

УДК 681.3:621.375

Азаров О. Д., д.т.н., проф.;  
Крупельницький Л. В., к.т.н., доц.;  
Теплицький М. Ю.

## ДВОТАКТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ СТРУМУ ДЛЯ ЦИФРОВОГО АНАЛІЗАТОРА ПАРАМЕТРІВ ЗВУКОВИХ ТРАКТІВ

Вінницький національний технічний університет

[michaeltepl@gmail.com](mailto:michaeltepl@gmail.com)

*У статті розглядаються можливості покращення характеристик аналізатора параметрів звукових трактів за рахунок використання двотактних підсилювачів постійного струму із вибірковою зворотним зв'язком. Запропоновано структурно-функціональні схеми швидкодіючих підсилювачів з низькими нелінійними спотвореннями і високим співвідношенням сигнал/шум, що дозволяє розширити діапазони власних і вимірюваних параметрів АПЗТ*

**Ключові слова:** двотактний підсилювач постійного струму, вибірково зворотний зв'язок, нелінійні спотворення, співвідношення сигнал/шум, аналізатор параметрів звукових трактів

### Вступ

Звук – пружні хвилі, які розповсюджуються в різноманітних середовищах (твердих, рідких, газоподібних) і здійснюють в них механічні коливання. В комп'ютерних системах звуковий сигнал представлено в цифровому вигляді, а в природі – в аналоговій формі. Отже, для опрацювання його потрібно перетворити, а це незмінно призведе до втрат в якості сигналу, бо будь-яке перетворення не проходить безслідно. «Цифровий звук» має дві важливі переваги: його легше редагувати і зберігається він набагато краще завдяки високій завадостійкості. Звук в електроніці представлений у вигляді тих же електричних коливань у певному діапазоні частот (16 Гц – 20 кГц).

Використання пристроїв цифрової обчислювальної техніки для аналізу параметрів звукових аналогових низькочастотних трактів засноване на застосуванні аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів (АЦП і ЦАП). Сучасні АЦП і ЦАП дозволяють перетворювати звукові сигнали з частотою дискретизації 32-96 кГц з роздільною здатністю, еквівалентною 16-24 двійковим розрядам [1, 5]. При розробці відповідного програмного забезпечення виявляється можливим формувати і відтворювати через ЦАП гар-

монічні, полігармонічні та інші вимірювальні сигнали. Прийняті від АЦП коди можуть бути опрацьовані методами спектрального [2-4] та часового аналізу, після чого будуть визначені параметри сигналів і розраховані параметри тракту проходження сигналу, який подається з виходу ЦАП на вхід АЦП.

### Актуальність

Найдоступнішими на теперішній час пристроями введення-виведення звукових сигналів у комп'ютері є карти типу *Sound Blaster* [5]. Проте більшість з цих пристроїв поки не має характеристик, необхідних для побудови якісних вимірювальних систем. Недосконаліми є параметри входів-виходів, власні шуми, нелінійні спотворення, нерівномірність АЧХ та інше. Рекламовані ж характеристики, як правило, є або потенційними, але не реалізованими у вбудованих мікросхемах спеціалізованих кодеків АЦП-ЦАП, або відносяться тільки до режиму відтворення *MIDI*-файлів [1]. Крім того, лише нещодавно з'явилися карти з можливістю одночасного введення і виведення сигналів (повний дуплекс) і з процесором цифрового опрацювання сигналів. Ці функції орієнтовані, в основному, на застосування в телеконференціях по мережі Інтернет і для реалізації набору стандартних алго-

ритмів обробки сигналів (фільтрація, ущільнення та ін.). У завданнях виміру, як правило, потрібне застосування складніших алгоритмів введення-виведення та аналізу сигналів.

Іншою альтернативою є промислові спеціалізовані комп'ютерні модулі – так звані пристрої зв'язку з об'єктом (ПЗО), частина яких може виконувати точні вимірювання і попереднє опрацювання сигналу за алгоритмом користувача. Такі пристрої значно більше пристосовані для задач вимірювання, оскільки містять автономні перетворювачі напруг живлення, диференціально і гальванічно розв'язані входи-виходи, мають гнучкі можливості програмування на вбудованому процесорі. Недоліком відомих пристроїв є їх надлишкова універсальність і орієнтованість на автоматизацію виробничих процесів. З цієї причини ПЗО, як правило, є багатоканальними, орієнтованими на вимірювання постійних напруг і струмів, а більш швидкодіючі не містять фільтрів від накладення спектрів і необхідних схем комутації входів-виходів, або у них не нормуються специфічні для звукових трактів параметри.

З урахуванням наведених вимог у ВНТУ було розроблено аналізатор параметрів звукових трактів (АПЗТ), який застосовується для вимірювання якості звукових каналів і трактів. До складу АПЗТ входить ЦАП, від якого значно залежать параметри і якість роботи приладу в цілому. У свою чергу ЦАП містить підсилювач постійного струму, характеристики якого багато в чому визначають точність вимірювання звукового тракту.

Поліпшення статичних та динамічних характеристик ППС [3, 4] дозволять спростити структуру АПЗТ та покращити його параметри, тому тема статті є актуальною.

### **Мета**

Покращення статичних і динамічних параметрів АПЗТ шляхом застосування досконалішої елементної бази, зокрема, двотактних ширококузових підсилювачів

постійного струму з вибірковою зв'язкою, які мають низькі нелінійні спотворення та покращені частотні характеристики.

### **Задачі досліджень**

1. Аналіз структурно-функціональної організації АПЗТ, а також потенційних можливостей покращення їх статичних і динамічних характеристик за рахунок застосування в них ширококузових високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС).

2. Аналіз статичних і динамічних характеристик ДППС із вибірковою зв'язкою.

3. Рекомендації щодо структурно-функціональної організації ширококузових ДППС із мінімальними нелінійними спотвореннями.

### **Результати досліджень**

АПЗТ призначені для вимірювання електричних характеристик студійних трактів систем радіо і телебачення, д्रो-тяних, радіорелейних і супутникових каналів передачі звукового мовлення, а також для вимірювання параметрів інших низькочастотних систем і пристроїв (магнітофонів, пультів, міні-дисківих і CD-програвачів). Прилади реалізують всі методи вимірювань, передбачені ГОСТ - 11515, їх використання дозволяє замінити велику кількість вимірювальних пристроїв (аналізатор спектру, вольтметр, низькочастотний генератор та ін.). Вони є незамінними для коректного вимірювання параметрів систем, що використовують ущільнення звуку [5].

З урахуванням проведеного аналізу у ВНТУ розроблено аналізатор параметрів звукових трактів (АПЗТ), структурну схему якого наведено на рис.1, пристосований для вимірювання якості звукових каналів і трактів.

У вхідній частині вона містить два стереоканала *A* і *B*. На диференціальному вході кожного каналу є керовані опори для сполучення з різними трактами студійної та побутової апаратури.

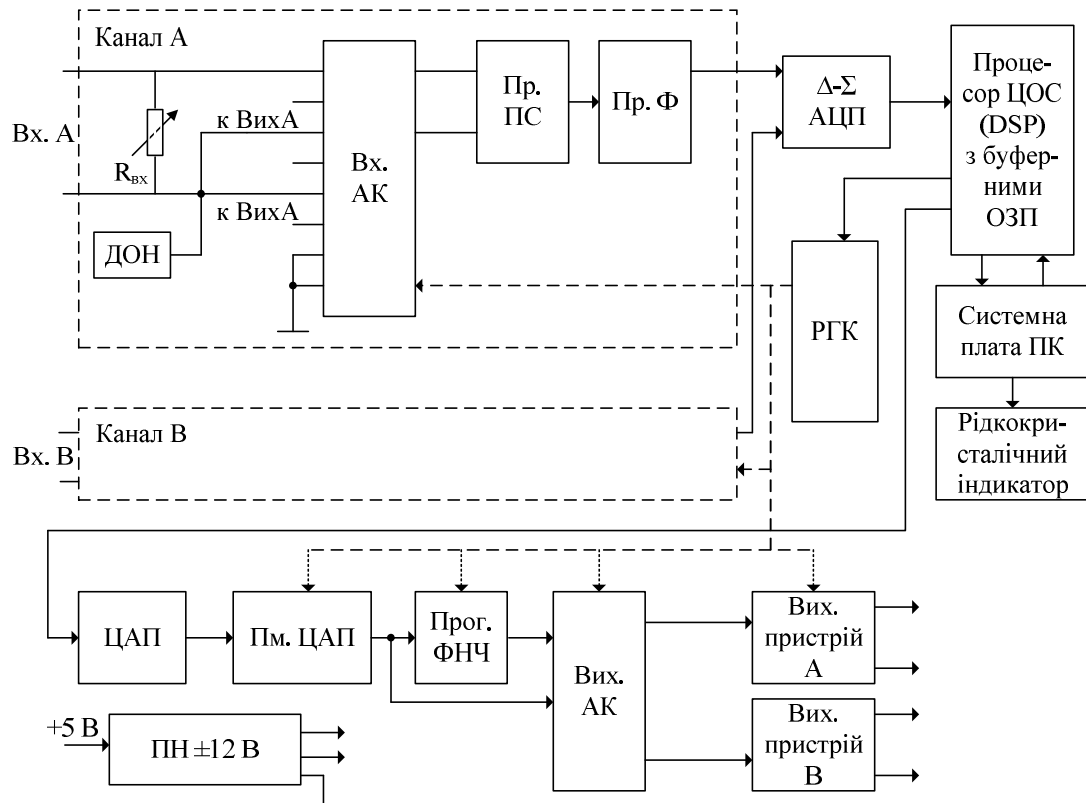


Рис. 1. Структурно-функціональна схема АПЗТ

У вхідній частині вона містить два стереоканала *A* і *B*. На диференціальному вході кожного каналу є керовані опори для сполучення з різними трактами студійної та побутової апаратури. Можуть бути запрограмовані такі значення вхідних опорів 100 кОм, 600 Ом, 200 Ом, 150 Ом. Вхідний аналоговий комутатор (Вх. АК) крім вхідного сигналу дозволяє комутувати також вихідний сигнал ЦАП, джерело опорної напруги (ДОН) і шину "нуля", що необхідно для самокалібрування коефіцієнтів передачі та самокоригування АЧХ і ФЧХ вимірювального каналу. Програмований підсилювач (Пр. ПС) перетворює диференційний вхідний сигнал в недиференціальний і програмно встановлює вхідні діапазони напруг рівнями від мінус 30 дБ до +18 дБ з кроком 6 дБ (0 дБ відповідає 0,775 В середньоквадратичного значення). Програмований фільтр (Пр. Ф) формує смугу робочих частот 20 Гц - 20 кГц, а також збільшує можливості АЦП по вимірюванню нелінійних спотворень менше 0,001% (за рахунок переключення в режим придушення

сигналу основної частоти). Дельта-сигма АЦП ( $\Delta$ - $\Sigma$  АЦП) перетворює аналоговий сигнали по каналам *A* і *B* із точністю 16 двійкових розрядів і частотою дискретизації 44,1 кГц.

Зовнішній вигляд апаратної частини АПЗТ наведено на рис 2.

Послідовний вихідний код АЦП надходить на процесор ЦОС [1, 2], де відповідно до алгоритмом вимірів відбувається його попереднє опрацювання, накопичення в буферному ОЗП і передача на системну плату персонального комп'ютера по шині ISA. Процесор ЦОС також дозволяє безперервно видавати в цифровому вигляді вимірювальний сигнал на ЦАП із 4-х або 8-кратної передискретизацією. Управління аналоговою частиною здійснюється кодами, що посилаються через процесор ЦОС у регістр керування (РГК).



Рис. 2. Аналізатор параметрів звукових трактів

Послідовний вихідний код АЦП надходить на процесор ЦОС [1, 2], де відповідно до алгоритмом вимірів відбувається його попереднє опрацювання, накопичення в буферному ОЗП і передача на системну плату персонального комп'ютера по шині ISA. Процесор ЦОС також дозволяє безперервно видавати в цифровому вигляді вимірювальний сигнал на ЦАП із 4-х або 8-кратної передискретизацією. Управління аналогової частиною здійснюється кодами, що посилаються через процесор ЦОС у регістр керування (РГК).

Вихідна частина пристрою містить 18-розрядний основний сигнальний ЦАП і помножуючий ЦАП (Пм. ЦАП). Послідовне включення ЦАП дозволяє плавно, з кроком 0,1 дБ регулювати рівень вихідного сигналу в діапазоні від мінус 74 до +12

дБ. Програмований ФНЧ при смузі пропускання 20 кГц дозволяє обмежити спектр шумів, а при смузі пропускання 1 кГц – забезпечити наднизький рівень нелінійних спотворень ЦАП. Вихідний аналоговий комутатор (Вих. АК) передає на вихід сигнал ЦАП безпосередньо, або після фільтрації, а також дозволяє незалежно управляти включенням вихідних каналів А і В. Вихідні пристрої А і В містять в своєму складі формувачі диференціального сигналу і буферні підсилювачі для роботи на низькоємне навантаження. Є також можливість змінювати власне вихідний опір 0 Ом / 600 Ом і вимірювати опір навантаження [3, 4].

Структура ЦАП, що входить до складу АПЗТ наведена на рис. 3.

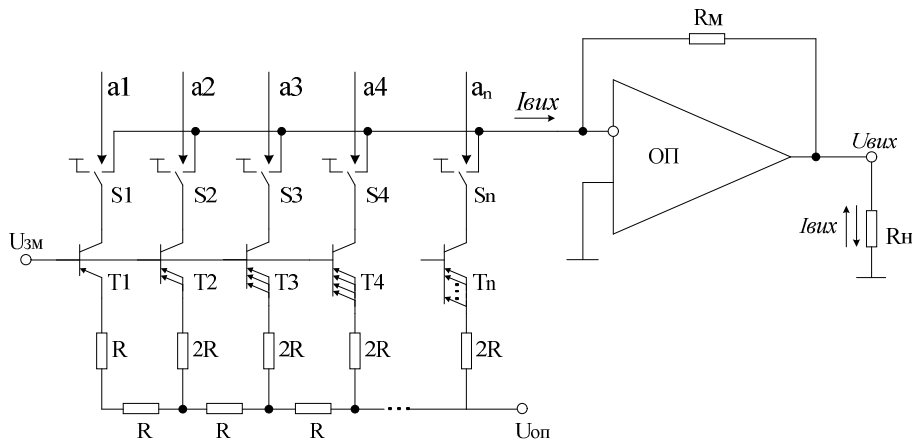


Рис. 3. Структурно-функціональна схема струмового ЦАП

Для покращення власних характеристик АПЗТ, а також розширення діапазону вимірюваних параметрів, його компоненти повинні мати характеристики на порядок-два кращі, ніж уся система в цілому. Саме тому авторами було запропо-

новано використовувати у приладі широкосмугові високолінійні ДППС з двонаправленими (ДВС) та спеціалізованими (ДСПВС) відбивачами струму [7], схеми яких зображено на рис. 4.

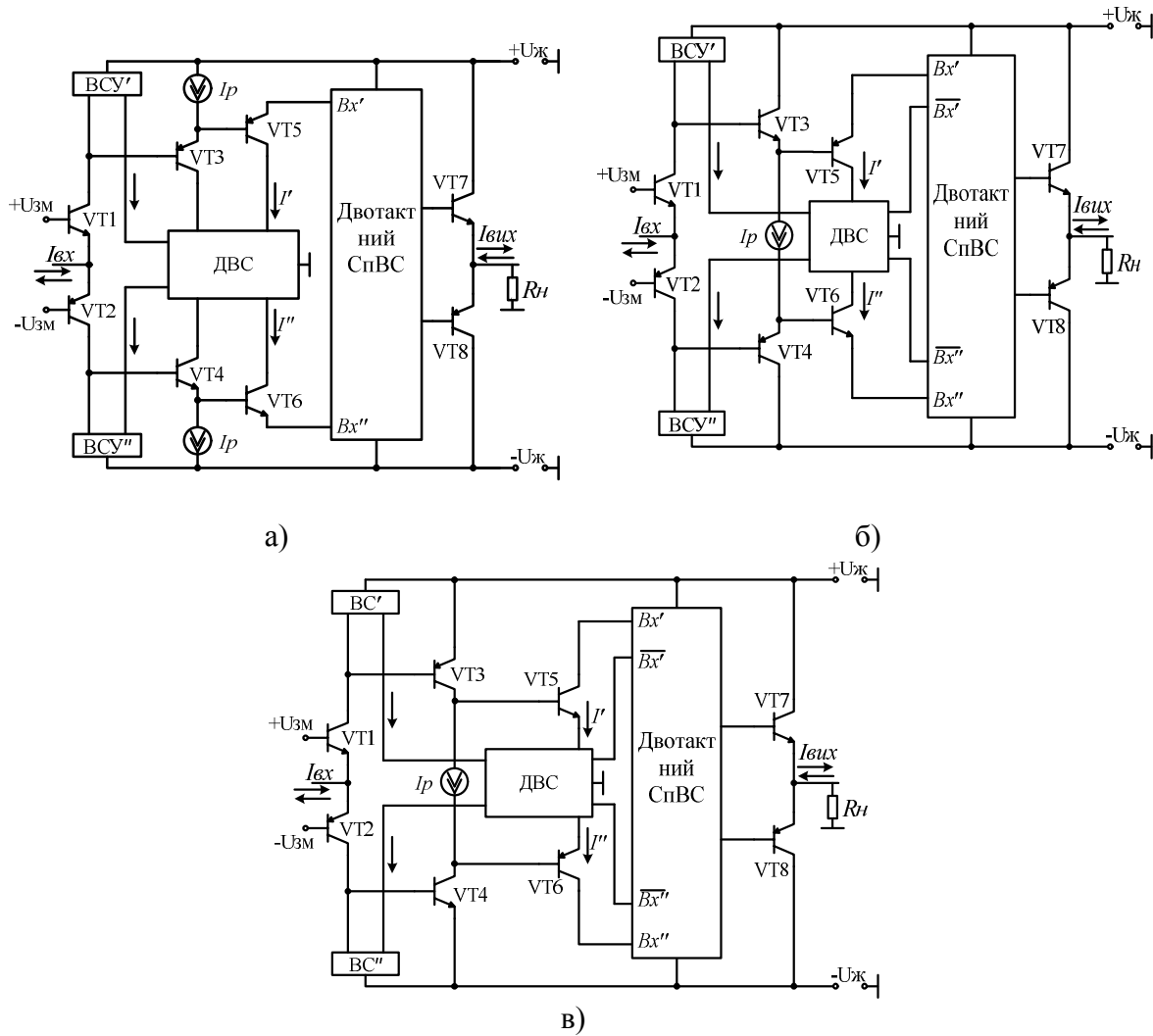


Рис. 4. Схемотехнічна організація ДПРС із ДСпВС та вихідним каскадом:  
 а) ДПРС із двоступеневими проміжними каскадами на базі складених транзисторів Дарлінгтона (схема 1);  
 б) ДПРС із двоступеневими проміжними каскадами на базі складених транзисторів Шиклаї I типу (схема 2);  
 в) ДПРС із двоступеневими проміжними каскадами на базі складених транзисторів Шиклаї II типу (схема 3).

АЧХ та ФЧХ підсилювачів наведені на рис. 5. Як можна побачити із наведених графіків усі схеми мають частоту одиничного підсилення більше 300 МГц при коефіцієнтах передачі 113 дБ для схеми 1, 108 дБ для схеми 2 та 120 дБ для схеми 3, що перевершує характеристики популярних моделей операційних підсилювачів фірми *Analog Devices* (*AD8010*, *AD8011*, *AD8014*), та дозволяє розширити смугу вимірюваних частот до 44 кГц. Дещо нижчий коефіцієнт підсилення та час-

тота підсилювача за схемою 2 компенсуються меншим струмом зміщення нуля, а також нижчою залежністю від зміни напруги живлення [2].

Варто зазначити, що у запропонованих схемах за рахунок використання ДВС автоматично задаються робочі точки проміжних каскадів та вирівнюються коефіцієнти передачі по каналах підсилення незважаючи на використання транзисторів різного типу провідності [7].

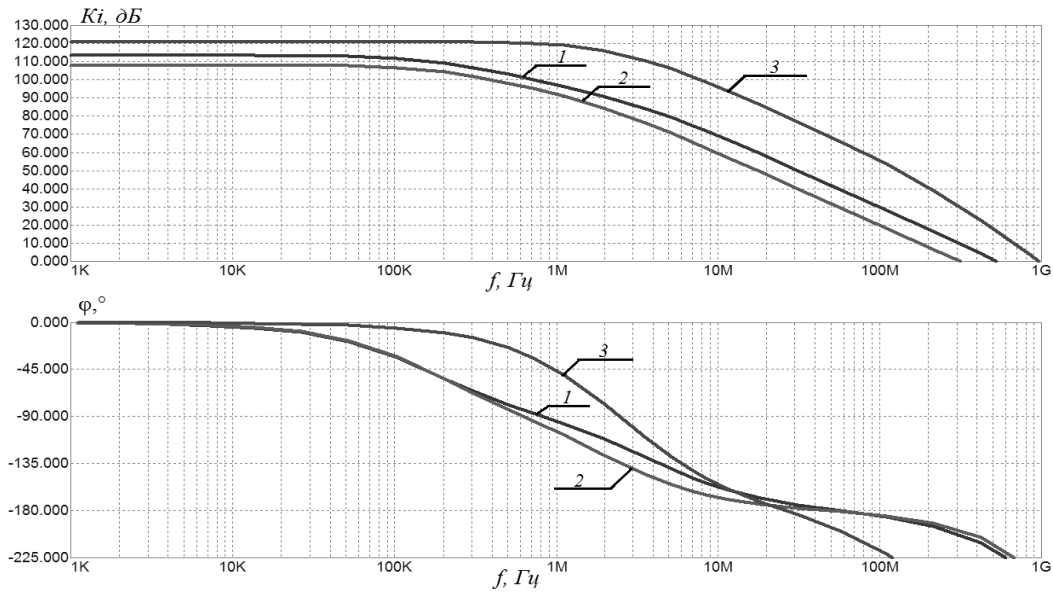


Рис. 5. АЧХ та ФЧХ запропонованих схем підсилювачів

Оскільки коефіцієнт нелінійних спотворень (КНС) ЦАП, що використовується в АПЗТ, повинен бути меншим 0,05%, то відповідно КНС підсилювача повинен бути ще на порядок меншим.

Усереднені кількісні оцінки коефіцієнту нелінійних спотворень розглянутих схем наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. ТНД для запропонованих ДППС

$f_{вх}, \kappa\Gamma\text{ц}$		1	10	100	1000	10000
$I_{вх}, \text{мкА}$	100	0.00002	0.00003	0.000084	0.0001	0.002
	200	0,000065	0,000065	0.00017	0.00011	0.0024
	500	0.00013	0.00015	0.00018	0.00064	0.008
	1000	0.00031	0.00037	0.000462	0.0025	0.045

Як видно з таблиці 1 коефіцієнт нелінійних спотворень у діапазоні звукового сигналу знаходиться на рівні десятитисячних відсотка, проте він зростає зі збільшенням як частоти, так і амплітуди вхідного сигналу. Варто також відзначити, що нелінійні спотворення значно зменшуються із введенням до схеми підсилювача двотактного спеціалізованого відбивача струму (ДСпВС), найпростішу реалізацію якого наведено на рис. 6.

У випадку  $I_p = 1 \text{ мА}$  (при застосуванні транзисторів IntersilHFA3036) після

проведення відповідних розрахунків та комп'ютерного моделювання маємо  $\Gamma_{вих} \approx 10,5 \text{ МОМ}$  [8-9].

Важливою характеристикою ДППС є також смуга повної неспотвореної потужності, яка визначається як максимальна частота вхідного сигналу  $f_{вх}(\kappa\Gamma\text{ц})$ , при якій амплітуда сигналу на виході схеми в рамках заданої напруги живлення є максимальною, а сам сигнал неспотвореним.

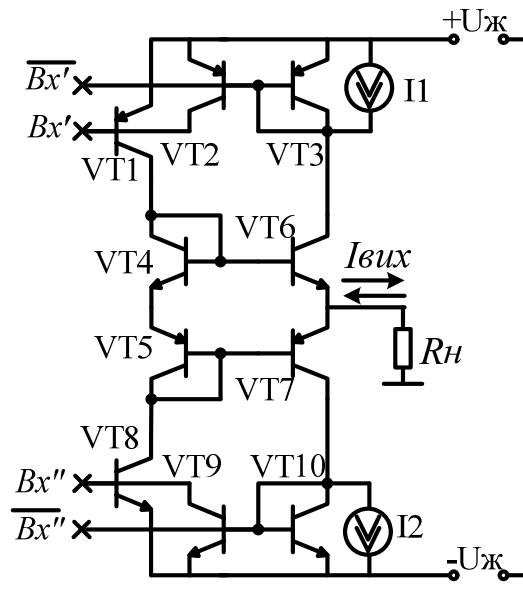


Рис. 6. Чотири-входовий двотактний спеціалізований відбивач струму

Для вимірювання смуги повної неспотвореної потужності ДППС при замкненій петлі зворотного зв'язку на вхід подають синусоїдальний сигнал з амплітудою, що дорівнює максимальному ви-

хідному струму, поступово збільшуючи частоту сигналу доти, поки сигнал на виході схеми не почне спотворюватися (див. рис. 7).

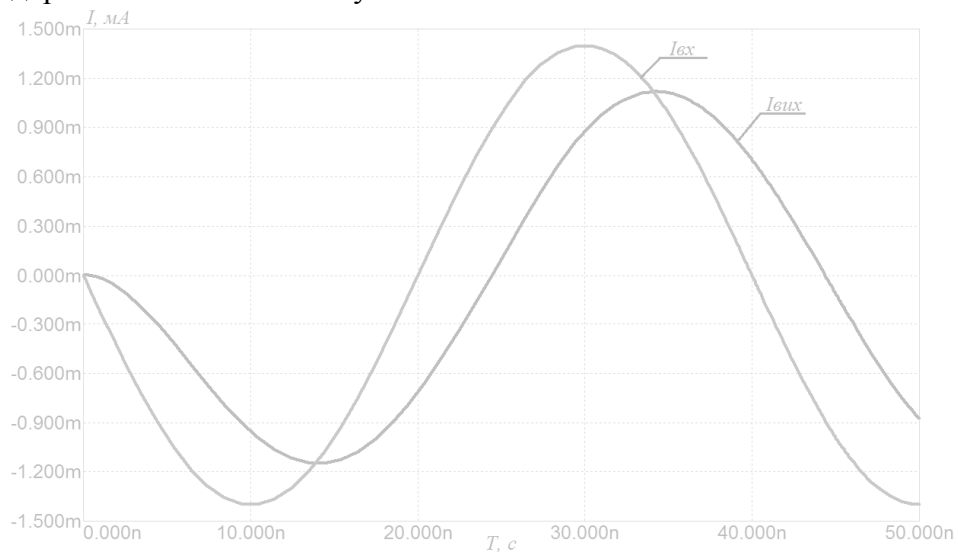


Рис. 7. Графічна інтерпретація спотворення синусоїдального сигналу високої частоти для схеми 1 (25 МГц)

Результати моделювання смуги повної неспотвореної потужності для напруги живлення  $U_{ж} = \pm 15$  В наведено у таблиці 2. Також для порівняння наведені

результати деяких підсилювачів, що випускаються серійно фірмою *Analog Devices*.

Таблиця. 2. Смуга повної неспотвореної потужності

$I_{ex}, mA$	Схема 1	Схема 2	Схема3	AD8010	AD8011	AD8014
1,4	19 МГц	21 МГц	18 МГц	13 МГц	15 МГц	18 МГц

Як можна побачити з таблиці 2 смуга повної неспотвореної потужності запропонованих схем є ширшою, ніж у розглянутих закордонних аналогів. Відмітною особливістю запропонованих схем є можливість забезпечення високої швидкості

наростання вихідного сигналу, а також симетричності фронтів при подачі на вхід схеми прямокутного імпульсу (рис. 8). Усереднені результати швидкості наростання вихідного сигналу  $U$  (В/мкс) наведені у таблиці 3.

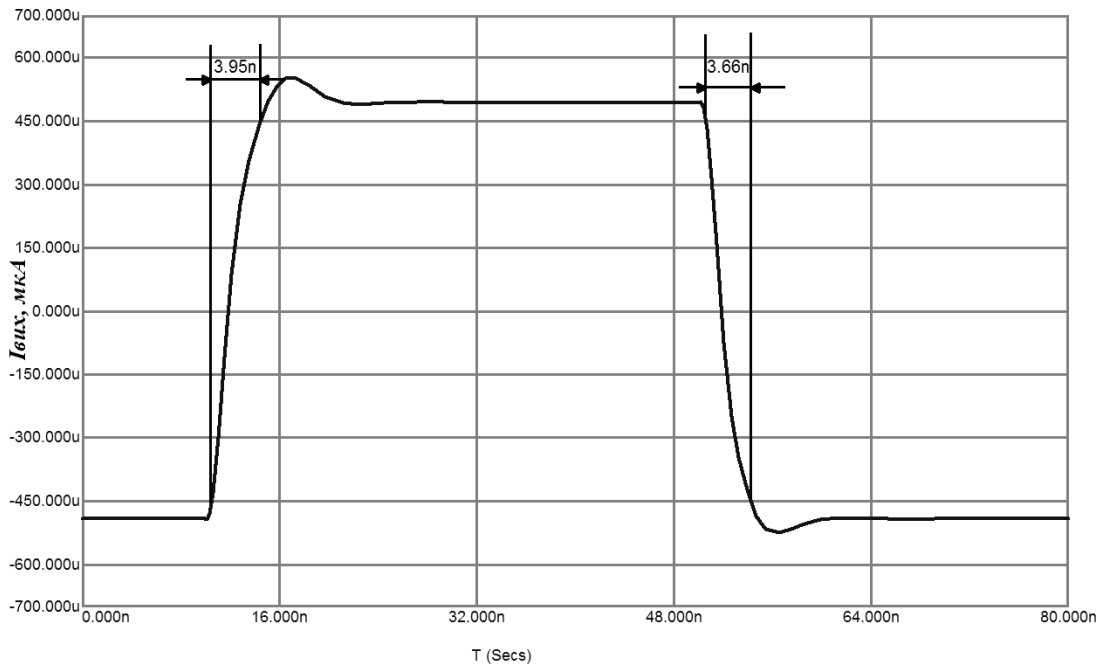


Рис. 8. Реакція підсилювача (схема 2) на вхідний прямокутний імпульс

Табл. 3. Швидкісні характеристики ДППС

$I_{ex}, \text{мкА}$	$I_p, \text{мкА}$	Швидкість наростання, В/мкс	Тривалість переднього фронту, нс	Тривалість заднього фронту, нс
500	500	1500	6,1	5,9
	1000	2093	4,42	4,21
	2000	2180	4,08	4,15

Також важливими параметрами ДППС є температурний дрейф та відношення сигнал-шум. Температурний дрейф відображає чутливість струму зміщення підсилювача до зміни температури навколишнього середовища [1, 6].

За результатами комп'ютерного моделювання в середовищі Мігосар 9.0 температурний дрейф розглянутих ДППС склав 30-40 нА/°С, а відношення сигнал/шум – 90-100 дБ.

Як бачимо із наведених даних запропонований підхід щодо побудови ДППС дозволяє зменшити нелінійні спо-

творення у діапазоні вихідного сигналу одночасно із збереженням високих динамічних характеристик. Водночас це дає змогу покращити параметри самого АПЗТ, наприклад, розширити діапазон робочих та вимірюваних частот з 20 кГц до 40 кГц, а також збільшити рівень вимірюваних значень коефіцієнта гармонік з 0,05% до 0,001%.

Таким чином, запропоновані схеми підсилювачів можуть використовуватись в ЦАП, що входять до складу АПЗТ, а також для підсилення вхідного та вихідного сигналів пристрою.



### Висновки

Проаналізовано структуру аналізатора параметрів звукових трактів та показано, що застосування ДППС із вибірко-вим зворотним зв'язком дозволяє покращити статичні і динамічні характеристики АПЗТ в цілому.

Запропоновано швидкодіючі ДППС з низькими нелінійними спотвореннями в діапазоні звукового сигналу на рівні 0,0001% та широкою смугою повної неспотвореної потужності (20 МГц).

Надано рекомендації щодо побудови ДППС з покращеними статичними і динамічними характеристиками, які дозволяють будувати прецизійні швидкодіючі аналого-цифрові системи, зокрема АПЗТ із вдосконаленими параметрами.

### Список літератури

1. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / Кестер Уолт. – М. : «Техносфера», 2007. – 1016 с. – ISBN 978-594-836-146-8.

2. Walter G. Jong, Op Amp applications handbook / Walter G. Jong – Analog Devices series, 2004, – 895 p.

3. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 232 с.

4. Азаров О. Д. Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем : монографія / О.Д. Азаров, С.В. Богомолов. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013. – 142 с.

5. Аналізатори параметрів звукових трактів АПЗТ-02 і АПЗТ-А3. [Електронний ресурс] / ВНТУ НТЦ «Аналого-цифрові системи» // Офіційний сайт. – Режим доступу : <http://ot.vntu.edu.ua/images/documents/katalogazs-ukr.pdf>.

6. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Т2. – 942 с. – ISBN: 5-94074-148-7.

7. Азаров О. Д. Двотактні підсилювачі постійного струму на базі двонаправлених відбивачів струму / О.Д. Азаров,

М.Ю. Теплицький, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – Київ, 2011. – № 2 (34). – С. 15-22.

8. Азаров О. Д. Спеціалізовані відбивачі струму з парафазними входами для двотактних підсилювальних схем / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, 2013. – № 1 (26). – С. 45-53.

9. Технічний опис HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models: Application Note [Електронний ресурс] / Intersil // Режим доступу : [http://pdf.eicom.ru/datasheets/intersil\\_pdfs/hfa3046\\_3096\\_3127\\_3128/hfa3046\\_3096\\_3127\\_3128.pdf](http://pdf.eicom.ru/datasheets/intersil_pdfs/hfa3046_3096_3127_3128/hfa3046_3096_3127_3128.pdf).

Статтю подано до редакції 24.11.2014