

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, Н. О. Біліченко

**ШВИДКОДІЙНІ ДВОТАКТНІ
ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
З БАЛАНСНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.375:004.3

ББК 32.971.31-041

A35

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 30.11.2015 р.)

Рецензенти:

Є. Т. Володарський, доктор технічних наук, професор

О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор

Азаров, О. Д.

A35 Швидкодійні двотактні підсилювачі постійного струму з балансним зворотним зв'язком : монографія / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, Н. О. Біліченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 136 с.

ISBN 978-966-641-661-5

У монографії розглянуто питання побудови швидкодійних двотактних підсилювачів постійного струму з балансним зворотним зв'язком. Запропоновано метод зменшення вхідного струму зсуву нуля, а також отримано математичні моделі статичної передатної характеристики. Показано, що застосування розглянутих підходів дозволяє розширити смугу пропускання та підвищити лінійність таких пристроїв. Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються розробкою високолінійних аналогових вузлів для багаторозрядних аналого-цифрових систем.

УДК 621.375:004.3

ББК 32.971.31-041

ISBN 978-966-641-661-5

© О. Азаров, М. Теплицький, Н. Біліченко, 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 Огляд методів побудови підсилювачів струму для багаторозрядних ЦАП і галузей їх застосування	9
1.1 Методи структурно-функціональної організації пристроїв і систем, в яких використовуються багаторозрядні паралельні ЦАП	9
1.2 Вимоги щодо статичних і динамічних характеристик підсилювачів струму для багаторозрядних ЦАП у задачах прямого цифрового синтезу	12
1.3 Ширококутові підсилювачі постійного струму	20
1.4 Швидкодіючі двотактні підсилювачі постійного струму	25
1.5 Коригування зсуву нуля в підсилювачах постійного струму ...	28
1.5.1 Методи зменшення струму бази у диференціальних підсилювачах	28
1.5.2 Метод коригування струму зсуву нуля у двотактних підсилювачах постійного струму	29
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ДВОТАКТНИХ ППС ІЗ БАЛАНСНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ	32
2.1 Метод структурно-функціональної організації балансного зворотного зв'язку на базі двонаправлених відбивачів струму	32
2.2 ДППС із одно- та багатоступеневими проміжними каскадами з балансним зворотним зв'язком	39
2.3 Моделі статичних передатних характеристик	47
2.4 Похибки лінійності передатних характеристик ППС	51
2.5 Метод коригування струму зсуву нуля ДППС	55
РОЗДІЛ 3 ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШВИДКОДІЙНИХ ДВОТАКТНИХ ППС	64
3.1 Моделі малосигнальних АЧХ і ФЧХ	64
3.2 Перехідна характеристика та швидкість наростання вихідного сигналу ДППС	71
3.3 Метод підвищення швидкодії ДППС шляхом застосування спеціалізованих відбивачів струму	74

3.4 Смуга повної неспотвореної потужності та коефіцієнт нелінійних спотворень	87
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ШВИДКОДІЙНИХ ВИСОКОЛІНІЙНИХ ДВОТАКТНИХ ППС ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ СТРУМОВИХ ЦАП	93
4.1 Рекомендації щодо застосування пакету схемотехнічного аналізу Microcap 9(10) для дослідження динамічних характеристик ДППС	93
4.2 Рекомендації щодо реалізації вхідних каскадів ДППС із низьким вхідним опором	97
4.3 Аналіз статичних і динамічних характеристик практичних схем ДППС для ЦАП та їх температурного дрейфу	106
4.4 Рекомендації щодо застосування ДППС як підсилювача потужності і активного фільтра у системах DDS	111
4.5 Аналізатор параметрів звукових трактів із використанням багаторозрядних паралельних ЦАП з вихідним підсилювачем.....	113
ЛІТЕРАТУРА	118
Додаток А Структурні схеми ДППС та генераторів компенсуючого сигналу	133
Додаток Б Схема моделювання пристрою DDS	135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DDS	–	прямий цифровий синтез
АК	–	аналоговий комутатор
АПЗТ	–	аналізатор параметрів звукових трактів
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
ВЗЗ	–	вибірковий зворотний зв'язок
ВС	–	відбивач струму
ДВС	–	двонаправлений відбивач струму
ДОН	–	джерело опорної напруги
ДППС	–	двотактний підсилювач постійного струму
ОП	–	операційний підсилювач
ПЗП	–	постійний запам'ятовувальний пристрій
ПКН	–	перетворювач код–напруга
ПКС	–	перетворювача код–струм
ППС	–	підсилювач постійного струму
СК	–	струмовий конвеєр
СпВС	–	спеціалізований відбивач струму
ФНЧ	–	фільтр низьких частот
ФЧХ	–	фазо-частотна характеристика
ЦАП	–	цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Останнім часом в комп'ютерних системах збирання і кодування даних, цифрового опрацювання сигналів, у тестових вимірювальних і комунікаційних системах, спеціалізованих процесорах цифрового оброблення аналогових сигналів активно застосовуються методи прямого цифрового синтезу аналогових сигналів (direct digital synthesis – DDS) [16, 20, 55]. Ці методи також використовуються в медичних засобах візуалізації, оптичних комунікаційних мережах, радарях, сонарах та фазованих антенних решітках, в оптичних каналах із розділенням по довжині хвилі, в опорних генераторах із фазовим автоналаштуванням частоти, в генераторах сигналів для аналізу мереж, а також у вузлах передавання даних по оптоволоконному кабелю у пристроях високочастотного зв'язку [87, 92, 94, 95, 121].

Водночас слід зазначити, що статичні і динамічні характеристики сигналів, що синтезуються, визначаються у першу чергу аналогічними характеристиками ЦАП паралельної дії, а також їх вихідних підсилювачів [18, 21, 80–82, 89, 148]. При цьому використовуються багаторозрядні ЦАП (12–18 розрядів), а також швидкодійні підсилювачі постійного струму (ППС), які мають не тільки широку смугу пропускання на рівні десятків і сотень МГц, а іноді і ГГц, а також і високу швидкість наростання вихідного сигналу (10^3 – 10^4 В/мкс) та широку смугу повної неспотвореної потужності. Слід додати, що вказані підсилювачі повинні мати також низьку адитивну похибку, а також високу лінійність статичної передатної характеристики (похибка лінійності на рівні 10^{-4} – 10^{-3} %). Такі статичні і динамічні характеристики можуть мати двотактні підсилювачі постійного струму (ДППС). Серійні моделі деяких вказаних пристроїв випускаються фірмами Analog Devices, Texas Instruments, Intersil, Linear Technology, Cirrus Logic, ON Semiconductor та ін. [1–9, 22, 24].

Варто зазначити, що можливості покращення точнісних і швидкісних характеристик існуючих ДППС далеко не вичерпано. Так, у ВНТУ з дев'яностих років минулого століття під керівництвом професора О. Д. Азарова здійснюються дослідження та розробки швидкодійних високолінійних ДППС із балансним зворотним зв'язком

[63–69]. Вказані пристрої цілком можуть застосовуватися у системах прямого цифрового синтезу. Водночас, ці дослідження є досить специфічними й оригінальними і до того ж недостатньо розкритими в науково-технічній літературі.

Метою досліджень, описаних у монографії, є покращення статичних і динамічних характеристик ДППС для багаторозрядних ЦАП паралельної дії шляхом застосування запропонованих методів структурно-функціональної організації із використанням балансного зворотного зв'язку для підвищення швидкодії підсилювачів та лінійності їх передатної характеристики, а також зменшення адитивної похибки.

Досягнення зазначеної вище мети потребує розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати відомі методи побудови підсилювачів постійного струму та їх характеристики для багаторозрядних ЦАП паралельної дії, а також їх переваги і недоліки. Визначити перспективні напрямки застосування цих пристроїв, зокрема, для прямого цифрового синтезу аналогових сигналів.

2. Удосконалити існуючий метод структурно-функціональної організації ДППС, який би дозволив покращити їх швидкодію, зокрема, швидкість наростання та смугу повної неспотвореної потужності, а також лінійність передатної характеристики.

3. Запропонувати й проаналізувати новий метод коригування вхідного струму зсуву нуля ДППС і його температурного дрейфу, а також пристрої, що його реалізують. Крім того, запропоновані ДППС повинні мати можливість використовуватися не тільки для виконання функції підсилення потужності, а і як активний фільтр низьких частот замість пасивного в задачах прямого цифрового синтезу.

4. Скласти математичні моделі статичної передатної характеристики, а також малосигнальних коефіцієнтів передачі по струму ДППС із балансным зворотним зв'язком. Передбачити під час вибору і моделювання вказаних пристроїв використання керованих і функціональних генераторів струму з метою порівняння параметрів ідеальних і реальних варіантів схем.

5. Запропонувати і вибрати функціональні і принципові схеми ДППС для багаторозрядних ЦАП із найкращими статичними і дина-

мічних характеристиками, зокрема, з максимальною швидкістю наростання вихідної напруги, мінімальними похибками лінійності та адитивною похибкою.

6. Про моделювати і проаналізувати динамічні характеристики запропонованих ДППС такі як: АЧХ, ФЧХ, швидкість наростання вихідної напруги та смуга повної неспотвореної потужності, а також коефіцієнт гармонік вихідного сигналу в діапазоні частот.

7. Викласти рекомендації щодо практичної реалізації швидкодіючих ДППС із високою лінійністю та низькими адитивними похибками і мінімальним температурним дрейфом, які доцільно було б використовувати у багаторозрядних ЦАП, а також спеціалізованих системах прямого цифрового синтезу, що містять їх у своєму складі.

8. Розглянути приклади застосування розроблених ДППС для багаторозрядних ЦАП паралельної дії у складі аналізатора параметрів звукових трактів (АПЗТ). Оцінити характеристики розглянутого пристрою.

Автори будуть вдячні за відгуки на монографію, а також за побажання щодо розвитку подальших досліджень.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ СТРУМУ ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ЦАП І ГАЛУЗЕЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Методи структурно-функціональної організації пристроїв і систем, в яких використовуються багаторозрядні паралельні ЦАП

Цифро-аналогові перетворювачі – це пристрої, що генерують вихідну аналогову величину $A_{вих}$, значення якої є еквівалентним цифровому коду, котрий надходить на вхід перетворювача.

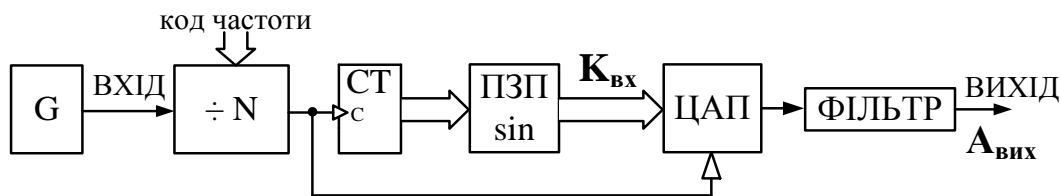
ЦАП поділяються на послідовні (сигма-дельта Σ - Δ) [11, 18] і паралельні [83, 126, 148], причому останні використовуються частіше завдяки більш високій швидкодії та точності. Вони містять елементи як цифрової, так і аналогової техніки. Аналоговими елементами в них є генератори розрядних струмів, підсилювачі постійного струму, аналогові ключі (комутатори), а також резистивні або конденсаторні матриці і т. д.

Багаторозрядні паралельні ЦАП широко застосовуються у різноманітних перетворювачах форм інформації (ПФІ). До них належать, зокрема, системи обробки, відтворення та аналізу звукових сигналів та трактів, аудіокодеки, системи обробки відео та розпізнавання даних, калібрування датчиків та інших вимірювальних пристроїв, схеми управління двигунами, системи розподілу даних, пристрої відображення, цифрові потенціометри, програмоване радіо (SDR), атенюатори з цифровим керуванням тощо [21, 24, 79, 91]. Останнім часом до галузей застосування ЦАП, що активно розвиваються, можна додати також системи прямого цифрового синтезу аналогових сигналів.

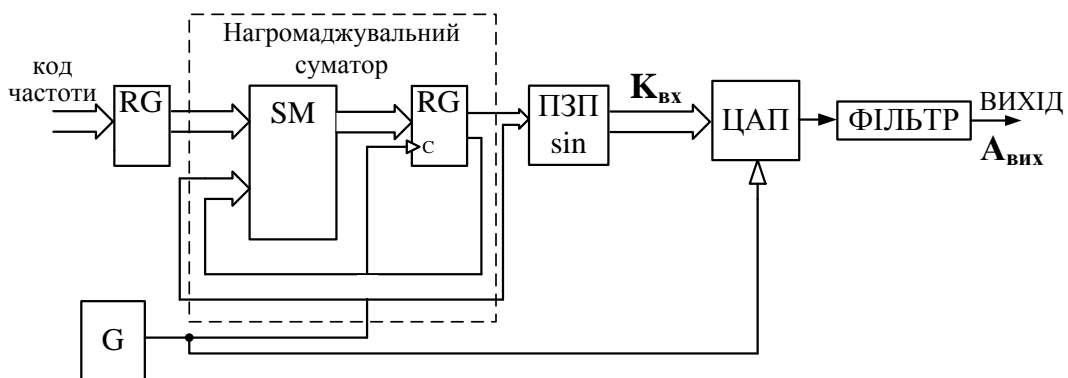
Задача прямого цифрового синтезу (DDS) – отримати на виході пристрою аналоговий сигнал заданої форми й частоти. Оскільки в системах DDS формування проміжного сигналу відбувається в цифровій формі, цілком очевидно є необхідність цифро-аналогового перетворення. Це означає, що в структурі DDS повинен бути ЦАП. У будь-якому випадку на виході ЦАП має бути фільтр низьких частот (ФНЧ)

для придушення високочастотних гармонік вихідного спектра, що з'являються з періодичністю тактової частоти (clock frequency). Для отримання, наприклад, синусоїдального сигналу на вхід ЦАП потрібно подати послідовність відліків функції синус із певною частотою дискретизації [94].

Найпростіший DDS складається із двійкового лічильника СТ, який формує адресу для постійного запам'ятовувального пристрою (ПЗП), куди записано таблицю кодів одного періоду функції \sin . Відліки з виходу ПЗП надходять на ЦАП, який формує на виході синусоїдальний сигнал, що проходить на вихід через ФНЧ (рис. 1.1а). Для зміни частоти тут використовується дільник зі змінним коефіцієнтом ділення N , на вхід якого надходить тактовий сигнал з опорного генератора G .



а)



б)

Рисунок 1.1 – Структурні схеми пристроїв прямого цифрового синтезатора

а) найпростіший DDS на базі лічильника;

б) із використанням нагромаджувального суматора

Така структура DDS має певні недоліки, основним з яких є погана здатність до переналаштування по частоті через використання дільника тактової частоти. Це спричиняє неоптимальне використання швид-

кісних характеристик ЦАП, які розкриваються в певній мірі на максимальній вихідній частоті [121].

Недоліки розглянутої структури зникають при заміні адресного лічильника ПЗП на нагромаджувальний суматор, як показано на рисунку 1.1б, що складається зі звичайного суматора та регістра RG та дозволяє пристрою функціонувати на постійній частоті дискретизації, близькій за значенням до максимальної частоти ЦАП.

Переважає більшість пристроїв DDS випускаються у вигляді інтегральних мікросхем, зокрема, фірмою Analog Devices. Параметри деяких з них наведено у таблиці 1.1 [3,5,9,13–15].

Таблиця 1.1 – Параметри серійних пристроїв DDS

Модель	Тактова частота	Роздільна здатність ЦАП	Максимальний вихідний струм
AD9851	180 МГц	10	20 мА
AD9102	180 МГц	14	8 мА
AD9913	250 МГц	10	4,6 мА
AD9852	300 МГц	12	10 мА
AD9854	300 МГц	12	10 мА
AD9859	400 МГц	10	20 мА
AD9956	400 МГц	14	10 мА

DDS можуть використовуватися не тільки для генерування синусоїдальних сигналів, але й трапецеїдальних та пілкоподібних сигналів. Сигнал у DDS генерується з цифровою точністю, а його цифрові пристрої практично не схильні до температурного дрейфу та старіння. Для підвищення точності, а також розширення функціональних можливостей таких систем, використовуються декілька ядер DDS в одному кристалі [3, 5, 8].

При цьому єдиним елементом, який має властиву аналоговим схемам нестабільність і неточність, є ЦАП.

Слід відзначити, що саме аналогові елементи, що входять до складу ЦАП, практично повністю визначають його якісні та експлуатаційні характеристики. Основну роль при цьому відіграють точність підбору номіналів резисторів або конденсаторів для відповідних матриць

і параметрів перетворювача, а також параметри підсилювача постійного струму (ППС) [120, 125]. Водночас, саме характеристики підсилювача в основному визначають похибки зсуву нуля та лінійності ЦАП.

1.2 Вимоги щодо статичних і динамічних характеристик підсилювачів струму для багаторозрядних ЦАП у задачах прямого цифрового синтезу

Для того, щоб сформулювати вимоги щодо динамічних і статичних характеристик підсилювачів, що використовуються на виході ЦАП, треба проаналізувати існуючі принципи їх побудови у вигляді перетворювачів код–напруга (ПКН) і код–струм (ПКС). ПКН традиційно реалізуються на основі резистивних і конденсаторних матриць. Перетворювачі код–струм також можуть бути побудовані на основі матриць вищезгаданих типів, переважно за схемою в інверсному вмиканні [63]. Іншим шляхом є побудова ПКН і ПКС з використанням генераторів розрядних струмів. Причому, у цьому випадку є два варіанти підсумовування розрядних струмів: однакових і зважених. У першому випадку в ролі суматора доцільно використовувати матрицю сходинкового типу, у другому – комбінованого типу.

Істотним є питання методу підключення операційного підсилювача (ОП) до виходів ПКН або ПКС із метою буферизації від навантаження. У випадку, якщо ПКН або ПКС реалізовано на резистивних матрицях, то можна використовувати варіанти, які показано на рисунку 1.2а-в. Слід також відзначити, що ФНЧ можна реалізувати постановкою конденсатора C_f паралельно R_m .

У першому варіанті (рисунок 1.2а) забезпечується повторення вихідної напруги ОП порівняно з вихідною напругою $U'_{вих}$ ПКН. При цьому висуваються надвисокі вимоги до статичних і динамічних характеристик ОП, адже потенціал його вхідного каскаду змінюється в широких межах і при стрибкоподібному вхідному сигналі виходить з режиму робочої точки і потім порівняно довго входить у режим рівноваги. Саме тому така схема вмикання ОП з ЦАП є не вигідною.

Якщо використовуються схеми, що показані на рисунках 1.2б,в має місце масштабування вихідної напруги за допомогою масштабового резистора R_m . У випадку використання конденсаторного ПКН ОП підключається так, як показано на рисунку 1.2г.

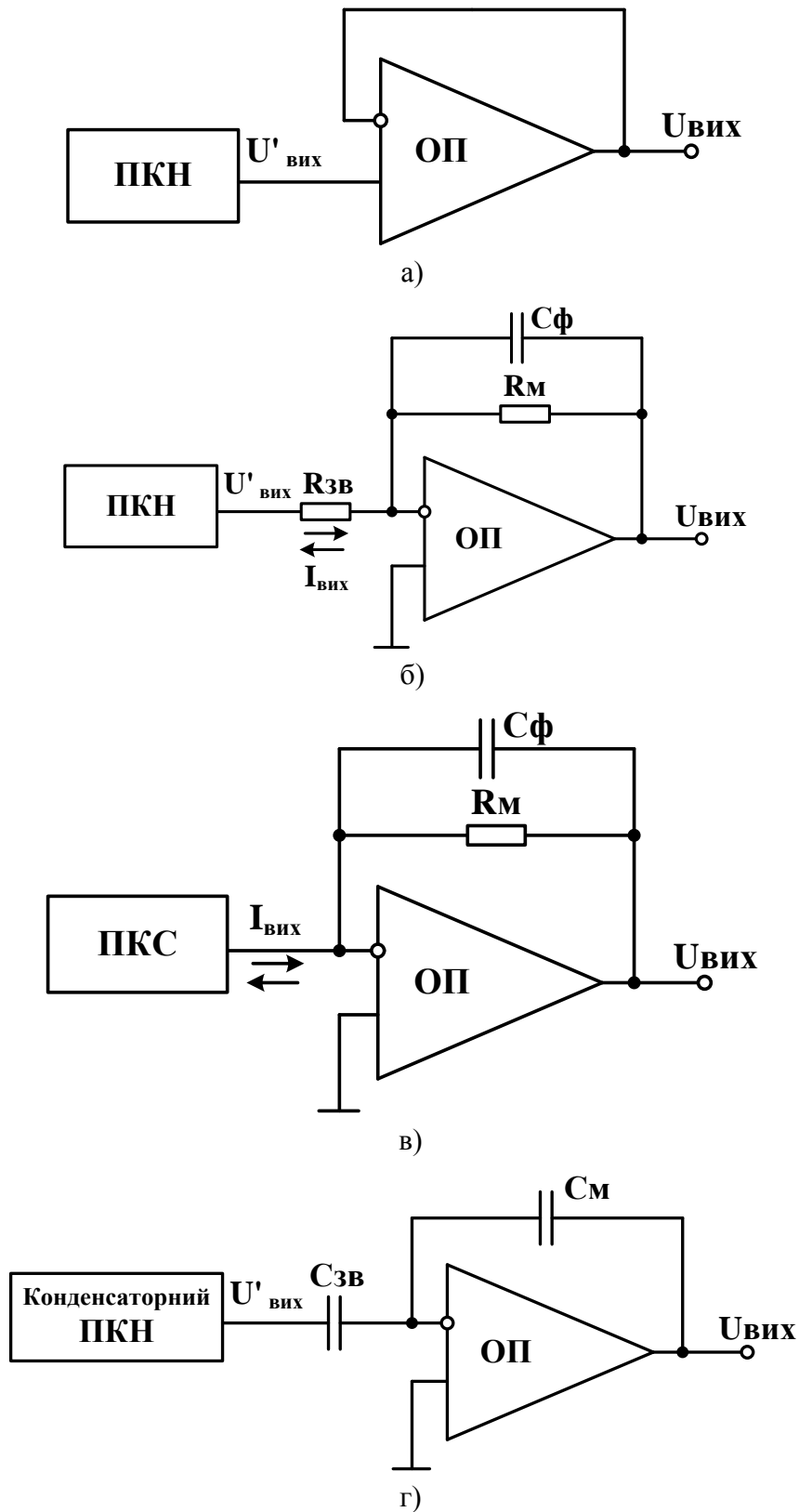


Рисунок 1.2 – Схеми підключення ОП до виходу ЦАП:
 а) безпосереднє з'єднання буфера напруги з виходом ПКН;
 б) через резистор зв'язку; в) з'єднання виходу ПКС зі входом перетворювача «струм–напруга»; г) підключення ПКН через конденсатор зв'язку

ЦАП на базі ПКС, схему якого показано на рис. 1.3а, має максимальну швидкодію та найвищу лінійність характеристики перетворення $U_{вих} = f(K_{ex})$ і мінімальні похибки суперпозиції.

Вихідна напруга такого ЦАП розраховується за формулою:

$$U_{вих} = U_{on} \cdot R_M \cdot \sum_0^{n-1} a_i I_i.$$

Якщо ж ЦАП побудовано на базі ПКН (див. рис. 1.3б) його вихідна напруга

$$U_{вих} = U_{on} \cdot \frac{R_M}{2R} \cdot \sum_0^{n-1} a_i 2^{-i}.$$

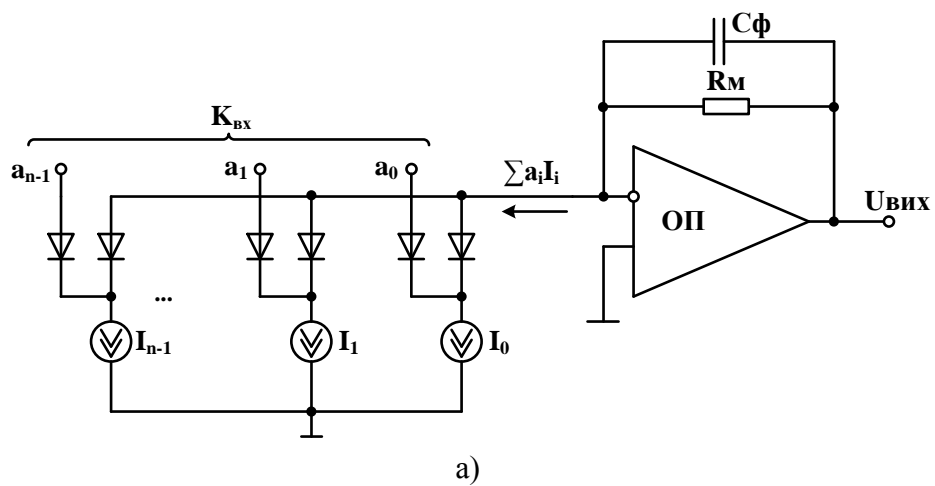
Такий ЦАП має задовільну швидкодію та лінійність характеристики перетворення.

Якщо застосовується конденсаторна матриця (див. рис. 1.3в), то вихідна напруга

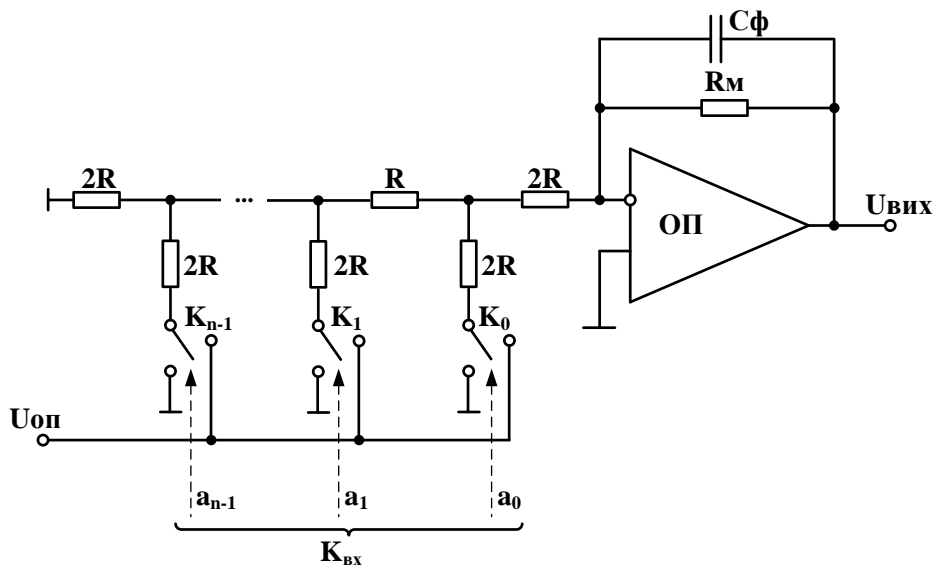
$$U_{вих} = U_{on} \cdot \frac{2C}{C_M} \cdot \sum_0^{n-1} a_i 2^{-i}.$$

Зазвичай функціонування ЦАП для генерування аналогових сигналів, що відповідають заданим функціям, реалізується програмним шляхом. Водночас різниця між реальним сигналом $A_{вих}$ з виходу ЦАП та вхідними кодами заданої функції визначається низкою похибок.

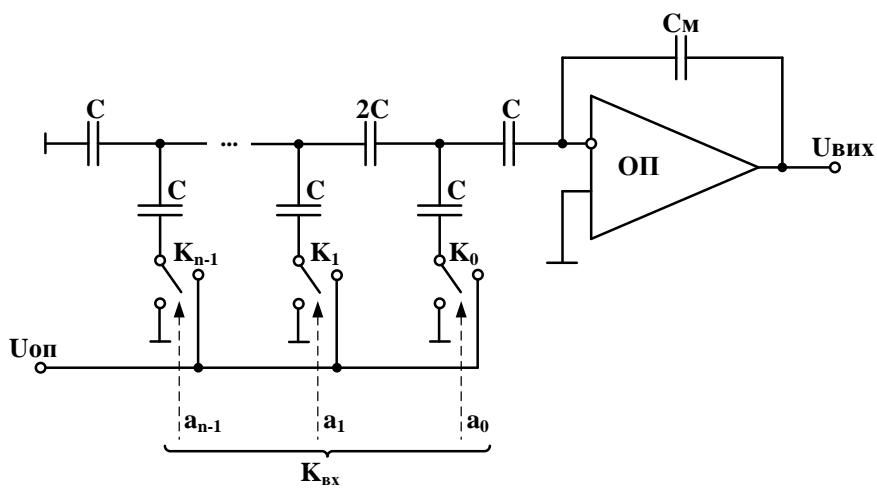
При послідовному зростанні значень вхідного цифрового сигналу $K_{вх}(t)$ від 0 до $2N-1$ через одиницю молодшого розряду (ОМР) вихідний сигнал $A_{вих}(t)$ утворить східчасту криву. Таку залежність називають характеристикою перетворення ЦАП. Під час відсутності апаратних похибок середні точки сходинок розташовані на ідеальній прямій, якій відповідає ідеальна характеристика перетворення. Реальна характеристика перетворення (ХП) може істотно відрізнитися від ідеальної розмірами та формою сходинок, а також розташуванням в площині координат. Для кількісного опису цих відмінностей існує низка параметрів [63, 71].



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 – Варіанти реалізації ЦАП на базі: а) ПКС; б) резистивної матриці; в) конденсаторної матриці

Призначенням підсилювача в структурі ЦАП є формування вихідного сигналу у вигляді напруги або струму, який задовольняє вимоги цифро-аналогової системи до амплітуди і потужності при заданому R_n . При цьому похибки ППС повинні бути набагато нижчими (у 3–5 разів) ніж власні похибки ЦАП.

Традиційно для побудови вихідного підсилювача ЦАП використовується інтегральний диференційний підсилювач, фрагмент схеми якого показаний на рис. 1.4 [10, 86, 125]. Спрощена схема диференційного підсилювача з блоком коригування зсуву нуля (рис. 1.4) містить диференційний вхідний каскад на транзисторах Дарлінгтона Q4, Q5, Q6, Q8, а також транслятор рівня на транзисторах Q7 і Q9 та коригуючий конденсатор C_k . Робочі точки задаються рівнями робочих струмів I_p .

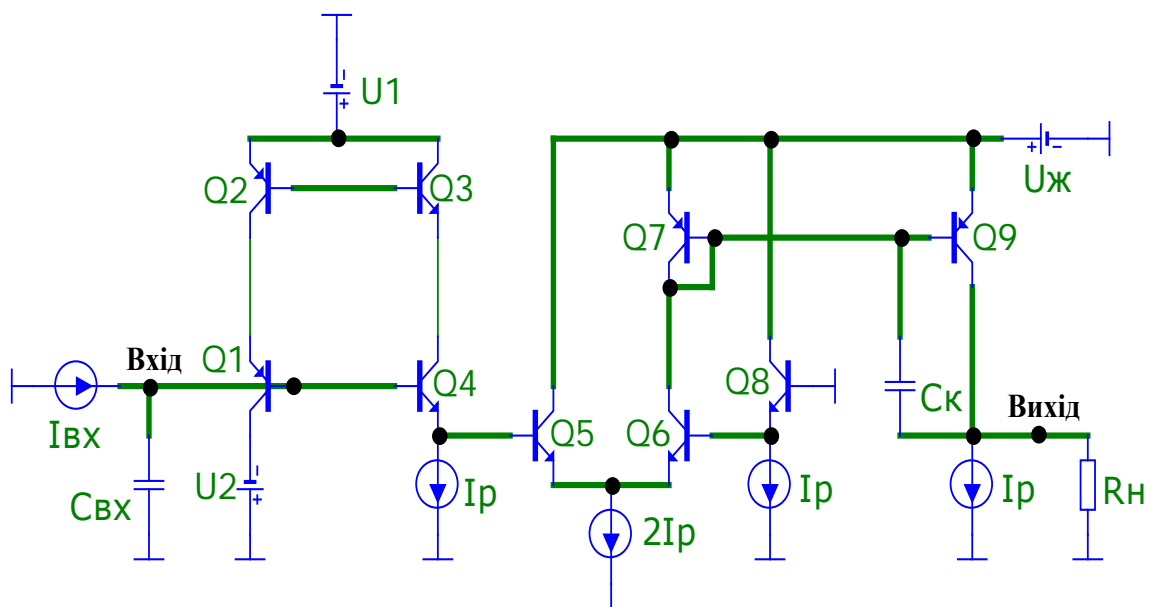


Рисунок 1.4 – Спрощена схема диференційного підсилювача постійного струму з блоком коригування зсуву нуля

У випадку застосування інтегральних транзисторів фірми Intersil HFA3036 [144] АЧХ розглянутої схеми має вигляд, наведений на рисунку 1.5.

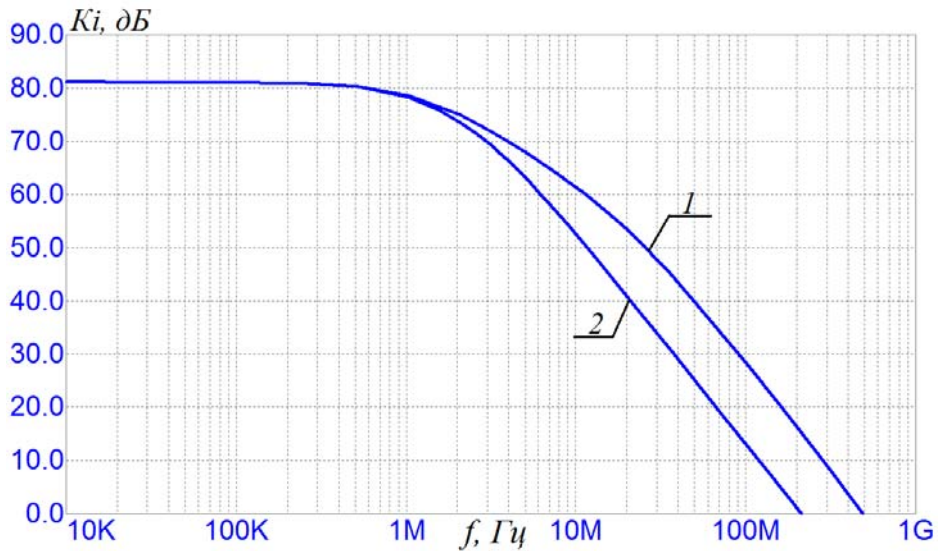
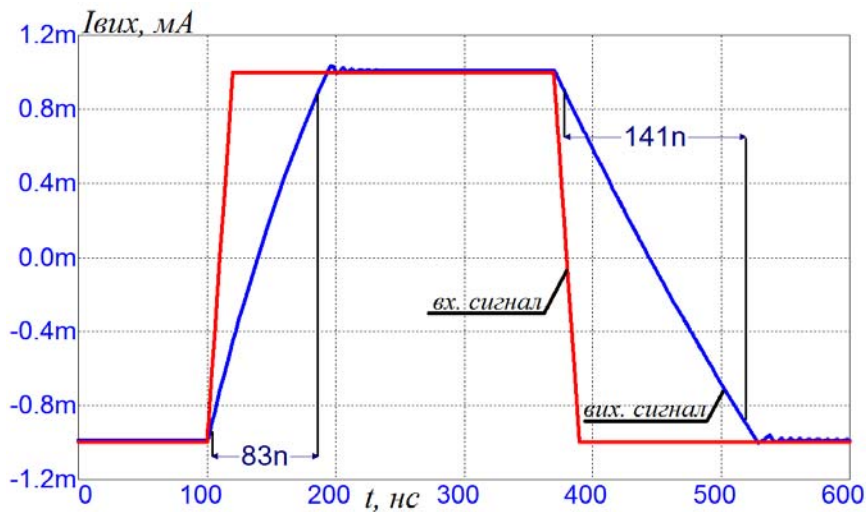


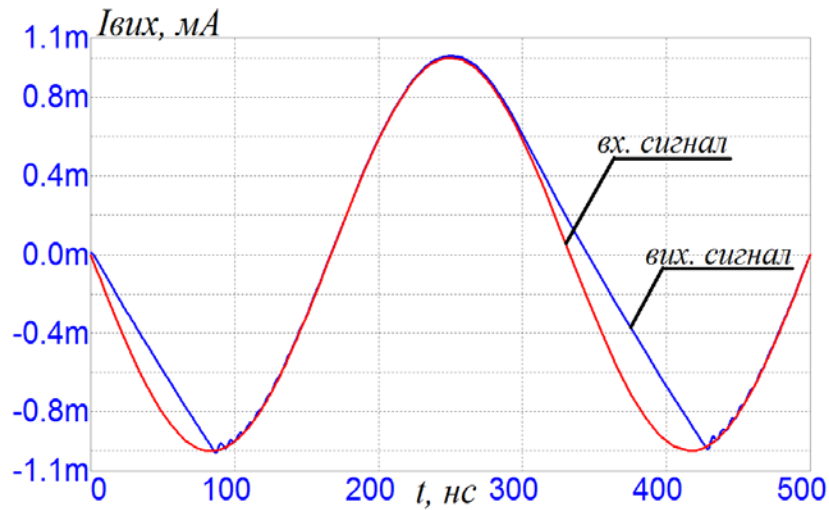
Рисунок 1.5 – АЧХ одноканальних диференційних підсилювачів

Тут криві 1 та 2 відображають АЧХ для схеми на рисунку 1.4 при значеннях вхідної ємності $C_{вх}$ 0 і 2 пФ відповідно. Як видно з наведених графіків схема має коефіцієнт підсилення на рівні 83 дБ. Наявність навіть невеликої вхідної ємності $C_{вх} \approx 2$ пФ звужує смугу пропускання до 130 МГц, як це показано на кривій 2. Динамічні характеристики цієї схеми показані на рис. 1.6.



а)

Рисунок 1.6 – Динамічні характеристики перетворювача струм–напруга:
а) перехідна характеристика; б) спотворення аналогового сигналу на виході ППС



б)

Рисунок 1.6 (продовження)

При цьому смуга повної неспотвореної потужності сягає значень 1,5–2 МГц. Паразитні ємності колектор–база транзисторів, а також наявність C_k істотно впливають на динамічні характеристики ППС. Вихідна напруга та час заряду t_z конденсатора C_k такого підсилювача відповідає:

$$U_{вих} = \frac{I_p \cdot t_z}{C_k}, \text{ а } t_z = \frac{C_k \cdot U_{вих}}{I_p}$$

де I_p – робочий струм, саме він визначає час заряджання конденсатора C_k і швидкість зміни вихідного сигналу.

Аналізуючи наведене, можна зробити такі висновки щодо традиційних одноктактних диференційних підсилювачів:

1) швидкість наростання вихідного сигналу (напруги) обмежена значення I_p , а його зростання призведе до збільшення споживаної потужності;

2) смуга повної неспотвореної потужності відповідно також обмежена I_p , а її ширина значно (на 1–2 порядки) менша, ніж ширина малосигнальної АЧХ при одиничному підсиленні;

3) застосування відомого методу коригування струму зсуву нуля додатково призводить до звуження смуги пропускання (1,5–2 рази);

4) схема є критичною до наявності ємності на виході генератора сигналу, навіть мінімального значення (одиниці пФ).

Таким чином все перераховане вимагає інших принципів структурно-функціональної організації ППС та дозволяє сформулювати вимоги до характеристик підсилювачів, що можуть застосовуватися в багатозрядних паралельних ЦАП в системах DDS:

1) статичні:

• висока лінійність передатної характеристики

$\delta I_{л} \approx (0,1 - 0,2) \cdot 2^{-n} \cdot 100\%$ ДППС, який використовується як вихідний ОП для ЦАП, де n – число розрядів ЦАП (16–18);

• низький вхідний опір $r_{вх} \approx r_e = \frac{\varphi_t}{I_e} \approx 26 \text{ Ом}$, де $I_e = 1 \text{ мА}$;

• середній вхідний опір $r_{вх} \approx r_e \cdot \beta$, де β – коефіцієнт передачі по струму для схеми «загальний емітер»;

• мінімальний струм зсуву нуля $I_0 \leq 10 - 100 \text{ нА}$;

• мінімальна напруга зсуву нуля $\Delta U_0 \leq 100 - 200 \text{ мкВ}$ (для 10-вольтової шкали ДППС);

• достатній рівень коефіцієнта передачі струму K_i для забезпечення потрібної похибки масштабу $\delta U_{м} \leq 0,2 \cdot 2^{-n} \cdot 100\%$ за умови зміни опору навантаження;

• температурний дрейф вхідного струму зсуву нуля $\Delta I_0 \leq 10 \text{ нА}/^\circ\text{C}$;

2) динамічні:

• широка смуга пропускання $\sim 0-1 \text{ ГГц}$;

• смуга повної неспотвореної потужності $f_{н.п.} \sim 0-100 \text{ МГц}$;

• симетричність переднього і заднього фронтів ($t_{\phi}^+ \approx t_{\phi}^-$) вихідного сигналу при подачі на вхід підсилювача прямокутного імпульсу;

• висока швидкість наростання вихідного сигналу (напруги) $V_{U_{вих}} \geq 1000 - 2000 \text{ В} / \text{мкс}$;

• відношення сигнал/шум $\geq 90 \text{ дБ}$.

1.3 Широкопсмугові підсилувачі постійного струму

Широкопсмуговим називається підсилувач, який забезпечує однакове підсилення у широкому діапазоні частот, близьких до граничної частоти транзистора f_m .

Зазвичай розширення смуги пропускання здійснюється шляхом спеціальної схемно-функціональної організації. Так під час проектування широкопсмугових монолітних схем підсилувачі струму мають беззаперечні переваги над підсилувачами напруги [90, 93, 120]. Це пов'язано з тим, що більшість паразитних параметрів являють собою ємності. Тому значного розширення смуги пропускання можна досягти при переході в базис струмів. При цьому зникає прикладення великих напруг до паразитних ємностей. Транзистор як підсилувач струму може успішно використовуватися до граничної частоти f_m . Навіть якщо потрібно підсилити напругу, її можна перетворити в струм і на виході підсилувача знову отримати напругу.

При цьому збільшення коефіцієнта передачі здійснюється шляхом збільшення кількості послідовно включених каскадів. Коефіцієнт підсилення в такому випадку розраховується як добуток коефіцієнтів передачі каскадів

$$K(j\omega) = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n,$$

а фаза як відповідна сума

$$\varphi(j\omega) = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n.$$

Паразитний зворотний зв'язок через колекторно-базову ємність є найвагомішою причиною обмеження смуги пропускання підсилувального каскаду із загальним емітером. У диференційному підсилувальному каскаді вплив цієї паразитної ємності значно зменшується шляхом застосування мостової схеми нейтралізації, як показано на рис. 1.7а [99, 120, 150].

ЛІТЕРАТУРА

1. 1.1 mA 200 MHz Current Feedback Op Amp with Enable Feature / ON Semiconductor // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.onsemi.ru.com/pub_link/Collateral/NCS2501-D.PDF.
2. 100MHz Current Feedback Amplifier/ Linear Technology // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1223fb.pdf>.
3. 2.7 GHz DDS-Based AgileRF Synthesizer / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9956.pdf>.
4. 200MHz Low-Power Current Feedback Amplifiers / Intersil // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/el51/el5160-161-260-261-360.pdf>.
5. 400 MSPS, 10-Bit, 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9859.pdf>.
6. 500MHz Low Power Current Feedback Amplifiers with Enable / Intersil // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/el51/el5162-163-262-263-362.pdf>.
7. 600MHz Current Feedback Amplifiers with Enable / Intersil // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/el51/el5164-165-364.pdf>.
8. AD5530/AD5531 Serial Input, Voltage Output 12-/14-Bit Digital-to-Analog Converters / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5530_5531.pdf.
9. AD5601/AD5611/AD5621 2.7 V to 5.5 V, <100 μ A, 8-/10-/12-Bit nanoDAC / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5601_5611_5621.pdf.
10. Alan B. Grebene. Bipolar and MOS analog integrated circuit design / Alan B. Grebene. – New Jercy : Wiley Classic Library, 2002. – 915 p.
11. Application Note AN-283: Sigma – Delta ADCs and DACs // Application Reference Manual. – Analog Devices, 1993. – 16 p.
12. Capofreddi P. D. The use of linear models in A/D converter testing / P. D. Capofreddi, P. D. Wooley // IEEE Trans. Circuit Syst. I. – December 1997. – CAS-44. – P.1105–1113.

13. CMOS 180 MHz DDS/DAC Synthesizer / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9851.pdf>.
14. CMOS 300 MSPS Complete DDS / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9852.pdf>.
15. CMOS 300 MSPS Quadrature Complete DDS / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9854.pdf>.
16. Direct Digital Synthesis Primer / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/direct_digital_synthesis.pdf.
17. Hans Camenzind. 700 Series 20v Bipolar Array Design Manual / Hans Camenzind. – 2005. – 192 p.
18. Hans Camenzind. Designing Analog Chips / Hans Camenzind. – 2005. – 242 p.
19. High Output Current Differential Driver / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD815.pdf>.
20. Jouko Vankka. Halonen Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications / Jouko Vankka, Kari A.I. Halonen // The Springer International Series in Engineering and Computer Science. – Springer, 2001. – 193 p.
21. Jung Walt. Op Amp applications handbook / Walt Jung. – Analog Devices series : Newnes, 2005. – 878 p.
22. Low Power 10MHz Current Feedback Amplifier Triple 1.4 GHz Current Feedback Op Amp with Enable Feature / Linear Technology // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/lt1217.pdf>.
23. Low Power 250 MSPS 10-Bit DAC 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9913.pdf>.
24. Low Power Video Op Amp with Disable / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD810.pdf>.
25. Low Power, 14-Bit, 180 MSPS, Digital-to-Analog Converter and Waveform Generator / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим

доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9102.pdf>.

26. Patent 1544921 USA, H03F 3/28. Amplifier circuits / Robert C. Mathes assignor to Western Electronic Company. – № 337565 ; filed 12.11.1919 ; publ. 07.07.1925.

27. 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 03.12.1974.

28. Patent 3986134 USA, H03F 3/16. Push-pull amplifier circuitry / Kenji Yokoayama, Nippon Gakki Seizo Kabushiki Kaisha. – № 605172 ; filed 15.08.1975 ; publ. 12.10.1976.

29. Patent 4031481 USA, H03F 3/16. Transistor amplifier / Tadao Yoshida assignor to Sony Corporation. – № 578195 ; filed 16.05.1975 ; publ. 21.06.1977.

30. Patent 4274059 USA, H03F 3/30. Single ended Push-pull amplifier / Yasuhisa Okabe assignor to Victor Company of Japan. – № 963901 ; filed 27.11.1978 ; publ. 16.06.1981.

31. Patent 4335360 USA, H03F 3/16, H03F 3/30. Class AB push-pull amplifiers / Merve V. Hoover. – № 97040 ; filed 23.11.1979 ; publ. 15.06.1982.

32. Patent 4384261 USA, H03F 3/30. Class A complementary single-ended push-pull amplifier / Kenji Yokoyama assignor to Nippon Gakki Seizo Kabushiki Kaisha. – № 279251 ; filed 01.07.1981 ; publ. 17.05.1983.

33. 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 ; publ. 21.02.1984.

34. Patent 4595883 USA, H03F 3/30, H03F 3/45. Emitter-follower type single-ended push-pull circuit / Kazuaki Nakayama assignor to Pioneer Electronics Corporation. – № 647789 ; filed 06.09.1984 ; publ. 17.06.1986.

35. 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 ; publ. 13.12.1988.

36. Patent 4827223 USA, H03F 3/30. Buffer amplifier / William H. Gross assignor to Elantec. – № 171035 ; filed 21.03.1988 ; publ. 02.05.1989.

37. Patent 4833424 USA, H03F 3/26. Linear amplifier with transient currents boost / John W. Wright assignor to Elantec. – № 177511 ; filed 04.04.1988 ; publ. 23.05.1989.

38. 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 ; publ. 12.02.1991.

39. 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 ; publ. 17.09.1991.

40. Patent 5218321 USA, H03F 3/26. Low offset unity gain buffer amplifier / Steven R. Jost assignor to Harris Corporation. – № 717347 ; filed 18.06.1991 ; publ. 08.06.1993.

41. 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 ; publ. 21.06.1994.

42. Patent 5339042 USA, H03F 3/45. Input stage offset compensation device / Jean-Claude Kaire, Bernard Majoux, Serge Pontarollo assignor to SGS-Tomson Microelectronics S. A. – № 10605 ; filed 28.01.1993 ; publ. 16.08.1994.

43. 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 ; publ. 21.03.1995.

44. 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 ; publ. 23.04.1996.

45. 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 ; publ. 30.04.1996.

46. 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 ; publ. 04.08.1998.

47. Patent 6529078 USA, H03F 3/45. Low-distortion transimpedance amplifier structures and methods / Royal A. Gosser, Edward Perry Jordan assignor to Analog Devices. – № 09/935263 ; filed 22.08.2001 ; publ. 04.03.2003.

48. Patent 6535064 USA, H03F 3/26. Current-feedback amplifier exhibiting reduced distortion / Barry Harvey assignor to Elantec Semiconductor. – № 10/152451 ; filed 21.05.2002 ; publ. 18.03.2003.

49. 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 ; publ. 11.05.2004.

50. 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 ; publ. 22.04.2008.

51. Practical Analog Design Technique. / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-05/Web_Ch3_final.pdf.

52. Sedra A. S. A second-generation current conveyor and its applications / A. S. Sedra, K. C. Smith // IEEE Transactions on Circuit Theory. – Feb. 1970. – CT-17. – P. 132-134.

53. Single Supply, Low Power Triple Video Amplifier / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD813.pdf>.

54. Smith K. C. The current conveyors – a new circuit building block / K. C. Smith, A. S. Sedra // Proc. IEEE. – Aug. 1968. – Vol. 56. – P. 1368-1369.

55. Stanford Research Group Прямой цифровой синтез / Stanford Research Group // РадиоЛоцман. – 2012. – № 10. – С. 21-27.

56. Teplytskyi Mykhailo. Linearity errors of the push-pull current amplifiers with separate intermediate cascade / Oleksiy Azarov, Mykhailo Teplytskyi, Natalya Bilichenko // Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics – Romania, 2014. – Tome LX (LXIV), Fasc. 1 – P. 47-58.

57. Triple 1.1 mA 200 MHz Current Feedback Op Amp with Enable Feature / ON Semiconductor // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCS2530-D.PDF.

58. Triple 1.4 GHz Current Feedback Op Amp with Enable Feature / ON Semiconductor // Офіційний сайт. – Режим доступу: http://datasheet.eeworld.com.cn/pdf/ONSEMI/171479_NCS2535DTG.pdf.

59. 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. – № 4268283 ; заявл. 26.06.87 ; опубл. 30.01.89, Бюл. № 4.

60. А. с. 1497713 СССР, Н 03 F 3/26. Двухтактный усилитель мощности / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Марценюк, В. П. Волков. – № 4180472 ; заявл. 12.01.87 ; опубл. 30.07.89, Бюл. № 28.

61. 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. – № 4402589 ; заявл. 01.04.88 ; опубл. 15.12.89, Бюл. № 46.

62. А. с. 1739476 СССР, Н 03 F 3/26. Усилитель тока / А. Д. Азаров, Ю. М. Степайко, Е. М. Арапова, Т. А. Савчук. – № 4748817 ; заявл. 19.09.89 ; опубл. 07.06.92, Бюл. № 21.

63. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Кадук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2010. – 150 с.

64. Азаров О. Д. Відбивачі струму для аналогових пристроїв із покращеними статичними і динамічними характеристиками / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 2. – С. 48–55.

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

66. Азаров О. Д. Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою / О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, В. А. Гарнага // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 4. – С. 20–24.

67. Азаров О. Д. Динамічні характеристики вхідного комплементарного каскаду двотактного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління – 2010. – № 3(31). – С. 5–13.

68. Азаров О. Д. Методи задання робочих точок проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – № 1(25). – С. 6–14.

69. Азаров О. Д. Методи симетрування коефіцієнтів передачі проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму /

О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2009. – № 3. – С. 1–9.

70. Азаров О. Д. 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.

71. Азаров О. Д. Обчислювальні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів. : монографія / О. Д. Азаров, О. О. Коваленко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2006. – 146 с.

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

73. Азаров О. Д. Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №2 (21). – С. 4–11.

74. Азаров О. Д. 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.

75. Азаров О. Д. Похибки лінійності прецизійних перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – №1 (23). – С. 24–30.

76. Азаров О. Д. Схемна організація вхідного комплементарного каскаду двотактного симетричного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – № 3(27). – С. 6–13.

77. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.

78. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, О. О. Решетнік, С. В. Богомолів // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2007. – № 1. – С. 1–8.

79. Аналізатори параметрів звукових трактів АПЗТ-02 і АПЗТ-А3 / Науково-технічний центр ВНТУ «Аналого-цифрові системи» // Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://ot.vntu.edu.ua/images/documents/katalogazs-ukr.pdf>.

80. Багацкий В. А. Преобразователи формы информации с обработкой данных / В. А. Багацкий, Ю. М. Грешищев, И. В. Самус. – К. : Наукова думка, 1992. – 264 с.

81. Багацкий В. А. Современные аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи / В. А. Багацкий. – К. : Знання, 1980. – 21 с.

82. Багацький В. А. Теорія побудови, проектування та практична реалізація аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів загального застосування : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.13.08 / В. А. Багацький. – К., 1995. – 35с.

83. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 528 с.

84. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : АСТ, 2006. – 991 с.

85. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев. – К. : Наукова думка, 1987. – 280 с.

86. Гребен А. Б. Проектирование аналоговых интегральных схем / А. Б. Гребен. – М. : Энергия, 1976. – 256 с.

87. Дингес С. Цифровые вычислительные синтезаторы для фазированных антенных решеток / С. Дингес, Н. Егоров, В. Кочемасов // Электроника: НТБ. – 2014. – № 1. – С. 160–167.

88. Достал И. Операционные усилители / И. Достал. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

89. Кондалев А. И. Вопросы проектирования преобразователей формы информации / А. И. Кондалев. – К. : Наук. думка, 1977. – 242 с.

90. Коннели Дж. Аналоговые интегральные схемы. Элементы, схемы, системы, применение / Дж. Коннели. – М. : Мир, 1977. – 430 с.

91. Крекрафт Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крекрафт, С. Джерджли. – М. : Техносфера, 2005. – 360 с.

92. Кронин Б. Простое и эффективное формирование сигналов при помощи синтезаторов прямого цифрового синтеза частот / Брэндан Кронин // Беспроводные технологии. – 2012. – № 1(26). – С. 59–64.

93. Ламекин В. Ф. Широкополосные интегральные усилители / Под ред. С. Я. Шаца. – М. : Сов. Радио, 1980. – 223 с.

94. Мерфи Е. Всё о синтезаторах DDS / Е. Мерфи, К. Слэттери // Компоненты и технологии. – 2005. – № 1. – С. 1–5.

95. Мерфи Е. Прямой цифровой синтез (DDS) в тестовом, измерительном и коммуникационном оборудовании / Е. Мерфи, К. Слэттери // Компоненты и технологии. – 2006. – № 8. – С. 1–4.

96. Метод підвищення навантажувальної здатності високолінійних двотактних буферних пристроїв напруги / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, С. В. Богомолів, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 3(25). – С. 47–54.

97. Моделі АЧХ і ФЧХ двотактних підсилювачів струму на основі схем заміщення транзисторів у форматі PSPICE / О. Д. Азаров, І. В. Сологуб, Є. С. Сентябов, М. Ю. Теплицький // XXXIX науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – Режим доступу: http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2010/initki/txt/tepluckuy_cologyb_centybov.pdf.

98. Моделі АЧХ і ФЧХ інтегральних біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, С. Ш. Каців [та ін.] // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – № 4(28). – С. 5–15.

99. Наундорф У. Аналоговая электроника: Основы, расчет, моделирование. / Уве Наундорф ; пер. с нем. М. М. Ташлицкого // М. : Техносфера, 2008. – 472 с.

100. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

101. Пат. 39796 Україна, (51) МПК (2009), H03K 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, О. О. Решетнік, С. В. Богомолів; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200812467 ; заявл. 23.10.2008 ; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5.

102. Пат. 42958 Україна, (51) МПК (2009), H03K 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний універси-

тет. – № u200902332 ; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.

103. Пат. 46178 Україна, (51) МПК (2009), H03K 5/00, G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, В. А. Гарнага; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200906445 ; заявл. 19.06.2009 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23.

104. Пат. 50876 Україна, (51) МПК (2009), H03K 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, С. В. Богомоллов; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200913704 ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.

105. Пат. 53415 Україна, (51) МПК (2009), H03K 5/00, G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, С. В. Богомоллов; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201002875 ; заявл. 15.03.2010 ; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.

106. Пат. 61272 Україна, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, В. Є. Яцик, М. Ю. Теплицький, В. А. Гарнага; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201100500 ; заявл. 17.01.2011 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

107. Пат. 61319 Україна, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, В. А. Гарнага, В. Є. Яцик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201102980 ; заявл. 14.03.2011 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

108. Пат. 63342 Україна, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двонаправлений відбивач струму / О. Д. Азаров, М. В. Пономарьова, В. А. Гарнага, М. Ю. Теплицький; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201101976 ; заявл. 21.02.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

109. Пат. 63382 Україна, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, В. Є. Яцик, М. Ю. Теплицький, В. А. Гарнага; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201102355 ; заявл. 28.02.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

110. Пат. 65020 Україна, (51) МПК, Н03К 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач постійного струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, О. В. Дудник; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201105008 ; заявл. 20.04.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.

111. Пат. 66030 Україна, (51) МПК (2011.01), Н03К 5/19 (2006.01), G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, Л. В. Крупельницький, М. Ю. Теплицький, М. В. Пономарьова; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201105552 ; заявл. 04.05.2011 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24.

112. Пат. 68720 Україна, (51) МПК, Н03К 5/22 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01), Н03F 3/26 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, М. В. Пономарьова; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201110892 ; заявл. 12.09.2011 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

113. Пат. 84381 Україна, (51) МПК, Н03К 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Підсилювач постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Павлов, М. Ю. Теплицький, В. М. Попенко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201301362 ; заявл. 05.02.2013 ; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.

114. Пат. 88148 Україна, (51) МПК (2014.01), Н03К 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Відбивач струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, М. Ю. Теплицький, В. Є. Яцик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201214501 ; заявл. 18.12.2012 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5.

115. Пат. 88149 Україна, (51) МПК (2014.01), Н03К 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Відбивач струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, М. Ю. Теплицький, В. Є. Яцик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201214503 ; заявл. 18.12.2012 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5.

116. Пат. 89363 Україна, (51) МПК (2014.01), Н03К 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Відбивач струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, М. В. Пономарьова; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201301358 ; заявл. 05.02.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

117. Пат. 89364 Україна, (51) МПК, G05B 1/01 (2006.01). Підсилювач постійного струму / О. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, М. Ю. Теплицький, М. В. Діденко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201301361 ; заявл. 05.02.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

118. Пат. 91385 Україна, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Підсилювач постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, М. Ю. Теплицький, С. І. Павлович; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201303343 ; заявл. 19.03.2013 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.

119. Патент України на корисну модель № 69740, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О.Д. Азаров, В.Є. Яцик, М.Ю. Теплицький, С.В. Павлов; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201112871 ; заявл. 02.11.2011 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

120. Полонников Д. Е. Операционные усилители: Принципы построения, теория, схемотехника / Д. Е. Полонников. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.

121. Ридико Л. DDS: Прямой цифровой синтез частоты / Леонид Ридико // Компоненты и технологии. – 2001. – № 1. – С. 1–5.

122. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем. / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – К. : Техника, 1967. – С. 469–481.

123. Смолов В. Б. Аналого-цифровые комплексы / В. Б. Смолов, А. В. Анисимов, Р. Ш. Исмаилов. – Л. : ЛЭТИ, 1980. – 96 с.

124. Смолов В. Б. Вычислительные преобразователи с цифровыми управляемыми сопротивлениями / В. Б. Смолов. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 135 с.

125. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. / Сидни Соклоф ; пер. с англ. А. Б. Перезенцева. – М. : Мир, 1988. – 583 с.

126. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники : учебное пособие для вузов / И. П. Степаненко. 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.

127. Теплицький М. Ю. Аналіз частотних характеристик біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, М. Ю. Теплицький // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування :

тези доповідей IV міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – С. 28.

128. Теплицький М. Ю. Двотактні підсилювачі постійного струму на базі двонаправлених відбивачів струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – 2011. – № 2(34). – С. 15–22.

129. Теплицький М. Ю. Двотактні підсилювачі струму для цифрового аналізатора параметрів звукових трактів / О. Д. Азаров, Л. В. Крупельницький, М. Ю. Теплицький // Проблеми інформатизації та управління. – 2014. – № 4(48). – С. 5–13.

130. Теплицький М. Ю. Двотактні симетричні підсилювачі постійного струму із покращеними динамічними характеристиками / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах : матеріали міжнародної наукової конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 98-100.

131. Теплицький М. Ю. Двотактні симетричні підсилювачі постійного струму із внутрішнім вибіркоvim зворотним зв'язком / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, М. Ю. Теплицький // Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 210-211.

132. Теплицький М. Ю. Динамічні характеристики двотактних підсилювачів постійного струму із роздільними каналами перетворення сигналів / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2013. – № 4. – С. 89–96.

133. Теплицький М. Ю. Дослідження двотактних симетричних структур ППС / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, М. Ю. Теплицький // XXXVIII науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2009/initki/txt/teplytskyj.pdf>.

134. Теплицький М. Ю. Малосигнальні моделі біполярних транзисторів у форматі PSPICE / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // XXXIX науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету : тези доповідей. — Вінниця : ВНТУ, 2010. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2010/initki/txt/teplusciy.pdf>.

135. Теплицький М. Ю. Метод неперервного коригування струму зсуву нуля двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 1. – С. 129–135.

136. Теплицький М. Ю. Методи розширення смуги пропускання двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 225–226.

137. Теплицький М. Ю. 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 технології та комп'ютерна інженерія : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 360–361.

138. Теплицький М. Ю. Модель передатної характеристики двотактного підсилювача струму з вибіркоvim зворотним зв'язком / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2012. – № 3. – С. 1–11. Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2333/2597>.

139. Теплицький М. Ю. Модель передатної характеристики двотактного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – С. 239–240.

140. Теплицький М. Ю. Моделювання нелінійних спотворень двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 284–286.

141. Теплицький М. Ю. Нелінійні спотворення двотактних підсилювачів постійного струму з вибіркоvim зворотним зв'язком / О. Д. Азаров, Л. В. Крупельницький, М. Ю. Теплицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 4. – С. 79–87.

142. Теплицький М. Ю. Побудова двотактних підсилювачів постійного струму з розділеними каналами підсилення / В. Є. Яцик, М. Ю. Теплицький // Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 229–230.

143. Теплицький М. Ю. 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. – 2013. – № 1(26). – С. 45–53.
144. Технічний опис HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models: Application Note / Intersil // Режим доступу: http://pdf.eicom.ru/datasheets/intersil_pdfs/hfa3046_3096_3127_3128/hfa3046_3096_3127_3128.pdf
145. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. / У. Титце, К. Шенк. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Т. 1. – 832 с.
146. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. / У. Титце, К. Шенк. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Т. 2. – 942 с.
147. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов – СПб. : БХВ-Петербург, 2001.– 528 с.
148. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / Кестер Уолт. – М. : Техносфера, 2007. – 1019 с.
149. Филинюк Н. А. Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров / Н. А. Филинюк, А. А. Лазарев, Л. Б. Лищинская, В. П. Стахов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2013. – № 4 (64). – С. 17–21.
150. 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
Теплицький Михайло Юхимович
Біліченко Наталія Олександрівна**

**ШВИДКОДІЙНІ ДВОТАКТНІ
ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
З БАЛАНСНИМ ЗВОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено М. Теплицьким

Підписано до друку 7.04.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,85.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-10

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.