

УДК 621.316

О. Д. Азаров, О. Я. Стахов

## МОДЕЛІ АЧХ І ФЧХ ДВОТАКТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Анотація.** Розглянуто універсальний підхід для загального аналізу АЧХ і ФЧХ аналогових схем з урахуванням фундаментальних співвідношень між параметрами транзисторів без прив'язки до конкретної елементної бази, що дозволить достовірно провести оцінку характеристик з урахуванням необхідної кількості підсилювальних каскадів.

**Ключові слова:** АЧХ, ФЧХ, багатокаскадний, високолінійний, двотактний підсилювач постійного струму (ДПНС).

**Abstract.** A universal approach for the general analysis of frequency response and frequency response of analog circuits is considered, taking into account the fundamental relationships between the parameters of transistors without reference to a specific element base, which will reliably assess the characteristics taking into account the required number of amplifier stages.

**Keywords:** frequency response, phase response, multi-stage, high-line, push-pull amplifier.

**DOI:** <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-53-1-77-83>.

### Вступ

При проектуванні високопродуктивних аналого-цифрових перетворювачів порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю, очевидним є те, що їх доцільно розглядати, як сукупність аналогових та цифрових вузлів, характеристики яких задають параметри системи в цілому [1, 2]. Водночас, варто відзначити, що такі АЦП є основними аналого-цифровими блоками багаторозрядних аналого-цифрових систем та структурних схем апаратної частини вимірювальних каналів. А тому, ґрунтуючись на класифікації аналогових пристроїв АЦП, що використовуються для побудови багаторозрядних аналого-цифрових систем, за функціональною ознакою, можна виділити такі аналого-цифрові пристрої: підсилювачі, вхідні буфери напруги, перетворювачі струм-струм, перетворювачі струм-напруга, перетворювачі напруга-напруга, вихідні буфери для ЦАП.

Зазначені пристрої відрізняються методами перетворення сигналів, що дозволяє провести роздільний аналіз їхніх похибок, а також розробити узагальнені критерії оптимального проектування. Тим самим можна сформулювати вихідні дані для синтезу і дослідження структурних і схемних рішень аналогових пристроїв.

### Актуальність

У теперішній час проектування аналогових інтегральних схем у значній мірі базується на комп'ютерному схемотехнічному аналізі [3]. Треба зазначити, що принципи схемотехнічного аналізу крім беззаперечних переваг таких як простота виконання, можливість варіаційного аналізу, висока наочність та універсальність, мають певні недоліки. Це пов'язано із специфікою чисельних методів, що використовуються для визначення відповідних параметрів схем. Побудова математичних моделей електронних схем [4, 5] базується на використанні схем заміщення окремих компонентів. Фундаментальними компонентами, у першу чергу, є транзистори. При цьому для побудови АЧХ і ФЧХ потрібні так звані П- або Т-подібні малосигнальні схеми заміщення транзисторів. Водночас для використання пакетів схемотехнічного аналізу таких як MicroCap, OrCAD, MicroSim та інших потрібна деталізована бібліотека елементів у форматі SPICE, що містить параметри елементів схем заміщення відповідних компонентів [5-7]. Лише за таких умов можливо отримати достовірні характеристики АЧХ і ФЧХ.

Проте ускладнення схем, шляхом нарощування кількості підсилювальних каскадів, з метою збільшення коефіцієнтів передачі схем, наштовхується на ряд проблем. Це має місце, наприклад, при моделюванні передатних характеристик багатокаскадних схем підсилювачів постійного струму з великим коефіцієнтом передачі (>90 дБ) із розірваною петлею зворотнього зв'язку під час балансування нуля і його подальшої компенсації, а також зняття таких характеристик як АЧХ і ФЧХ та коефіцієнта нелінійних спотворень. При цьому наявність методичних похибок дискретизації, притаманних чисельним методам, призводить до недостовірних результатів. Пошук підходу вирішення вищезгаданої проблеми є актуальним.

Автор пропонує універсальний метод для загального аналізу АЧХ і ФЧХ аналогових схем, не прив'язуючись до конкретної елементної бази, з використанням аналітичних співвідношень, які отримуються на основі наявних фундаментальних співвідношень між параметрами транзисторів, що дозволить достовірно оцінювати АЧХ і ФЧХ з урахуванням необхідної кількості підсилювальних каскадів.

### Мета

Створення універсального підходу для загального аналізу АЧХ і ФЧХ аналогових схем з урахуванням фундаментальних співвідношень між параметрами транзисторів без прив'язки до конкретної елементної бази.

### Постановка задач

1. Розглянути узагальнену структурну схему двотактного підсилювача постійного струму.
2. Проаналізувати запропонований підхід для загального аналізу АЧХ і ФЧХ аналогових схем з урахуванням фундаментальних співвідношень між параметрами транзисторів без прив'язки до конкретної елементної бази.
3. Перевірити адекватність запропонованих моделей АЧХ і ФЧХ у рамках запропонованого і відомого підходів.

### Розв'язання поставлених задач

Всі багаторозрядні аналого-цифрові системи, а також АЦ перетворювачі містять у своїй структурі ті чи інші аналогові вузли, від характеристик яких у значній мірі залежать вихідні статичні і динамічні характеристики систем та перетворювачів у цілому. Водночас високі показники точності можуть бути досягнуті лише при низькому рівні некоригованих похибок аналогових пристроїв, що входять до складу цих систем, які, у свою чергу, можуть бути досягнуті структурним і схемотехнічним шляхом.

Відомо, що на базі підсилювачів можна реалізувати усі необхідні аналогові вузли такі як: буфери напруги, нормуючі підсилювачі, перетворювачі струм-напруга і напруга-струм, підсилювачі різниці та інші [ 1, 2]. Найкращі показники для побудови високолінійних аналогових пристроїв мають ДППС із розділеними каналами підсилення, які дозволяють достатньо зменшити рівень некоригованих похибок. Водночас, побудова таких ДППС потребує точного завдання струму робочої точки [8].

Узагальнена структурна схема ДППС може мати вигляд, як показано на рис. 1. Принципову ДППС наведено на рис. 2, який захищено патентом України [9].

Підсилювач містить вхідний двотактний каскад (ВДК), який побудовано на транзисторах VT4, VT5, які ввімкнено за схемою загальна база (ЗБ). Робоча точка цього каскаду задається джерелами струмів I1 та I2, а також транзисторами VT1, VT2, VT3, VT6. Для завдання режиму по постійному струму транзисторів VT11, VT13 першого підсилювального каскаду (ПК1) і VT11, VT13 другого підсилювального каскаду (ПК2), транзистори яких ввімкнено за схемою загальний колектор (ЗК), використовується двонаправлений відбивач струму (ДВС), який побудовано на транзисторах VT8, VT9, VT15, VT16 та компенсатори струму (КС), які побудовано на транзисторах VT7, VT14 та VT10, VT17 відповідно. Транзистори VT19, VT21, VT23, VT24 та VT20, VT22, VT25, VT26 утворюють складені відбивачі Уїлсона і, водночас, утворюють двотактний вихідний каскад (ДВК).

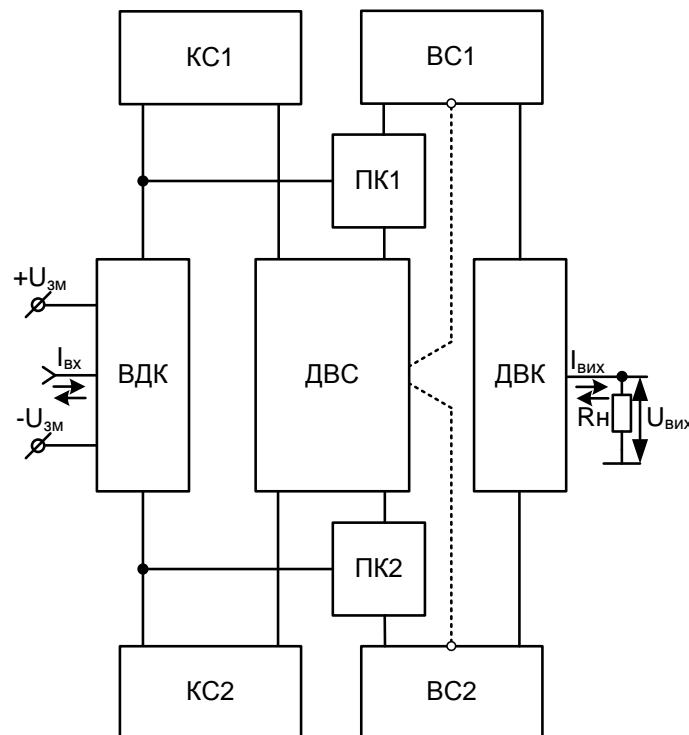


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема ДППС

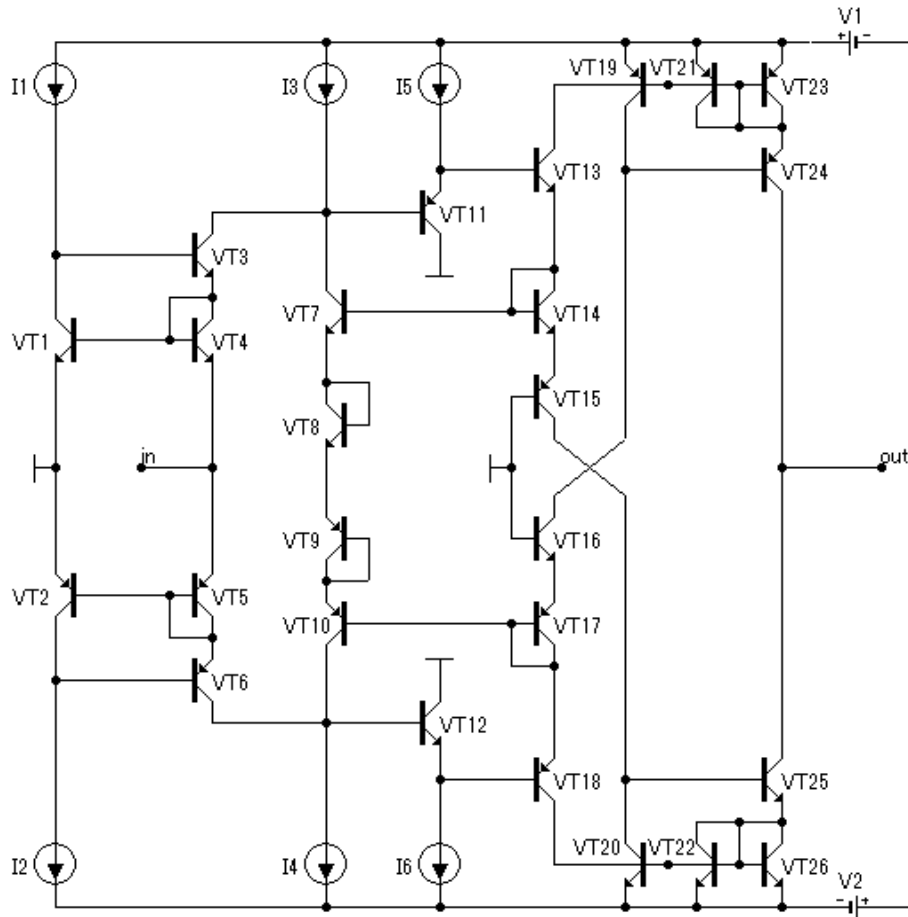


Рисунок 2 – Принципова схема ДППС

Існуючі методи оцінки АЧХ і ФЧХ базуються на використанні схем заміщення каскадів ЗБ, ЗЕ, ЗК на основі яких можна скласти малосигнальну схему заміщення для ДППС. Проте, проводити аналіз вказаних характеристик в рамках математичної моделі схеми ДППС за загальним методом Кірхгофа досить складно, оскільки необхідно скласти систему рівнянь більш як з 20-ти рівнянь, причому, для обчислення визначників відповідних матриць необхідні значні обчислювальні ресурси (визначник складається з  $n!$  доданків, де  $n$  – кількість рівнянь, при  $n=20$  кількість доданків  $\approx 2,4 \cdot 10^{18}$  [7]). Доцільнішим є опис моделей АЧХ і ФЧХ ДППС на запропонованому підході, який можна пояснити так, що загальний коефіцієнт підсилення можна розглядати як вектор  $\vec{K}_i(f)$ , що визначається як сума векторів  $\vec{K}_i'(f)$ ,  $\vec{K}_i''(f)$  верхнього і нижнього каналів підсилення відповідно [7]. Для знаходження сумарного  $\vec{K}_i(f)$  використовуємо теорему косинусів:

$$K_i(f) = \sqrt{K_{i1}^2(f) + K_{i2}^2(f) - 2 \cdot K_{i1}^2(f) \cdot K_{i2}^2(f) \cos \left[ \left(180 - \Delta\varphi\right) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}. \quad (1)$$

Щоб визначити кут  $\varphi'(f)$  необхідно застосувати теорему синусів при цьому:

$$\varphi'(f) = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{K_{i1} \cdot \sin \left[ \Delta\varphi(f) \cdot \frac{180}{\pi} \right]}{\sqrt{K_{i1}^2(f) + K_{i2}^2(f) - 2 \cdot K_{i1}^2(f) \cdot K_{i2}^2(f) \cos \left[ \left(180 - \Delta\varphi(f)\right) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}}. \quad (2)$$

Графічну інтерпретацію коефіцієнтів передачі ДППС показано на рисунку 3.

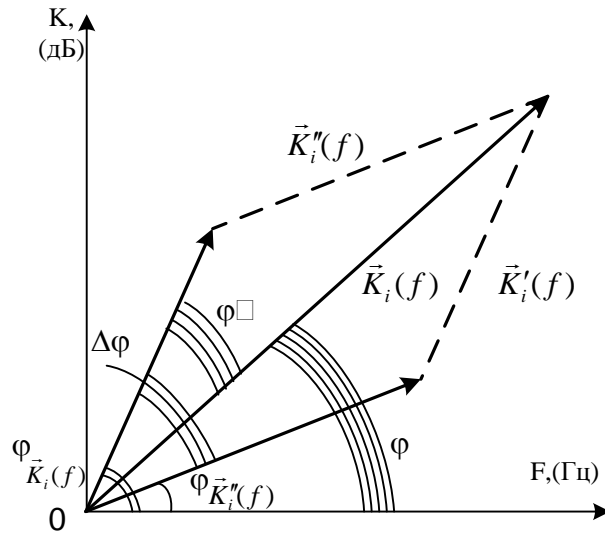


Рисунок 3 – Графічна інтерпретація коефіцієнтів передачі ДППС

У свою чергу  $K_i', K_i''$  визначаються у вигляді:

При цьому коефіцієнти підсилення по каналах визначаються:

$$K_i' = K_{i\text{вх}}' \cdot K_{\text{ПР}}' \cdot K_{i\text{вих}}', \tag{3}$$

$$K_i'' = K_{i\text{вх}}'' \cdot K_{\text{ПР}}'' \cdot K_{i\text{вих}}'',$$

де  $K_{i\text{вх}}', K_{i\text{вх}}''$  – коефіцієнти підсилення по струму ВДК відповідно по верхньому і нижньому каналах,  $K_{\text{ПР}}', K_{\text{ПР}}''$  – коефіцієнт підсилення по струму ПК,  $K_{i\text{вих}}', K_{i\text{вих}}''$  – коефіцієнт підсилення по струму відбивачів Уїлсона по верхньому і нижньому каналах відповідно.

Для проведення подальшого аналізу математичної моделі АЧХ і ФЧХ скористаємося спрощеними формулами коефіцієнтів передачі транзисторних каскадів [6]:  
для АЧХ та ФЧХ відповідно:

$$k_i(f) = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2}}, \tag{4}$$

$$\varphi(f) = \arctg\left(\frac{f}{f_p}\right) + \varphi_c,$$

де  $f_p$  – частота полюсу на рівні «-3 дБ»,  $\varphi_c = \arctg\left(\frac{f}{f_{\text{max}}}\right)$  – додатковий фазовий зсув;

$f_{\text{max}} = \sqrt{\frac{f_t}{8\pi \cdot C_{bc} \cdot r_b}}$  – максимальна частота генерування [4] транзистора;  $f_{\text{max}}$  – гранична частота транзистора на рівні 0 дБ для каскаду загальний емітер (ЗЕ).

Враховуючи схеми вмикання транзисторів у ВДК ДППС із загальною базою та враховуючи (4) для схеми ЗБ запишемо:

$$K'_{i_{вх}} = K_{i_{T3}}(f) = K'_{i_{3Б}} = \frac{\alpha_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT3}}\right)^2}};$$

$$K''_{i_{вх}} = K_{i_{T4}}(f) = K''_{i_{3Б}} = \frac{\alpha_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT6}}\right)^2}},$$
(5)

де  $f_{pT3}$  та  $f_{pT6}$  – полюси транзисторів VT3 та VT6.

Враховуючи схеми каскадного вмикання транзисторів у ППК ДППС із загальним колектором (4) для схеми ЗК запишемо

$$K_{i_{T11}}(f) = K'_{i_{3К}} = \frac{\beta_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT11}}\right)^2}};$$

$$K_{i_{T13}}(f) = K''_{i_{3К}} = \frac{\beta_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT13}}\right)^2}};$$

$$K_{i_{T12}}(f) = K'_{i_{3К}} = \frac{\beta_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT12}}\right)^2}};$$

$$K_{i_{T18}}(f) = K''_{i_{3К}} = \frac{\beta_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT18}}\right)^2}},$$
(6)

де  $f_{pT11}$ ,  $f_{pT12}$ ,  $f_{pT13}$ ,  $f_{pT18}$  – полюси транзисторів VT11, VT12, VT13, VT18 відповідно.

При цьому:

$$K'_{ПП} = K_{i_{T11}}(f) \cdot K_{i_{T13}}(f);$$

$$K''_{ПП} = K_{i_{T12}}(f) \cdot K_{i_{T18}}(f),$$
(7)

Враховуючи (5), (6), (7) і те, що ДВК побудовано на відбивачах Уїлсона (при цьому  $K'_{i_{вх}} \approx K''_{i_{вх}} \approx 2$ ) та підставивши в (3), отримаємо коефіцієнти передачі по верхньому і нижньому каналах підсилення:

$$K_i'(f) = \frac{\alpha_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT3}}\right)^2}} \cdot \frac{\beta_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT11}}\right)^2}} \cdot \frac{\beta_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT13}}\right)^2}} \cdot 2; \quad (8)$$

$$K_i''(f) = \frac{\alpha_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT6}}\right)^2}} \cdot \frac{\beta_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT12}}\right)^2}} \cdot \frac{\beta_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT18}}\right)^2}} \cdot 2,$$

За допомогою виразів (1), (2) та (8) можна визначити значення загального коефіцієнта підсилення та його фазову характеристику. Для перевірки адекватності запропонованих моделей АЧХ і ФЧХ використовуємо моделювання у програмному середовищі MicroCap та MathCAD. Для цього використовуємо отримані аналітичні співвідношення та електричну схему, яку наведено на рис. 2. Моделюючи схеми за допомогою програми MicroCap, отримуємо збіжність результатів аналізу аналітичних рівнянь АЧХ і ФЧХ та електричної принципової схеми. Графіки АЧХ і ФЧХ наведено на рис. 4.

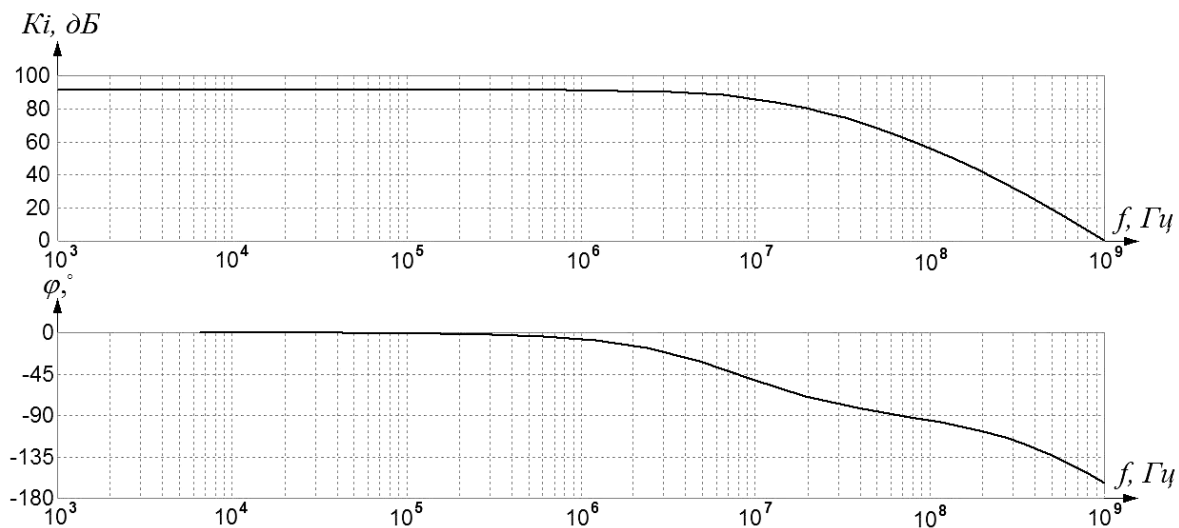


Рисунок 4 – Результати моделювання АЧХ і ФЧХ ДППС

### Висновки

1. Розглянуто узагальнену структурну схему двотактного підсилювача постійного струму та відповідну їй електричну принципову схему, що дозволило зрозуміти основний принцип функціонування аналогових схем за двотактною структурою.

2. Проаналізовано запропонований підхід для загального аналізу АЧХ і ФЧХ двотактного підсилювача постійного струму з урахуванням фундаментальних співвідношень між параметрами транзисторів без прив'язки до конкретної елементної бази. Запропонований підхід дозволяє спростити аналіз аналогових електронних схем за двотактною структурою, не використовуючи складні розрахунки за законами Кіргофа.

3. Перевірено адекватність моделей АЧХ і ФЧХ у рамках запропонованого і відомого підходів. Доведено, що збіжність АЧХ і ФЧХ коефіцієнтів передачі, отриманих шляхом схемотехнічного аналізу та спрощених аналітичних виразів, які їх описують, не перевищує допустимого рівня 1%.

### Список використаних джерел

- [1] А. И. Кондалев, В. А. Багацький, В. А. Романов, В. А. Фабричев, *Высокопроизводительные преобразователи формы информации*. К.: Наукова думка, 1987, 280 с.

- [2] Walt Kester, *ANALOG-DIGITAL CONVERSION*. Central Application Department, March 2004. 1127 p.
- [3] М. А. Амелина, С. А. Амелин, *Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8*. М.: Горячая линия– Телеком, 2007, 464 с. ил. ISBN 978-5-93517-339-5.
- [4] И. П. Степаненко, *Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.* М.: Лаборатория базовых знаний, 2003, 488 с.
- [5] B. Alan, *Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design*. Wiley Classic Library New Jersey, 2003, 915 p.
- [6] У. Титце, К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем.* М.: ДМК Пресс, 2008, 832 с. ISBN 5-94074-148-7.
- [7] М. Я. Выгодский, *Справочник по высшей математике*. М.: АСТ: Астрель, 2005, 991с. ISBN 5-271-03651-0.
- [8] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, *Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються: монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2011, 156 с.
- [9] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, О. О. Лукашук, «Двотактний підсилювач постійного струму», патент на корисну модель 140168 Україна, 10.02.20.

Стаття надійшла: 18.01.2022.

#### References

- [1] A. I. Kondalev, VA Bagatsky, VA Romanov, VA Fabricev, *High-performance form converters*. К.: Scientific opinion, 1987, 280 s. [in Russian].
- [2] Walt Kester, *ANALOG-DIGITAL CONVERSION*. Central Application Department, March 2004. 1127 p.
- [3] M. A. Amelina, S. A. Amelin, *Micro-Cap 8 circuit design program*. Moscow: Hotline – Telecom, 2007, 464 p. ISBN 978-5-93517-339-5 [in Russian].
- [4] I. P. Stepanenko, *Fundamentals of microelectronics: Textbook. manual for universities. - 2nd ed., Reworked. and ext.* Moscow: Laboratory of Basic Knowledge, 2003, 488 p. [in Russian].
- [5] B. Alan, *Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design*. Wiley Classic Library New Jersey, 2003, 915 p.
- [6] W. Titze, K. Schenk, *Semiconductor circuitry. 12th ed. Volume I: Per. with him.* М.: DMK Press, 2008, 832 p. ISBN 5-94074-148-7 [in Russian].
- [7] M. Ya. Vygodsky, *Handbook of higher mathematics*. М.: AST: Astrel, 2005, 991p. ISBN 5-271-03651-0 [in Russian].
- [8] O. D. Azarov, V. A. Garnaga, *Two-stroke DC amplifiers for multi-bit converters of self-calibrating information: a monograph*. Vinnytsia: VNTU, 2011, 156 p. [in Ukrainian].
- [9] O. D. Azarov, M. R. Obertyukh, O. Ya. Stakhov, O. O. Lukashuk, "Push-pull amplifier", patent for utility model 140168 Ukraine, 10.02.20 [in Ukrainian].

#### Відомості про авторів

**Азаров Олексій Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки.

**Стахов Олексій Ярославович** – аспірант кафедри обчислювальної техніки.

O. D. Azarov, O. Y. Stahov

## MODELS OF AMPLITUDE FREQUENCY AND PHASE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PUSH-PULL AMPLIFIERS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia