



HIGH VOLTAGE MEASUREMENT AMPLIFIER ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ

Dovhal A.V/ Довгаль А.В

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Анотація. В даній статті розглядається побудова високовольтного вимірювального підсилювача (ВВП) з розширеним діапазоном вихідної напруги, та результати випробування моделі такого підсилювача. Наведено відповідні схеми та діаграми.

Результати дослідження моделі такого ВВП [9] показують, що завдяки використанню оригінальної схеми з'єднання кількох каскадів операційних підсилювачів суттєво розширюється діапазон робочих частот підсилювача, що дозволяє підвищити якість вимірювання.

Використання ВВП запропонованої схеми може бути ефективним при виконання досліджень та випробувань в цивільних та військових програмах, особливо для побудови лабораторних еталонів для вимірювання при розробці систем електростатичного відхилення та електрооптичної модуляції.

Ключові слова: високовольтний вимірювальний підсилювач, каскадний підсилювач, напруга, опір, діапазон

Вступ Операційні підсилювачі спочатку були спроектовані для виконання математичних операцій, в яких значення чисел задавалося рівнем напруги, відповідного знаку та частоти. Проте зараз, операційні підсилювачі є багатофункціональними виробами з великою кількістю варіантів застосування.

До високовольтних операційних підсилювачів взагалі відносять підсилювачі, вихідна напруга яких перевищує робочу напругу існуючої елементної бази [2]. Такі операційні підсилювачі схемотехнічно являють собою багатотранзисторні схеми з великим коефіцієнтом підсилення напруги (до 10^6) і смугою частот $0 \dots f_{\max}$. У сучасних підсилювачів значення f_{\max} може сягати одиниць ГГц [1].

Високовольтні підсилювачі широко використовуються в діелектричній спектроскопії. При цьому такі підсилювачі мають забезпечувати не тільки значну вихідну напругу (сотні вольт), але й високу точність підтримання сталого її значення та велику швидкість її зростання. Це дозволяє застосовувати такі підсилювачі в пристроях для діагностики ізоляції і діелектриків в промисловості (джерелах живлення, зварювальному обладнанні, системах управління електроприводами, клапанами, соленоїдами і іншими виконавчими механізмами) та при лабораторному застосуванні. Вони також успішно застосовуються в обладнанні військового і аерокосмічного призначення (схемах компенсації вібрації, гідролокаторах, пристроях електростатичної левітації), виробках медичного призначення (апаратурі ультразвукової діагностики та магнітно-резонансної томографії, мікроскопах і аналізаторах) [3].

У калібраторів змінної напруги є і певні особливості: обмежена смуга робочих частот, обмежений вихідний рівень сигналу, висока похибка стабілізації заданого рівня вихідного сигналу. Такі похибки виникають переважно від зміщення нульового рівня напруги на виходах окремих каскадів і



від спадання напруги в лініях зв'язку між каскадами [7].

Частотний діапазон більшості калібраторів обмежується частотою 100 кГц, а високочастотні калібратори, що працюють в діапазоні 50-100 МГц (В1-16, В1-29, Н5-3), мають обмежений вихідний рівень сигналу (30 V), недостатній для комплексної повірки приладів вказаного діапазону частот. При цьому власні похибки стабілізації рівня вихідної напруги калібраторів, що працюють в діапазоні частот до 100 кГц, становлять $\pm(0,002-0,05) \%$, а працюючих в діапазоні частот до 100 МГц становлять $\pm(0,1-1) \%$ [6].

Окремо слід розглядати вимірювальні операційні підсилювачі. Прецизійні параметри таких підсилювачів забезпечують їх широке використання у вимірювальному чи тестувальному обладнанні [1]; однак вони не призначені для забезпечення високої потужності на виході.

Вимірювальний високовольтний підсилювач можна вважати спеціалізованим вимірювальним операційним підсилювачем. На основі операційного підсилювача зручно будувати не тільки підсилювальні схеми як такі, але й системи автоматичного регулювання.

Актуальним завданням є побудова високовольтних потужних калібраторів змінної напруги на основі ВВП. Такі калібратори забезпечують автоматичне підтримання стабільного рівня вихідної напруги при її відхиленнях від заданого значення.

Аналіз поточних досліджень і публікацій

Існують різноманітні варіанти схемотехнічної реалізації ВВП з метою розширення діапазону їх робочої напруги та зменшення похибок стабілізації рівня вихідної напруги.

Найбільш поширені на сьогодні є ВВП американської фірми Fluke та потужні операційні підсилювачі фірми Apex Microtechnology.

Такі пристрої використовуються в новітніх калібраторах із вбудованими підсилювачами потужності, здатними формувати змінну напругу амплітудою до 1000 В на частотах до 30 кГц та 750 В на частотах до 100 кГц. Такі калібратори побудовані на основі генератора сигналів з вбудованою системою автоматичного регулювання рівня вихідної напруги [8].

Підсилювачі Apex Microtechnology являють собою унікальні за своїми параметрами багатофункціональні пристрої, що забезпечують широкий діапазон напруг живлення (25...450 В), великі значення вихідних струмів (до 200 мА), точність і максимальну швидкодію поряд з малими струмами спокою, низькими внутрішніми втратами і високою лінійністю (клас АВ)- можливо так, а можливо ні, хіба що представники фірми написали про це).

Слід зазначити, що неспеціалізовані операційні підсилювачі не можуть забезпечувати значення вихідної напруги більшої за напругу живлення. Для подолання цього недоліку в статті розглянута нова схема побудови підсилювачів високої напруги, в яких використовується кілька каскадів високовольтних операційних підсилювачів для значного (в 3-5 разів) розширення діапазону робочої напруги пристрою в цілому.

В даній статті розглядається побудова моделі 3-каскадного ВВП на основі операційного підсилювача PA94 (Apex Microtechnology).



РА94 – це високовольтний операційний підсилювач з потужними MOSFET-транзисторами, що був розроблений саме як недороге рішення для передачі постійних вихідних струмів до 100 мА та імпульсних струмів до 200 мА на ємнісні навантаження. РА94 було обрано для побудови багатокаскадного підсилювача з високою напругою живлення (± 1500 В) та значною швидкістю наростання сигналу (до 700 В/мкс) [4].

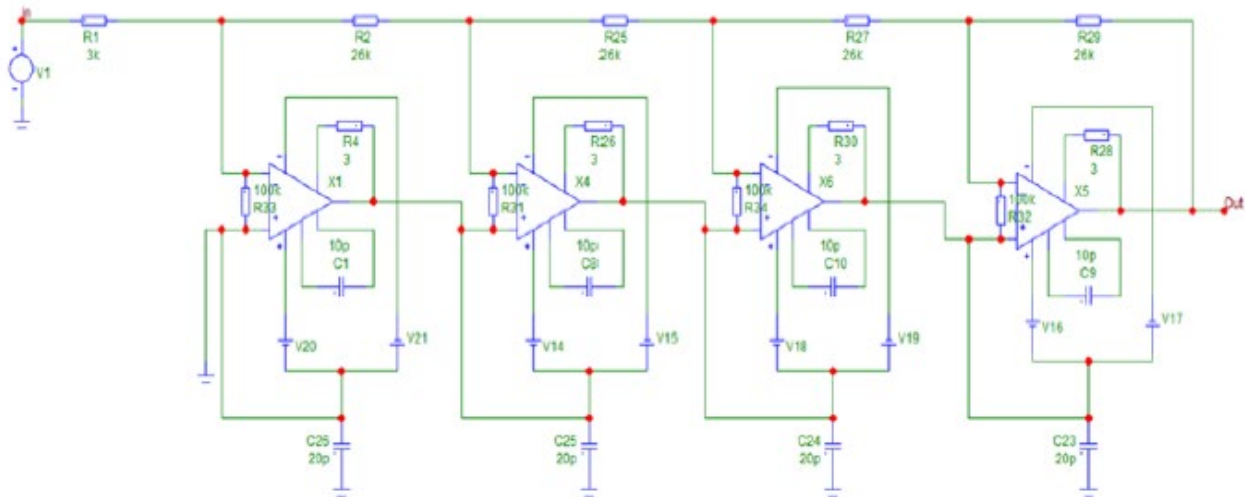


Рисунок 1. Схема високовольтного підсилювача на чотирьох операційних підсилювачах.

Постановка завдання дослідження

На даний момент промисловістю випускаються генератори сигналів, калібратори і вимірювальні підсилювачі високої напруги, основним призначенням яких є використання для метрологічної атестації термоелектричних перетворювачів; вказані вимірювальні прилади працюють в діапазоні частот до 100 кГц при напрузі 500 В і 1000 В. Основним недоліком сучасних ВВП є те, що вони мають обмежений рівень вихідного сигналу (± 400 В). В той же час, для забезпечення вимірювання потрібні більш високі напруги (± 1500 В). Тому є доцільним створення високовольтного вимірювального підсилювача, який міг би забезпечити амплітуду вихідної напруги не менше 1000 В у діапазоні частот до 100 кГц.

Мета дослідження

Мета дослідження полягає у розробці нової моделі ВВП, в якому використовується декілька каскадів операційних підсилювачів для розширення діапазону значень робочої напруги (завдяки послідовному "віртуальному" з'єднанню вихідних напруг окремих каскадів).

Модель багатокаскадного високовольтного вимірювального підсилювача

Дослідження декількох варіантів побудови схем операційних підсилювачів із інвертуючими та неінвертуючими каскадами із залежними і незалежними зв'язками показали, що на частоті 100 кГц через обмежену швидкість наростання, вихідний сигнал спотворюється. При цьому замість синусоїдальної форми, він набуває форми близької до трикутної. Більш наочно це явище спостерігається у разі каскадного з'єднання двох та більше підсилювачів по



еквівалентній схемі інвертуючого підсилювача (рис. 1) [5]. Відповідно, постає задача розробки пристрою, що буде позбавлений вказаних недоліків.

Для уникнення вказаних недоліків використовується послідовне каскадне з'єднання окремих операційних підсилювачів, з метою послідовного з'єднання джерел живлення шляхом формування суматора напруг.

Для аналізу роботи схеми такого підсилювача було виконано моделювання в пакеті MicroCap. Структурна схема моделі високовольтного вимірювального підсилювача зображена на рис. 2.

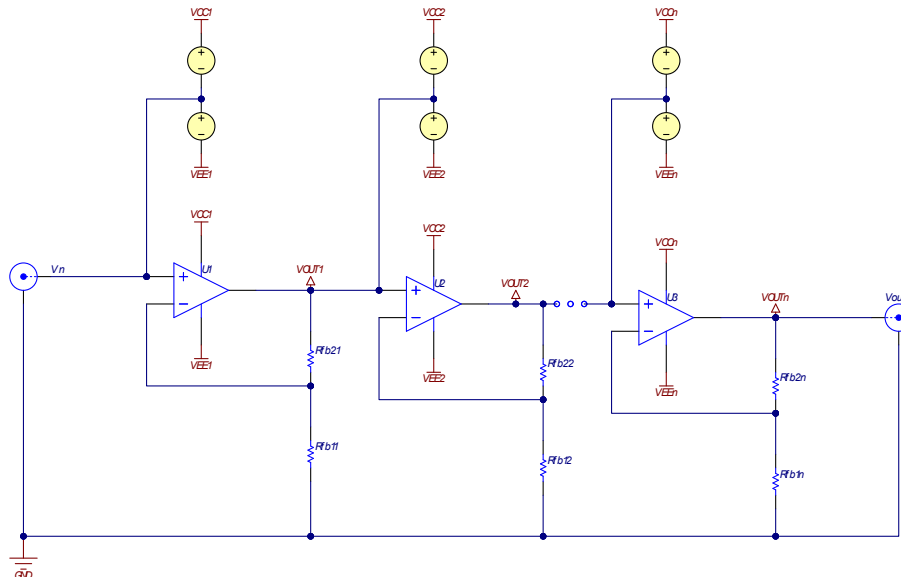


Рисунок 2. Структурна схема високовольтного підсилювача.

Вказана модель являє собою схему з фіксованим коефіцієнтом перетворення; схема складається з окремих незалежних каскадів операційних підсилювачів, з'єднаних послідовно. Кожен каскад високовольтного підсилювача виконано у вигляді окремого операційного підсилювача з незалежним та гальванічно розв'язаним від інших каскадів, джерелом живлення.

Вхідна напруга, що поступає на вхід кожного каскаду підсилюється у K разів; це досягається завдяки використанню подільника напруги на резисторах R_{fb2} та R_{fb1} в колі зворотного зв'язку. Таким чином напруга на виході кожного з каскадів може бути обчислена за загальною формулою:

$$V_{out_n} = V_{out_{n-1}} \times K_n \tag{1.1}$$

$$K_n = 1 + \frac{R_{fb2n}}{R_{fb1n}} \tag{1.2}$$

де: n – номер каскаду підсилювача;

$V_{out_{n-1}}$ – напруга, що надходить на неінвертуючий вхід відповідного підсилювача;

K_n – коефіцієнт подільника зворотного зв'язку.

При цьому формула перетворення для вхідної напруги набуває такий вид:

$$V_{out} = V_{in} \times \prod_{i=1}^n K_i \tag{1.3}$$



На рис. 3 наведені розрахункові діаграми вихідної напруги окремих каскадів.

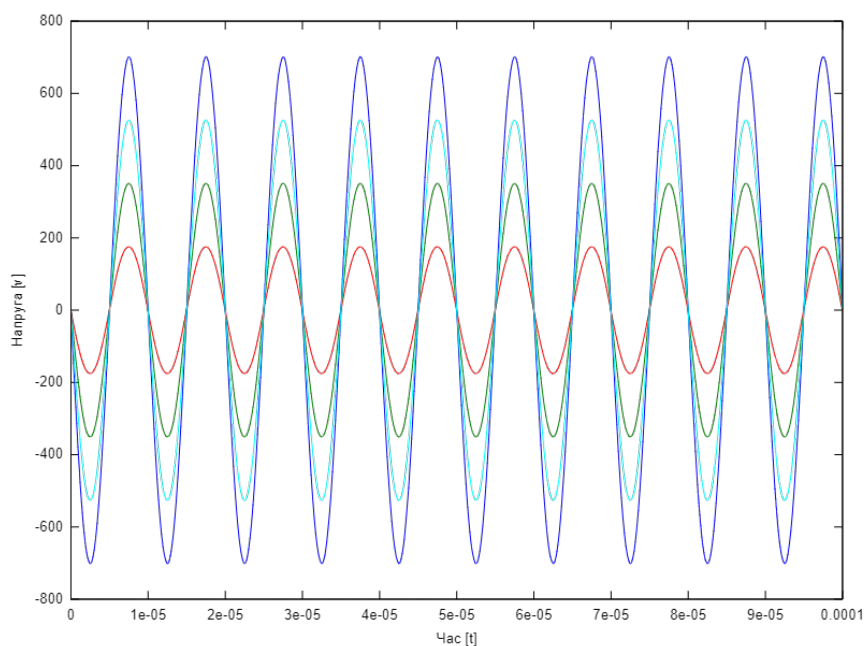


Рисунок 3. Діаграми вихідної напруги на виходах каскадів: червоний – вхідний сигнал; зелений - вихідний сигнал першого каскаду, блакитний – вихідний сигнал другого каскаду, синій – вихідний сигнал третього каскаду.

При виборі коефіцієнта перетворення для кожного каскаду необхідно умови звертати увагу, щоб вихідна напруга конкретного каскаду не перевищувала суми значень вхідної напруги та напруги джерела живлення:

$$V_n \times K_n < V_{ccn} + V_n \tag{1.4}$$

$$K_n < \frac{V_{ccn} + V_n}{V_n} \tag{1.5}$$

Схема електричної моделі високовольтного підсилювача наведена на рис. 4.

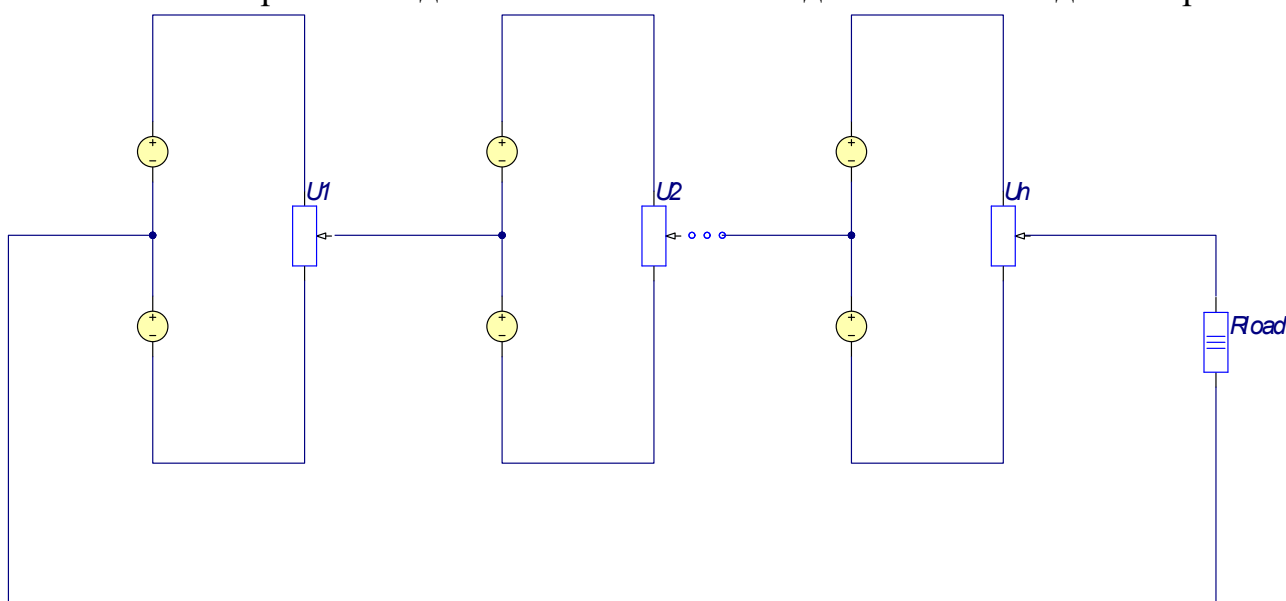


Рисунок 4. Електрична модель високовольтного підсилювача.



Висновки

Результати розрахункових досліджень нової моделі ВВП показують, що завдяки використанню кількох каскадів операційних підсилювачів та введенню схеми адитивної корекції похибки можливо суттєво збільшити частотний діапазон підсилювача, а також розширити інтервал робочої напруги, що у свою чергу підвищить якість вимірювання.

Література

1. Аналогова схемотехніка / Л.П. Медяний – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 177 с.
2. Сєдов С.О. Оброблення сигналів на базі операційних підсилювачів. Схемотехніка. Розрахунки: Навч. посіб. / Сергій Олексійович Сєдов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 132 с.
3. Ji Liu, Daning Zhang, Mengqi Wang, Ling Huang, Dongxu Zhao. A cascaded linear high-voltage amplifier circuit for dielectric measurement. IEEE Transactions On Industrial Electronics, № 3(63), 2016. – P. 1834- 1841. DOI: 10.1109/TIE.2015.2498129.
4. Офіційний сайт компанії «Арех Microtechnology». [Електроний ресурс]. Режим доступу: <https://www.apexanalog.com>.
5. Кобзар Д.А. Моделювання високовольтного широкопосмугового вимірювального підсилювача / Д. А. Кобзар, Ю. М. Туз // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. – Вип. 32. – С. 132-139. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mgs_2016_32_16.
6. Гуревич М.Л. «Комплект широкополосных измерительных преобразователей напряжения В9-29» Вестник метролога. - №3 – 2005.
7. Paul C.A. Roberts. «Developments in high bandwidth power amplifier technology for compact cost effective calibrator applications». 2007.
8. Flue Corporation. «The 5700A/5720A Series II. High Performance Multifunction Calibrators. Extended Specifications».
9. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1718340> - Патент на корисну модель

Abstract. This article discusses the construction of a high-voltage measuring amplifier and a model capable of changing the working range of a single voltage. Schemes and diagrams have been translated.

The results of research on a new model of a high-voltage measuring amplifier show that, using several cascades of operational amplifiers, the frequency range of the amplifier's operation is essentially increased, which makes it possible to increase the washing efficiency.

The use of the proposed model can be useful in research, military applications, including reference units, dielectric laboratories, electrostatic deflection and electro-optical modulation.

Key words: high-voltage measuring amplifier, cascade amplifier, voltage, resistance, range