DOI 10.34185/1562–9945–5–166–2026–01
УДК 004.94:621.375:621.382.3

А.Ю. Зимогляд, А.І. Гуда, Т.В. Селівьорстова

РОЗРОБКА, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА БЕЗ ПАСИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ JFET

Анотація. В статті проводилось дослідження розробленої схеми підсилювача – буферу без використання пасивних елементів (далі PAA – pure active amplifier), а також порівняння з вже існуючим найближчим аналогом – Diamond Follower.
Проведено серію лабораторних досліджень на працездатність розробленої схеми PAA буферу, а також отримані її параметри. Схема показала свою працездатність і може бути використана в задачах, де потрібна розв'язка каскадів, узгодження імпедансів, захист від просадки сигналу при малих розмірах схеми та низькій вартості.
Розроблену схему має сенс використати для створення інтегрованих схем, де основними перевагами будуть: мінімальна площа на кристалі, широка смуга пропускання, технологічність виробництва та низький рівень шуму.
Ключові слова: JFET, buffer, diamond follower, PAA, pure active amplifier.

Постановка проблеми. Аналоговий буфер, або буфер–повторювач напруги – це електронна схема на операційному підсилювачі або активному елементі з коефіцієнтом підсилення, рівним одиниці (K=1) [1]. У ідеальному уявленні він повинен передавати вхідну напругу на вихід без змін за амплітудою та фазою, при цьому забезпечувати високий вхідний та низький вихідний опір для узгодження каскадів. Також суттєвим заданням є забезпечення заданої вихідної потужності.

Основні функції аналогового буферу це: розв'язка каскадів (запобігає впливу вихідного навантаження на чутливе джерело сигналу); узгодження імпедансів (ефективно передає сигнал від джерела з високим внутрішнім опором до низькоомного входу наприклад, АЦП); захист від просадки (дозволяє передавати аналоговий сигнал через довгі кабелі без спотворень та падіння напруги).

Метою роботе є дослідження можливості побудови буферу на дискретних компонентах без використання пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, індуктивностей). Цей буфер може бути використаний як для аналогового сигналу, так і цифрового. До задач, які може вирішити побудова такого буферу можна віднести:

1) Мінімізація площі на кристалі. Резистори та конденсатори займають багато місця в кремнії. Транзистори набагато компактніші;

2) Збільшення ширини смуги пропускання. Відсутність паразитних ємностей великих пасивних елементів збільшує швидкодію та робочу частоту. Високий вхідний опір. Ідеально для ізоляції джерела сигналу від наступних каскадів. Низький вихідний опір. Дозволяє ефективно управляти суттєвим активним та реактивним навантаженням;

© Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Селівьорстова Т.В., 2026
Copyright for this paper by its authors. Use permitted under License CC BY 4.0.
ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

3) Технологічність виробництва. Виготовлення схеми, що складається тільки з транзисторів, спрощує та здешевлює літографію мікросхем;

4) Низький рівень шуму. Тепловий шум резисторів (шум Джонсона) у такій структурі мінімальний.

Вище зазначене вказує, що побудова такої схеми, що використовує тільки активні компоненти є перспективною.

Опис схеми і конструкції буферу. Було розроблено схему буферу без пасивних компонентів, що представлено на рис. 1. Буфер побудовано на 10 транзисторах. На схемі присутні резистори R1, R2 та R3 номіналом в 1 Ω, але вони не є частиною підсилювача і виконують роль шунтів для вимірювання струму при дослідженні. Вплив цих резисторів на режим роботи схеми зневажливо малий завдяки їх малому опору.

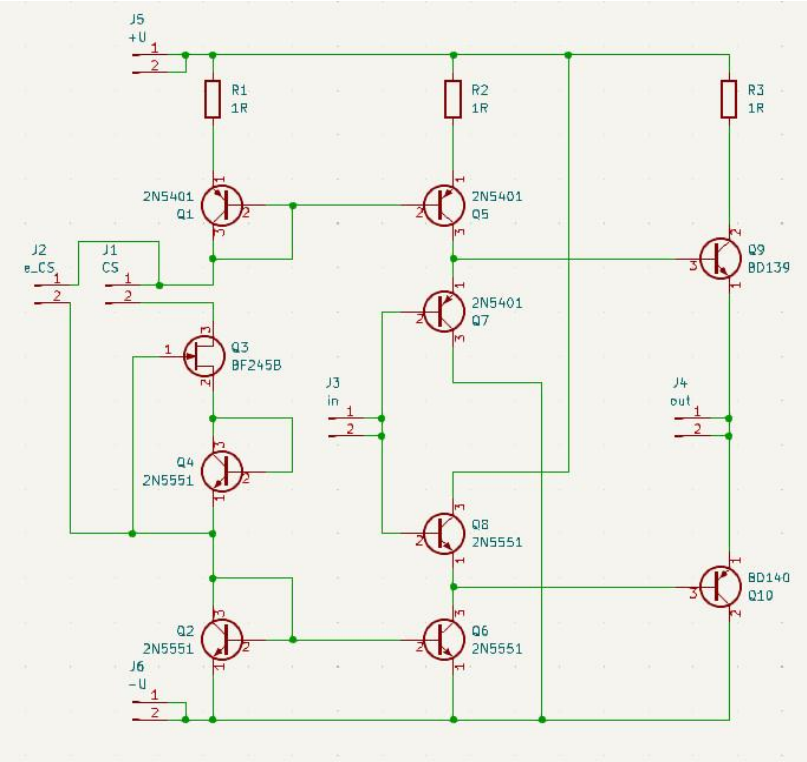


Рисунок 1 – Схема буферу без пасивних компонентів (РАА)

Живлення схеми може бути реалізовано як двополярним джерелом ±12 V, так і однополярним. Оскільки схема розроблялась для дослідження, на ній вставлено додаткові роз'єми J1 та J2. Через роз'єм J2 можна під'єднати зовнішнє джерело струму 1−10 mA для додаткових досліджень. Роз'єм J1 використовується для вмикання або вимикання вбудованого джерела струму на N–JFET BF245B [2].

Структурно схему можна поділити на 3 основні частини, а саме: джерело струму, струмове дзеркало та вихідний каскад, який використовує струмове дзеркало для живлення передвихідних транзисторів.

Джерело струму побудовано на N–JFET BF245B (Q3) та NPN транзисторі 2N5551 (Q4). При цьому NPN транзистор 2N5551 включено, як діод, падіння напруги на цьому «діоді» в 0.7 V встановлює робочу точку N–JFET BF245B. Замість діода на транзисторі

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

також можна використати стабілітрон, звичайний діод або світлодіод. Різне падіння на цих напівпровідникових елементів буде встановлювати різну робочу точку N–JFET BF245B і дозволить виставити різний струм.

Струмове дзеркало, що було використане на схемі є біполярним і комплементарним з коефіцієнтом віддзеркалення – 1. Це дзеркало побудовано на комплементарних транзисторах 2N5551 та 2N5401, а саме на Q1, Q2, Q5 та Q6. Використання саме цієї схеми струмового дзеркала пов'язано з потребою встановлювати робочий струм струмового дзеркала одним єдиним джерелом струму, а також тим, що ця схема дає більшу термостабільність.

Вихідний каскад побудовано на комплементарній парі транзисторів BD139 (Q9) та BD140 (Q10). З цими транзисторами буфер може на виході видати до 1 А струму. Максимальна напруга, яку може видати такий буфер дорівнює напрузі шин живлення мінус падіння в 0.6 V. Транзистори 2N5401 (Q7) та 2N5551 (Q8) можна назвати «драйверними»: вони керують вихідною комплементарною парою транзисторів, саме до їх баз під'єднано вхід буферу − роз'єм J3.

Тестову модель буферу для дослідження було побудовано у середовищі KiCAD, 3D модель друкованої плати з компонентами представлено на рис. 2.

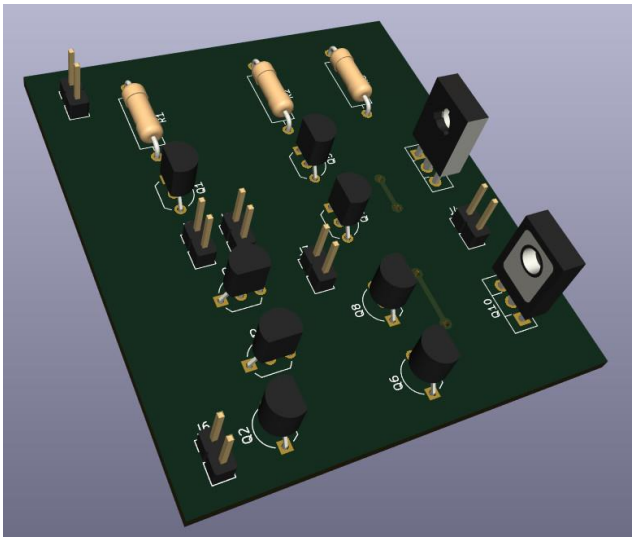


Рисунок 2 – Плата буферу PAA 3D: модель з KiCAD

На рис. 3 представлено створену модель буферу. На ній зроблені контакти для під'єднання живлення, навантаження та вхідного сигналу. Резистори вимірювання струму 1 Ω було встановлено таким чином, щоб легше під'єднати до них засоби вимірювання.

Для перевірки працездатності було під'єднано джерело синусоїдального сигналу на вхід буферу, вихід було навантажено резистором 50 Ω, а до шин живлення буфера було під'єднано джерело живлення ±12 V.

При перевірці роботи буферу на вхід подавалось синусоїдальна напруга амплітудою 3 V, в діапазоні частот 5 Hz – 20 kHz на навантаження 50 Ω, на рис. 4 можна побачити осцилограми крайніх точок діапазону. Буфер показав досить непогану лінійність в цьому діапазоні частот.

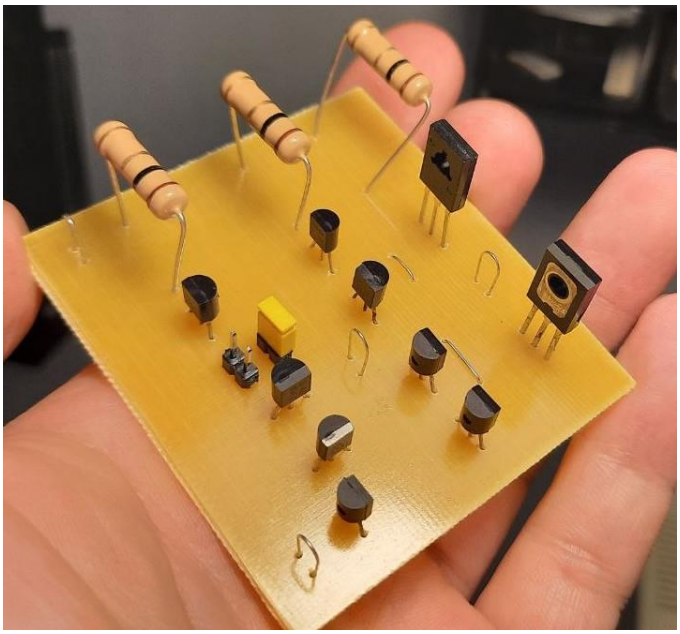


Рисунок 3 – Плата РАА буферу

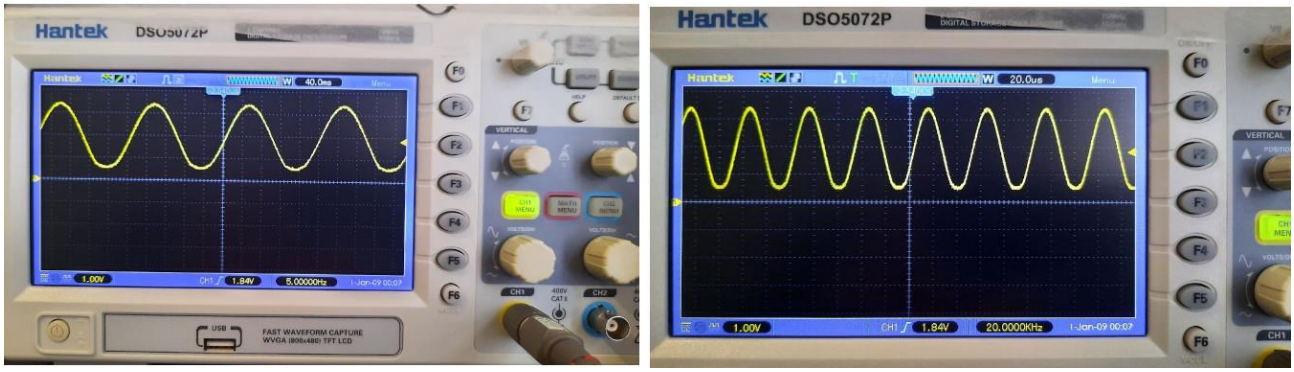


Рисунок 4 – Осцилограми на виході буферу без пасивних компонентів на навантажені 50 Ω, зліва при вхідній частоті 5 Hz зправа при вхідній частоті 20 kHz

Моделювання схеми РАА. На рис. 5 представлено схему класичного струмового дзеркала [1]. Струмове дзеркало – це керований струмом стабілізатор струму.

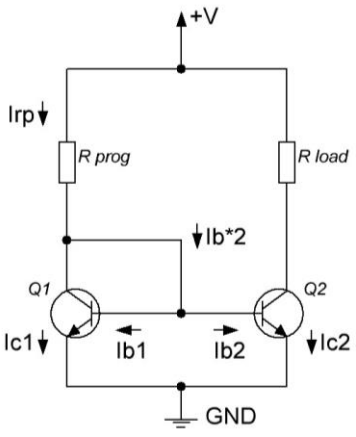


Рисунок 5 – Струмове дзеркало

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Основна функція струмового дзеркала — це копіювання струму, що проходить через один транзистор Q1, контролюючи струм в іншому активному пристрої кола Q2, зберігаючи постійний струм на виході, незалежно від навантаження R load.

$$I_{rp} = I_{c1} + 2 \cdot I_b \tag{1}$$

Керуючий струм складається з струму колектору Q1 та базового струму двох транзисторів Q1 та Q2, (1).

$$I_{b1} = I_{c1} / \beta \tag{2}$$

Струм бази Q1 залежить від струму колектору та коефіцієнта β, (2).

$$I_{rp} = I_c + 2 \cdot (I_c / \beta) \Rightarrow I_c \cdot (1 + 2 / \beta) \tag{3}$$

Як можна побачити з формули 3 керуючий струм дорівнює струму колектору Q1.

$$\frac{I_{rp}}{I_{c2}} = 1 + \frac{2}{\beta} \Rightarrow \frac{I_{c2}}{I_{rp}} = \frac{1}{1 + (2/\beta)} \tag{4}$$

На формулі 4 представлено залежність керуючого струму, що подається на Q1 до струму транзистора Q2.

$$\beta_1 = \beta_2 \approx 100 \tag{5}$$

Оскільки транзистори Q1 та Q2 однакові й коефіцієнт β в них теж однаковий і для транзистора 2N5551 дорівнює приблизно – 100.

$$I_{c2} = \frac{I_{rp}}{1 + (2/\beta)} \tag{6}$$

Враховуючи усі залежності представлені вище, можна описати залежність струму формулою 6, згідно з якою струм колектору Q2 залежить від керуючого струму, при цьому вплив коефіцієнта β можна не враховувати.

Задати керуючий струм можна за рахунок резистора Rprog (рис. 5), що і робиться у більшості випадків, проте його можна замінити джерелом струму. В схемі у якості джерела струму було обрано джерело струму на N–JFET BF245B (рис. 6).

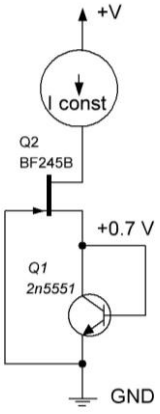


Рисунок 6 – Струмове джерело на N–JFET BF245B

Джерело струму, що задає керуючий струм струмового дзеркала побудовано на двох транзисторах N–JFET BF245B (Q2) та NPN 2N5551 (Q1). Падіння напруги, на

транзисторі 2N5551 Q1, що включено у режимі діода задає робочу точку N–JFET BF245B Q2 і власне це падіння і задає значення робочого струму джерела струму [3−5].

Для розрахунку струму потрібно мати залежність Ids(Vgs) − струму drain–source до напруги gate–source. Коректному моделюванню цієї залежності присвячена робота [6] , рис 7. Але у першому наближенні ця залежність може бути заснована на даних з технічній документації на напівпровідниковий прилад [2]. Таким чином, будемо оцінювати струм джерела струму на N–JFET [4]:

$$I_D = I_{DSS} \cdot (1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}})^2 \tag{7}$$

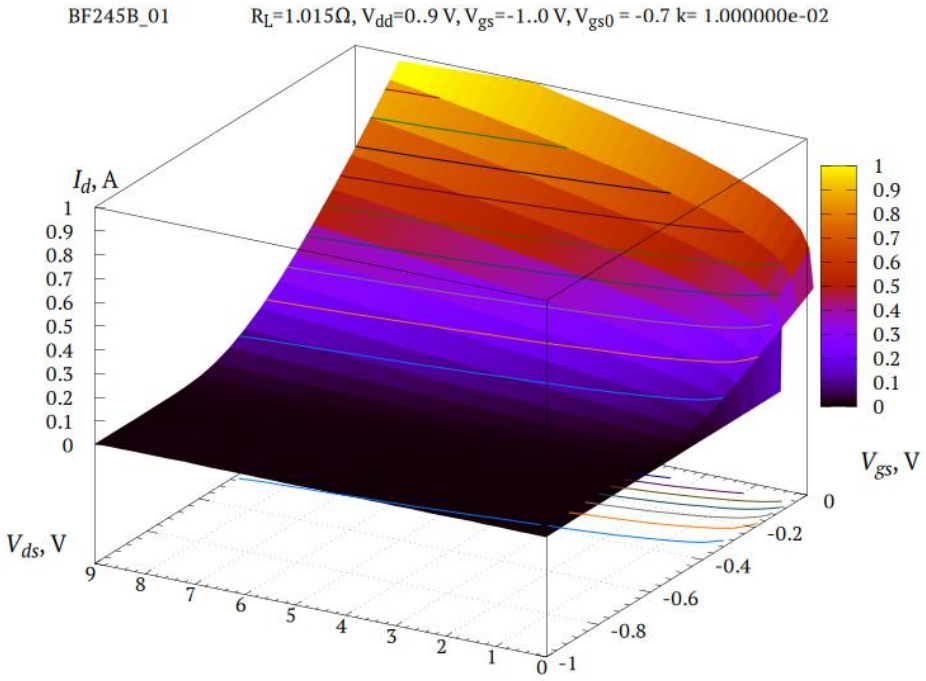


Рисунок 7 – Залежність Ids(Vgs,Vds) N–JFET BF245B

Враховуючи параметри з datasheet на N–JFET BF245B [2] підставимо значення до формули 7 і отримаємо струм джерела струму – 0.845 mA.

$$I_D = 2 \cdot (1 - \frac{0.7}{2})^2 = 0.845mA \tag{8}$$

Отримавши значення струму джерела струму, яке встановлює керуючий струм струмового дзеркала можна знайти струм, який видає дзеркало, скориставшись формулою 6.

$$I_{c2} = \frac{0.845}{1 + (2/100)} = 0.828mA \tag{9}$$

Ці значення струмів, що були розраховані близькі до реальних виміряних на резисторах R1 та R2. На резисторі R1 виміряно струм 0.824 mA, що дуже близько до розрахунку, а на резисторі R2 виміряно струм 0.645 mA. Різниця струму виходу струмо-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

вого дзеркала може бути пов'язана з різним коефіцієнтом β транзисторів Q7 та Q8 (рис. 1).

Вихідний каскад побудовано за схемою «Diamond Follower» (рис. 8). Це паралельний підсилювач струму, повторювач напруги або буфер. Схемотехнічно це комплементарний емітерний повторювач на чотирьох транзисторах, в якому кожен з двох вхідних транзисторів керує вихідним транзистором протилежного типу. Емітерні переходи вхідного та керованого ним вихідного транзистора включені назустріч один одному, тому зсув напруги між входом та виходом не перевищує кількох десятків мВ. Ця схема не вимагає схемотехнічних заходів щодо теплової стабілізації струму спокою: достатньо лише забезпечити тепловий зв'язок між транзисторами. Недолік базової схеми − це жорстке обмеження вихідного струму, що можливо виправити її ускладненням, або підвищенням струмів покою вхідних транзисторів.

На схемі класичного вихідного каскаду побудованого за схемою «Diamond Follower» є два джерела струму IE1 та IE2, в простішому випадку це звичайні струмообмежуючі резистори.

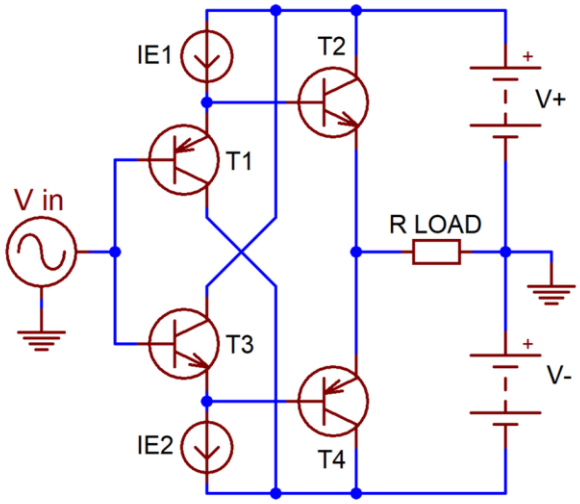


Рисунок 8 – Схема Diamond Follower

В схемі на рис. 1 в якості джерела струму для живлення вхідних транзисторів «Diamond Follower» використано струмове дзеркало.

Схему РАА буферу можна поділити на 3 основні частини, а саме: джерело струму, струмове дзеркало та вихідний каскад (схема Diamond Follower), який використовує струмове дзеркало для живлення передвихідних транзисторів. Режими струмів транзисторів можна розрахувати по представленим вище рівнянням.

Дослідження РАА буферу на резистивному навантаженні. Для дослідження властивостей схеми РАА, що була розроблена, та для порівняння з відомою схемою «Diamond Follower» (далі − DF), було створено стенд, який включав у себе лабораторне джерело живлення RF6006P, цифровий мультиметр SDM3055, набору резисторів для навантаження (RL), та універсального програмованого пристою для вимірювання та керування «Cube» [6]. Саме цей пристрій/стенд дозволив у автоматичному режимі задавати значення вхідної напруги Vin, та отримувати одночасно значення в декількох

точках схеми. Ручні маніпуляції були потрібні лише при зміні навантаження. Мультиметр SDM3055 був використаний для перевірки коректності роботи системи автоматичного вимірювання та верифікації значень опору. Для цієї серії вимірювань було використано однополярний метод живлення.

Результати вимірювань у вигляді Vout(Vin) для PAA та DF для різних навантажень RL представлено на рис. 9.

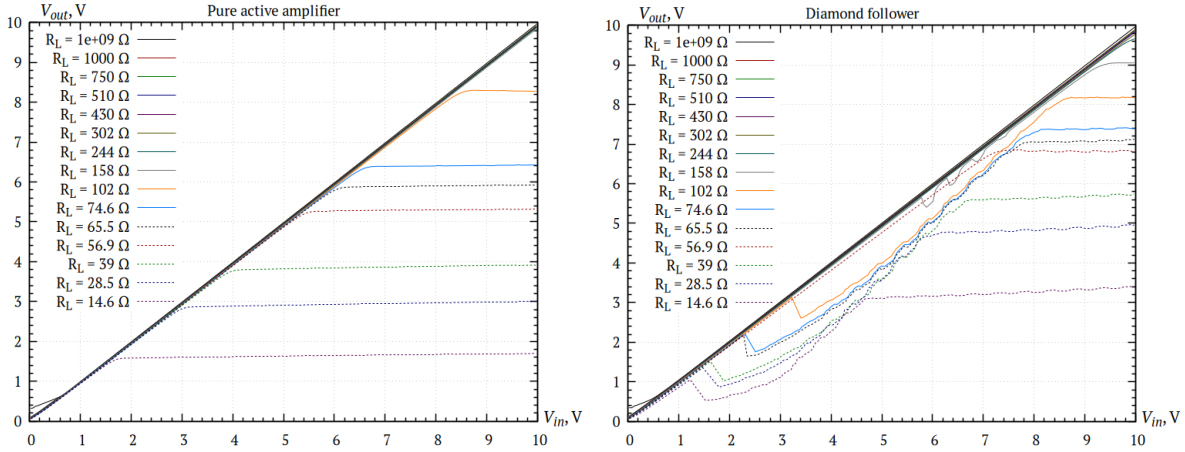


Рисунок 9 – Залежності Vout(Vin) для PAA та DF при різних навантаженнях

Аналіз цих залежностей дозволяє зробити висновок, що при достатньо невеликих навантаженнях обидва буфера дійсно виправдовують свою назву. PAA починає обмежувати вихідний струм, а отже, і напругу, починаючи зі значення опору навантаження у 102 Ω, при цьому залежність теж близька до лінійної, що відповідає режиму обмеження струму. З іншого боку, обмеження струму при використанні DF починається з навантаження у 158 Ω, але залежності суттєво нелінійні, що свідчить про генерацію коливань у цих випадках. Тем не менш, якщо коливання відсутні, DF здатен забезпечити суттєво більший струм (див. залежність для RL=39 Ω).

Для систем, де важливо не забезпечити максимальну вихідну потужність, а і зберегти форму сигналу (а це більшість систем), важливою ціллю становить збільшення діапазону, де вихідний сигнал повторює вхідний за заданою точністю. Тому на рис. 10. представлено у трьохвимірному вигляді залежності (Vin−Vout)(Vin,gL), де gL = 1/RL.

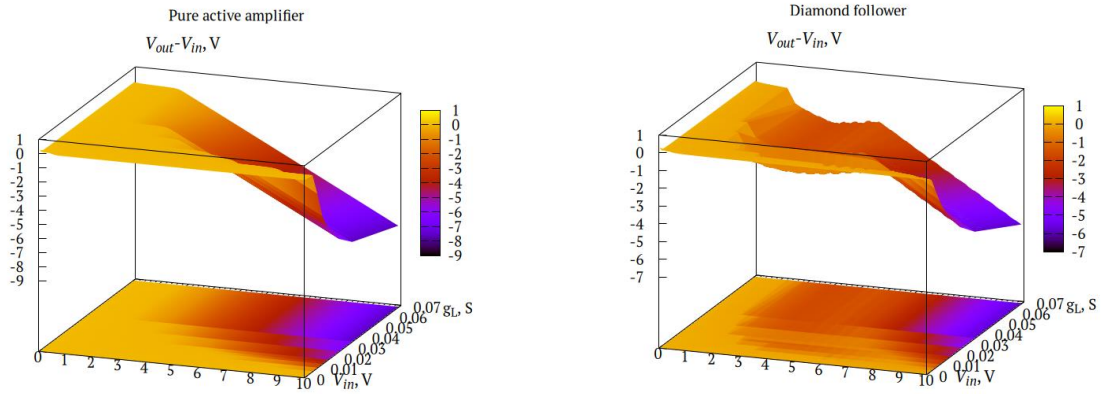


Рисунок 10 – Залежності (Vin−Vout)(Vin,gL) для PAA та DF

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Аналіз цих графіків дозволяє зробити висновок, що РАА забезпечує значно більший діапазон напруг і навантажень, де можна використовувати буфер без суттєвих похибок.

Для задач побудови систем вимірювальної техніки, інших приладів, де важлива мінімізація похибок, суттєвим є не тільки робочий діапазон, а і точність відтворення вхідного сигналу. Тому залежності (Vin−Vout)(Vin,gL) поблизу робочого діапазону представлено на рис. 11.

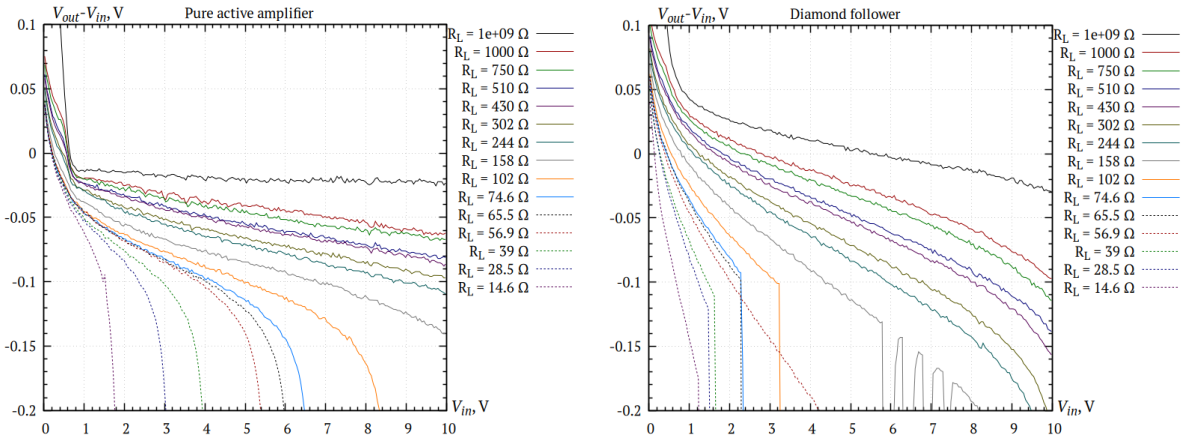


Рисунок 11 – Залежності (Vin−Vout)(Vin,gL) для РАА та DF поблизу робочого діапазону

Порівняльні залежності (Vin−Vout)(Vin,gL) для РАА та DF для двох навантажень представлено на рис. 12, при цьому було використано як зневажано мале навантаження, так і наближене до максимального.

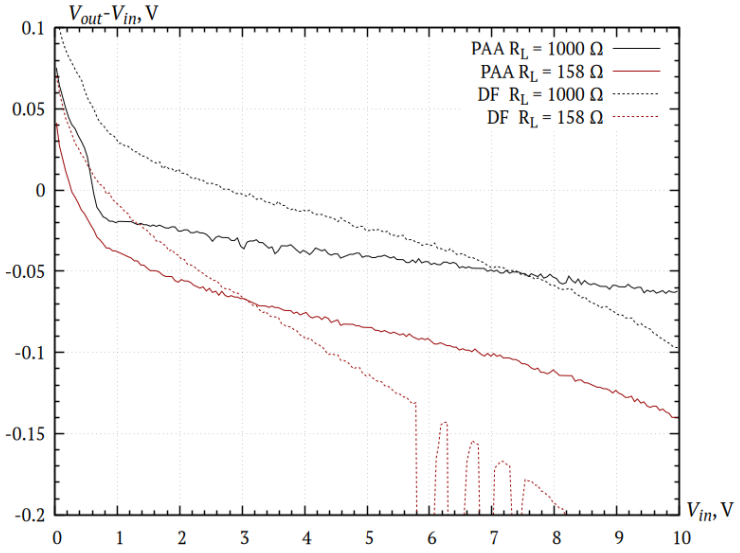


Рисунок 12 – Порівняння залежностей (Vin−Vout)(Vin,gL) для РАА та DF для двох навантажень

Як і очікувалось, РАА забезпечує як просто меншу похибку відтворення сигналу, так суттєво меншу залежність похибки від Vin. При цьому слід відмітити, що початкова

ділянка (Vin < 0.6 V) лежить за межами, де очікується низький рівень похибок. Для усунення цього явища слід використовувати двополярне живлення.

Однією з важливих характеристик підсилювача є Rout − вихідні опор. Слід взяти на увагу, що це − не константа для кожного підсилювача, а величина, що залежить від багатьох параметрів, і кращі підсилювачі забезпечують майже постійність цього опору у робочому діапазоні [7,8]. Для оцінювання Rout цього були побудовані залежності Vout(I) (рис. 13).

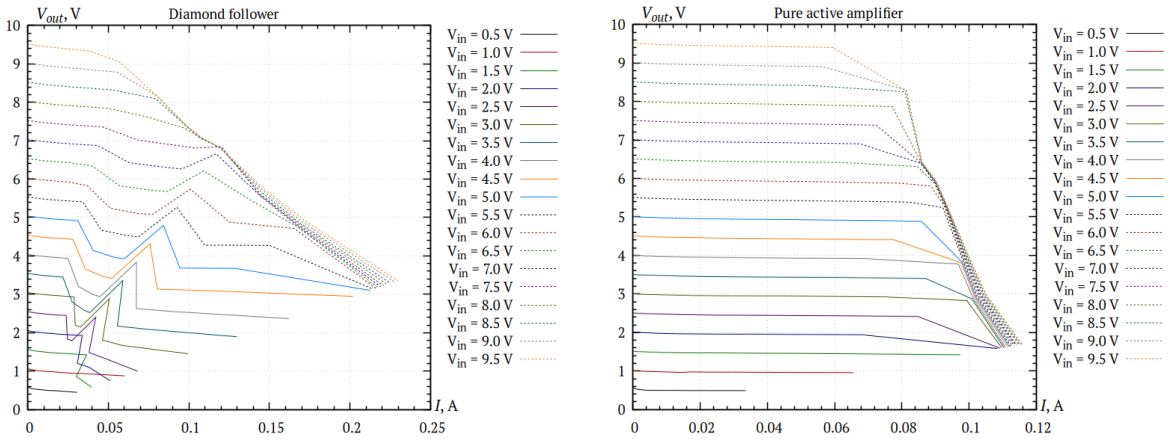


Рисунок 13 – Залежності Vout(I) для PAA та DF для різних навантажень

Аналіз графіків дає можливість стверджувати, що PAA забезпечує значно більшу, ділянку, де Rout не зазнає суттєвих змін. З цих графіків також було обрано діапазон для оцінювання Rout. При цьому слід відмітити, що якщо використовувати один діапазон струму для обох буферів, то для DF будуть отримані зовсім безглузді результати − завдяки коливанням. Тому для PAA було обрано діапазон струму [0.005..0.06] A, а для DF − [0.005..0.02] A. Отримані при цих умовах залежності Rout(Vin) представлено на рис. 14.

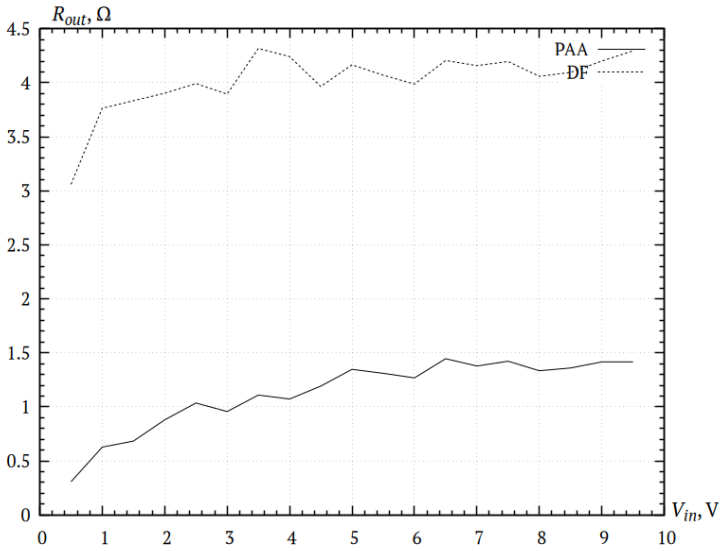


Рисунок 14 – Залежності Rout(Vin) для PAA та DF

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таким чином, РАА забезпечує як суттєво менше значення Rout, так і значно більший робочий діапазон.

Висновки. Було розроблено та створено схему буферу без використання пасивних компонентів. Були отримані її характеристики та досліджено роботу схеми при різному навантаженні. В статті виконувалось порівняння схеми РАА з відомою схемою Diamond Follower, оскільки їх сфера використання однакова.

На підставі проведених досліджень можна стверджувати, що:

1. Запропонована схема РАА дійсно може бути використана у якості буфер–повторювача.
2. У порівнянні з DF, РАА забезпечую меншу похибку відтворення вхідного сигналу у суттєво більшому діапазоні параметрів.
3. На відміну від DF, запропонована схема не демонструє самозбудження в умовах дослідження.
4. РАА має як краще значення Rout, так і ширший діапазон його стабільності.
5. Але РАА забезпечує менший струм навантаження за межами зони лінійності.

В подальших дослідах створену схему можливо використати для створення інтегрованих схем, де основними перевагами будуть: мінімальна площа на кристалі, широка смуга пропускання, технологічність виробництва та низький рівень шуму.

ЛІТЕРАТУРА

1. P. Horowitz, W. Hill, The art of electronics, 3rd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2015.
2. BF245A; BF245B; BF245C N–channel silicon field–effect transistors, Netherland: NXP Semiconductors, 1996. URL: https://www.nxp.com/docs/en/data–sheet/BF245A–B–C.pdf
3. DIAMOND TRANSISTOR OPA660, Texas Instruments, Burr–Brown 1993. URL: https://www.ti.com/lit/an/sboa071/sboa071.pdf
4. Follow The Leader – Voltage Followers & Buffers 2016, Rod Elliott (ESP) Page Created – July 2016, Updated August 2023 URL: https://sound–au.com/articles/followers.html
5. Linear Systems. JFET Circuit Design: A Schematics Library and Application Notes. Linear Systems. Jul 1, 2024
6. V. Hnatushenko, A. Guda, A. Zimoglyad, and A. Zhurba, “Development of a JFET model with increased accuracy: measurements of wrangling data, acquisition and model analysis,” in Proceedings of the Computational Intelligence Application Workshop (CIAW 2025), Lviv, Ukraine, pp. 97–109. https://ceur–ws.org/Vol–4110/paper8.pdf
7. A. Guda, A. Zimoglyad, Simultaneous parametric identification for the coupled relaxation generators system, Proc. Int. Sci. Tech. Conf. Information Technologies in Metallurgy and Machine Building, Dnipro, 2022, pp. 261–264. https://doi.org/10.34185/1991–7848.itmm.2022.01.057
8. Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Кліщ С.М. Апаратний комплекс для вимірювання потужності UHF сигналів // Системні технології Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2024. – № 2 (151). https://doi.org/10.34185/1562–9945–2–151–2024–03

REFERENCES

1. P. Horowitz, W. Hill, The art of electronics, 3rd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2015.
2. BF245A; BF245B; BF245C N–channel silicon field–effect transistors, Netherland: NXP Semiconductors, 1996. URL: https://www.nxp.com/docs/en/data–sheet/BF245A–B–C.pdf
3. DIAMOND TRANSISTOR OPA660, Texas Instruments, Burr–Brown 1993. URL: https://www.ti.com/lit/an/sboa071/sboa071.pdf
4. Follow The Leader – Voltage Followers & Buffers 2016, Rod Elliott (ESP) Page Created – July 2016, Updated August 2023 URL: https://sound–au.com/articles/followers.html
5. Linear Systems. JFET Circuit Design: A Schematics Library and Application Notes. Linear Systems. Jul 1, 2024
6. V. Hnatushenko, A. Guda, A. Zimoglyad, and A. Zhurba, "Development of a JFET model with increased accuracy: measurements of wrangling data, acquisition and model analysis," in Proceedings of the Computational Intelligence Application Workshop (CIAW 2025), Lviv, Ukraine, pp. 97–109. https://ceur–ws.org/Vol–4110/paper8.pdf
7. A. Guda, A. Zimoglyad, Simultaneous parametric identification for the coupled relaxation generators system, Proc. Int. Sci. Tech. Conf. Information Technologies in Metallurgy and Machine Building, Dnipro, 2022, pp. 261–264. https://doi.org/10.34185/1991–7848.itmm.2022.01.057
8. Zymohliad A.Iu., Huda A.I., Klishch S.M. Aparatnyi kompleks dlia vymiriuvannia potuzhnosti UHF syhnaliv // Systemni tekhnolohii Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – 2024. – № 2 (151). https://doi.org/10.34185/1562–9945–2–151–2024–03

Received 01.06.2026.
Accepted 03.08.2026.
Published 30.10.2026

Development, modeling and research of an amplifier without passive elements using JFETs

It is known that an analog buffer, or voltage repeater buffer, is an electronic circuit based on an operational amplifier or active element with a gain of unity (K=1). Ideally, it should transfer the input voltage to the output without changes in amplitude and phase, while providing high input and low output impedance for matching the cascades. Also, an essential task is to provide a given output power.

The main functions of an analog buffer are: cascade isolation (prevents the influence of the output load on a sensitive signal source); impedance matching (effectively transmits a signal from a source with high internal resistance to a low–impedance input, such as an ADC); dropout protection (allows you to transmit an analog signal over long cables without distortion and voltage drop).

The aim of the work is to investigate the possibility of building a buffer on discrete components without using passive elements (resistors, capacitors, inductors). This buffer can be used for both analog and digital signals. The task of building such a circuit that uses only active components (hereinafter PAA pure active amplifier) is promising.

PAA has advantages such as: 1) Minimum area on the crystal. Resistors and capacitors take up a lot of space in silicon. Transistors are much more compact; 2) Wide bandwidth. The

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

absence of parasitic capacitances of large passive elements increases the speed and operating frequency. High input impedance. Ideal for isolating the signal source from subsequent stages. Low output impedance. Allows you to effectively control heavy capacitive loads; 3) Manufacturing processability. Manufacturing a circuit consisting only of transistors simplifies and reduces the cost of microcircuit lithography; 4) Low noise. Thermal noise of resistors (Johnson noise) is absent in such a structure.

A series of laboratory studies were conducted on the operability of the developed PAA (pure active amplifier) buffer circuit, and its parameters were also measured. The circuit showed its operability and can be used in tasks where cascade decoupling, impedance matching, signal dropout protection at small sizes of what? and low cost are required.

In the future, with further experiments, it is possible to use it to create integrated circuits, where the main advantages will be: minimal area on the crystal, wide bandwidth, manufacturability of production and low noise level.

Key words: JFET, buffer, diamond follower, PAA, pure active amplifier.

Зимогляд Андрій Юрійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем, ННІ «ДМетІ» Українського державного університету науки і технологій, старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.
ORCID: https://orcid.org/0009–0001–7239–2467
Гуда Антон Ігорович – д.т.н., доцент, професор кафедри Інформаційних технологій і систем, ННІ «ДМетІ» Українського державного університету науки і технологій, провідний науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–1139–1580
Селівьорстова Тетяна Віталіївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем, ННІ «ДМетІ» Українського державного університету науки і технологій.
ORCID: https://orcid.org/0000–0002–2470–6986

Zymoglyad Andrew – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information technologies and systems, Ukrainian state university of science and technology, Senior Researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009–0001–7239–2467
Guda Anton – Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Information technologies and systems, Ukrainian state university of science and technology, Leading Researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–1139–1580
Selivorstova Tetiana – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information technologies and systems, Ukrainian state university of science and technology.
ORCID: https://orcid.org/0000–0002–2470–6986