

В. А. Гарнага

## ВИСОКОЛІНІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ІЗ СИМЕТРИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВИМІРЮВАНЬ

*Визначальним компонентом аналогової схемотехніки є підсилювачі, окрему нішу серед яких складають підсилювачі постійного струму (ППС), що у свою чергу є основою операційних підсилювачів для аналогових і гібридних обчислювальних машин та вимірювальних інформаційних систем [1]. Історично склалося так, що перші ППС будували на електронних лампах [2]. Водночас перенесення підходів та принципів побудови структурних схем лампових підсилювачів на транзисторні призвело до того, що інтегральні транзисторні схеми ППС, які з'явилися в 60-х і 70-х роках, значною мірою нагадували лампові схеми. Це значно обмежувало досягнення потенційних можливостей у рамках динамічних та статичних характеристик, оскільки, зокрема, не дозволяло використовувати частотні властивості транзисторів аж до граничної частоти  $f_T$ , а також обмежувало лінійність передатної характеристики та ряд інших параметрів.*

**Ключові слова:** симетрична структура, підсилювач постійного струму.

Значна кількість сучасних підсилювачів постійного струму застосовують переважно одноканальну асиметричну структуру з диференційним підсилювальним каскадом на вході і двотактним симетричним каскадом на виході, який передбачає принцип підсилення і перетворення напруг [3]. Перевагами такого підходу є функціональна універсальність цих схем, що дозволяє використовувати їх у різних пристроях (операційні підсилювачі, буферні пристрої, пристрої вибірки-зберігання аналогових сигналів, компаратори і т. д.). Проте підсилювачі на базі диференційного каскаду з одноканальною структурою мають певні недоліки: низьку швидкість наростання вихідного сигналу, значний коефіцієнт нелінійних спотворень, особливо при збільшенні частоти вхідного сигналу, асиметричність вихідного сигналу при роботі з прямокутним двополярним вхідним імпульсом.

Водночас, слід зазначити, що ще в 70-х роках почали будувати двотактні симетричні підсилювачі струму. Проте вони були недосконалі, оскільки мали обмежену кількість (1 або 2) підсилювальних каскадів, низьку лінійність і малий коефіцієнт передачі. Однією з причин цього було те, що у вказаних схемах з багатокаскадною структурою (2 або 3) складно задавати потрібний режим по постійному струму. З цієї причини не було можливості скористатися перевагами, які надають двотактні підсилювачі постійного струму з симетричною структурою. Тому проблема побудови двотактних симетричних підсилювачів постійного струму з підвищеною лінійністю передатної характеристики є актуальною.

Автор пропонує побудову підсилювальних пристроїв здійснювати на базі двотактних симетричних структур ППС, в яких проблему завдання робочої точки схеми подолано за допомогою використання двонаправлених відбивачів струму. Перевагами такого підходу є висока лінійність статичної передатної характеристики, підвищена швидкодія, а також симетрична реакція на вхідний прямокутний двополярний імпульс [4]. Незважаючи на ряд практичних реалізацій різновидів цих підсилювачів, до того ж захищених патентами СРСР та України, аналіз передатної характеристики таких ППС проведено недостатньо глибоко через брак відповідних аналітичних залежностей.

**Мета** – розглянути схемні рішення ППС із симетричною структурою, проаналізувати їх переваги перед асиметричними традиційними структурами.

### Розв'язання задач

Розглянемо основні особливості побудови підсилювальних пристроїв із симетричною структурою. Залежно від побудови вхідного каскаду симетричні ППС можна поділити на дві основні групи:

- 1) із самоповнювальною схемою із загальною базою;
- 2) з гібридною схемою із загальним колектором.

Розглянемо спрощену схему підсилювача постійного струму із симетричною структурою, що наведена на рис. 1. Вона належить до першої групи схем симетричних ППС.

Двотактний симетричний ППС складається із вхідного каскаду, побудованого на транзисторах T1 і T2, включених за самоповнювальною схемою із загальною базою, та проміжних каскадів підсилення на транзисторах T9 і T10, включених за схемою із загальним емітером. Для завдання і балансування режиму по постійного струму проміжних каскадів у схему введено двонаправлений відбивач струму на транзисторах T3 і T5, T6 і T7, T4 і T8 і двох транзисторів T10, T11 у діодному вмиканні.

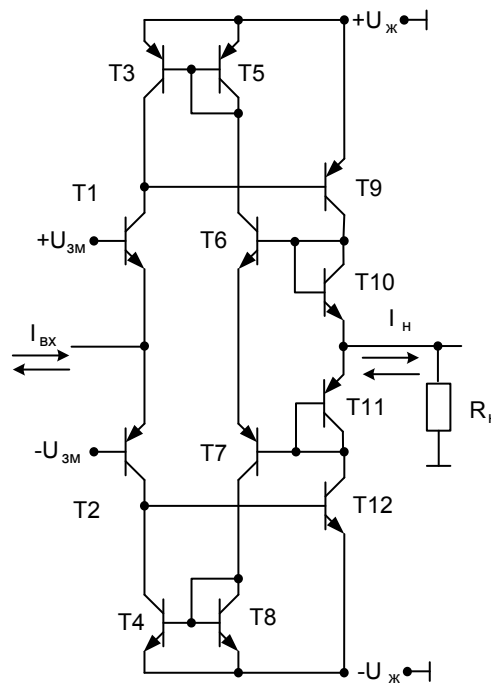


Рис. 1. Спрощена принципова схема двотактного симетричного ППС

Загальний коефіцієнт передачі по струму описується формулою:

$$K_i(I_{ex}) \cong \frac{\beta_0^{(12)}\alpha_2 + \beta_0^{(9)}\alpha_1}{2} + \frac{\beta_1^{(12)}\alpha_2 + \beta_1^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex} + \frac{\beta_2^{(12)}\alpha_2 + \beta_2^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex}^2.$$

На рис. 2 представлено спрощену схему підсилювача постійного струму із симетричною структурою, що належить до другої групи.

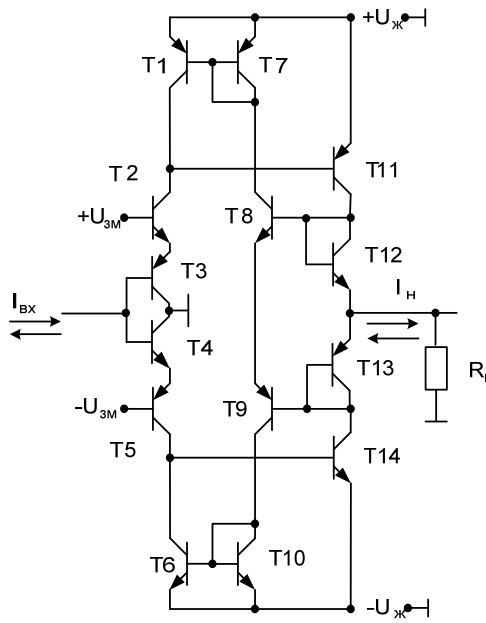


Рис. 2. Спрощена принципова схема двотактного симетричного ППС за гібридною схемою із загальним колектором

Особливістю схеми, що розглядається, є її вхідний підсилювальний каскад на транзисторах Т3 і Т4, побудований на основі гібридної схеми із загальним колектором. Аналогічно, як і в попередній схемі, використовується двонаправлений відбивач струму для завдання режиму по постійному струму на транзисторах Т1 і Т7, Т6 і Т10, Т8 і Т9, а також Т12 і Т13 у діодному вмиканні.

Перевагами підсилювачів постійного струму із симетричною структурою є симетрична реакція на прямокутний двополярний імпульс, висока швидкість наростання вихідного сигналу рис. 3.

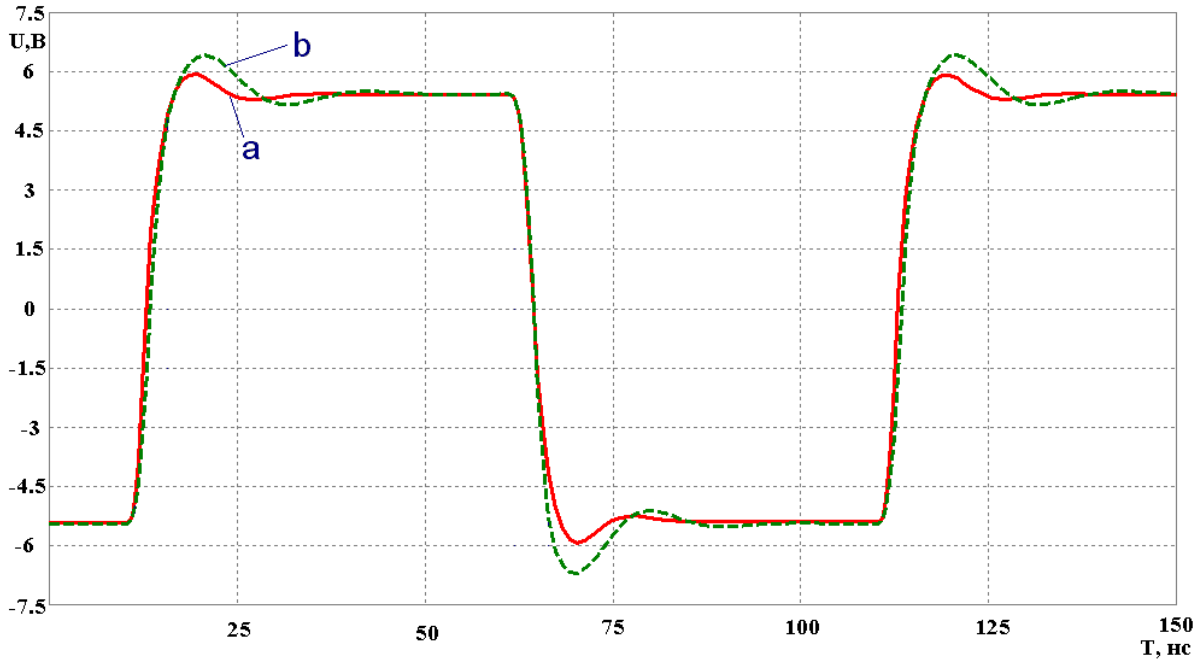


Рис. 3. Передатна характеристика ППС із симетричною структурою:  
а) схема 1; б) схема 2

Висока лінійність передатної характеристики досягається за рахунок використання симетричної структури підсилювачів постійного струму. На рис. 4 представлено типову похибку передатної характеристики ППС.

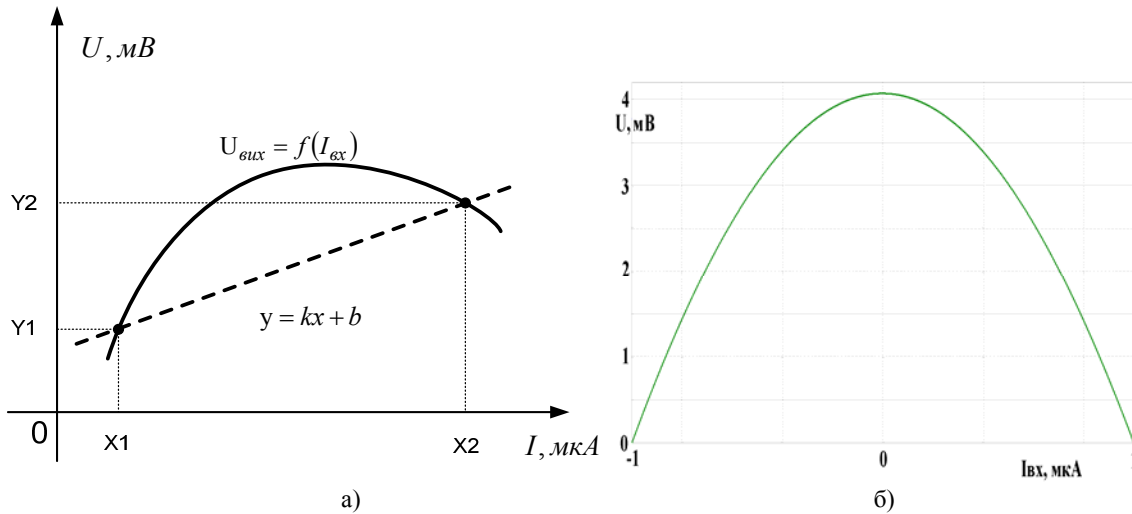


Рис. 4. Графіки статичної передатної характеристики: а) схематичної; б) двотактного симетричного ППС у діапазоні  $\pm 1$  мкА

Слід зазначити, що, незважаючи на відсутність вихідного каскаду, який збільшував би навантажувальну здатність каскаду попереднього підсилення схеми, похибки лінійності є доволі низькими. Водночас додаткове введення вихідного каскаду дозволить збільшити загальний коефіцієнт передачі.

Для малосигнальної зони матимемо такі прирости на резисторі навантаження для двотактних симетричних ППС [5]:

$$\Delta I_n = \frac{\beta_{12}\alpha_2 + \beta_9\alpha_1}{2} I_{вх} + (\beta_{12}\alpha_2 - \beta_9\alpha_1) \left( \sqrt{\frac{I_{вх}^2}{4} + I_0^2} - I_0 \right),$$

де  $\Delta I_n$  – струм, що протікає через навантаження,  $I_{вх}$  – вхідний струм,  $I_0$  – зміщення нуля,  $\beta_9$  і  $\beta_{12}$  – диференційні коефіцієнти підсилення по струму відповідних транзисторів у схемі із загальним емітером,  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – параметри відповідних транзисторів у схемі із загальною базою [4].

Ще однією перевагою над асиметричними структурами є низький коефіцієнт нелінійних спотворень. Виведено коефіцієнт нелінійних спотворень в аналітичній формі для двотактних ППС із симетричною структурою [5]:

$$\nu = \left| \frac{\left( -\frac{\bar{\beta}_1}{2} + \bar{\beta}_2 I_0 \right) I_{вх}}{\bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 I_0 - \frac{\bar{\beta}_2}{2} I_{вх}^2} \right|.$$

Застосування симетричної структури побудови та двонаправлених відбивачів струму в підсилювальних каскадах дає змогу будувати ППС з високими коефіцієнтами підсилення:

100 дБ і більше.

### Висновки

1. Представлено аналітичні вирази для коефіцієнтів підсилення для вхідного каскаду, каскадів попереднього підсилення і вихідного каскаду двотактного ППС, які дозволяють оцінити значення цих коефіцієнтів, використовуючи диференційні коефіцієнти передачі  $\beta$  по струму р-п-р і п-р-п транзисторів.
2. Показано вплив неідентичності коефіцієнтів підсилення по струму транзисторів типу п-р-п та р-п-р на коефіцієнт нелінійних спотворень у діапазоні частот вхідного сигналу.
3. Наведено практичні схеми реальних ППС та проведено аналіз значень їх коефіцієнтів підсилення. При цьому треба зазначити, що двотактні симетричні структури мають низький КНС при достатньо високому коефіцієнті підсилення по струму ( $10^2$ - $10^3$ ) і в ряді випадків можуть використовуватися без зворотного зв'язку.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kesler W. ANALOG-DIGITAL CONVERSION. – ADI Central Application Department, – 2004. – 1127 p.
2. Alan B. Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design. – Wiley Classic Library New Jersey, 2003. – 915 p.
3. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
4. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Решетнік О. О., Богомолів С. В. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Електронне наукове фахове видання. – 2007. – №1(1). Режим доступу до журн.: [www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html)
5. О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. Нелінійні спотворення у двотактних симетричних підсилювачах постійного струму // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології: Міжнар. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2007. – № 2 (14). – С. 26 – 33.

**Гарнага Володимир Анатолійович** – аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: [w0lfman@rambler.ru](mailto:w0lfman@rambler.ru), моб.: +380979888981; +380939031717.

Вінницький національний технічний університет.