

Високовольтний широкосмуговий вимірювальний підсилювач для діапазону частот до 100 кГц і максимальної вихідної напруги до 1000 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

Основним призначенням високовольтного широкосмугового вимірювального підсилювача (ВШВП) є метрологічне забезпечення термоелектричних перетворювачів, зокрема ПНТЕ-12 та інших, які мають межі перетворення 300, 500, 1000 В. Тому актуальним завданням є створення підсилювача, здатного працювати в широкому діапазоні частот та напруг.

У статті детально висвітлено можливості вдосконалення метрологічних характеристик спеціалізованих блоків розширення частотного та динамічного діапазонів еталонів напруги змінного струму, що застосовуються у метрологічних комплексах. Розглянуто роботу цих блоків у частотному діапазоні до 100 кГц та за максимальних значень вихідної напруги до 1000 В, що особливо актуально для сучасних високоточних метрологічних і калібрувальних лабораторій.

На основі матричного рівняння запропоновано аналітичні залежності, що описують статичні та динамічні характеристики підсилювачів неінвертуючого типу із застосуванням незалежних ланцюгів зворотного зв'язку. Ці залежності дозволяють прогнозувати та оптимізувати поведінку підсилювачів, зокрема стабільність амплітуди, фазові зсуви та лінійність передачі сигналів у широкому діапазоні робочих частот і амплітуд.

Наведено результати експериментальних досліджень високовольтного широкосмугового вимірювального підсилювача (ВШВП), який забезпечує невизначеність передачі напруги, що не перевищує 15 ppm у повному діапазоні частот до 100 кГц при вихідній напрузі 1000 В.

Описано експериментальні установки, методики вимірювань та аналіз факторів, що впливають на точність та стабільність роботи підсилювача.

Створено високовольтний широкосмуговий вимірювальний підсилювач із максимальною вихідною напругою 1000 В у діапазоні частот від 0 до 100 кГц на основі неінвертуючих каскадів із незалежними зворотними зв'язками. Отримані результати дозволили реалізувати впровадження цього ВШВП у склад військового еталона напруги змінного струму ВВТУ-08-07-01-09 для калібрування високовольтних термоелектричних перетворювачів, що підтверджує високу метрологічну надійність, стабільність та практичну цінність розроблених технічних рішень.

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

Отримано: 14.07.2025

Відредаговано: 31.07.2025

Схвалено до друку: 13.08.2025

Постановка проблеми

В [1] висвітлено загальні питання створення високовольтних широкосмугових вимірювальних підсилювачів, наведено конструктивні особливості та проблеми побудови підсилювачів для еталона напруги змінного струму ВВТУ 08-07-01-09. У роботі [2] ретельно розглянуті питання удосконалення і практична реалізація широкосмугового каскадного підсилювача для діапазону частот 0...30 МГц і максимального діапазону напруг до 30 В середньоквадратичного значення для удосконалення еталона ВВТУ 08-07-01-09 у 2024 році.

Наявні в Україні калібратори Н4-6 разом з підсилювачами напруги здатні забезпечити вихідну напругу 700 В СКЗ у діапазоні частот до 10 кГц і 500 В у діапазоні частот до 20 кГц.

Більш сучасні калібратори Н4-7 разом з підсилювачем здатні генерувати напругу до 1000 В у діапазоні частот до 50 кГц. Підсилювач до калібратора В1-9 здатен формувати вихідну напругу до 1000 В у діапазоні частот до 100 кГц, але він має обмежений ресурс експлуатації, тому що побудований на електронних лампах і при цьому має вагу 49 кг. Існуючий в Україні еталон напруги змінного

струму ДЕТУ 08-07-02 потребує періодичного обслуговування за кордоном.

Основним призначенням ВШВП є метрологічне забезпечення термоелектричних перетворювачів, таких як ПНТЕ-12 та інші, що мають межі перетворення в тому числі 300, 500, 1000 В, тому створення підсилювача, здатного працювати в широкому діапазоні частот та напруг, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження в галузі високовольтних ширококутових вимірювальних підсилювачів охоплюють різні аспекти їх проектування, технології та застосування. В.М. Чинков [3] дослідив теоретичні засади метрології вимірювальної техніки, що дає змогу краще зрозуміти природу похибок і способи їх мінімізації у процесі розробки високовольтних підсилювачів. Р.М. Мороз [4] формалізував складові похибок у вимірювальних підсилювачах потужності, запропонував методи усунення нелінійних спотворень і цифрові підходи для стабільного відтворення амплітуд у широкому діапазоні частот і високих напруг.

N.E. Flowers-Jacobs et al. [5] розробили технологію генерації сигналів, застосовуючи ефект Джозефсона з дільниками Вілкінсона для високоточних сигналів до 2 В, що є ключовим для калібрування і точних вимірювань високовольтних ширококутових сигналів. Пропозиції U. Mehrotra & D.C. Hopkins [6] щодо покращення точності обробки сигналів у складних умовах, зокрема методи каскадного з'єднання ключів, дозволили масштабувати підсилювачі на надвисокі напруги.

Низка авторів акцентували увагу на апаратурі для високовольтного і ширококутового підсилення. Зокрема, J. Liu et al. [7] розробили каскадні лінійні високовольтні підсилювачі з точним коефіцієнтом підсилення і широким частотним діапазоном (до 10 кГц), що підходить для вимірювання діелектричних властивостей. L. Xu et al. [8] створили високовольтний силовий підсилювач із шириною смуги до 57 кГц і низьким рівнем шуму, придатний для керування п'єзоелектричними актуаторами з високими вимогами до стабільності. J. Bohler et al. [9] акцентували увагу на високочастотних потужних підсилювачах із стабільним виходом для моделювання енергетичних мереж у реальному часі. N. Vai et al. [10] запропонували проектування операційних підсилювачів із низькою напругою живлення і енергоспоживанням, що важливо для портативних ширококутових пристроїв.

Застосування вдосконалених методів тепловідведення і конструктивних рішень дозволяє забезпечити надійну роботу в умовах високої напруги і частоти, що може бути корисним для систем підсилення сигналів у вимірювальній техніці.

Виклад основного матеріалу

Узагальнену принципову схему багатокаскадного неінвертуючого ВШВП з незалежними ланками зворотного зв'язку наведено на рис. 1.

На рис. 1 застосовані такі позначення: ОП_{*i*} – операційні підсилювачі; *i*=1,2,...*n*; U_{ex} – вхідна напруга; U_i – вихідні напруги ОП_{*i*} відносно середніх точок їх живлення; K_i – коефіцієнти підсилення ОП_{*i*} зі зворотним зв'язком відносно загальної шини заземлення; k_i – коефіцієнти під-

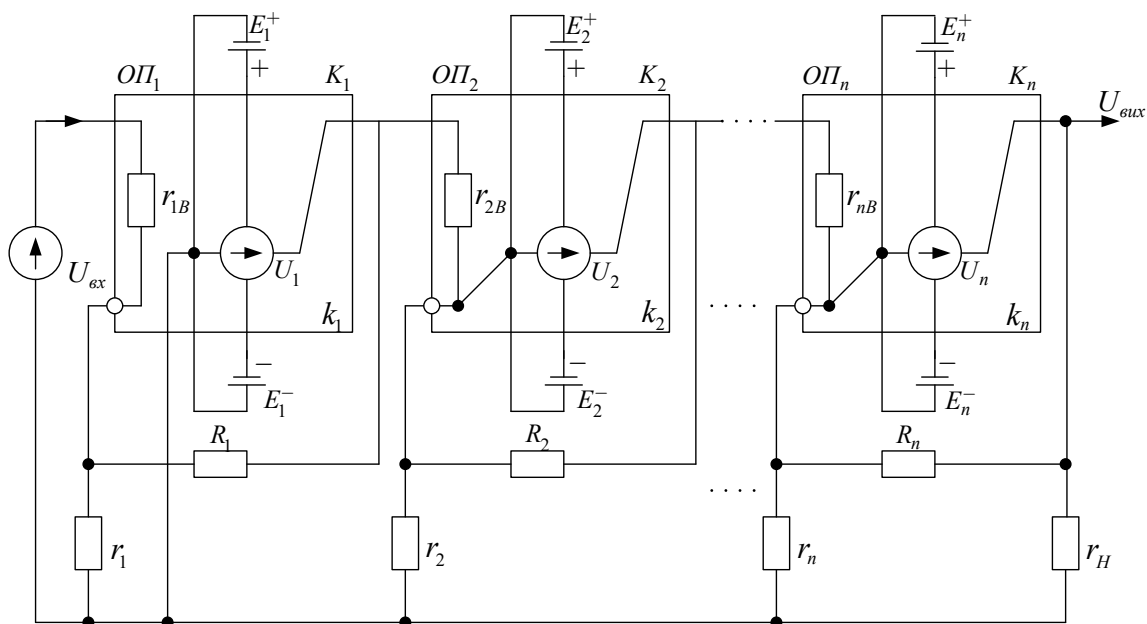


Рис. 1. Узагальнена принципова схема багатокаскадного неінвертуючого ВШВП з незалежними зворотними зв'язками і відокремленим живленням ОП

Для побудови ВШВП із зазначеними вище діапазонами найбільш придатними є операційні підсилювачі фірми Арех – РА98, РА94, РА194. Вони мають напруги живлення ± 225 , ± 450 , ± 450 відповідно. Швидкості наростання вихідної напруги в режимі малого сигналу становлять 1000 В/мкс, 700 В/мкс, 2000 В/мкс відповідно. Найбільш стабільними та надійними є підсилювачі РА98.

Для реалізації підсилювача з номінальним значенням вихідної напруги 1000 В шляхом каскадування з послідовним включенням окремих каскадів необхідно застосувати 8 шт РА98 або 4 шт РА194. Вартість підсилювачів РА98 становить 250 €, а вартість РА194 сягає більше 480 € за одиницю. Для мінімізації кількості ОП, особливо при застосуванні підсилювачів РА98, реалізується схема слідкуючого живлення згідно з патентом на корисну модель [11], завдяки чому вдається зменшити загальну кількість підсилювачів удвічі.

Матричне рівняння чотирикаскадного ВШВП наведено в табл. 1.

Розрахунок вихідної напруги $U_{вих}$ виконується шляхом перемноження вихідного струму i_6 на резистор навантаження r_n . Струм i_6 визначається

детермінантом системи $detC$ та детермінантом матриці струму det_{i_6} за формулою (8).

$$U_{вих} = \frac{det_{i_6}}{detC} \cdot r_n. \quad (8)$$

Розраховані в символьному вигляді детермінанти $detC$ та det_{i_6} представлені формулами (9) та (10).

$$detC = -\frac{1}{3} R_1 \cdot R_n \cdot \begin{bmatrix} ((2k_1e^{j\varphi_1} + 5)r_{1\theta} + 2R_1) \cdot \\ ((R_1k_2e^{j\varphi_2} + R_2 + R_1)r_{2\theta} + R_1R_2) \cdot \\ ((2R_1k_3e^{j\varphi_3} + R_3 + 2R_1)r_{3\theta} + 2R_1R_3) \cdot \\ ((3R_1k_4e^{j\varphi_4} + R_4 + 3R_1)r_{4\theta} + 3R_1R_4) \cdot \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$det_{i_6} = -\frac{1}{3} R_1 \cdot U_{ex} \cdot \begin{bmatrix} ((5k_1e^{j\varphi_1} + 10)r_{1\theta} + 4R_1) \cdot \\ (((R_1 + R_2)k_2e^{j\varphi_2} + R_2 + R_1)r_{2\theta} + R_1R_2) \cdot \\ (((R_3 + 2R_1)k_3e^{j\varphi_3} + R_3 + 2R_1)r_{3\theta} + 2R_1R_3) \cdot \\ (((R_4 + 3R_1)k_4e^{j\varphi_4} + R_4 + 3R_1)r_{4\theta} + 3R_1R_4) \cdot \end{bmatrix} \quad (10)$$

Нагадаємо, що $e^{j\varphi} = \cos\varphi + jsin\varphi$.

Визначення параметрів підсилювача виконувалося в контрольованих умовах, що знижувало вплив сторонніх чинників та забезпечувало високу достовірність отриманих результатів (табл. 2).

Таблиця 2

Серія вимірювань значень напруги підсилювача 1000 В – 100 кГц

№	U_0	$E_{ex}(f_0)$	$E_{вих}(f_0)$	$E_{ex}/E_{вих}$	F_i	$E_{ex}(f_i)$	$E_{вих}(f_i)$	Похибка ppm
1	100	0,00949266	0,00562970	0,59305865	1000	0,00949237	0,00562951	-1,94
2	100	0,00949228	0,00562963	0,59307436	1000	0,00949235	0,00562957	-8,60
3	100	0,00949242	0,00562976	0,59307877	1000	0,00949248	0,00563002	20,37
4	100	0,00949263	0,00563008	0,59310007	1000	0,00949282	0,00563028	7,96
5	100	0,00949282	0,00563032	0,59311290	1000	0,00949291	0,00563011	-23,12
6	100	0,00949301	0,00562999	0,59306652	1000	0,00949317	0,00562997	-9,36
7	100	0,00949349	0,00563005	0,59304367	1000	0,00949371	0,00563006	-10,71
8	100	0,00949416	0,00563037	0,59303485	1000	0,00949455	0,00563066	5,92
9	100	0,00949490	0,00563085	0,59303871	1000	0,00949522	0,00563108	3,99
10	100	0,00949556	0,00563123	0,59303788	1000	0,00949584	0,00563138	-1,02
11	100	0,00949609	0,00563164	0,59304795	10000	0,00949472	0,00563092	7,86
12	100	0,00949682	0,00563211	0,59305260	10000	0,00949542	0,00563140	10,66
13	100	0,00949745	0,00563273	0,59307809	10000	0,00949598	0,00563188	1,92
14	100	0,00949802	0,00563303	0,59307408	10000	0,00949653	0,00563247	28,87
15	100	0,00949854	0,00563348	0,59308922	10000	0,00949709	0,00563264	1,45
16	100	0,00949912	0,00563384	0,59309017	10000	0,00949774	0,00563318	14,36
17	100	0,00949962	0,00563420	0,59309730	10000	0,00949820	0,00563351	13,88
18	100	0,00950002	0,00563454	0,59310824	10000	0,00949854	0,00563382	13,65
19	100	0,00950050	0,00563493	0,59311924	10000	0,00949899	0,00563418	12,63
20	100	0,00950085	0,00563530	0,59313660	10000	0,00949932	0,00563444	3,92
21	100	0,00950114	0,00563557	0,59314697	20000	0,00949939	0,00563542	78,25
22	100	0,00950139	0,00563588	0,59316295	20000	0,00949973	0,00563563	66,14
23	100	0,00950184	0,00563607	0,59315537	20000	0,00950018	0,00563577	61,14
24	100	0,00950222	0,00563627	0,59315329	20000	0,00950046	0,00563594	62,68
25	100	0,00950247	0,00563640	0,59315086	20000	0,00950094	0,00563644	83,82
26	100	0,00950298	0,00563689	0,59317076	20000	0,00950124	0,00563647	54,54
27	100	0,00950332	0,00563727	0,59318934	20000	0,00950149	0,00563692	65,62
28	100	0,00950342	0,00563734	0,59319052	20000	0,00950181	0,00563719	71,67
29	100	0,00950375	0,00563751	0,59318750	20000	0,00950199	0,00563723	67,61

№	U_0	$E_{ex}(f_0)$	$E_{вих}(f_0)$	$E_{ex}/E_{вих}$	F_i	$E_{ex}(f_i)$	$E_{вих}(f_i)$	Похибка ppm
30	100	0,00950412	0,00563790	0,59320650	20000	0,00950240	0,00563741	46,92
31	100	0,00950435	0,00563803	0,59320551	50000	0,00950398	0,00564034	224,21
32	100	0,00950474	0,00563824	0,59320297	50000	0,00950417	0,00564043	224,45
33	100	0,00950496	0,00563871	0,59323922	50000	0,00950462	0,00564085	206,84
34	100	0,00950525	0,00563865	0,59321476	50000	0,00950481	0,00564093	224,95
35	100	0,00950550	0,00563900	0,59323513	50000	0,00950503	0,00564103	204,69
36	100	0,00950567	0,00563897	0,59322173	50000	0,00950519	0,00564095	201,15
37	100	0,00950602	0,00563916	0,59321978	50000	0,00950549	0,00564114	203,32
38	100	0,00950640	0,00563939	0,59321971	50000	0,00950587	0,00564149	214,14
39	100	0,00950662	0,00563959	0,59322727	50000	0,00950615	0,00564170	212,28
40	100	0,00950705	0,00563974	0,59321652	50000	0,00950637	0,00564195	232,10
41	100	0,00950718	0,00563996	0,59323159	80000	0,00950850	0,00564415	301,80
42	100	0,00950740	0,00564022	0,59324491	80000	0,00950869	0,00564427	291,79
43	100	0,00950753	0,00564045	0,59326148	80000	0,00950889	0,00564435	273,92
44	100	0,00950775	0,00564059	0,59326220	80000	0,00950908	0,00564458	284,30
45	100	0,00950804	0,00564086	0,59327288	80000	0,00950935	0,00564484	283,80
46	100	0,00950819	0,00564080	0,59325692	80000	0,00950949	0,00564492	297,08
47	100	0,00950848	0,00564109	0,59326883	80000	0,00950982	0,00564506	281,91
48	100	0,00950874	0,00564130	0,59327474	80000	0,00950982	0,00564525	293,37
49	100	0,00950891	0,00564149	0,59328466	80000	0,00950989	0,00564527	282,95
50	100	0,00950912	0,00564178	0,59330192	80000	0,00950999	0,00564543	278,04
51	100	0,00950903	0,00564128	0,59325509	100000	0,00951185	0,00564484	167,32
52	100	0,00950912	0,00564142	0,59326375	100000	0,00951187	0,00564519	189,94
53	100	0,00950905	0,00564189	0,59331804	100000	0,00951191	0,00564540	160,47
54	100	0,00950882	0,00564176	0,59331820	100000	0,00951162	0,00564562	195,18
55	100	0,00950855	0,00564174	0,59333399	100000	0,00951163	0,00564554	174,13
56	100	0,00950811	0,00564173	0,59335967	100000	0,00951129	0,00564568	183,11
57	100	0,00950762	0,00564144	0,59335925	100000	0,00951084	0,00564523	167,39
58	100	0,00950721	0,00564148	0,59338992	100000	0,00951047	0,00564542	177,56
59	100	0,00950698	0,00564152	0,59340831	100000	0,00951032	0,00564542	170,24
60	100	0,00950665	0,00564154	0,59343097	100000	0,00951020	0,00564542	157,25

У підсумковій табл. 3 наведено результати обчислень. Для кожної частоти подано середнє значення \bar{U} , стандартне відхилення S , невизначеність типу А u_A та розширену невизначеність $U = 2u_A$.

Таблиця 3
Результати обчислень характеристик підсилювача 1000 В – 100 кГц

Частота, кГц	\bar{U}	S	u_A	U
1	-1,65	12,09	3,82	7,64
10	10,92	8,05	2,55	5,10
20	65,84	10,71	3,39	6,78
50	214,81	10,93	3,46	6,92
80	286,90	8,79	2,78	5,56
100	174,26	12,32	3,90	7,80

На графіку (рис. 2) зображено середньоквадратичне відхилення (СКВ) на різних частотах. Видно, що значення СКВ змінюються в межах 8–14 ppm, що підтверджує достатню стабільність підсилювача в усьому робочому діапазоні частот.

Завдяки мінімальним відхиленням у частотному діапазоні підсилювач забезпечує точність

і стабільність сигналу, що є критично важливим для еталонних вимірювань та метрологічних застосувань.

Оскільки точні значення коефіцієнтів підсилення і конструктивних ємностей та індуктивностей невідомі, частотна характеристика і її похибки визначились експериментальним шляхом за допомогою пакета Voltstandart в автоматичному режимі з підключенням приладів відповідно до структурної схеми на рис. 3.

Результати розрахунку невизначеностей в ppm при десяти вимірюваннях на кожній частоті при напругах 1000 В наведені в табл. 4.

Таблиця 4
Результати розрахунку невизначеностей

Частота, кГц	\bar{U}	S	u_A	U
1	-1	12	3	7
10	10	8	2	5
20	65	10	3	6
50	214	10	3	6
80	286	8	2	5
100	174	12	3	7

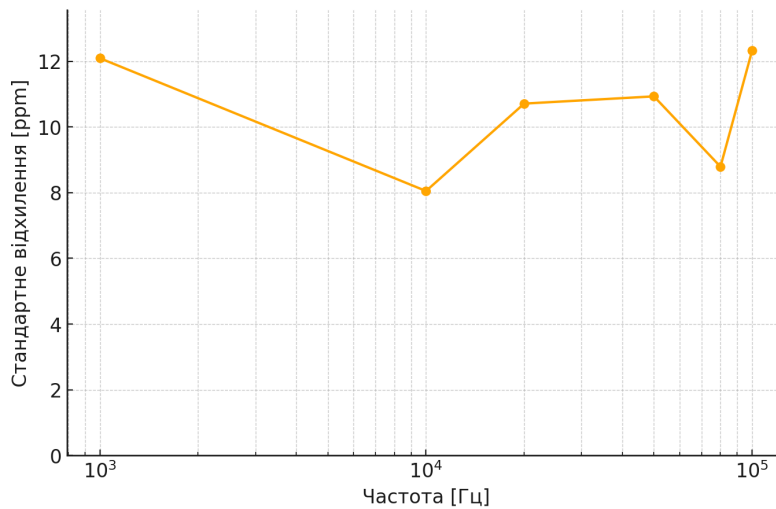


Рис. 2. Стандартне відхилення вихідної напруги підсилювача 100 кГц – 1000 В

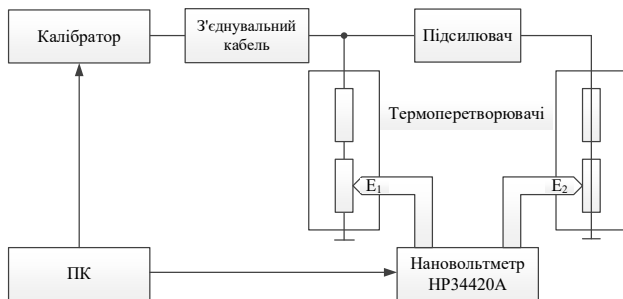


Рис. 3. Структурна схема визначення частотної характеристики підсилювача

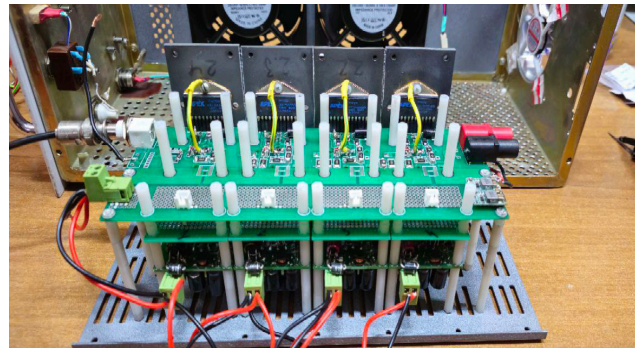


Рис. 4. Фотографія підсилювача 1000 В – 100 кГц на операційних підсилювачах RA98 із застосуванням слідкуючого живлення

На рис. 4 наведено зображення підсилювача 1000 В–100 кГц на операційних підсилювачах RA98 із застосуванням слідкуючого живлення.

Висновок

Створено високовольтний широкосмуговий вимірювальний підсилювач із максимальною ви-

хідною напругою 1000 В у діапазоні частот від 0 до 100 кГц на основі неінвертуючих каскадів із незалежними зворотними зв'язками, невідзначеність якого задовольняє вимоги застосування його в еталоні ВВТУ 08-07-01-09 для калібрування високовольтних термоелектричних перетворювачів.

High-voltage broadband amplifier for a frequency range of up to 100 kHz and a maximum output voltage of up to 1000 V

Yu. Tuz, A. Dovhal

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteyskiy Ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine

tuz@aer.kpi.ua; minloud1@gmail.com

Abstract

The main purpose of the high-voltage broadband amplifier is to provide metrological support for thermoelectric converters, in particular the PNTE-12 and others, with conversion limits of 300 V, 500 V, and 1000 V. Therefore, the development of an amplifier capable of operating across a wide frequency and voltage range is a relevant task.

This paper provides a detailed overview of the possibilities for improving the metrological characteristics of specialized extension units for the frequency and dynamic ranges of AC voltage standards used in metrological systems. The operation of these units in the frequency range up to 100 kHz and at maximum output voltages up to 1000 V is considered, which is particularly relevant for modern high-precision metrological and calibration laboratories.

Based on a matrix equation, analytical expressions to describe the static and dynamic characteristics of non-inverting amplifiers with independent feedback loops are proposed. These expressions make it possible to predict and optimize amplifier performance, particularly in terms of amplitude stability, phase shifts, and signal transmission linearity across a wide range of operating frequencies and amplitudes.

The paper presents the results of an experimental study on a high-voltage broadband amplifier that provides a voltage transfer uncertainty not exceeding 15 ppm across the full frequency range of up to 100 kHz at a maximum output voltage of up to 1000 V.

Experimental setups and measurement methods are described, and the factors affecting the accuracy and stability of amplifier operation are analysed.

A high-voltage broadband amplifier with a maximum output voltage of up to 1000 V and operating within a frequency range of 0 to 100 kHz was developed using non-inverting stages with independent feedback loops. The results obtained made it possible to implement this amplifier as part of the military AC voltage reference unit VVTU-08-07-01-09 for calibrating high-voltage thermoelectric converters, confirming the high metrological reliability, stability, and practical value of the developed technical solutions.

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

Список літератури

1. Туз Ю.М., Афанасьєв М.А. Широкосмугові високовольтні вимірювальні підсилювачі змінного струму: монографія. Київ, 2012. 101 с.
2. Довгаль А.В., Туз Ю.М. Метод побудови високовольтних широкосмугових підсилювачів для еталонів напруги. *Інфраструктура вимірювань*. 2024. № 8. doi: [https://doi.org/10.33955/v8\(2024\)-060](https://doi.org/10.33955/v8(2024)-060)
3. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб. Харків: НТУ "ХПІ", 2005. 524 с.
4. Мороз Р.М. Принципи побудови вимірювальних підсилювачів потужності: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05. Київ, 2020. 20 с.
5. Flowers-Jacobs N.E. et al. Two-Volt Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer Using Wilkinson Dividers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, vol. 26, no. 6. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2532798>
6. Mehrotra U., Hopkins D.C. Methodologies of Cascading to Realize High-Voltage Cascaded Super Cascode Power Switch. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, vol. 11, issue 6, pp. 5853–5862. doi: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2023.3314025>
7. Ji Liu et al. A Cascaded Linear High-Voltage Amplifier Circuit for Dielectric Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, issue 3, pp. 1833–1841. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2498129>
8. Lisong Xu, Hongwen Li, Pengzhi Li et al. A High-Voltage and Low-Noise Power Amplifier for Driving Piezoelectric Stack Actuators. *Sensors*, 2020, vol. 20, issue 22, 6528. doi: <https://doi.org/10.3390/s20226528>
9. Bohler J. et al. Ultra-High-Bandwidth Power Amplifiers: A Technology Overview and Future Prospects. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 54613–54633. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172291>
10. Na Bai, Xiaolong Li, Yaohua Xu. A Low-Voltage, Ultra-Low-Power, High-Gain Operational

Amplifier Design for Portable Wearable Devices. *Electronics*, 2022, vol. 11(1), no. 74. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11010074>

11. Довгаль А.В. Високовольтний неінвертуючий широкопasmовий каскадний підсилювач. Патент на корисну модель № 152343. Опубл. 11.01.2023, бюл. № 2/2023. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1718340/>

References

1. Tuz Yu.M., Afanasiev M.A. Shyrokosmuhovi vysokovoltni vymiriuvalni pidsyliuvachi zminnoho strumu: monohrafiia [Broadband high-voltage measurement amplifiers for AC signals: monograph]. Kyiv, 2012. 101 p. (in Ukrainian).
2. Dovhal A.V., Tuz Yu.M. Metod pobudovy vysokovoltnykh shyrokosmuhovykh pidsyliuvachiv dlia etaloniv napruhy [A method for constructing high-voltage wideband amplifiers for voltage standards]. *Measurements infrastructure*, 2024, no. 8 (in Ukrainian). doi: [https://doi.org/10.33955/v8\(2024\)-060](https://doi.org/10.33955/v8(2024)-060)
3. Chynkov V.M. Osnovy metrolohii ta vymiriuvanoi tekhniki: navch. posibnyk. [Fundamentals of metrology and measuring technology: tutorial]. Kharkiv, 2005. 524 p. (in Ukrainian).
4. Moroz R. M. Pryntsypy pobudovy vymiriuvalnykh pidsyliuvachiv potuzhnosti: avtoref. dys. ... cand. tekhn. nauk [Principles of designing measuring power amplifiers: abstracts of cand. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2020. 20 p. (in Ukrainian).
5. Flowers-Jacobs N.E. et al. Two-Volt Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer Using Wilkinson Dividers. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, vol. 26, no. 6. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2532798>
6. Mehrotra U., Hopkins D.C. Methodologies of Cascading to Realize High-Voltage Cascaded Super Cascode Power Switch. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, vol. 11, issue 6, pp. 5853–5862. doi: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2023.3314025>
7. Ji Liu et al. A Cascaded Linear High-Voltage Amplifier Circuit for Dielectric Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, issue 3, pp. 1833–1841. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2498129>
8. Lisong Xu, Hongwen Li, Pengzhi Li et al. A High-Voltage and Low-Noise Power Amplifier for Driving Piezoelectric Stack Actuators. *Sensors*, 2020, vol. 20, issue 22, 6528. doi: <https://doi.org/10.3390/s20226528>
9. Bohler J. et al. Ultra-High-Bandwidth Power Amplifiers: A Technology Overview and Future Prospects. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 54613–54633. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172291>
10. Na Bai, Xiaolong Li, Yaohua Xu. A Low-Voltage, Ultra-Low-Power, High-Gain Operational Amplifier Design for Portable Wearable Devices. *Electronics*, 2022, vol. 11(1), no. 74. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11010074>
11. Dovhal A.V. Vysokovoltnyi neinvertuiuchy shyrokosmuhovyi kaskadnyi pidsyliuvach [High-voltage non-inverting wideband cascaded amplifier]. Utility Model Patent no. 152343, publ. 11.01.2023, bul. № 2/2023 (in Ukrainian). Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1718340/>