

Високовольтний широкопasmовий вимірювальний підсилювач для діапазону частот до 30 МГц і максимальної вихідної напруги до 30 В

Ю. М. Туз, А. В. Довгаль

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
пр. Берестейський, 37, 03056, Київ, Україна
tuz@aer.kpi.ua; minloud1@gmail.com

Анотація

Основною сферою застосування високовольтного широкопasmового вимірювального підсилювача (ВШВП) є підсилення вихідної напруги вимірювальних калібраторів до рівня, достатнього для метрологічної атестації найбільш поширених термоелектричних перетворювачів у їх частотному діапазоні. Характерною рисою існуючих операційних підсилювачів (ОП) є те, що чим у ширшому діапазоні частот вони працюють, тим менша їх максимальна вихідна напруга.

У статті запропоновано створювати ВШВП шляхом багатокаскадного включення низьковольтних операційних підсилювачів із віртуальним живленням і незалежним паралельним струмовим зворотним зв'язком.

Створено принципові схеми ВШВП, матричні рівняння для знаходження в аналітичному і чисельному вигляді коефіцієнта підсилення, рівняння похибок як функції елементної бази.

Виготовлено зразок підсилювача на керамічній платі з нітриду алюмінію, яка виконує функції як друкована плата і є радіатором для розсіювання тепла завдяки високій теплопровідності нітриду алюмінію.

Проведено метрологічні дослідження, які підтвердили придатність виготовленого зразка у військовому вторинному еталоні одиниці електричної напруги в діапазоні напруг від 0,1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц ВВЕТУ 08-07-01-09.

Ключові слова: підсилювач напруги; каскадний підсилювач; еталон змінної напруги.

Отримано: 08.01.2025

Відредаговано: 10.02.2025

Схвалено до друку: 14.02.2025

Постановка проблеми

Для створення еталонів напруги змінного струму за середньоквадратичними значеннями (СКЗ) у широкому діапазоні частот використовуються перетворювачі теплової групи, а саме перетворювачі вхідної змінної напруги в електрорушійну силу (ЕРС) і термістори, які перетворюють вхідну напругу в змінну власного опору.

Існує широка номенклатура цих перетворювачів, як за конструктивним виконанням, так і за діапазонами частот. Розширення частотного діапазону досягається шляхом мініатюризації перш за все нагрівача і мінімізації індуктивності та ємності.

Розширення динамічного діапазону досягається включенням додаткових резисторів. Передача номінальних значень напруги здійснюється шляхом паралельних з'єднань термоперетворювачів із послідовно включеними резисторами від даної межі вимірювання до наступної прилеглої вгору або вниз. Наприклад, в еталоні ВВЕТУ 08-07-01-09 має місце ланцюг, зображений на рис. 1.

Промислові високочастотні калібратори змінної напруги в більшості випадків мають вихідну напругу, меншу ніж максимальні напруги термоперетворювачів. Наприклад, калібратор В1-29 видає на узгоджене навантаження 50 Ом максимальне значення напруги 3 В у діапазоні частот до 100 МГц, калібратор В1-16 також здатен віддавати максимальну напругу 3 В, при фіксованому значенні ряду напруг і при фіксованому ряді частот до 50 МГц, а калібратор Н5-4 працює в розширеному діапазоні до 20 В у порівнянні з В1-16. Калібратор Fluke 5790А здатен відтворювати до 7 В СКЗ у смузі частот до 30 МГц [1].

У зв'язку з відсутністю державного вихідного еталона для діапазонів частот від 1 до 30 МГц та існуючих рішень, що забезпечують відтворення напруги в безперервній смузі частот до 30 МГц, створення підсилювача є актуальним завданням для створення вихідного еталона в зазначеному діапазоні частот та напруг [2].

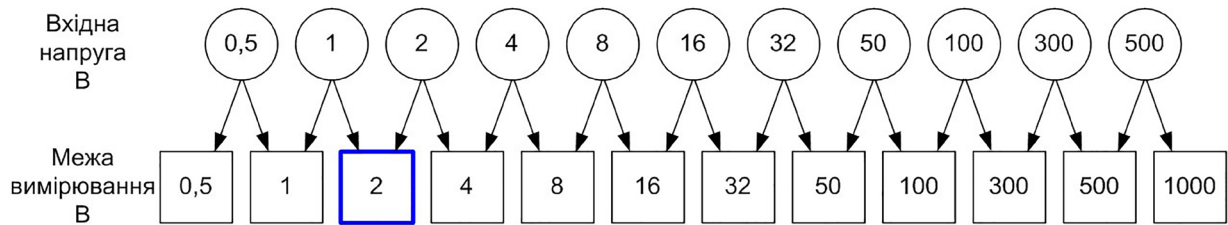


Рис. 1. Ланцюг визначення частотних похибок

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найсвіжіша інформація про калібратори, підсилювачі та еталони напруги змінного струму, в тому числі мегагерцового діапазону, міститься в публікаціях періодичної конференції з електричних і магнітних вимірювань СРЕМ, яка відбувається кожні два роки. Більшість публікацій спрямовано на підвищення точності завдяки застосуванню чарунок Джозефсона і синтезу синусної напруги [3–5]. Досягнуті результати поширюються на звуковий і ультразвуковий діапазони частот.

Детальний аналіз варіантів побудови ВШВП наведено в [6], де розглянуто структурні схеми багатокаскадних ВШВП з інвертуючими і не інвертуючими операційними підсилювачами із залежними і незалежними зворотними зв'язками та віртуальним (відокремленим від загальної шини заземлення) живленням окремих ОП.

Вихідна напруга таких ВШВП дорівнює сумі вихідних напруг кожного з ОП. За наявності фазових зсувів у кожному з ОП модуль вектора сумарної напруги завжди менший, ніж сума модулів векторів кожного з ОП. У зв'язку з цим нарощування кількості ОП повільно збільшує модуль сумарного вектора і навіть призводить до його зменшення. Через те, що операційні підсилювачі мають різний

характер підсилення при роботі в режимі малих та великих сигналів, намагання збільшити вихідну напругу шляхом збільшення вхідної напруги призводить до збільшення вихідної напруги кожного ОП, що викликає додаткові нелінійні спотворення і може викликати перенавантаження кожного з ОП при наближенні амплітуди сигналу до допустимої напруги живлення.

Наприклад, для підсилювачів THS3091 швидкість наростання та рівень гармонічних спотворень мають нелінійну залежність від амплітуди вихідної напруги. Таку залежність показано на рис. 2.

Для оптимізації структури ВШВП з урахуванням вищенаведених обмежень розглянемо структурну схему шестикаскадного ВШВП з паралельними незалежними струмовими зворотними зв'язками кожного з ОП. Структурну схему такого ВШВП зображено на рис. 3.

Виклад основного матеріалу

Для конкретизації результатів аналізу як ОП було обрано підсилювачі фірми Texas Instruments THS3491, які мають швидкість наростання сигналу до 8000 В/мксек, напругу живлення ± 15 В і відносяться до типу Current-Feedback. На відміну від попередньої моделі THS3091, підсилювачі THS3491 мають ширшу смугу частот та більше значення швидкості

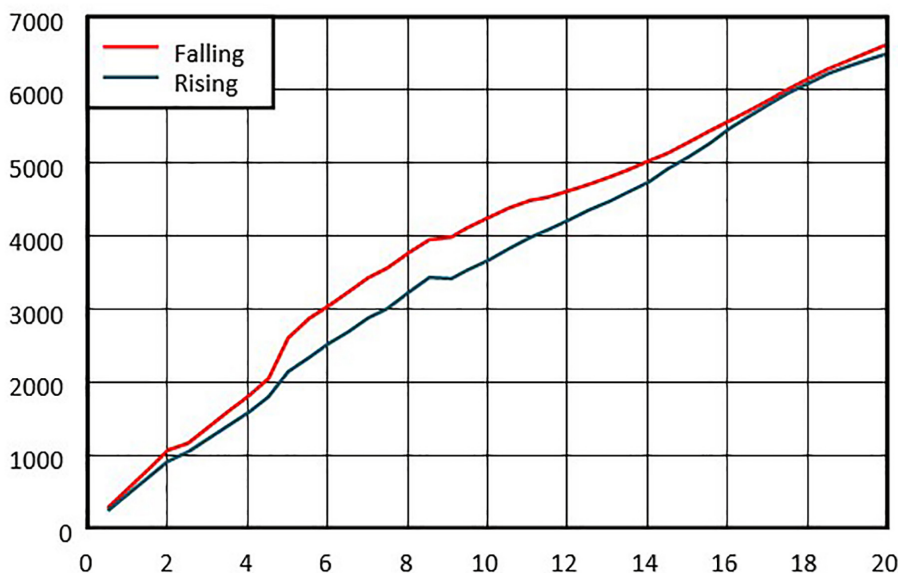


Рис. 2. Графік залежності швидкості наростання сигналу THS3091

наростання сигналу, що робить їх більш чутливими та призводить до нестабільності при роботі в режимі одиночного підсилення. Враховуючи такі особливості, при проектуванні друкованої плати та підборі компонентів інженер має звертати особливу увагу на паразитні властивості конструкції, а саме мінімізувати ємнісні та індуктивні параметри компонентів і ланцюгів включення [7].

Для схеми на рис. 3 і відповідної еквівалентної моделі складемо систему рівнянь.

Рівняння вузлових струмів:

- 1) $-i_1 - i_2 - i_3 - i_4 - i_5 - i_6 + i_{26} = 0;$
- 2) $i_{18} - i_{19} + i_{25} = 0;$
- 3) $i_{12} + i_{17} + i_{19} - i_{20} = 0;$
- 4) $i_{11} + i_{16} + i_{20} - i_{21} = 0;$
- 5) $i_{10} + i_{15} + i_{21} - i_{22} = 0;$
- 6) $i_9 + i_{14} + i_{22} - i_{23} = 0;$
- 7) $i_8 + i_{13} + i_{23} - i_{24} = 0;$
- 8) $i_1 - i_7 - i_{13} = 0;$ 9) $i_2 - i_8 - i_{14} = 0;$
- 10) $i_3 - i_9 - i_{15} = 0;$
- 11) $i_4 - i_{10} - i_{16} = 0;$
- 12) $i_5 - i_{11} - i_{17} = 0;$
- 13) $i_6 - i_{12} - i_{18} = 0.$

Рівняння контурних напруг:

- 14) $i_1 Z_1 + i_7 Z_7 = U_{ax};$
- 15) $-i_1 Z_1 + i_2 Z_2 + i_8 Z_8 - i_{13} Z_{13} = 0;$
- 16) $-i_2 Z_2 + i_3 Z_3 + i_9 Z_9 - i_{14} Z_{14} = 0;$
- 17) $-i_3 Z_3 + i_4 Z_4 + i_{10} Z_{10} - i_{15} Z_{15} = 0;$
- 18) $-i_4 Z_4 + i_5 Z_5 + i_{11} Z_{11} - i_{16} Z_{16} = 0;$
- 19) $-i_5 Z_5 + i_6 Z_6 + i_{12} Z_{12} - i_{17} Z_{17} = 0;$
- 20) $-i_7 (Z_7 + K_1) + i_{13} Z_{13} = 0;$
- 21) $-i_8 (Z_8 + K_2) + i_{14} Z_{14} = 0;$
- 22) $-i_9 (Z_9 + K_3) + i_{15} Z_{15} = 0;$
- 23) $-i_{10} (Z_{10} + K_4) + i_{16} Z_{16} = 0;$
- 24) $-i_{11} (Z_{11} + K_5) + i_{17} Z_{17} = 0;$
- 25) $-i_{12} (Z_{12} + K_6) + i_{18} Z_{18} = 0;$
- 26) $i_7 K_1 + i_8 K_2 + i_9 K_3 + i_{10} K_4 + i_{11} K_5 + i_{12} K_6 - i_{25} Z_{25} = 0.$

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – коефіцієнти перетворення вхідного струму ОП в його вихідну напругу, які мають розмірність Ом. Усі ОП є інвертуючими.

На базі рівнянь вузлових струмів і контурних напруг створено матричне рівняння (табл. 1), у якому визначник системи має розмірність 26×26 .

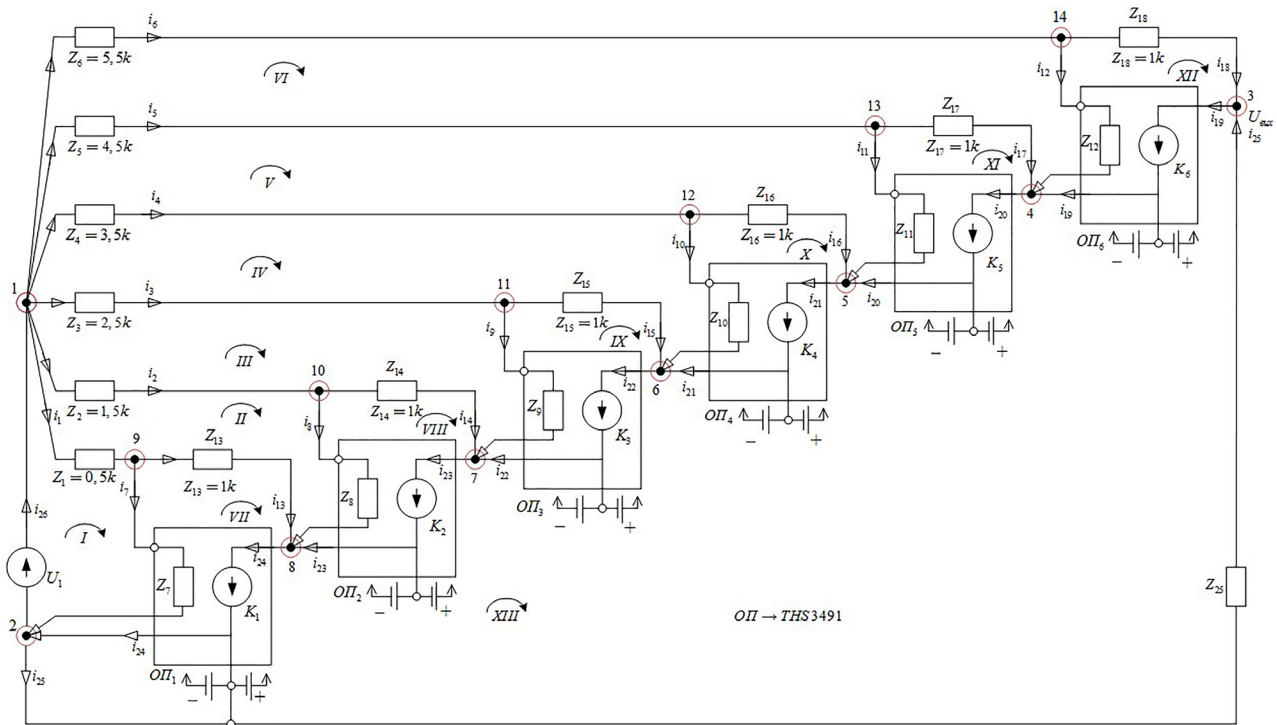


Рис. 3. Структурна схема ВШВП на ОП THS3491

Матричне рівняння ВШВП

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26			
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	i_1	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	i_2	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	i_3	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	i_4	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	i_5	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	i_6	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	i_7	0
8	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_8	0
9	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_9	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{10}	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{11}	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{12}	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{13}	0
14	Z_1	0	0	0	0	0	Z_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{14}	U_1
15	$-Z_1$	Z_2	0	0	0	0	0	Z_8	0	0	0	0	$-Z_{13}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{15}	0
16	0	$-Z_2$	Z_3	0	0	0	0	0	Z_9	0	0	0	0	$-Z_{14}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{16}	0
17	0	0	$-Z_3$	Z_4	0	0	0	0	0	Z_{10}	0	0	0	0	$-Z_{15}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{17}	0
18	0	0	0	$-Z_4$	Z_5	0	0	0	0	0	Z_{11}	0	0	0	0	$-Z_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{18}	0
19	0	0	0	0	$-Z_5$	Z_6	0	0	0	0	0	Z_{12}	0	0	0	0	$-Z_{17}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{19}	0
20	0	0	0	0	0	0	$-(Z_7 + K_1)$	0	0	0	0	0	Z_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{20}	0
21	0	0	0	0	0	0	0	$-(Z_8 + K_2)$	0	0	0	0	0	Z_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{21}	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(Z_9 + K_3)$	0	0	0	0	0	Z_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{22}	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(Z_{10} + K_4)$	0	0	0	0	0	Z_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{23}	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(Z_{11} + K_5)$	0	0	0	0	0	Z_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{24}	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(Z_{12} + K_6)$	0	0	0	0	0	Z_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	i_{25}	0
26	0	0	0	0	0	0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-Z_{25}$	0	i_{26}	0

Таблиця 2

Визначник системи (табл. 1) з урахуванням похибок тільки ОП

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Z_1	0	0	0	0	0	Z_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	$-Z_1$	Z_2	0	0	0	0	0	Z_8	0	0	0	0	$-Z_{13}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	$-Z_2$	Z_3	0	0	0	0	0	Z_9	0	0	0	0	$-Z_{14}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	$-Z_3$	Z_4	0	0	0	0	0	Z_{10}	0	0	0	0	$-Z_{15}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	$-Z_4$	Z_5	0	0	0	0	0	Z_{11}	0	0	0	0	$-Z_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	$-Z_5$	Z_6	0	0	0	0	0	Z_{12}	0	0	0	0	$-Z_{17}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	$K_1 \delta_{K_1}$	0	0	0	0	0	Z_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	$K_2 \delta_{K_2}$	0	0	0	0	0	Z_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	$K_3 \delta_{K_3}$	0	0	0	0	0	Z_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$K_4 \delta_{K_4}$	0	0	0	0	0	Z_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$K_5 \delta_{K_5}$	0	0	0	0	0	Z_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$K_6 \delta_{K_6}$	0	0	0	0	0	Z_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	$K_1 \delta_{K_1}$	$K_2 \delta_{K_2}$	$K_3 \delta_{K_3}$	$K_4 \delta_{K_4}$	$K_5 \delta_{K_5}$	$K_6 \delta_{K_6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-Z_{25}$	0

Зауважимо, що незважаючи на велику кількість нульових елементів, визначник такого розміру має величезну кількість доданків у вигляді

добутку 26 його елементів. При підрахунку в пакеті MatLab вона формує рівняння, що розміщується на 21 сторінці. При чисельному підрахунку,

на відміну від символічного, час підрахунку скорочується в декілька разів.

На основі матричного рівняння перетворення (табл. 1) можна отримати матричне рівняння похибки. Для цього елементи визначників необхідно подати у вигляді суми номінального значення елемента і його абсолютної похибки. Згідно з відомою теоремою, такий визначник з одним стовпчиком у вигляді суми двох складових дорівнює сумі двох визначників, у першому з яких у відповідному стовпчику буде розташований перший доданок, тобто номінальне значення елемента, а в другому визначнику – другий доданок, тобто абсолютна похибка того самого елемента.

Найбільший внесок у загальну похибку вносять коефіцієнти перетворення ОП. У табл. 2 наведено визначник системи, в якому враховані похибки тільки коефіцієнтів перетворення ОП. Оскільки в реальних ОП TNS3491 вхідний опір набагато менший, ніж коефіцієнт перетворення ОП, ним було знехтувано ($R_i \approx 20 \div 40 \text{ Ом}$, $K_i \approx 5 \times 10^6 \div 8 \times 10^6 \text{ Ом}$). З урахуванням цих зауважень визначник системи матричного рівняння (табл. 1) зображено в табл. 2.

Процедуру розкладання визначників, у яких елементи частини стовпчиків визначників є сумою

номінального значення і абсолютної похибки, детально викладено в [8]. При 6 стовпчиках із похибками похибки першого порядку малості будуть представлені сумою 6 визначників. Похибки другого порядку малості представлені сумою 15 визначників.

На основі проведеного аналізу зроблено оптимізацію принципів схем з метою корекції частотної характеристики і виготовлено ВШВП для діапазону частот 30 МГц і максимальним середньоквадратичним значенням напруги до 40 В. Підсилювач застосовано в модернізованому еталоні напруги змінного струму ВВЕТУ 08-07-01-09. Підсилювач виготовлено на друкованій платі з нітриду алюмінію, яка завдяки його високій теплопровідності одночасно слугує радіатором. Живлення віртуально включених ОП здійснюється через трансформатор, у якого ємність між первинною і вторинними обмотками не перевищує 3÷5 пФ. Зовнішній вигляд плати підсилювача зображено на рис. 4.

Частотна характеристика визначається відповідно до структурної схеми на рис. 5, яка є автоматизованою і керується програмним забезпеченням Voltstandart.

При малих адитивних похибках як підсилювача, так і задіяних термоперетворювачів і ви-

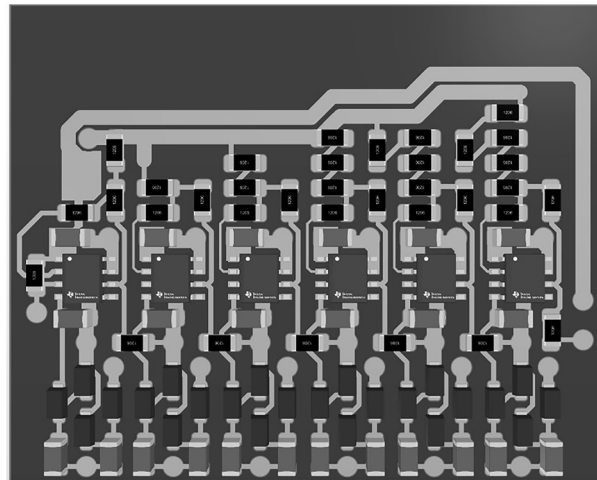


Рис. 4. Зовнішній вигляд плати підсилювача (комп'ютерна модель)

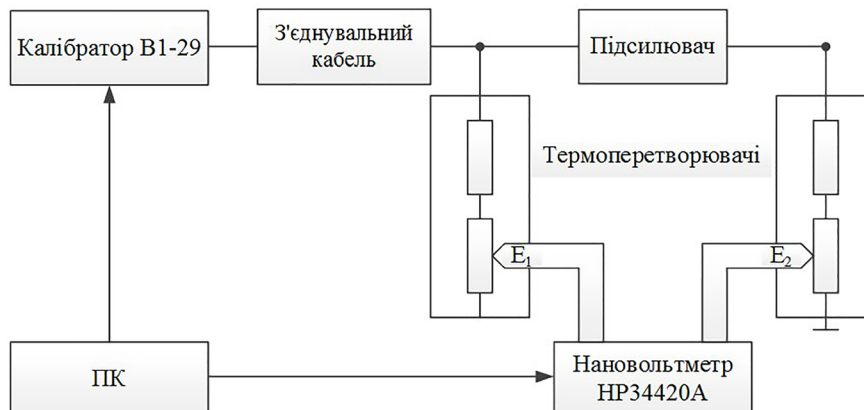


Рис. 5. Структурна схема визначення частотної характеристики підсилювача

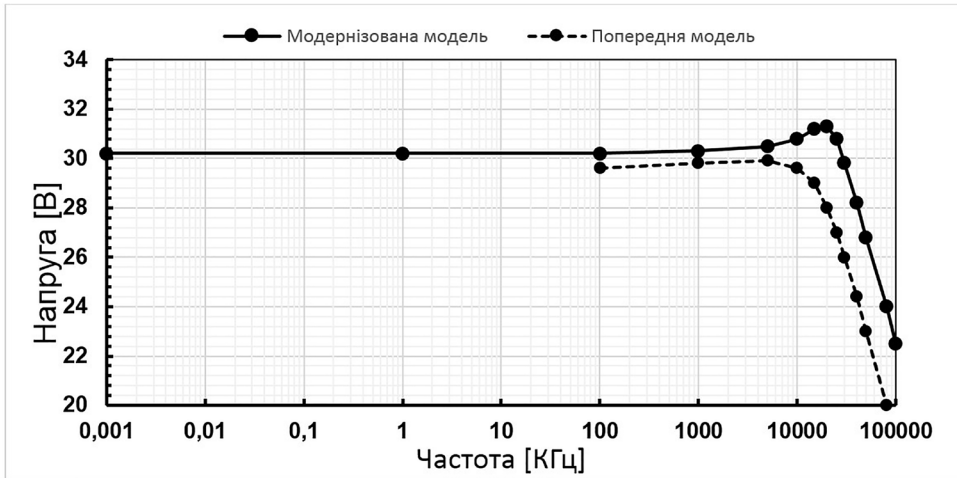


Рис. 6. Частотні характеристики підсилювачів

мірювачів електрорушійної сили, якими можна знехтувати, частотна похибка підсилювача визначається за формулою (1):

$$\gamma_K(f_i) = 0,5 \left(\frac{E_{вих}(f_0)}{E_{вих}(f_i)} \cdot \frac{E_{вх}(f_i)}{E_{вх}(f_0)} - 1 \right) - (\gamma_{вих} - \gamma_{вх}), \quad (1)$$

де $\gamma_{вих}$, $\gamma_{вх}$ – частотні похибки термоперетворювачів; $E_{вих}(f)$, $E_{вх}(f)$ – ЕРС термоперетворювачів.

На рис. 6 наведено експериментально отримані частотні характеристики моделей.

Для забезпечення точного відтворення напруги та мінімізації похибок, викликаних нерівномірністю частотної характеристики, використано додаткові апаратні та програмні засоби компенсації. При виготовленні ВШВП частотна

характеристика вирівнюється шляхом оптимізації частотно-корегуючих ланок RC та ланцюгів зворотного зв'язку.

При використанні цифрових калібраторів та програмно-алгоритмічних засобів управління похибка відтворення напруги мінімізується шляхом ітераційної корекції за рівнянням (2).

$$U_n = 0,5 U_{n-1} \left(3 - \frac{E_{n-1}}{E_{k0}} \right), \quad (2)$$

де E_{k0} – опорна ЕРС; n – номер такту ітерації; U_{n-1} – значення напруги на попередньому такті ітерації. На рис. 7 наведено структурну схему стабілізації напруги.

На рис. 8 показано робоче місце дослідження підсилювача. Перелік обладнання: калібратор В1-29; нановольтметр Agilent 34420A;

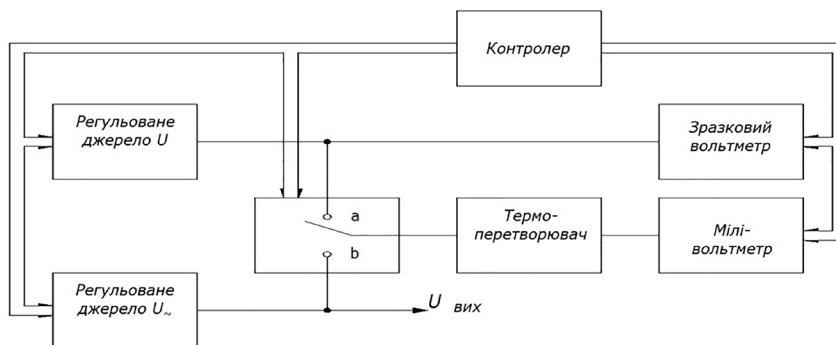


Рис. 7. Структурна схема стабілізації напруги



Рис. 8. Зовнішній вигляд робочого місця та метрологічного забезпечення

калібратор Н4-7; мілівольтметр ВЗ-59; блок підсилювачів БРЧДД.

Висновок

Завдяки застосуванню багатокаскадної схеми з 6 підсилювачів із незалежними струмовими зв'язками було виконано модернізацію блока розширення частотного і динамічного діапазо-

ну (БРЧД1) – еталона напруги ВВЕТУ 08-07-01-09 для розширення амплітудно-частотної характеристики та забезпечення роботи при відтворенні постійної напруги. Застосування алгоритму ітераційної корекції забезпечує відтворення заданого значення напруги у всьому частотному і динамічному діапазонах підсилювача.

High-voltage broadband amplifier for a frequency range of up to 30 MHz and a maximum output voltage of up to 30 V

Yu. Tuz, A. Dovhal

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteyski Ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine
tuz@aer.kpi.ua; minloud1@gmail.com

Abstract

The main application area of the high-voltage signal amplifier (HVSA) is to amplify the output voltage of measuring calibrators to a level sufficient for metrological certification of the most commonly used thermoelectric converters within their frequency range. A characteristic feature of existing operational amplifiers is that their maximum output voltage decreases as the frequency range in which they operate increases. To address the shortcomings of the existing design, a prototype with an increased number of amplifier stages was developed and implemented. The integration of modern amplifiers enabled an expansion of the operating voltage and frequency range.

The HVSA comprises a series of amplifiers operating with supply voltages lower than the output voltage range. This paper proposes the development of HVSA through multi-stage integration of low-voltage operational amplifiers with virtual power supplies and independent parallel current feedback.

The study presents circuit diagrams for HVSA, matrix equations for analytical and numerical determination of the gain coefficient, and equations for errors as functions of the component base.

A prototype amplifier was developed on an aluminium nitride ceramic board, which serves both as a printed circuit board and as a heat sink for heat diffusion due to the high thermal conductivity of aluminium nitride.

The experimental data, derived from a comparison of dynamic characteristics of the existing device and the newly developed prototype, confirm the usability and effectiveness of adopting this approach.

Metrological studies were conducted, confirming the suitability of the developed prototype for use in a military secondary measurement standard for the unit of electric voltage in the range of 0.1 V to 1000 V AC and frequencies from 10 Hz to 30 MHz, according to the ВВЕТУ 08-07-01-09 measurement standard.

Keywords: voltage amplifier; cascade amplifier; AC voltage standard.

Список літератури

1. 5790A Automated AC Measurement Standard. URL: <https://www.promprylad.com.ua/pdf/fluke-5790a-1.pdf>
2. Державний еталон одиниці електричної напруги від 0,1 до 1000 В змінного струму у діапазоні частот від 10 Гц до 1 МГц (ДЕТУ 08-07-02).
3. Brevik J.A., Donnelly C.A., Flowers-Jacobs N.E. et al. Radio-Frequency Waveform Synthesis with the Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer. *Proceedings of International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Paris, France, 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501023
4. Rufenacht A., Flowers-Jacobs N.E., Fox A.E. et al. DC Comparison of a Programmable Josephson Voltage Standard and a Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer. *Proceedings of International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Paris, France, 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8500955
5. Katkov A.S., Gubler G., Shevtsov V., Petrovskaya A. et al. Pulse-driven AC Josephson voltage standard at VNIIM. *Proceedings of International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, USA, 2020. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191742
6. Туз Ю.М., Афанасьєв М.А. Широкополосні високовольтні вимірювальні підсилювачі: монографія. Київ, 2012. 101 с.
7. Paul C.A. Roberts. Developments in high bandwidth power amplifier technology for compact cost effective calibrator applications. URL: https://s3.amazonaws.com/download.flukecal.com/pub/literature/dev_in_high_bw_p_amp_tech.pdf
8. Туз Ю.М., Шумков Ю.С., Козир О.В. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв. Курс лекцій: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 318 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/3fc92b98-d57a-4718-9d86-f140c76f7d2e/full>

References

1. 5790A Automated AC Measurement Standard. Available at: <https://www.promprylad.com.ua/pdf/fluke-5790a-1.pdf>
2. State standard of the unit of electric voltage from 0.1 to 1000 V AC in the frequency range from 10 Hz to 1 MHz (ДЕТУ 08-07-02) (in Ukrainian).
3. Brevik J.A., Donnelly C.A., Flowers-Jacobs N.E. et al. Radio-Frequency Waveform Synthesis with the Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer. *Proceedings of International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Paris, France, 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8501023
4. Rufenacht A., Flowers-Jacobs N.E., Fox A.E. et al. DC Comparison of a Programmable Josephson Voltage Standard and a Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer. *Proceedings of International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Paris, France, 2018. doi: 10.1109/CPEM.2018.8500955
5. Katkov A.S., Gubler G., Shevtsov V., Petrovskaya A. et al. Pulse-driven AC Josephson voltage standard at VNIIM. *Proceedings of International Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, USA, 2020. doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191742
6. Tuz Yu.M., Afanasiev M.A. Shyrokopolosni vysokovoltni vymiriuvalni pidsyliuvachi: monohrafiia [Broadband high-voltage measuring amplifiers: monograph]. Kyiv, 2012. 101 p. (in Ukrainian).
7. Paul C.A. Roberts. Developments in high bandwidth power amplifier technology for compact cost effective calibrator applications. Available at: https://s3.amazonaws.com/download.flukecal.com/pub/literature/dev_in_high_bw_p_amp_tech.pdf
8. Tuz Yu.M., Shumkov Yu.S., Kozyr O.V. Avtomatyzatsiia analizu vymiriuvalnykh prystroiv. Kurs lektzii: navchalnyi posibnyk [Automation of measurement device analysis. Course of lectures: textbook]. Kyiv, 2022. 318 p. (in Ukrainian). Available at: <https://ela.kpi.ua/items/3fc92b98-d57a-4718-9d86-f140c76f7d2e/full>