

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.375.024

О. Д. АЗАРОВ, С. В. БОГОМОЛОВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

ПОХИБКИ ЛІНІЙНОСТІ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТРУМ-НАПРУГА ТА НАПРУГА-НАПРУГА НА БАЗІ ДВОТАКТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ СТРУМУ

Анотація. Розглянуто похибки лінійності прецизійних перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму. Виведено аналітичні співвідношення, що описують похибки статичної передатної характеристик із урахуванням параметрів схеми, зокрема, вхідного і вихідного опорів, опору навантаження та коефіцієнтів передачі.

Ключові слова: прецизійність, перетворювач струм-напруга, перетворювач напруга-напруга, похибка лінійності, структурно-функціональна організація, двотактний підсилювач струму, автокоригування.

Аннотация. Рассмотрены погрешности линейности прецизионных преобразователей ток-напряжение и напряжение-напряжение на базе двухтактных усилителей тока. Выведены аналитические соотношения, описывающие погрешности статической передаточной характеристики с учетом параметров схемы, в частности, входного и выходного сопротивлений, сопротивления нагрузки и коэффициентов передачи.

Ключевые слова: прецизионность, преобразователь ток-напряжение, преобразователь напряжение-напряжение, погрешность линейности, структурно-функциональная организация, двухтактный усилитель тока, автокорректировка.

Abstract. The error of linear precision converters current-voltage and voltage-voltage push-pull amplifiers based on the current. Analytical value describing the error of static transfer characteristics of the subject circuit parameters, including input and output resistance, load resistance and transfer factors.

Key words: precision, current-voltage converter, voltage-voltage converter, linearity error, structural and functional organization, push-pull current amplifier, automatic adjustment.

Вступ

Перетворювачі струм-напруга (ПСН) та напруга-напруга (ПНН) є аналоговими вузлами, що використовуються у багатьох електронних пристроях, зокрема, багаторозрядних АЦП і ЦАП, які у свою чергу входять до складу високоточних систем вимірювання, опрацювання та реєстрування сигналів [1-3]. Деякі метрологічні характеристики цих перетворювачів, такі, як лінійність передатної характеристики, слабо піддаються коригуванню, тому прецизійні ПСН та ПНН, здебільшого, будують на базі операційних підсилювачів з великим коефіцієнтом передачі (10^6 - 10^8) [1,4]. Проте, такий підхід, як правило, обмежує їх швидкодію.

Кроком вперед у цьому напрямку є використання, двотактних підсилювачів струму (ДПС), які мають високу лінійність і в яких не вимагається досягнення надвисоких значень коефіцієнтів передачі.

Актуальність

Традиційно побудову ПСН та ПНН здійснюють шляхом застосування операційного підсилювача, який увімкнено по схемі із глибоким зворотнім зв'язком [3, 5-7]. Проте застосування традиційних однотактних підсилювачів постійного струму має свої недоліки, а саме: вузьку смугу повної неспотвореної потужності та обмежену швидкість наростання вихідного сигналу. Це все призводить до різкого збільшення нелінійності із зростанням частоти вхідного сигналу [8]. Кращі показники у цьому плані мають ДПС, які випускаються серійно провідними фірмами, зокрема Analog Device, Maxim, ON Semiconductor, Intersil [1,4]. Проте і вони мають свої недоліки: низьке підсилення на каскад і, як результат, для досягнення потрібних коефіцієнтів підсилення, потрібне збільшення кількості підсилювальних каскадів [6], що у свою чергу, погіршує динамічні характеристики.

Авторами запропоновано ряд методів структурно-функціональної організації прецизійних ПСН та ПНН на базі ДПС [9]. При цьому доцільно оцінити переваги та недоліки застосування ДПС із низьким, середнім та високим вхідними опорами. Відомі аналітичні співвідношення, що описують передатні характеристики ПСН та ПНН із урахуванням більшої кількості параметрів підсилювача, таких, як: параметри зовнішніх і внутрішніх кіл та опору навантаження, дозволяють більш точно оцінити передатні характеристики. Проте здійснено оцінку впливу лише вхідного опору ДПС на похибку лінійності ПСН та ПНН [9].

Водночас матеріал, присвячений аналізу похибок лінійності прецизійних ПСН та ПНН на базі ДПС в науково-технічній літературі подається епізодично і є неструктурованим. Тому тема статті, присвячена похибкам лінійності прецизійних перетворювачів стум-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму є актуальною.

Мета

Аналіз похибок лінійності прецизійних перетворювачів стум-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму із урахуванням параметрів елементів зовнішніх і внутрішніх кіл підсилювача та опору навантаження.

Задачі

1. Отримати аналітичні співвідношення похибок лінійності статичних передатних характеристик перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга.
2. Дослідити вплив параметрів елементів зовнішніх і внутрішніх кіл підсилювача та опору навантаження на рівень похибки лінійності.
3. Проаналізувати запропонований метод структурно-функціональної організації прецизійного двотактного підсилювача струму із коригуванням зсуву нуля.

Розв’язання задач

Для дослідження впливу параметрів зовнішніх і внутрішніх кіл підсилювача та опору навантаження на похибку лінійності прецизійних ПСН та ПНН на базі ДПС, доцільно розглянути їх схеми заміщення, які зображено на рис. 1. Операційний режим роботи підсилювача здійснено шляхом уведення кола глибокого зворотного зв’язку за допомогою резистора R_M .

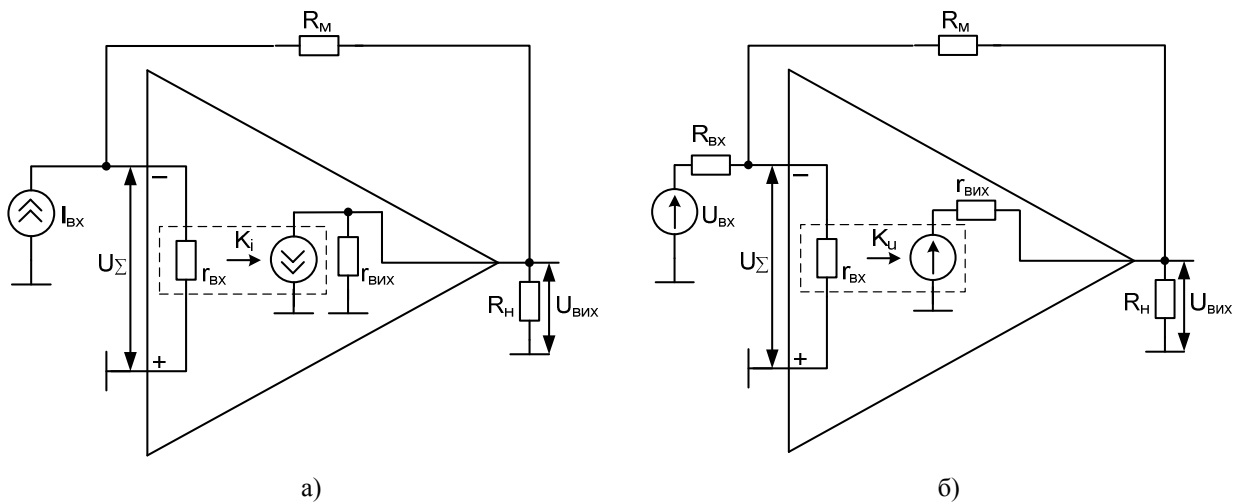


Рисунок 1 – Схеми заміщення перетворювачів а) струм-напруга; б) напруга-напруга

Залежно від типу перетворювача вхідний сигнал може бути заданим, як у вигляді струму I_{vx} , так і у вигляді напруги U_{vx} , а вихідним сигналом є напруга U_{vix} . У літературних джерелах [1-3, 7, 10], описуються ПСН та ПНН, передані характеристики яких мають вигляд:

$$\text{ПСН: } U_{vix} \approx I_{vx} \cdot R_M; \quad \text{ПНН: } U_{vix} \approx -U_{vx} \cdot \frac{R_M}{R_{vx}}. \quad (1)$$

Проте у цих формулах не враховуються характеристики самого підсилювача, а саме: вхідний r_{vx} та вихідний r_{vix} опори, опір навантаження R_n , які впливають на рівень похибок лінійності ПСН та ПНН.

Залежно від чинників, що впливають на передатну характеристику, можна виділити такі рівні деталізації, а саме врахування:

$$R_M, r_{vx}, K_i \text{ (або } K_u \text{)};$$

$$R_M, R_n, r_{vx}, K_i \text{ (або } K_u \text{)};$$

$$R_M, R_n, r_{vx}, r_{vix}, K_i \text{ (або } K_u \text{)},$$

де K_i, K_u – коефіцієнти передачі по струму і по напрузі – K_u , що визначаються при розірваній петлі зворотного зв’язку [9].

При першому рівні деталізації передатна характеристика ПСН має вигляд [9]:

$$U_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{r_{вх} + R_M \cdot K_i}{1 + K_i}.$$

Абсолютна похибка [11] визначається, як:

$$\Delta U_{вих} = U_{вих} - U'_{вих}, \quad (2)$$

де $U'_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{R_M \cdot K_i}{1 + K_i}$ – напруга на виході ПСН, при $r_{вх} = 0$.

Враховуючи вищевказані вирази та вираз (2), отримуємо:

$$\Delta U_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{r_{вх}}{1 + K_i} \quad (3)$$

Відносна похибка [11] визначається, як:

$$\delta = \frac{\Delta U_{вих}}{U_{вих}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Враховуючи вищевказані вирази, отримуємо вираз для опису відносної похибки ПСН при ненульовому значенні $r_{вх}$.

$$\delta = \frac{r_{вх}}{R_M \cdot (1 + K_i)} \cdot 100\%. \quad (5)$$

При другому рівні деталізації передатна характеристика ПСН має вигляд [9]:

$$U_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{r_{вх} + R_M \cdot K_i}{1 + K_i + \frac{R_M - r_{вх}}{R_H}}.$$

Із урахуванням рівностей (2) і (4), отримуємо співвідношення для опису абсолютної та відносної похибок ПСН:

$$\Delta U_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{r_{вх} \cdot R_H \cdot (1 + K_i) - R_M \cdot K_i \cdot (R_M - r_{вх})}{(1 + K_i) \cdot [R_M - r_{вх} + R_H \cdot (1 + K_i)]}, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{r_{вх} \cdot R_H \cdot (1 + K_i) - R_M \cdot K_i \cdot (R_M - r_{вх})}{R_M \cdot (1 + K_i) \cdot [R_M - r_{вх} + R_H \cdot (1 + K_i)]} \cdot 100\%. \quad (7)$$

При третьому рівні деталізації передатна характеристика ПСН має вигляд [9]:

$$U_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{r_{вх} + R_M \cdot K_i}{\left(1 + \frac{R_M}{R_{сер}}\right) \cdot (1 + K_i) - \frac{r_{вх} + R_M \cdot K_i}{R_{сер}}},$$

причому $R_{сер} = \frac{r_{вих} \cdot R_H}{r_{вих} + R_H}$.

Із урахуванням рівностей (2) і (4), отримуємо співвідношення для опису абсолютної та відносної похибок ПСН:

$$\Delta U_{вих} = I_{вх} \cdot \frac{r_{вх} \cdot R_{сер} \cdot (1 + K_i) - R_M \cdot K_i \cdot (R_M \cdot (1 + 2 \cdot K_i) - r_{вх})}{(1 + K_i) \cdot [R_M \cdot (1 + 2 \cdot K_i) - r_{вх} + R_{сер} \cdot (1 + K_i)]}; \quad (8)$$

$$\delta = \frac{r_{вх} \cdot R_{сер} \cdot (1 + K_i) - R_M \cdot K_i \cdot (R_M \cdot (1 + 2 \cdot K_i) - r_{вх})}{R_M \cdot (1 + K_i) \cdot [R_M \cdot (1 + 2 \cdot K_i) - r_{вх} + R_{сер} \cdot (1 + K_i)]} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Беручи до уваги аналітичні вирази (6-9), які описують абсолютну та відносну похибки ПСН із вищими рівнями деталізації та враховуючи параметри підсилювача ($r_{вх} \ll R_M$, $r_{вих} \ll R_H$, $K_i \gg 1$), шляхом математичних спрощень, отримуємо вирази (3) і (5) із нижчим рівнем деталізації для ПСН. Вирази (3) і (5) враховують критичні параметри ПСН. Найкритичнішим чинником спотворення похибок передатної характеристики є наявність U_Σ , що викликано впливом $r_{вх}$ [5].

Передатна характеристика ПНН при першому рівні деталізації має вигляд [9]:

$$U_{вих} = U_{вх} \cdot \frac{r_{вх} \cdot R_M \cdot K_U}{R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) - (K_U - 1) \cdot r_{вх} \cdot R_{вх}}. \quad (10)$$

Із урахуванням рівностей (2) і (4), отримуємо співвідношення для опису абсолютної та відносної похибок ПСН:

$$\Delta U_{вих} = U_{вх} \cdot \frac{R_M \cdot [r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх})]}{R_{вх} \cdot [R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) - (K_U - 1) \cdot r_{вх} \cdot R_{вх}]}; \quad (11)$$

$$\delta = - \frac{r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх})}{R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) - (K_U - 1) \cdot r_{вх} \cdot R_{вх}} \cdot 100\%. \quad (12)$$

При другому рівні деталізації отримаємо збіжність передатної характеристики ПНН із виразом (10), адже $U_{вих} = U_{вих.вн}$ і сигнал повністю передається в навантаження. Проте на практиці підсилювач має $r_{вих} \neq 0$, враховуючи який, отримаємо передатну характеристику ПНН [9] для третього рівня деталізації:

$$U_{вих} = U_{вх} \cdot \frac{r_{вх} \cdot R_M \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих})}{\left[r_{вих} \cdot R_H + R_M \cdot (r_{вих} + R_H) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] - \frac{-r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих})}{}}$$

Із урахуванням рівностей (2) і (4), отримуємо співвідношення для опису абсолютної та відносної похибок ПНН:

$$\Delta U_{вих} = U_{вх} \cdot \frac{R_M \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих}) + \left[r_{вих} \cdot R_H + R_M \cdot (r_{вих} + R_H) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] - \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих}) \right]}{R_{вх} \cdot \left[r_{вих} \cdot R_H + R_M \cdot (r_{вих} + R_H) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] - \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих}) \right] - \frac{-r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих})}{}}; \quad (13)$$

$$\delta = - \frac{r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих}) + \left[r_{вих} \cdot R_H + R_M \cdot (r_{вих} + R_H) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] - \left[r_{вх} \cdot R_{вх} + R_M \cdot (r_{вх} + R_{вх}) \right] \cdot \left[r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих}) \right]}{-r_{вх} \cdot R_{вх} \cdot R_H \cdot (K_U \cdot R_M + r_{вих})} \cdot 100\% \quad (14)$$

Враховуючи, що на практиці параметри підсилювача співвідносяться, як: $r_{вх} \gg R_M$, $r_{вх} \gg R_{вх}$, $R_M \approx R_{вх}$, $r_{вих} \ll R_H$, $K_U \gg 1$ та беручи до уваги аналітичні вирази (11-14), шляхом математичних спрощень, отримуємо вирази (8) і (9) із нижчим рівнем деталізації для ПНН. Вирази (8) і (9) враховують найкритичніші параметри ПНН на основі ДПС. Істотний внесок на появу похибок передатної характеристики є наявність U_{Σ} [5]. Тому для побудови прецизійних ПСН доцільно використовувати ДПС із низьким вхідним опором $r_{вх}$. Традиційно для зменшення U_{Σ} використовують підсилювачі із високим коефіцієнтом підсилення по струму K_i . Сучасні підсилювачі, які випускаються провідними фірмами світу, забезпечують коефіцієнти підсилення на рівні 120...140 дБ [12]. Підвищення коефіцієнту підсилення по струму K_i ДПС можливе, шляхом введення одно-, дво-, трохступневих проміжних каскадів (ПК) та двотактних вихідних каскадів (ДВК) [13]. При цьому похибка лінійності оберненопропорційна коефіцієнту підсилення по струму K_i .

Зменшити похибку лінійності можна додатково збільшивши глибину зворотного зв'язку R_M . Проте такий підхід призводить водночас до зменшення швидкодії [10].

Для побудови ПНН доцільно використовувати ДПС на основі комплементарних польових транзисторів [9]. Такі ДПС хоч і мають високий вхідний опір, проте можуть бути використані при роботі із вхідними сигналами у вигляді напруги та джерелами сигналів ємнісного характеру, а також забезпечують підсилення.

Специфікою ДПС на біполярних транзисторах є наявність ненульового вхідного струму, що призводить до появи похибки зсуву нуля $\Delta U_{зс0}$, причому $\Delta U_{зс0} = \Delta I_{зс0} \cdot R_M$, при $I_{вх} = 0$.

Для зменшення похибки зсуву нуля авторами запропоновано метод структурно-функціональної організації ДПС із автокоригуванням зсуву нуля, схему якого наведено на рис. 2.

Вона складається з блока напруг зміщення (БНЗ), джерел струму I1 та I2, які з транзисторами VT1 і VT2 задають режим роботи каскадів схеми.

Блок автокоригування нуля (БАН), який складається з імітатора вхідного каскаду (ІВК), перетворювачів струмів (ПС1, ПС2), відбивачів струму (ВС1, ВС2) і транзисторів VT2-VT12, забезпечує автокори-

гування струму $I_{зс0}$ параметричним методом таким чином, що $\Delta I_{зс0} \rightarrow 0$. Це, у свою чергу, дозволяє зменшити похибку зсуву нуля на 1-2 порядки.

Двонаправлений відбивач струму (ДВС) разом із ВС3-ВС6, забезпечують автоматичне симетрування підсилення по верхньому і нижньому каналах підсилення, які побудовано на вхідному (ВК), ПК1, ПК2 і ДВК.

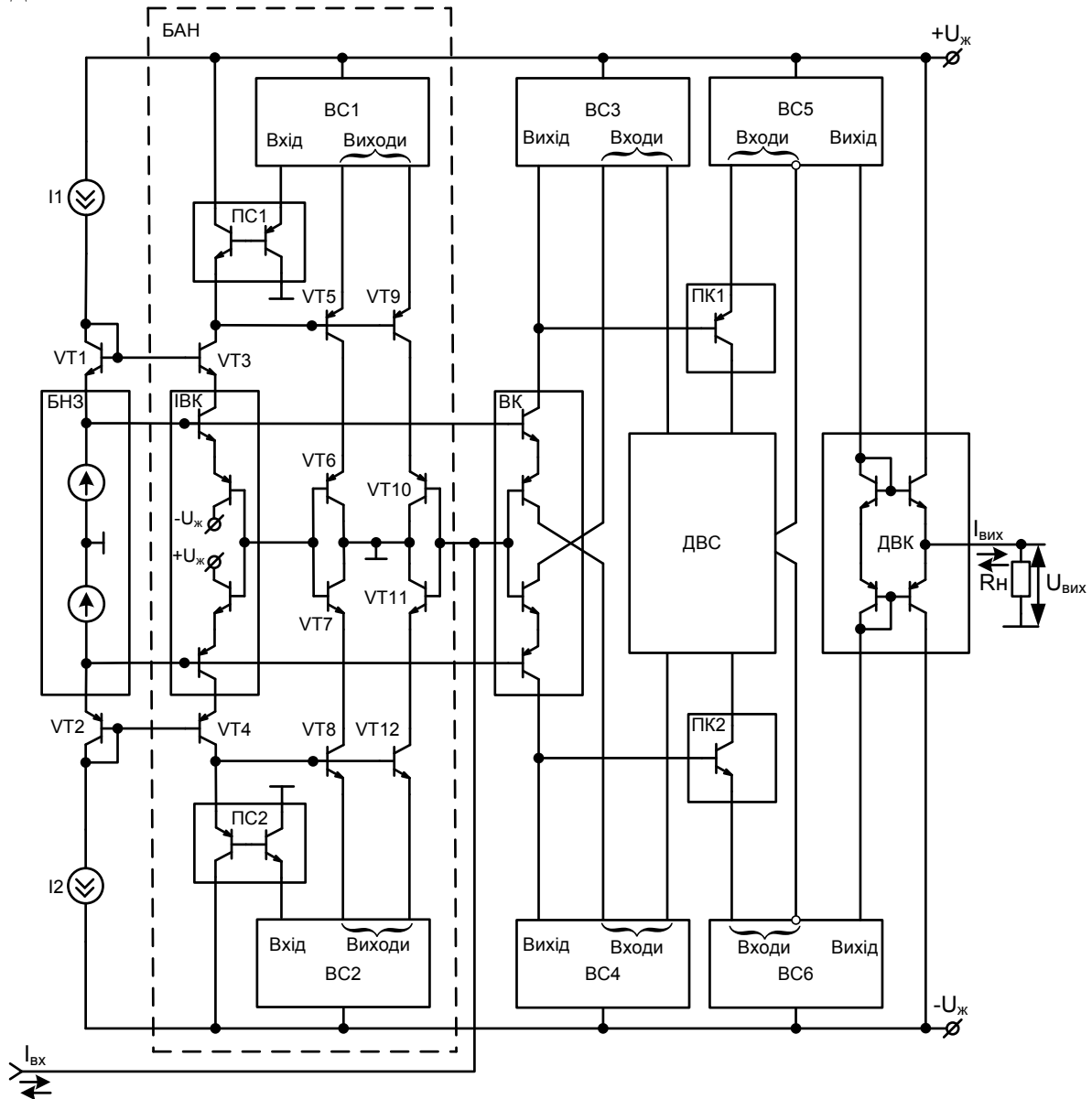


Рисунок 2 – Структурно-функціональна організація ДПС із автокоригуванням зсуву нуля

ДПС, який побудовано за розглянутою структурно-функціональною організацією, забезпечує такі характеристики:

- коефіцієнт підсилення K_i : 125,87 дБ;
- вхідний опір: 3380 Ом;
- частота одиничного підсилення: 796,2 МГц;
- струм зсуву нуля: 89,9 нА;
- діапазон вихідного струму: ± 1 мА;
- діапазон вихідної напруги: ± 10 В;
- похибка лінійності $\delta_L = 0.000016\%$.

Висновки

1. Виведено аналітичні співвідношення, що дозволяють описати похибки лінійності передатних характеристик ПСН та ПНН із урахуванням параметрів внутрішніх елементів підсилювача, зовнішніх кіл та опору навантаження. Це дозволяє точніше оцінити значення похибок передатних характеристик.
2. Досліджено вплив параметрів зовнішніх і внутрішніх кіл підсилювача та опору навантаження на появу похибок лінійності прецизійних ПСН та ПНН. Доведено, що лінійність ДПС можна покращити, використовуючи вхідні каскади із низьким вхідним опором.
3. Проаналізовано запропонований метод структурно-функціональної організації прецизійного ДПС із автокоригуванням зсуву нуля. Показано, що це дозволяє зменшити похибку зсуву нуля на 1-2 порядки.

Список літератури

1. Walt Kesler. ANALOG-DIGITAL CONVERSION / Walt Kesler – ADI Central Application Department, March 2004. – 1127 p.
2. Alan B. Grebene. Bipolar and MOS analog integrated circuit design / Alan B. Grebene – New Jersey: Wiley Classic Library, 2002. – 915 p.
3. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электрон-ных устройств / Волович Г.И. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
4. Walter G. Jong, Op Amp applications handbook / Walter G. Jong – Analog Devices series, 2004, – 895 p.
5. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: [справочное руководство] / У. Титце, К. Шенк; [пер. с нем.] –М.: 1982. – 512 с., ил.
6. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и лнейных ИС / Фолкенберри Л. [пер. с англ.] –М.: Мир, 1985. – 572 с., ил.
7. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Дж.Пейтон, В. Волш – М.: БИНОМ, 1994 – 352 с.: ил. – ISBN 5-7503-0013-7
8. Азаров О.Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: [монографія] / Азаров О.Д. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 257 с.
9. Азаров О.Д. Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму / О.Д. Азаров, С.В. Богомолів // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Вінницький національний технічний університет – 2011. – №2(21). – С. 4-11.
10. Уин Палмер. Быстродействующий прецизионный усилитель-преобразователь сопротевлений / Уин Палмер // Электроника. Серия: методы, схемы, аппаратура – 1988. – №1. – С. 77-82.
11. Касаткин А.С. Электротехника: [учеб. пособие для вузов] /А.С. Касаткин, М.В. Немцов– изд. 4-е, перераб. – М.:Энергоатомиздат, 1983. – 440 с., ил.
12. Макаренко В. Операционные усилители со сверхмалыми искажениями для высококачественных аудиоприложений / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы – 2011. – №12(172). – С.34-38.
13. Азаров О.Д. Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою / О.Д. Азаров, В.А. Гарнага, С.В. Богомолів // Вісник Хмельницького національного університету – 2008. – №4(113). – С. 20-24.

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – д. т. н., професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 58-02-25.

Богомолів Сергій Віталійович – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. +38-097-131-83-78, e-mail: bogomolovsergiy@rambler.ru.