

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**О. Д. Азаров, В. А. Гарнага**

**ДВОТАКТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ  
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ  
БАГАТОРОЗРЯДНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ,  
ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 621.375.024

ББК 32.846

A35

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 11 від 30 червня 2011 року)

Рецензенти:

**М. А. Філинюк**, доктор технічних наук, професор

**Є. Т. Володарський**, доктор технічних наук, професор

**Азаров, О. Д.**

A35 Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с.

ISBN 978-966-641-435-2

У монографії розглянуто питання структурно-функціональної побудови двотактних підсилювачів постійного струму з внутрішніми контурами вибіркового зворотного зв'язку. Наведено аналітичні вирази для статичної передатної характеристики та відповідних похибок лінійності, а також отримано співвідношення для визначення динамічних характеристик базових схем двотактних підсилювачів постійного струму. Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються розробкою аналогових вузлів високоточних аналого-цифрових перетворювачів.

**УДК 621.375.024**

**ББК 32.846**

**ISBN 978-966-641-435-2**

© О. Азаров, В. Гарнага, 2011

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....  | 5  |
| ВСТУП.....  | 6  |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ІСНУЮЧИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ БАГАТОРОЗ-<br>РЯДНИХ АЦП І ЦАП.....                               | 10 |
| 1.1. Структурно-схемна реалізація існуючих двотактних ППС   | 10 |
| 1.2. Вплив характеристик аналогових вузлів, побудованих на<br>базі ППС, на статичні похибки АЦП і ЦАП із самокалібру-<br>ванням.....        | 29 |
| 1.2.1. Кориговані і некориговані похибки перетворюваль-<br>ного каналу, що містить аналогові вузли на базі ППС.....                         | 29 |
| 1.2.2. Вплив інтегральної нелінійності ППС на некориго-<br>вану складову похибки перетворювального каналу.....                              | 35 |
| 1.3. Аналіз залежності швидкодії аналогових вузлів ПФІ від<br>динамічних характеристик ППС.....   | 36 |
| РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОРГА-<br>НИЗАЦІЇ ДВОТАКТНИХ СИМЕТРИЧНИХ ППС.....  | 42 |
| 2.1. Структурно-функціональна та схемна організація<br>ДСППС із введенням внутрішніх контурів вибіркового зво-<br>ротного зв'язку.....      | 42 |
| 2.1.1. Метод структурно-функціональної організації<br>ДСППС .....   | 42 |
| 2.1.2. Принципи організації контурів вибіркового зворот-<br>ного зв'язку на базі двонаправлених відбивачів струму... ..                     | 46 |
| 2.1.3. Схемна організація ДСППС.....  | 51 |
| 2.2. Метод параметричної компенсації неідентичності статич-<br>них характеристик транзисторів протифазних підсилюваль-<br>них каскадів..... | 58 |
| 2.3. Математичні моделі статичних передатних характери-<br>стик базових схем двотактних ППС.....  | 64 |
| 2.4. Похибки лінійності передатної характеристики двотакт-<br>них симетричних ППС.....  | 71 |

|  |     |
|--|-----|
| РОЗДІЛ 3 ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОТАКТНИХ СИМЕТРИЧНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....                               | 79  |
| 3.1. Математичні моделі АЧХ і ФЧХ ДСППС із керованими генераторами струму.....   | 79  |
| 3.1.1. Математичні моделі малосигнальних схем заміщення транзисторних каскадів із керованими генераторами струму .....     | 79  |
| 3.1.2. Математичні моделі базових схем ДСППС із КГС...   | 88  |
| 3.2. Нелінійні спотворення, що виникають в ДСППС у діапазоні частот вихідного сигналу.....                                 | 95  |
| 3.3. Перехідні характеристики ДСППС.....   | 102 |
| 3.4. Класифікація і порівняльні оцінки характеристик існуючих і запропонованих двотактних ППС.....                         | 109 |
| РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯ ДСППС ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ .....           | 118 |
| 4.1. Рекомендації щодо проектування аналогових вузлів, реалізованих на основі ДСППС.....                                   | 118 |
| 4.1.1. Високолінійний швидкодіючий перетворювач «струм–напруга» та буферний пристрій для АЦП і ЦАП...                      | 118 |
| 4.1.2. Підсилювач струмів із нелінійним зворотним зв'язком для компаратора з регульованою чутливістю.....                  | 121 |
| 4.2. Рекомендації з комп'ютерного моделювання статичних і динамічних характеристик ДСППС.....                              | 125 |
| 4.3. Аналогова частина багаторозрядного АЦП, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю для системного застосування..... | 130 |
| Додаток А. Принципові схеми розроблених ДСППС.....   | 135 |
| Додаток Б. Підсумки моделювання двотактних симетричних ППС...  | 136 |
| ЛІТЕРАТУРА.....  | 140 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| АК           | – | аналоговий комутатор;                     |
| АЦП          | – | аналого-цифровий перетворювач;            |
| АЧХ          | – | амплітудно-частотна характеристика;       |
| ВЗЗ          | – | вибірковий зворотний зв'язок;             |
| ВБС          | – | відбивач струму;                          |
| ВЗЗ          | – | від'ємний зворотний зв'язок;              |
| ДВС          | – | двонаправлений відбивач струму;           |
| ДЗЗ          | – | додатний зворотний зв'язок;               |
| ДППС         | – | двотактний підсилювач постійного струму;  |
| ДСППС        | – | двотактний симетричний підсилювач постій- |
| ного струму; |   |   |
| ЗЗ           | – | зворотний зв'язок;                        |
| ІВС          | – | інформаційно-вимірвальна система;         |
| КГС          | – | керований генератор струму;               |
| КС           | – | компенсатор струму;                       |
| НП           | – | нормалізуючий підсилювач;                 |
| ОП           | – | операційний підсилювач;                   |
| ПВЗ          | – | пристрій вибірки–зберігання;              |
| ПЕ           | – | пороговий елемент;                        |
| ПКН          | – | перетворювач код–напруга;                 |
| ПКС          | – | перетворювач код–струм;                   |
| ППС          | – | підсилювач постійного струму;             |
| ПР           | – | підсилювач різниці;                       |
| ПФІ          | – | перетворювач форми інформації;            |
| РФР          | – | розгалужувач-фазорозщиплювач;             |
| ФЧХ          | – | фазочастотна характеристика;              |
| ЦАП          | – | цифроаналоговий перетворювач.             |

## ВСТУП

Для переважної більшості сучасних підсилювачів постійного струму застосовують одноканальну асиметричну структуру з вхідним диференційним підсилювальним каскадом і тільки вихідний каскад є двотактним. Це в значній мірі пов'язано з тим, що історично перші ППС було побудовано на електронних лампах, які за аналогією з польовими транзисторами мають однакову провідність і по суті є «п-канальними». При цьому слід відмітити, що для побудови двотактних структур на електронних лампах необхідно було застосовувати трансформатори [4, 6–8], які робили практично неможливим мікроелектронну реалізацію таких схем. Перенесення підходів та принципів побудови структурних схем лампових підсилювачів на транзисторні призвело до того, що інтегральні транзисторні схеми ППС, які з'явилися в 60-х і на початку 70-х років, були однотоктними, оскільки р-п-р транзистори мали значно гірші статичні і динамічні параметри порівняно з п-р-п транзисторами. Це суттєво обмежувало покращення вказаних характеристик схем, оскільки не дозволяло повністю використовувати частотні властивості транзисторів, а також робило недоцільним застосування двотактних комплементарних структур.

В однотоктних ППС переважно використовуються: вхідний диференційний каскад, однотоктний проміжний каскад і одно- або двотактний вихідний каскад. Перевагами вказаного підходу є функціональна універсальність призначення таких схем, що дозволяє їх використовувати в різних пристроях (операційні підсилювачі, пристрої вибірки-зберігання аналогових сигналів, компаратори і т. д.). Проте схеми на базі диференційного каскаду мають і деякі недоліки: обмежену швидкість наростання вихідного сигналу, значний коефіцієнт нелінійних спотворень, різну довжину фронтів вихідного сигналу при роботі з імпульсами та інші.

У міру розвитку мікроелектронних технологій і можливістю виготовлення на одному кристалі біполярних р-п-р та п-р-п транзисторів, статичні і динамічні характеристики яких мають незначні розбіжності (одного порядку), а також польових п- і р-канальних транзисторів,

стимулювало розробників до проектування нових структур і схем на базі двотактних симетричних структур. Перший прорив у цьому напрямку було здійснено американським інженером Дж. Фраєм [9]. Він відмовився від використання вхідного диференційного каскаду і застосував вхідний двотактний каскад на основі самодоповняльної схеми із загальною базою та два протифазних канали підсилення. При цьому у запропонованому підході не повністю було вирішено проблему задання струму робочої точки пари проміжних каскадів, але, не зважаючи на це, було закладено початок проектування двотактних схем. Подібні ідеї побудови двотактних підсилювачів постійного струму було запатентовано й іншими фахівцями у 1976–1977 роках із використанням польових транзисторів [10, 11]. Далі у 80-х роках з'явилися комбіновані варіанти побудови двотактних двокаскадних схем із використанням відбивачів струму [12–19]. Так, фірма Analog Devices у 1988 році представила свою розробку – підсилювач AD846 [4, 129]. Це був завершений продукт, проте в ньому залишилося багато невирішених проблем, що істотно обмежували використання таких структур. З того часу жодних значних просувачів у цьому напрямі не було зафіксовано і переважна більшість провідних фірм світу, які спеціалізуються на виготовленні і розробці аналогових схем, продовжують використовувати структурні підходи, що були запропоновані у 90-х роках [20–28]. Недоліки відомих двотактних схем є такими:

- значна залежність коефіцієнта передачі від опору навантаження;
- велика кількість проміжних каскадів підсилення, а також недосконала структура ППС, яка призводить до зниження швидкодії такого типу схем;
- обмежені статичні характеристики.

Проте, незважаючи на вказані недоліки, двотактні підсилювачі постійного струму перевершують одностактні аналоги за швидкістю наростання вихідного сигналу, лінійністю передатної характеристики та шириною смуги пропускання [4]. Саме завдяки вказаним перевагам інтерес до двотактних структур зростає і з'являються нові схемні рішення, принаймні у вигляді патентів та наукових статей [29–32]. Водночас, у жодному з наведених патентів не вдалося вирішити проблему

зменшення залежності коефіцієнта передачі схеми від опору її навантаження.

У Радянському Союзі у 60–80-х роках було побудовано цілу низку інтегральних ППС. Ці серії [85] використовували диференційний вхідний каскад і, в значній мірі, нагадували американські однокатні аналоги. При цьому, особливо слід відзначити таких науковців: Г. В. Войшвілла, Д. Е. Полоннікова, В. Л. Шила, Н. Н. Прокопенка та інших. Слід відзначити, що наукова школа професора Н. Н. Прокопенка продовжує займатися подальшим покращенням характеристик підсилювачів на базі диференційного каскаду та деякими двотактними структурами із наскрізним каналом підсилення [52, 73, 114–118].

Водночас спроби побудувати двотактні структури ППС було здійснено у Вінницькому політехнічному інституті у 80-х роках ХХ століття в науковій школі професора О. Д. Азарова [36]. Запропонований підхід дозволив вирішити проблему забезпечення струму робочої точки схеми, шляхом використання параметричної компенсації неідентичності базових струмів проміжних каскадів [35–40]. Такі схеми використовували так званий режим мікроструму у вхідному каскаді, а проміжні протифазні підсилювальні каскади функціонували у номінальному режимі роботи. Нажаль недоліком такого підходу було деяке зменшення смуги пропускання підсилювачів.

Слід також відмітити, що двотактні підсилювачі мають деякі специфічні похибки, до яких відносяться похибка масштабу та похибка зміщення нуля. Це накладає деякі обмеження на застосування такого типу схем. При цьому варто відмітити, що у традиційних асиметричних ППС для зменшення похибки зміщення нуля можливе використання двох каналів підсилення (швидкого і повільного), а також застосування принципів модуляції–демодуляції вхідного сигналу, як це показано в роботі [111]. Недоліком такого методу є значна складність його реалізації, оскільки при використанні такого підходу важко узгоджувати низькочастотний та високочастотний канали підсилення, до того ж такий ППС чутливий до якості реалізації низькочастотного каналу перетворення, а це у свою чергу в значній мірі призводить до по-



дорожчання кінцевого виробу. Недоліком цього підходу також є неможливість зменшення похибки масштабу.

Другий підхід полягає у вилученні цих похибок при використанні ППС у складі каналів АЦ і ЦА-перетворення, що самокоригується або самокалібрується [43–46, 63, 66]. Такий підхід дозволяє також зменшити похибку інтегральної нелінійності каналу перетворення АЦП, якщо її важко чи неможливо усунути вказаними процедурами. Саме тому дослідження в напрямку побудови двотактних симетричних підсилювачів постійного струму із високими статичними і динамічними характеристиками є актуальним.

Метою роботи, описаної в монографії, є покращення статичних і динамічних характеристик двотактних підсилювачів струму шляхом такої їх структурно-функціональної організації, яка базується на введенні до схеми внутрішніх контурів вибіркового зворотного зв'язку і генераторів компенсаційних струмів. Це дозволяє збільшити підсилення на каскад, навантажувальну здатність та швидкодію.

Автори будуть вдячні за відгуки на монографію, а також за побажання з приводу подальшого розвитку досліджень.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ІСНУЮЧИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП

### 1.1. Структурно-схемна реалізація існуючих двотактних ППС

За структурною реалізацією усі відомі підсилювачі як струму, так і напруги можна поділити на два класи: 1) однотоктні; 2) двотактні. Перші зазвичай будують на основі диференційного каскаду і історично набули поширення через відсутність добре узгоджених біполярних  $n$ - $p$ - $n$  і  $p$ - $n$ - $p$  транзисторів на ранніх етапах розвитку транзисторної технології, які необхідні для побудови двотактних підсилювачів. Проте у теперішній час із розвитком технології виготовлення інтегральних комплементарних біполярних транзисторів, наприклад, [2, 129], можна скористатися з переваг, що надають підсилювачі з двотактною структурою.

Для виявлення недоліків, що властиві ППС, побудованих за традиційним підходом, проаналізуємо однотоктний підсилювач, структурну схему якого показано на рис. 1.1а. Його трикаскадна структура стала типовою для переважної більшості підсилювачів, особливе місце в якій займає вхідний диференційний каскад, який виділяє різницю напруг і потім підсилює її. Крім того, більшість операційних підсилювачів використовують саме такий вхідний підсилювальний каскад [48, 118, 136, 137]. Після вхідного диференційного каскаду ставиться проміжний підсилювальний каскад – транслятор рівня, і останній каскад – вихідний. При цьому варто зазначити, що навіть у однотоктних ППС вихідний каскад по можливості намагаються робити двотактним для збільшення навантажувальної здатності та лінійності передатної характеристики схеми [48, 74, 118, 136, 138]. Спрощену принципову схему трикаскадного диференційного підсилювача постійного струму представлено на рис. 1.1б.

Проаналізуємо роботу диференційного каскаду на основі спрощеної схеми, яку наведено на рис. 1.1б. Будемо вважати, що транзистори

VT2 і VT4 працюють в лінійній зоні. Основне співвідношення, на якому будуть ґрунтуватися розрахунки, – це залежність струму колектора від напруги база-емітер транзистора.

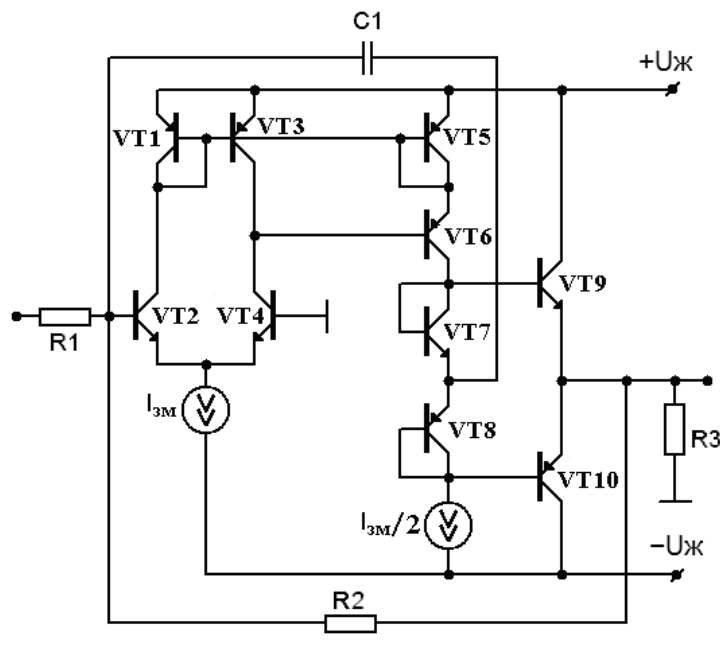
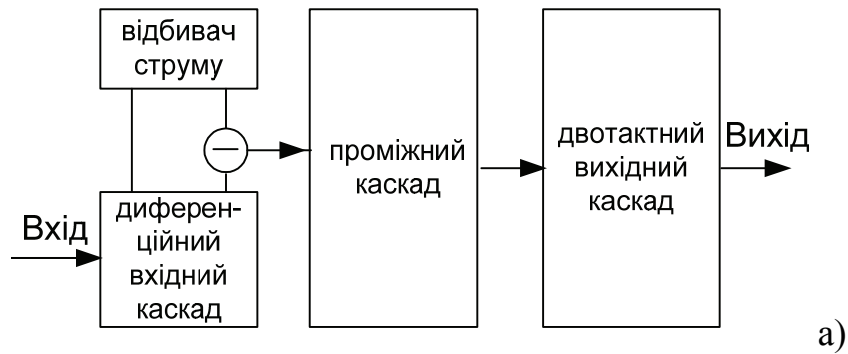


Рис. 1.1. Традиційний одноканальний підсилювач із диференційним вхідним каскадом: а) структурна схема; б) принципова схема

Для струму колектора VT2 можна записати [136]

$$I_{VT2} = I_{к2} = I_{зс2} \cdot \exp\left(\frac{U_{бе2}}{\varphi_T}\right),$$

де  $I_{зс2}$  – початковий тепловий струм VT2;  $U_{бе2}$  – напруга база-емітер транзистора VT2;  $\varphi_T$  – термопотенціал.

Аналогічне співвідношення можна записати для транзистора VT4:

$$I_{VT4} = I_{к4} = I_{зс4} \cdot \exp\left(\frac{U_{бс4}}{\varphi_T}\right).$$

За умови, що характеристики транзисторів  $VT2$  і  $VT4$  були б ідентичними і вони працювали при однакових колекторних напругах, тоді  $I_{зс2} = I_{зс4}$ . Проте, навіть якщо транзистори виконано на одному кристалі, вони не будуть абсолютно однаковими. Саме тому виникає напруга зміщення  $U_{зм}$ , яку можна визначити за співвідношенням [136]

$$U_{зм} = \varphi_T \ln(I_{зс2} / I_{зс1}).$$

При цьому передатні характеристики для  $I_1$  та  $I_2$  визначаються [118, 136] за виразами

$$I_{VT2} = \frac{I_{зм}}{1 + \exp\left(-\frac{U_{вх} - U_{зм}}{\varphi_T}\right)}; \quad I_{VT4} = \frac{I_{зм}}{1 + \exp\left(\frac{U_{вх} - U_{зм}}{\varphi_T}\right)},$$

де  $U_{вх}$  – значення вхідної напруги;  $I_{зм}$  – струм зміщення вхідного каскаду.

Проаналізуємо детальніше основні динамічні характеристики однотактних ППС із диференційним вхідним каскадом. Відомо, що коефіцієнт нелінійних спотворень для такого вхідного каскаду визначається за співвідношенням [136]

$$K = \frac{\frac{U_{вх}^3}{96 \cdot \varphi_T^3}}{\frac{U_{вх}}{2 \cdot \varphi_T} - \frac{3 \cdot U_{вх}^3}{96 \cdot \varphi_T^3}} \approx \frac{1}{48} \left(\frac{U_{вх}}{\varphi_T}\right)^2. \quad (1.1)$$

Таким чином, він збільшується пропорційно квадрату  $U_{вх}$  і має значення значно менше, ніж у схемі із загальним емітером. Для порівняння розрахуємо амплітуду  $U_{вх \max}$ , при якій коефіцієнт нелінійних спотворень досягає 1 %. Вона складає [1, 136]

$$\tilde{U}_{вх \max} = 0,7 \cdot \varphi_T = 18(\text{мВ}).$$

Отже, вказаний рівень вхідної напруги є граничним, після якого диференційний підсилювальний каскад виходить з лінійного режиму роботи.

Проаналізуємо швидкість наростання вихідного сигналу одноканального ППС. Для простоти аналізу використаємо спрощену схему операційного підсилювача, наведену на рис. 1.2 [1, 136]. При великому вхідному сигналі працює тільки транзистор VT2 і через нього протікає весь струм  $I_1 = 2I_0$ . Якщо ж працює тільки VT1, тоді весь струм тече через струмове дзеркало, і  $I_1 = -2I_0$ .

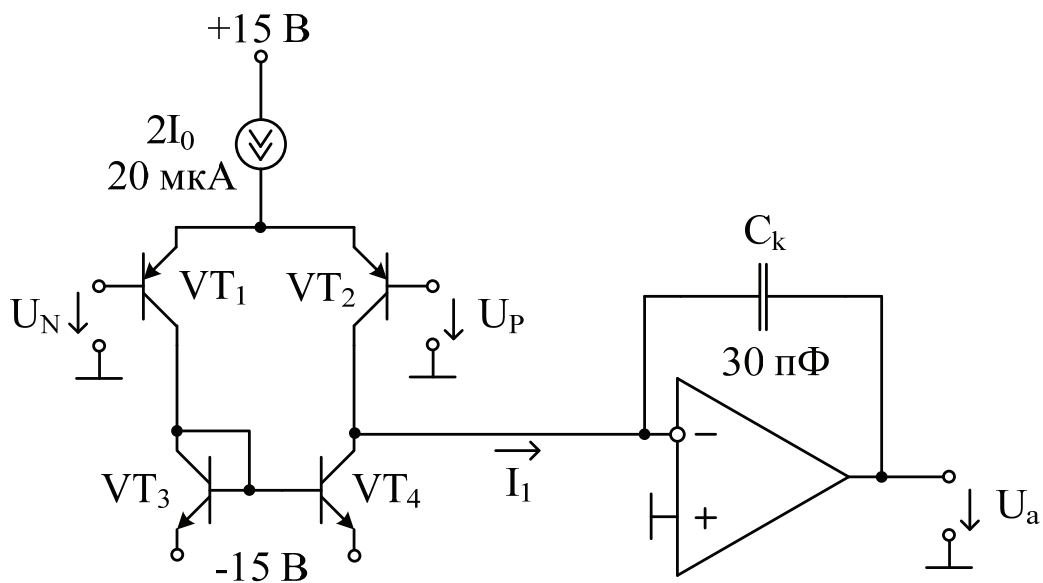


Рис. 1.2. Спрощена схемно-функціональна модель підсилювача постійного струму

Максимальний струм другого підсилювального каскаду, представленого тут у вигляді інтегратора, також обмежений, але він помітно вищий (300 мкА) і тому не обмежує смугу пропускання. Зарядний струм для  $C_k$  обмежується максимальним вихідним струмом диференціального підсилювача  $I_{1\max} = \pm 2I_0 = \pm 20$  мкА. Оскільки до коригувальної ємності прикладена вся вихідна напруга, з  $I = CU'$  визначимо максимальну швидкість наростання вихідного сигналу, таким чином [136]:

$$V = \left. \frac{dU_a}{dt} \right|_{\max} = \frac{I_{1\max}}{C_k} = \frac{2I_0}{C_k} = \frac{20 \text{ мкА}}{30 \text{ пФ}} = 0,6 \frac{\text{В}}{\text{мкс}}$$

Отже, вихідна напруга здатна змінюватися максимум на 0,6 В за 1 мкс, і час наростання сигналу прямокутної форми з вихідною амплітудою 20 В складе [136]

$$\Delta t = \frac{\Delta U_a}{V} = \frac{20 \text{ В}}{0,6 \text{ В/мкс}} = 33 \text{ мкс}.$$

При модуляції сигналом синусоїдальної форми вихідна напруга також не здатна змінюватися швидше, ніж допускає максимальна швидкість наростання вихідної напруги. При вихідній напрузі  $U_a = \hat{U}_a \sin \omega t$  для максимального нахилу в точці перетину з віссю абсцис маємо [136]:

$$V = \frac{dU_a}{dt} = \hat{U}_a \omega = 2\pi f \hat{U}_a. \quad (1.2)$$

Звідки знаходимо частоту, до якої можливе підсилення без суттєвих спотворень на усій робочій ділянці [136]:

$$f_p = \frac{V}{2\pi \hat{U}_a} = \frac{0,6 \text{ В/мкс}}{2\pi \cdot 10 \text{ В}} = 10 \text{ кГц}.$$

Вказану характеристику називають смугою повної неспотвореної потужності, до цієї частоти можна одержати повну вихідну потужність сигналу. Для такого підсилювача вона становить усього 10 кГц, тоді як малосигнальна ширина смуги пропускання обмежена частотою  $f = 1 \text{ МГц}$ . Згідно з (1.2), вище частоти  $f_p$  полюса амплітуда вихідного сигналу зменшується за законом [136]

$$\hat{U}_a = \frac{V}{2\pi f}.$$

Розглянутий підсилювач підтримує повну амплітуду вихідного сигналу на частотах до 10 кГц, але при зростанні частоти до 100 кГц він видає лише 1 В, а на 1 МГц – усього 0,1 В [136]. При помітному перевищенні швидкості зміни вихідного сигналу над максимальною швидкістю наростання вихідної напруги вихідний сигнал приймає трикутну

форму і має мало спільного з неспотвореним сигналом, за винятком частоти. Необхідно також відмітити, що недоліком одноктактних ППС є різна тривалість переднього і заднього фронтів вихідного імпульсного сигналу і зменшення амплітуди вихідного сигналу зі збільшенням частоти  $f_c$ , як показано на рис. 1.3а, б.

Відомі також підсилювачі з низьким вхідним опором – підсилювачі різницевого струму (або підсилювачі Нортон) [70, 71, 80]. Вони переважно виготовляються за одноктактною структурою і знайшли значно меншу кількість застосувань через недостатньо високі статичні і динамічні характеристики.

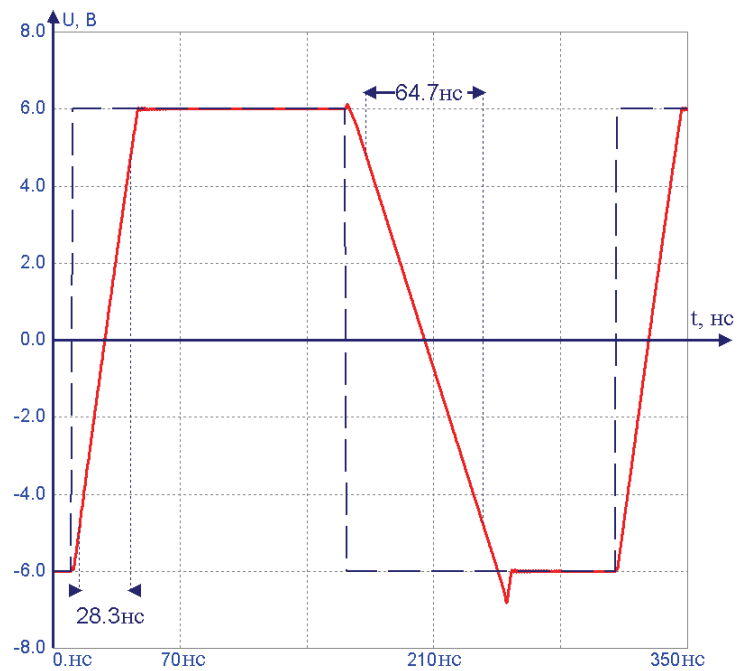
Інший підхід до побудови підсилювачів напруги та струму ґрунтується на використанні повністю двотактних каскадів у підсилювальних трактах таких пристроїв. І хоча ідея побудови повністю двотактних пристроїв з'явилася ще на початку 70-х років, двотактні схеми поширення набули значно пізніше одноктактних підсилювачів. Це пов'язано перш за все із різними частотними характеристиками елементної бази, на якій будувалися підсилювальні пристрої, зокрема, n-p-n та p-n-p біполярних транзисторів. Перший підхід – двотактні підсилювачі за принципом підсилення і перетворення напруг.

При цьому схеми орієнтовані на принцип підсилення і перетворення струмів потенційно мають вищу швидкодію, ніж аналоги, що використовують принципи підсилення і перетворення напруг. Навіть у тих випадках, коли необхідно виконувати підсилення напруг, напругу вхідного сигналу доцільно перетворювати у струм, підсилювати його декількома струмовими каскадами, а потім на виході знову перетворювати у напругу [1]. Також доцільно виділити й інші переваги струмових підсилювачів [4]:

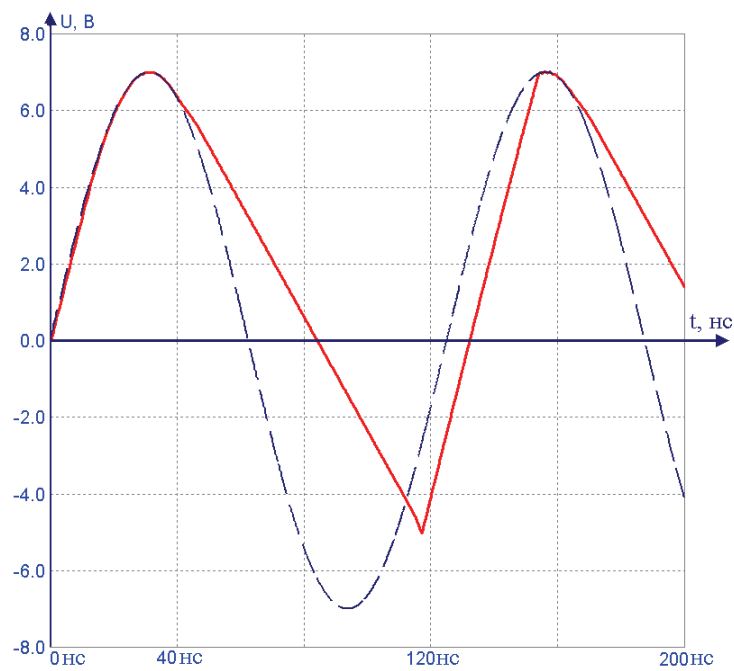
- 1) більша максимальна частота повної неспотвореної потужності і здатність керувати більшими зовнішніми навантаженнями;
- 2) вища швидкість наростання вихідного сигналу;
- 3) менша чутливість до інвертування вхідної ємності.

На рис. 1.4 показано схему першого запропонованого двотактного ППС, наведену у патенті США № 3852678 [9] (Push pull amplifier with current mirrors). Вона складається з двох каскадів підсилення: 1) вхідного каскаду на основі схеми із самодоповнювальною загаль-

ною базою; 2) протифазні пари проміжних підсилювальних каскадів на основі схеми із загальним емітером.



а)



б)

Рис. 1.3. Обмеження динамічних характеристик одноканальних ППС:  
а) перехідна характеристика з асиметричними фронтами;  
б) спотворення синусоїдального вихідного сигналу



Транзистори VT1 та VT2 у діодному вмиканні забезпечують напругу зміщення для транзисторів вхідного каскаду. Вихідний струм ППС визначається, як різниця колекторних струмів транзисторів проміжного каскаду VT5 і VT6. Проте через недосконалість структури та малий коефіцієнт передачі схема є чисто теоретичною.

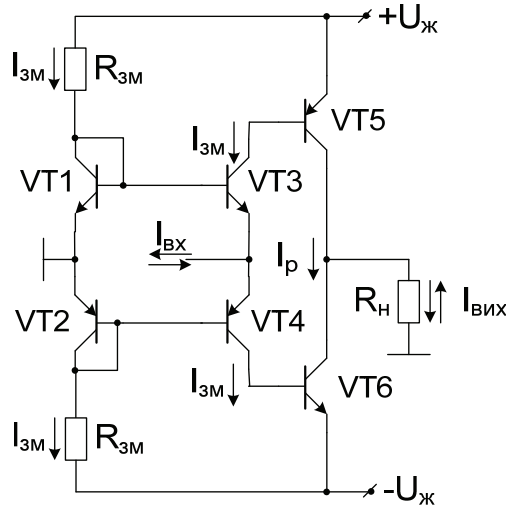


Рис. 1.4. Спрощена принципова схема двотактного ППС

У розглянутому ДППС виникає необхідність використання біполярних транзисторів різної потужності: 1) малопотужних у вхідному підсилювальному каскаді; 2) більш потужних – у проміжному. Крім цього застосування такого підходу призводить до зниження швидкодії пристрою в цілому. Щоб вирішити вказану проблему, було запропоновано увести до схеми так звані компенсатори струму, які б дозволили працювати усім каскадам підсилювача в одному режимі [4]. Структуру ДППС та принципову схему, що реалізує такий підхід, показано на рис. 1.5. Тут у ролі компенсаторів використовуються джерела струму  $I_3$  та  $I_4$ . Для задання режиму по постійному струму повинна виконуватися така умова:

$$I_{кТ3} \approx I_{кТ4}, \text{ тобто } \beta_{pnp} \cdot I_{бТ3} \approx \beta_{npn} \cdot I_{бТ4} \approx I_p,$$

де  $\beta_{pnp}$ ,  $\beta_{npn}$  – диференційні коефіцієнти підсилення по струму біполярних транзисторів;  $I_{бТ3}$ ,  $I_{бТ4}$  – базові струми відповідних транзисторів;  $I_p$  – номінальний струм ДППС.

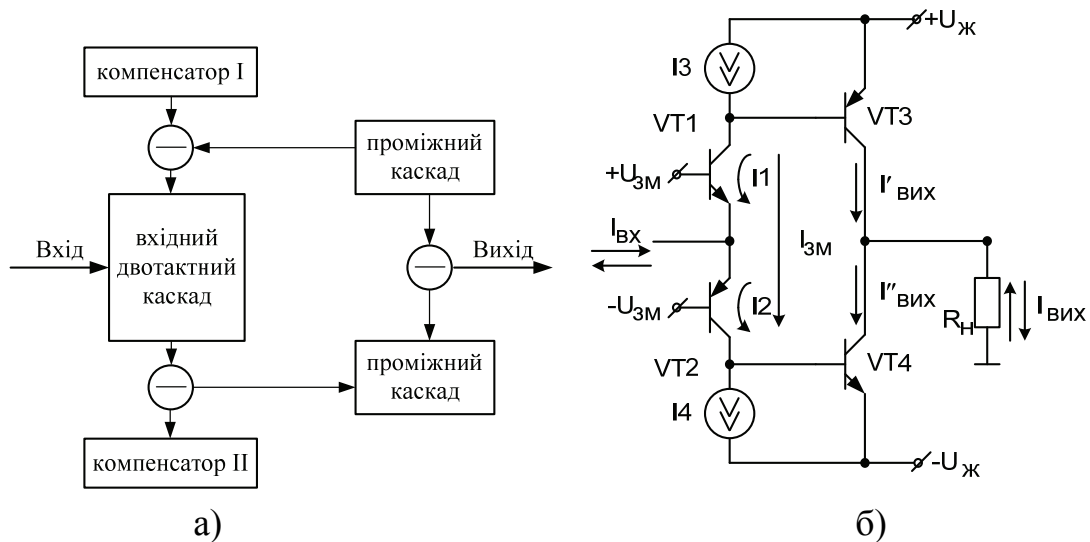


Рис. 1.5. Узагальнена схема двотактного ППС із компенсаторами струму: а) структурна; б) принципова

Оскільки  $\beta_{pnp} \neq \beta_{nnp}$ , то і базові струми пар проміжних підсилювальних каскадів будуть їм пропорційні, звідки випливає, що компенсаційні струми  $I_3$  та  $I_4$  будуть також різні, а це в свою чергу вимагає індивідуального високоточного припасування значень компенсаційних струмів. Таким чином, значення компенсаторів струму можна визначити з виразу

$$\beta_{pnp} \cdot (I_{кТ1} - I_3) \approx \beta_{nnp} \cdot (I_{кТ2} - I_4).$$

З останнього виразу стає очевидним, що від точності припасування компенсаційних струмів буде залежати вихідний струм зміщення нуля ППС. Таким чином, розробка схеми автоматичного задання струмів зміщення проміжного каскаду  $I_3$  та  $I_4$  є ключем до успіху при розробці двотактних підсилювачів [4].

Враховуючи двокаскадну структуру ДППС, коефіцієнти передачі по струму такого підсилювача будуть визначатися у вигляді

$$K_{i\Sigma} = \frac{I_{\text{ВІХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = K_I + K_{II} = \frac{1}{2} \alpha_{nnp} \cdot \beta_{pnp} + \frac{1}{2} \alpha_{pnp} \cdot \beta_{nnp}, \quad (1.3)$$

де  $K_I$  і  $K_{II}$  – коефіцієнти передачі верхнього і нижнього тактів підсилення,  $\alpha_{nnp}$  та  $\alpha_{pnp}$  – коефіцієнти підсилення по струму вхідних транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ .

З останнього виразу нескладно зрозуміти, що коефіцієнти передачі  $K_I$  і  $K_{II}$  по трактах підсилення різні, а це призводить до різних амплітудно-частотних характеристик трактів підсилення та асиметрії переднього і заднього фронтів вихідного сигналу ДППС.

Збільшення коефіцієнта підсилення ППС досягається нарощуванням числа його каскадів. Водночас, багатокаскадні схеми мають дещо гірші динамічні характеристики, зокрема, велику кількість полюсів АЧХ та значні фазові зсуви вихідного сигналу. У зв'язку із цим проектування багатокаскадних ППС доцільно здійснювати таким чином, щоб досягти потрібного підсилення з мінімальною кількістю каскадів. Для багатокаскадного підсилювача загальний коефіцієнт підсилення можна визначити так [48, 118, 120, 136]:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n,$$

де  $K_1, \dots, K_n$  – коефіцієнти передачі проміжних каскадів ППС;  $n$  – кількість каскадів ППС.

При цьому слід зазначити, що для оцінювання ефективності структурної організації схеми доцільно використовувати деякий усереднений показник, такий як підсилення на каскад [120], що визначається у вигляді

$$K^* = \sqrt[n]{K}. \quad (1.4)$$

Це дає змогу порівняти раціональність структурно-функціональної організації ППС та виділити найвдаліші схемні рішення. Проаналізуємо підсилення на каскад ДППС із компенсаторами з урахуванням виразу (1.3)

$$K_1^* = \sqrt[2]{\frac{\alpha_{npn} \cdot \beta_{pnp} + \alpha_{pnp} \cdot \beta_{npn}}{2}}. \quad (1.5)$$

Визначимо підсилення на каскад при реалізації вказаного ППС для сучасної елементної бази, наприклад, біполярних транзисторів фірми Інтерсіл [129]. При встановленому струмі робочої точки в 1 мА, тран-

зистори мають такі значення коефіцієнтів підсилення по струму:  $\beta_{pnp} = 50$  і  $\beta_{nnp} = 100$ . Підставимо ці значення у вираз (1.5) та отримаємо

$$K_1^* \approx 8,6.$$

Типовим прикладом схем із середнім значенням вхідного опору є підсилювач запатентований фірмою Analog Devices з так званим «чотири ядерним» вхідним каскадом, принципову схему якої показано на рис. 1.6. В іноземних літературних джерелах такого класу пристрої мають назву «voltage feedback amplifier», тобто підсилювачі із ЗЗ за напругою [4].

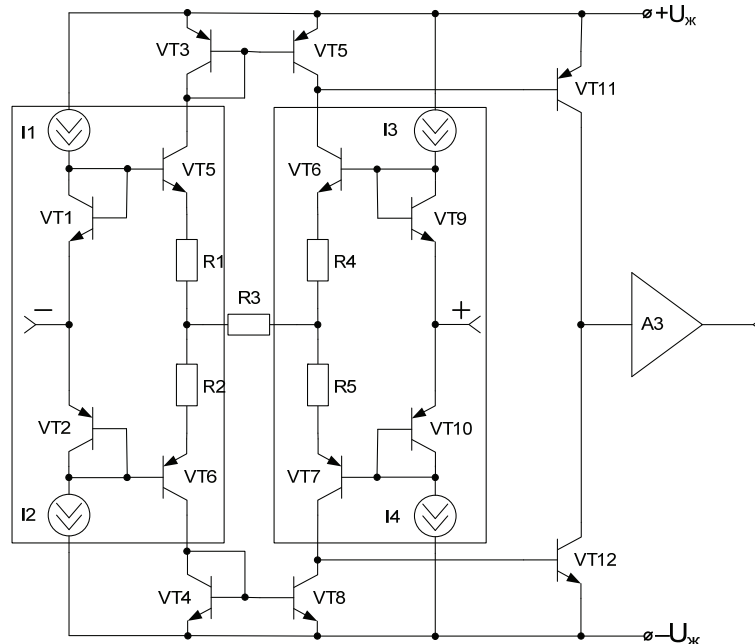


Рис. 1.6. Спрощена принципова схема двотактного підсилювача напруги

Розглянутий підсилювач складається з трьох каскадів: двотактного вхідного, що містить прямий та інверсний входи (на відповідному рисунку їх виділено прямокутниками), протифазних підсилювальних каскадів на транзисторах VT11 і VT12 та вихідного каскаду, який може бути реалізовано у різний спосіб (на рис. 1.6 показано схематично). Вхідний каскад складається з двох частин, які між собою узгоджують за допомогою резистора R3 та відбивачів струму на транзисторах

## ЛІТЕРАТУРА

1. Grebene A. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design / Alan B. Grebene – , 2003. – 879 p.
2. Hans Camenzind. 700 Series 20v Bipolar Array Design Manual / Hans Camenzind. – 2005. – 192 p.
3. Hans Camenzind. Designing Analog Chips / Hans Camenzind. – 2005. – 242 p.
4. Jung Walt Op Amp applications handbook / Walt Jung. Analog Devices series, 2005. – 878 p.
5. Kesler W. ANALOG-DIGITAL CONVERSION. / Walt Kesler // ADI Central Application Department, 2004. – 1127 p.
6. Patent 1544921 USA, Amplifier circuits / Robert C. Mathes, assignor to Western Electronic Company. – № 337565, filed 12.11.1919, issued 07.07.1925.
7. Patent 1924469 USA, Push-pull amplifier / Felix Strecker assignor to Siemens & Halske. – № 584406, filed 22.10.1930, issued 29.08.1933.
8. Patent 1931648 USA, Push-pull amplifier / Popko Reinder Dyksterhuis, assignor to Radio Corporation of America. – № 478831, filed 02.09.1929, issued 24.10.1933.
9. Patent 3852678 USA H03F 3/26, Push-pull amplifier with current mirrors for determining the quiescent operating point / George Joseph Frye. – № 358152, filed 07.05.1973, issued 12.10.1976.
10. Patent 3986134 USA, H03F 3/16, Push-pull amplifier circuitry / Kenji Yokoayama, Nippon Gakki Seizo Kabushiki Kaisha. – № 605172 filed 15.08.1975, issued 12.10.1976.
11. Patent 4031481 USA, H03F 3/16, Transistor amplifier. / Tadao Yoshida assignor to Sony Corporation. – № 578195 filed 16.05.1975, issued 21.06.1977.
12. Patent 4274059 USA, H03F 3/30 Single ended Push-pull amplifier // Yasuhisa Okabe assignor to Victor Company of Japan. № 963901, filed 27.11.1978, issued 16.06.1981.

13. Patent 4335360 USA, H03F 3/16, H03F 3/30 Class AB push-pull amplifiers. / Merve V. Hoover. № 97040, filed 23.11.1979 issued 15.06.1982.
14. Patent 4384261 USA, H03F 3/30 Class A complementary single-ended push pull amplifier/ Kenji Yokoyama, assignor to Nippon Gakki Seizo Kabushiki. № 279251, filed 01.07.1981 issued 17.05.1983.
15. Patent 4433303 USA, H03F 3/30 Push-pull amplifier circuit with field-effect transistors // Katuhiro Sasaki, assignor to Pioneer Electronics Corporation. № 298143, filed 31.08.1981, issued 21.02.1984.
16. Patent 4595883 USA, H03F 3/30, Emitter-follower type single-ended push-pull circuit. / Kazuaki Nakayama assignor to Pioneer Electronics. № 647789, filed 06.09.1984, issued 17.06.1986.
17. Patent 4791383 USA, H03F 3/30 High speed current amplifier buffer circuit / Dennis M. Monticelli, John W. Wright assignor to National Semiconductor Corporation. № 92929, filed 04.09.1987, issued 13.12.1988.
18. Patent 4827223 USA, H03F 3/30 Buffer amplifier. / William H. Gross, assignor to Elantec. № 171035, filed 21.03.1988, issued 2.05.1989.
19. Patent 4833424 USA, H03F 3/26 . Linear amplifier with transient currents boost. / John W. Wringht, assignor to Elantec. № 177511, filed 04.04.1988 issued 23.05.1989.
20. Patent 4991916 USA, H03F 2/26 . Method and apparatus for automatically biasing a push-pull amplifier / David K. Deaver, assignor to John Fluke Mfg. Co., Inc. № 180540, filed 12.04.1988, issued 12.02.1991.
21. Patent 5049653 USA, H03F 3/30, Wideband buffer amplifier with high slew rate. / Steven O. Smith, Kerry A. Tompson, assignor to Comlinear Corporation. № 554275, filed 17.07.1990, issued 25.09.1991.
22. Patent 5218321 USA, H03F 3/26. Low offset unity gain buffer amplifier. / Steven R. Jost, assignor to Harris Corporation. № 717347, filed 18.06.1991 issued 8.06.1993.

23. Patent 5323122 USA, H03F 3/26, Rapid slewing unity gain buffer amplifier with boosted parasitic capacitance charging. / Derek F. Bowers, assignor to Analog Devices. № 145820, filed 02.11.1993, issued 21.06.1994.
24. Patent 5339042 USA, H03F . Input stage offset compensation device. / Jean-Claude Kaire, Bernard Majoux, Serge Pontarollo, assignor to SGS-Tomson Microelectronics. № 106056 filed 28.01.1993, issued 16.08.1994.
25. Patent 5399991 USA, H03F 3/45, High speed low power op-amp circuit / Farhood Moraveji, assignor to National Semiconductor Corporation. № 270524, filed 05.07.1994, issued 21.03.1995.
26. Patent 5510754 USA, H03F 3/30. Fast slewing amplifier using dynamic current mirrors. / Farhood Moraveji, assignor to National Semiconductor Corporation. № 341818, filed 18.11.1994, issued Apr. 23.04.1996.
27. Patent 5512859 USA, H03F 3/30 Amplifier stage having compensation for npn, pnp beta mismatch and improved slew rate. / Farhood Moraveji, assignor to National Semiconductor Corporation. № 340556, filed 16.11.1994, issued 30.04.1996.
28. Patent 5789982 USA, H03F 3/45 Low distortion feedback IC amplifier and method. / Gabriel J. Uscategui, Glenn Wells, assignor to Harris Corporation. № 712562, filed 11.09.1996, issued 4.08.1998.
29. Patent 6529078 USA, H03F 3/45 Low-distortion transimpedance amplifier structures and methods. / Royal A. Gosser, Edward Perry Jordan, Analog Devices. № 09/935263, filed 22.08.2001, issued 4.03.2003.
30. Patent 6535064 USA, H03F Current-feedback amplifier exhibiting reduced distortion. / Barry Harvey Barry, assignor to Elentec Semiconductor. № 10/152451, filed 21.05.2002, issued 18.03.2003.
31. Patent 6734720 USA, H03F 3/45. Operation amplifier in which the idle current of its output push-pull transistors is substantially zero / Hiroshi Imai, assignor to Denso Corporation. № 10/223702, filed 20.08.2002 issued 11.03.2004.

32. Patent 7362176 USA, H03F 3/26. High efficient linear amplifier. / Maria-Flora Carrento, Charles Parkhurst, assignor to Texas Instruments. № 11/061332, filed 18.02.2005, issued 22.04.2008.
33. Sedra A. S. Current conveyor theory and practice / A. S. Sedra, G. W. Roberts // London: – Peter Peregrinus Limited, 1990. – pp. 93-126.
34. Walt Kester. Which ADC Architecture Is Right for Your Application? [Электронный ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу:  
<http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-6/architecture.pdf>
35. А. с. 1363452 СССР, Н 03 К 5/24, G 05 В 1/01. Входное устройство схемы сравнения токов/ А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, А. Е. Рафалюк, В. В. Лысюк (СССР). № 3923619; заявл. 08.07.85; опубл. 01.09.87, Бюл. № 9.
36. А. с. 1450098 СССР, Н 03 К 5/24, G 05 В 1/01. Входное устройство схемы сравнения токов/ А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко, М. И. Демин (СССР). заявл. 02.03.87; опубл. 07.01.89, Бюл. № 1.
37. А. с. 1455387 СССР, Н 03 К 5/24. Входное устройство схемы сравнения токов/ А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко, В. П. Марценюк (СССР). № 4268283; заявл. 26.06.87; опубл. 30.01.89, Бюл. № 4.
38. А. с. 1497713 СССР, Н 03 F 3/26. Двухтактный усилитель мощности / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Марценюк, В. П. Волков (СССР). № 4180472; заявл. 12.01.87; опубл. 30.07.89, Бюл. № 28.
39. А. с. 1529434 СССР, Н 03 К 5/24. Входное устройство схемы сравнения токов / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко, Л. В. Крупельницкий (СССР). № 4402589; заявл. 01.04.88; опубл. 15.12.89, Бюл. № 46.
40. А. с. 1739476 СССР, Н 03 F 3/26. Усилитель тока / А. Д. Азаров, Ю. М. Степайко, Е. М. Арапова, Т. А. Савчук (СССР). № 4748817; заявл. 19.09.89; опубл. 07.06.92, Бюл. № 21.



41. А. с. на твір №20371 ПА. України Комп'ютерна програма «Модельовання процесу порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ» / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Гарнага В. А. Рішення від 27.02.2007.
42. Азаров О. Д. Конвеєрні аналого-цифрові перетворювачі з ваговою надлишковістю: монографія / О. Д. Азаров, О. В. Шапошніков, С. М. Захарченко. – Вінниця, 2006. – 157 с.
43. Азаров О. Д. Багатоканальні ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів на базі АЦП із ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, А. В. Снігур. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 138с.
44. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / О. Д. Азаров. – Вінниця: ВНТУ, 2010. –232 с.
45. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Кадук. –Вінниця., 2010. – 150 с.
46. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів. Монографія / О. Д. Азаров, О. А. Архипчук, С. М. Захарченко – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.
47. Азаров О. Д. Основи аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : Монографія / О. Д. Азаров – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2004. –260 с.
48. Алексеев А.Г. Операционные усилители и их применение / А. Г. Алексеев, Г. В. Войшвилло. – М. : Радио и связь, 1989. – 120 с.
49. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. / М. А. Амелина, С. А. Амелин – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.
50. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму [Електронний ресурс] / [ О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, О. О. Решетнік та інш.] // Електронне наукове фахове видання «Наукові праці Вінницького націона-

- льного технічного університету». – 2007. – № 1. – Режим доступу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html>
51. Бахтиаров Г. Д. Аналого-цифровые преобразователи / Г. Д. Бахтиаров, В. В. Малинин, В. П. Школин; Под ред Г. Д. Бахтиарова. М. : Советское радио, 1980. – 280 с. ил.
  52. Будяков С.А. Архитектура и схемотехника операционных усилителей с предельными значениями динамических параметров : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» / С. А. Будяков. – Таганрог, 2008. – 22 с.
  53. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 528 с.
  54. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский // – М. : АСТ: «Астрель», 2005. – 991с.
  55. Гарнага В. А. Аналіз частотних характеристик біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, В. А. Гарнага // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009) міжнар. наук.-техн. конф., 8—10 жовт.: тези допов. – Вінниця, 2009. – С. 28.
  56. Гарнага В. А. Вирівнювання коефіцієнтів передачі проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: міжнар. наук.-техн. конф., 22–24 квіт. 2009 р.: тези допов. – Вінниця, 2009. – С. 176–177.
  57. Гарнага В. А. Високолінійні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою для систем контролю вимірювань: (тези доповідей ІХ міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2008)» 21—24 жовт.) [Електронний ресурс] / В. А. Гарнага // – 2008. – С. 27. – Режим доступу: [http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/materials/subsection\\_2.1.pdf](http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/materials/subsection_2.1.pdf)
  58. Гарнага В. А. Високолінійні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою для систем контролю вимірювань [Електронний ресурс]. Електронне наукове фахове видання

- «Наукові праці Вінницького національного технічного університету». – 2008. – № 4. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-4/2008-4.htm>.
59. Гарнага В. А. Високолінійні швидкодіючі підсилювачі постійного струму із симетричною структурою / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, С. В. Богомолів // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: міжнар. наук.-техн. конф., 15—17 трав.: тези допов. – Вінниця, 2007. – С. 48.
60. Гарнага В. А. Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, С. В. Богомолів // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4. – С. 20–24.
61. Гарнага В. А. Математична модель передатної характеристики двотактного підсилювача постійного струму/ О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 2 (12). – С. 5–11.
62. Гарнага В. А. Методи задання робочих точок проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – Київ, 2009. – № 1 (25). – С. 6–14.
63. Гарнага В. А. Методи побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – Київ, 2006. – № 3. – С. 5–11.
64. Гарнага В. А. Методи симетрування коефіцієнтів передачі проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму [Електронний ресурс] / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Електронне наукове фахове видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету». – Вінниця, 2009. – № 3. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.htm>.
65. Гарнага В. А. Моделі АЧХ і ФЧХ двотактних підсилювачів струму на основі схем заміщення транзисторів у форматі SPICE / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, М. Ю. Теплицький // Інформаційні те-

- хнології та комп'ютерна інженерія: міжнар. науч.-техн. конф.; 19–21 трав. 2010 р.: тези допов. – Вінниця, 2010. – С. 360–361.
66. Гарнага В. А. Модель операції порівняння при порозрядному аналого-цифровому перетворенні з прогресуючим набором тривалостей тактів урівноваження / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 3 (13). – С. 5–12.
67. Гарнага В. А. Нелінійні спотворення у двотактних симетричних підсилювачах постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 2(14). – С. 26–33.
68. Гарнага В. А. Підсилювач постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // XIII міжнародна конференція з автоматичного управління Автоматика-2006: міжнар. науч.-техн. конф., 25–28 вер. 2006 р.: тези допов. – Вінниця, 2006. – С. 145.
69. Гарнага В. А. Похибки лінійності двотактного симетричного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 1 (11). – С. 124–132.
70. Иванов В. В. Мощные интегральные усилители. / В. В. Иванов, В. Н. Иванов. – Ленинград : ЦНИИ «Румб», 1987. – 145 с.
71. Иванов В. Н. Проектирование аналоговых схем на специализированных БИС / В. Н. Иванов, В. В. Иванов. – Ленинград : ЦНИИ «Румб», 1988. – 139 с.
72. Каванаг К. Автоматическая калибровка смещения нуля цифро-аналоговых преобразователей // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 1. – С.6–7.
73. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники «МикАн» / [С. Г. Крутчинский, Н. Н. Прокопенко, И. П. Щербинин и др.] // под ред. С. Г. Крутчинского; Сев.-Кавк.науч.центр высш.школы, Рос.-Белорус.центр аналоговой микросхемотехники, Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса, Таганрогский гос. радиотех. ун-т; Белорус. гос. ун-т. – Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2003. – 45 с.

74. Киарлоне Ф. Преобразователь напряжения в ток на основе двух измерительных усилителей // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 7. – С. 40–41.
75. Кондалев А. И. Преобразователи формы информации компьютерного типа / А. И. Кондалев. – К. : Знание, 1990. – 46 с.
76. Конденсаторні матриці для ЦАП на основі НПСЧ / [О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага та інш.] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, 2006. – № 2. – С. 6–18.
77. Коригування статичних похибок вимірювального каналу ІВС, який містить АЦП із ваговою надлишковістю / [О. Д. Азаров, Л. В. Крупельницький, А. В. Снігур та інш.] // Проблеми інформатизації та управління: – Київ, 2007. – № 2. – С. 5-9.
78. Крекрафт Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крекрафт, С. Джерджли. – М. : Техносфера, 2005 – 360 с.
79. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія / Л. Крупельницький, О. Азаров. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.
80. Ламекін В. Ф. Широкополосные интегральные усилители / Под ред. С. Я. Шаца. – М.: Сов. Радио, 1980. – 223 с.
81. Миниатюрные ЦАП с выходом по току обеспечивают высокую точность, малое потребление и большое быстродействие // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 3. – С. 5.
82. Моделі АЧХ і ФЧХ інтегральних біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / [О. Д. Азаров, С. Ш. Каців, В. А. Гарнага та інш. ] // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – № 4 (28). – С. 5–15.
83. Моделі форсуючих сигналів для прискореного порозрядного аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю / [О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага, та інш.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця, 2006. – № 2. – С. 6-18.

84. Наундорф У. Аналоговая электроника: Основы, расчет, моделирование. / Уве Наундорф [пер. с нем. М. М. Ташлицкого] // М. : Техносфера, 2008. – 472 с.
85. Операционные усилители и компараторы / [мат. подготов. В. Д. Авербух, Н. В. Каратаев и др.]. – М. : «Додэка– XXI», 2001. – 560 с.
86. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский; 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Вища школа, 1983. – 455 с.
87. Основы теории цепей : / учебник для вузов // [ Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. ] – М. : Энергоатомиздат, 1989 – 528 с.
88. Пат. на винахід 91923 Україна, МПК (2006) H03K 5/22, H03F 3/26, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомоллов С. В, Гарнага В. А. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № а200900486 заявл. 26.07.2007 опубл.10.09.2010, бюл. № 17.
89. Пат. на корисну модель 11189 Україна, МПК (2007) H 03 K 5/24, G 05 B 1/01. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Захарченко С. М., Решетнік О.О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200505341 заявл. 06.06.2005; опубл. 15.12.2005; Бюл. № 12. – 5 с.
90. Пат. на корисну модель 16968 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/00, G 05 B 1/00. Буферний елемент / Азаров О. Д., Решетнік О. О., Гарнага В. А., Захарченко С. М., Харьков О. М.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200512049 заявл. 15.12.2005; опубл. 15.09.2006; Бюл. № 9. – 5 с.
91. Пат. на корисну модель 17239 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Лукашук О.О., Гарнага В. А., Решетнік О.О., Снігур А.В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. № u200603280 – заявл. 27.03.2006; опубл. 15.09.2006; Бюл. № 9. – 7 с.
92. Пат. на корисну модель 18466 Україна, МПК (2006) H03F3/26. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Лукашук О. О., Га-

- рнага В. А., Решетнік О. О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200604582 заявл. 25.04.2006; опубл. 15.11.2006 Бюл. № 11. – 7 с.
93. Пат. на корисну модель 18599 Україна, МПК (2006) H03F3/26. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Лукащук О. О., Гарнага В. А., Решетнік О. О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200605299 заявл. 15.05.2006; опубл. 15.11.2006 Бюл. № 11. 7 с.
94. Пат. на корисну модель 19370 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Решетнік О. О., Тарасова О. М.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200606551 заявл. 13.06.2006; опубл. 15.12.2006; Бюл. № 12. – 7 с.
95. Пат. на корисну модель 19728 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Лукащук О. О., Богомолів С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200608586 заявл. 31.07.2006; опубл. 15.12.2006; Бюл. № 12. – 7 с.
96. Пат. на корисну модель 20246 Україна, МПК (2007) H03F3/26. Вхідний пристрій схеми порівняння струмів / Азаров О. Д., Лукащук О. О., Гарнага В. А., Решетнік О. О., Богомолів С. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200607987 заявл. 17.07.2006, опубл. 15.01.2007 Бюл. № 1. 7 с.
97. Пат. на корисну модель 21954 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Буферний елемент / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. А., Лукащук О. О., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200611431 заявл. 30.10.2006; опубл. 10.04.2007; Бюл. № 4. – 7 с.
98. Пат. на корисну модель 23999 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200702059 заявл. 26.02.2007; опубл. 11.06.2007; Бюл. № 8. – 7 с.

99. Пат. на корисну модель 25471 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Вхідний пристрій порівняння струмів/ Азаров О. Д., Кадук О. В., Богомоллов С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200703563 заявл. 02.04.2007; опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12. – 9 с.
100. Пат. на корисну модель 26413 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Вхідний пристрій порівняння струмів/ Азаров О. Д., Кадук О. В., Богомоллов С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200702063 заявл. 02.04.2007; опубл. 25.09.2007; Бюл. № 15. – 9 с.
101. Пат. на корисну модель 26493 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомоллов С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200705169 заявл. 11.05.2007; опубл. 25.09.2007 Бюл. № 15. 7 с.
102. Пат. на корисну модель 26495 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомоллов С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200705196 заявл. 11.05.2007; опубл. 25.09.2006 Бюл. № 15. 9 с.
103. Пат. на корисну модель 26771 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00 Двотактний симетричний підсилювач струму Азаров О. Д., Кадук О. В., Богомоллов С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О. заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200704476 заявл. 26.02.2007; опубл. 10.10.2007 Бюл. № 16. 9 с.
104. Пат. на корисну модель 28375 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Вхідний пристрій порівняння струмів/ Азаров О. Д., Богомоллов С. В., Крупельницький Л. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200707425 заявл. 02.07.2007; опубл. 10.12.2007; Бюл. № 14. – 11 с.



105. Пат. на корисну модель 35482 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Стейскал В.Я. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200803596 заявл. 21.03.2009; опубл. 25.09.08 Бюл № 18. – 8 с.
106. Пат. на корисну модель 36692 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Шабатура М. Ю., Богомолів С. В., Гарнага В. А. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200802987 заявл. 07.03.2008; опубл. 10.11.08, Бюл № 21. – 9 с.
107. Пат. на корисну модель 42958 Україна, МПК (2009) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Теплицький М. Ю., Решетнік О. О., Гарнага В. А. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200902332 заявл. 07.03.2008; опубл. 27.07.09, Бюл. № 14. – 9 с.
108. Пат. на корисну модель 46178 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Теплицький М. Ю., Гарнага В. А. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u2009066445 заявл. 19.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 9 с.
109. Пат. на корисну модель 51958 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. А., Кириленко Д. О. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u201000906 заявл. 29.01.2010; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15. – 5 с.
110. Пат. на корисну модель № 11301 Україна, МПК (2007) Н 03 F 3/26. Різницевий підсилювач струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Захарченко С. М., Решетнік О.О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200506085 заявл. 21.06.2005; опубл. 15.12.2005; Бюл. № 12. – 5 с.
111. Полонников Д. Е. Операционные усилители: Принципы построения, теория, схемотехника. / Д. Е. Полонников. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 216 с., ил.

112. Похибки квантування в АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення / [О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага та інш. ] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2007 . – № 3. – С. 67-73.
113. Прецизионная весоизмерительная система на базе сигма-дельта АЦП AD7190 // Электронные компоненты и системы. – 2010. – № 2. – С.3–5.
114. Прокопенко Н. Н. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей /Н. Н. Прокопенко, А. С. Будяков. – Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 220 с.
115. Прокопенко Н. Н. Нелинейная активная коррекция в прецизионных аналоговых микросхемах / Н. Н. Прокопенко. – Ростов-на-Дону : Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 2000. – 224 с.
116. Прокопенко Н. Н. Нелинейные корректирующие цепи на основе коммутаторов тока и напряжения в аналоговых микросхемах / Н. Н. Прокопенко, Н. Н. Никуличев. – Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 130 с.
117. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем. / В. П. Сигорский, А. И. Петренко – К. : Техника, 1967. – С. 469–481.
118. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. / Сидни Соклоф ; [пер. с англ. А. Б. Перезенцева]. – М. : Мир, 1988. – 583 с.
119. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган: [Пер. с англ.] – М. : Наука, 1979. – 830 с.
120. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники : учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / И. П. Степаненко. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.: ил.
121. Технічний опис AD7090: 1.5GHz Ultrahigh Speed Op Amp [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.–Режим доступу:  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/-AD7090.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/-AD7090.pdf)
122. Технічний опис AD7095: 1.7GHz Ultrahigh Speed Op Amp [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.–Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/-AD7095.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/-AD7095.pdf)

123. Технічний опис AD8000: 1.5GHz Ultrahigh Speed Op Amp [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8000.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8000.pdf)
124. Технічний опис AD8005: 270MHz, 400µA Current-Feedback Amplifier [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.–Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8005.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8005.pdf)
125. Технічний опис AD8011: 300MHz Current-Feedback Op Amp [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.–Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8011.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8011.pdf)
126. Технічний опис AD8014: 400MHz Low Power High Performance Amplifier [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.–Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8014.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8014.pdf)
127. Технічний опис AD811: High Performance Video Op Amp [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт – Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD811.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD811.pdf)
128. Технічний опис AD846: 450V/µs, Precision, Current-Feedback Op Amp [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт.– Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets\\_obsolete/270284AD846.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets_obsolete/270284AD846.pdf)
129. Технічний опис HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models: Application Note, Intersil, 1994. – 5 p.
130. Технічний опис LT1352/LT1353: Dual and Quad 250µA, 3MHz, 200V/µs Operational Amplifiers [Електронний ресурс] / Linear Technology // офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.datasheetarchive.com/pdfdatasheets/Datasheets-17/DSA-321861.pdf>
131. Технічний опис NCS2530 Triple 1.1 mA 200 MHz Current Feedback Op Amp with Enable Feature [Електронний ресурс] / ON Semiconductor // офіційний сайт. – Режим доступу: [http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/33/337868\\_1.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/33/337868_1.pdf)

132. Технічний опис NCS2535 Triple 1.4 GHz Current Feedback Op Amp with Enable Feature/ [Електронний ресурс] / ON Semiconductor // офіційний сайт – Режим доступу: <http://pdf1.alldata-sheet.com/datasheet-pdf/view/175065/ONSEMI/NCS2535DTG.html>
133. Технічний опис OP467: Quad Precision, High Speed Operational Amplifier [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. – Режим доступу: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/OP467.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/OP467.pdf)
134. Технічний опис EL2030C: 120 MHz Current Feedback Amplifier. [Електронний ресурс] / Elantec Semiconductor // офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-9/DSA-170457.pdf>
135. Технічний опис OPA660: Wide Bandwidth OPERATIONAL TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER AND BUFFER Amplifier [Електронний ресурс] / Burr-Brown // офіційний сайт. – Режим доступу: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa660.pdf>.
136. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. / У. Титце, К. Шенк [ пер. с нем. ДМК Пресс ]. – М. : – ДМК Пресс, 2008 – Т. 1. – 832 с.
137. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. / У. Титце, К. Шенк [ пер. с нем. ДМК Пресс ]. – М. : – ДМК Пресс, 2008 – Т2. – 942 с.
138. Тутьшкин А. А. Схемотехника КМОП-усилителей тока – токовых конвейеров / А. А. Тутьшкин, А. С. Коротков // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч.VIII: 2002. – С. 39–40.
139. Уолт Кестер. Как выбрать тип АЦП для ваши приложений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 4. – С. 12–17.
140. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС / Лусис М. Фолкенберри; [пер. с англ. Л. М. Наймарка]. – М. : Мир, 1985. – 572 с.

*Наукове видання*

**Азаров Олексій Дмитрович  
Гарнага Володимир Анатолійович**

**ДВОТАКТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ,  
ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ**

Монографія

Редактор Н. Мазур.

Оригінал-макет підготовлено В. Гарнагою

Підписано до друку 4.11.2011 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,01  
Наклад 100 прим. Зам № 2011-170

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.