

УДК 621.375:621.382.3



О. П. Кондратенко



С. С. Лукашенко

ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РЕГУЛЮВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ У ЗВ'ЯЗКОВИХ КАНАЛАХ КОМПЕНСАТОРІВ ЗАВАД

Розглянуті варіанти реалізації систем автоматичного регулювання підсилення транзисторних каскадів, які забезпечують стійкий режим роботи спеціалізованого пристрою придушення завад.

Для кількісного оцінювання ефективності регулювання використовується діапазон регулювання як найчастіше використовуваний показник. Показано, що на сьогодні перспективнішими є регульовані операційні підсилювачі з вхідним каскадом на польових транзисторах. Сформульовані загальні вимоги до системи автоматичного регулювання підсилення, яка повинна забезпечити необхідні величини вихідної напруги в усьому діапазоні дальності.

Проведено попередній розрахунок структури і загальних характеристик регульованого підсилювача.

К л ю ч о в і с л о в а: динамічний діапазон, транзисторний підсилювач, система автоматичного регулювання.

Постановка проблеми. Підвищення якості й розширення функціональних можливостей аналогових пристроїв, застосовуваних у техніці, неможливі без використання підсилювачів з регульованими параметрами. Особливістю регульованих підсилювачів (РП) є здатність до перенастроювання їхніх експлуатаційних характеристик і адаптація до загальних вимог системи. Застосування таких підсилювачів викликано необхідністю підсилення сигналів з широким діапазоном зміни амплітуд.

У статті наведено огляд джерел, які містять дані про методи й схемні рішення регулювання транзисторних підсилювачів з одного з найбільш важливих параметрів – коефіцієнта підсилення, порівнюються ефективності методів регулювання стосовно до інтегральних підсилювачів. Загальна класифікація методів регулювання підсилення електронних підсилювачів подана на рис. 1 [1]. Кожний з методів має свої границі застосування, для розширення яких може бути використана комбінація декількох видів регулювання.

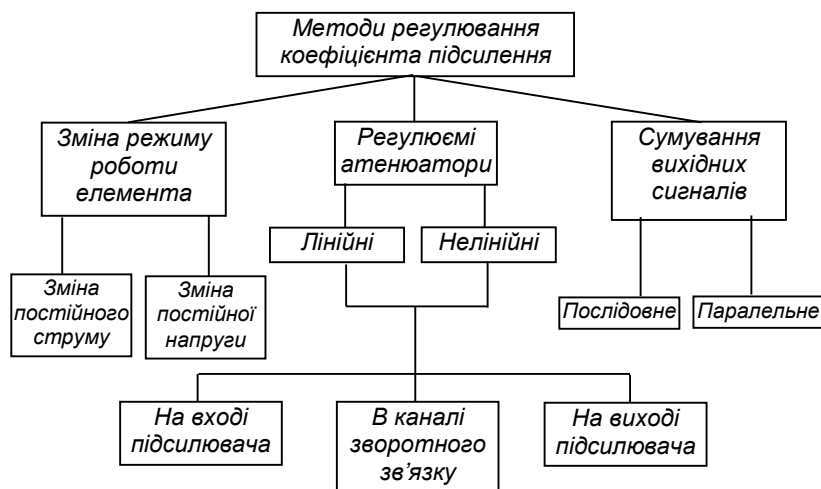


Рис. 1. Загальна класифікація методів регулювання підсилення

Керування коефіцієнтом передачі підсилювача зі зміною режиму або за допомогою керованого атенюатора може здійснюватися як вручну, так і автоматично. Відзначимо, що через істотну нелінійність підсилювачі з підсумовуванням вихідних сигналів не розглядатимемо.

Система регулювання може бути розімкнутою або замкнутою. У розімкнутій системі керуючий сигнал задається за довільною програмою, а в замкнутій – змінюється відповідно до вхідного або вихідного сигналу. Структурна схема підсилювача з автоматичним регулюванням підсилення (АРП) замкнутого типу показана на рис. 2. Вона містить у загальному випадку пристрій керування (ПК), пристрій порівняння (П) і амплітудний детектор (АД). Сигнал на вхід АД може надходити як із входу (пряме регулювання), так і з виходу РП (зворотне регулювання).

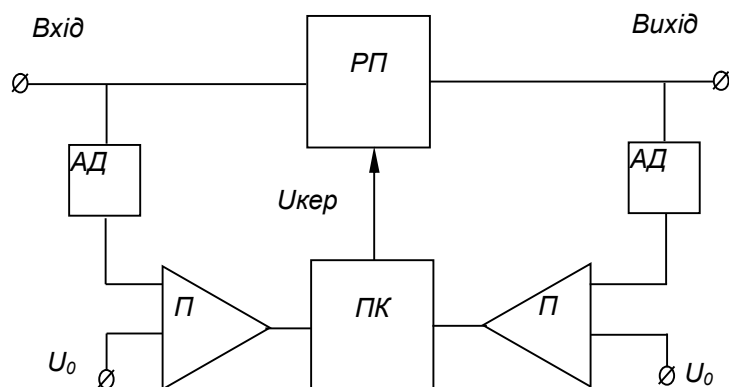


Рис. 2. Структурна схема підсилювача з АРП замкнутого типу

Підсилювач зі зворотним регулюванням є системою з негативним зворотним зв'язком, тому зі зростанням вхідного сигналу підсилення має зменшуватися. За однакових параметрів каналів керування швидкодія й стабільність підсилювачів при зворотному регулюванні вищі, ніж при прямому [1, 2].

Замкнуті системи з аналоговим АРП здатні швидше відпрацьовувати сигнали керування, тому частіше застосовуються в підсилювачах з безперервним процесом регулювання [2, 9].

Для кількісного і якісного оцінювання ефективності регулювання використовують набір параметрів, з яких виберемо діапазон регулювання як найбільш часто використовуваний показник, вимірюваний у децибелах [8]:

$$D_{\text{РП}} = 20 \lg \frac{K_{\text{max}}}{K_{\text{min}}}.$$

Мета статті – оцінити можливості досягнення потрібних характеристик підсилювача для забезпечення стійкого режиму роботи пристрою придушення завод.

Виклад основного матеріалу. Керування коефіцієнтом передачі підсилювача може бути здійснене за рахунок зміни параметрів активного елемента при зміні режиму його роботи з постійного струму шляхом зміни напруги й/або струму вихідного електрода транзистора (перший метод регулювання).

Регулювання зміною постійної напруги на вихідному електроді (колекторі біполярного або стоці польового транзистора) здійснене лише у випадку високоомних навантажень, воно супроводжується великими нелінійними й частотними спотвореннями і в інтегральних підсилювачах не застосовується.

Найчастіше регулювання здійснюється або зміною напруги (струму) на керуючому електроді, або за рахунок струморозподілення при підключенні керованих резисторів (рис. 3), як такі використовуються нелінійні елементи – напівпровідникові діоди, *p-n* переходи транзисторів і всілякі комбінації їх з резисторами [3].

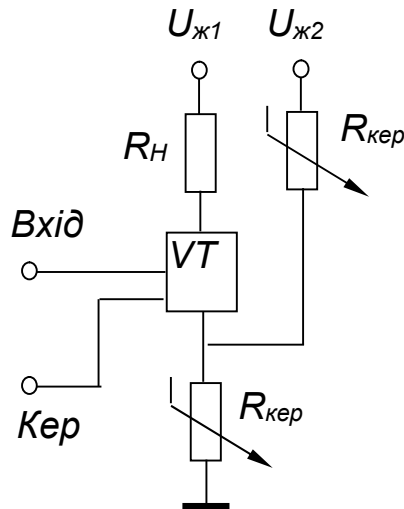


Рис. 3. Схема зміни режимної величини струму

Термостабілізація широкосмугових РП, пристосованих до монолітної інтегральної технології, здійснюється відомими способами. Так, регулювання підсилення в диференціальних підсилювачах на біполярних (рис. 4, а) і польових транзисторах (рис. 4, б) здійснюється подачею керуючого сигналу на базу (заслін) транзистора VT_3 , що виконує функції струмостабілізуючого двополосника. Коефіцієнт підсилення каскаду залежить від керуючої напруги та змінюється за *логарифмічним* законом.

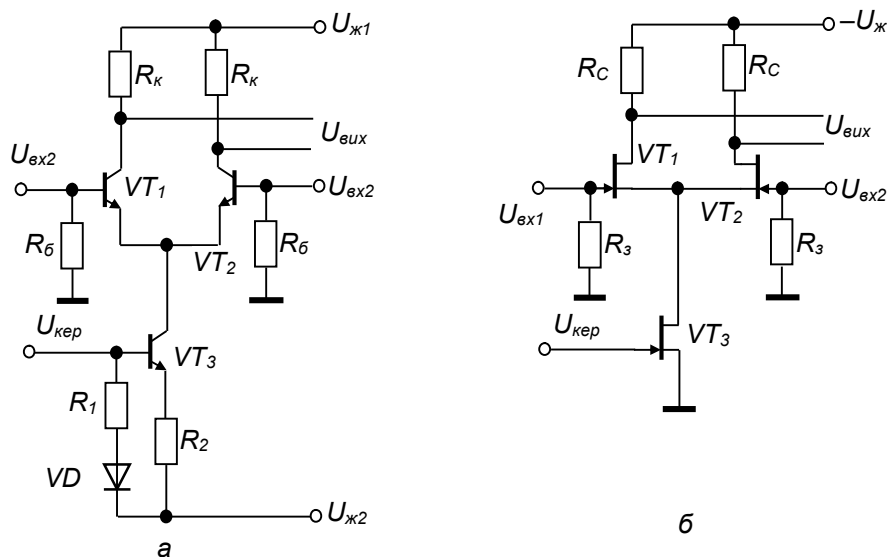


Рис. 4. Схема РП зі зміною режиму на основі диференціальних підсилювачів:
а – на біполярних транзисторах; б – на польових транзисторах

У РП на польових транзисторах (ПТ) частіше використовують каскади на транзисторах з керуючим $p-n$ переходом, які перевершують МДН-транзистори за чутливістю, часовою та температурною стабільністю. Діапазон регулювання в РП на потужнострумових ПТ складає 60 – 70 дБ [4]. Інженерна методика розрахунку нелінійних спотворень у РП на потужнострумових ПТ на сьогодні розроблена недостатньо.

Інший метод – регулювання підсилення за допомогою керованих атенюаторів. Найпростішим різновидом керованих атенюаторів є Г-подібний подільник напруги, у плечах якого послідовно або

паралельно з навантаженням включені один або два нелінійні елементи. За однакової амплітуди вхідного сигналу паралельний атенюатор характеризується меншим рівнем нелінійних спотворень, ніж послідовний і послідовно-паралельний [1, 2]. Збільшення діапазону регулювання досягається каскадним з'єднанням атенюаторів. Відзначимо, що в силу низки причин, які тут не розглядаються, застосування біполярних транзисторів у таких атенюаторах обмежене.

Більш широке застосування знаходять польові транзистори. У тріодній області вольтамперної характеристики (ВАХ) польовий транзистор можна розглядати як керований резистор, опір якого змінюється в межах трьох декад [6]. Особливістю польових транзисторів є симетрія ВАХ у випадку зміни полярності прикладеної напруги, завдяки чому керування опором ПТ можливе за відсутності постійної напруги між стоком та витокком. Це дозволяє використати ПТ, не викликаючи зміни режиму роботи транзисторів за постійним струмом. Регульовані підсилювачі на ПТ із каналом n -типу легко виготовити одночасно з біполярними транзисторами, одержавши в такий спосіб монолітну структуру інтегральної мікросхеми. У разі гарної погодженості параметрів транзисторів діапазон $D_{\text{пу}}$ може досягати 60 дБ при амплітуді вхідного сигналу 50 мВ та $K_{\Gamma} < 2\%$.

Відома також схема підсилювача, коефіцієнт підсилення якого регулюється за допомогою мостового діодного атенюатора, включеного на вході диференційного підсилювача [7]. Керування атенюатором здійснюється шляхом зміни емітерних струмів транзисторів, подаючи на їхні бази керуючу напругу, що дозволяє знизити потужність керуючого сигналу. Діапазон регулювання $D_{\text{пу}} = 80$ дБ при $K_{\Gamma} < 1\%$.

Тепер оцінимо можливість побудови схеми регульованого підсилювача, спираючись на перший метод, з використанням як вихідних даних характеристик, отриманих у статті [11].

Як ми вже відзначали, інерційні системи АРП зі зворотним зв'язком є замкнутими нелінійними системами автоматичного регулювання, що містять підсилювальний тракт із регульованим коефіцієнтом підсилення й коло регулювання, що складається з детектора АРП, фільтра й підсилювача (рис. 5). У загальному випадку може бути ще вузол затримки. Фільтр АРП перешкоджає проходженню на регульовані каскади складової продетектованої напруги, що відповідає корисним модуляційним змінам сигналу; у протилежному випадку глибина корисної модуляції сигналу буде зменшуватися.

Система АРП, структурна схема якої зображена на рис. 5, є прикладом системи автоматичного керування, у якій регулювання здійснюється за вихідною величиною (система зі зворотним зв'язком).

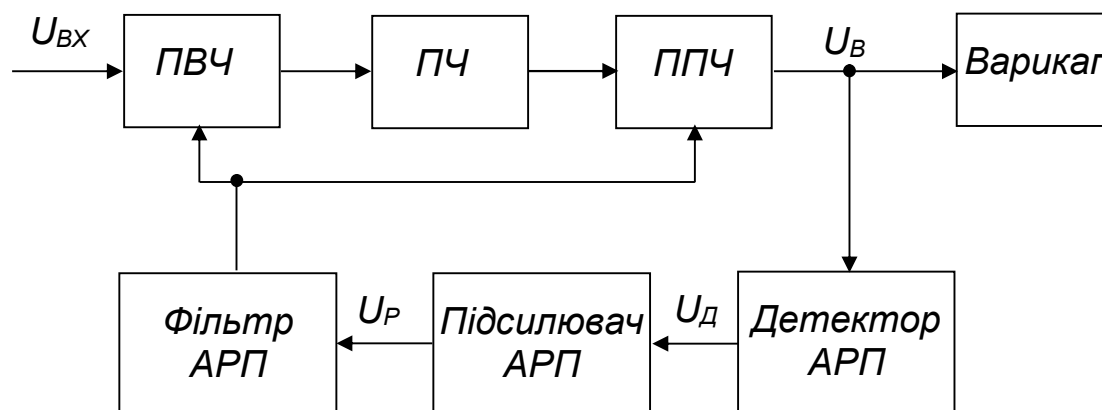


Рис. 5. Структурна схема системи АРП

Як навантаження використовується варикап, для якого необхідно забезпечити початковий зсув 1,5 В й амплітуду накачування 2,5 В, це і є рівень напруги U_V , позначений на рис. 5. Вхідну напругу $U_{\text{вх}}$ візьмемо (для простоти розрахунків, значення не є принциповим) 25 мкВ. Звідси одержуємо необхідне підсилення, що дорівнює 100 дБ. Таке підсилення повинен забезпечити тракт у складі підсилювача високої частоти (ПВЧ), перетворювача частоти (ПЧ) і підсилювача проміжної частоти (ППЧ), що ніяких труднощів не становить.

Вимоги до системи АРП у самому загальному вигляді сформулюємо так. Нехай пристрій повинен забезпечити необхідні характеристики в діапазоні відстані 1...50 км, тобто відстань змінюється у 50 разів. З теорії зв'язку відомо, що потужність прийнятого сигналу змінюється за законом, обернено пропорційним квадрату відстані. У нашому випадку одержуємо 2 500 разів або збільшення на 34 дБ. Це і є необхідний діапазон регулювання.

Визначимо можливість роботи системи затриманої АРП для проектного приймача. Характеристики для АРП виберемо такі: допустима зміна вихідної напруги $B = 3,5$ дБ (у півтора разу), діапазон регулювання $D = 34$ дБ (типові значення для даного класу приймача [8]).

Для затриманої АРП напруга затримки вибирається так, щоб до значення $U_{\text{вих min}}$, що відповідає чутливості 25 мкВ, система не діяла. Для транзисторних приймачів достатньо мати напругу затримки 0,5...1 В.

За таких значень максимальної регулюючої напруги глибина регулювання підсилення одного каскаду звичайно буває не менше 5...10 (виберемо значення, рівне 7). Глибина регулювання Γ_K для вибраних значень визначається за формулою

$$\Gamma_K = \frac{K_{0\max}}{K_{0\min}},$$

де $K_{0\max}$, $K_{0\min}$ – максимальний і мінімальний резонансний коефіцієнти селективного підсилення.

Розрахуємо необхідну кількість регульованих каскадів N_p за такою нерівністю [10]:

$$N_p \geq \frac{\lg \frac{D}{B}}{\lg \Gamma_K} = \frac{\lg \frac{10^{34}}{3,5}}{\lg 7} = 1,52.$$

Отже, достатньо регулювати підсилення тільки у двох каскадах. Доцільно для збереження чутливості не регулювати підсилення в ПВЧ, охопивши регулюванням два перших каскади ППЧ. Потім визначається спосіб регулювання підсилення в кожному каскаді. Таким чином, всі необхідні регулювання для пристрою здійснені.

Завданнями розрахунку є визначення величин елементів системи АРП, а також розрахунок і побудова амплітудної характеристики підсилювача. Детальні розрахунки виходять за межі цієї статті, за необхідності потрібно скористатися рекомендованою літературою [5, 8–10].

Висновки

1. Більш перспективними є регульовані операційні підсилювачі із вхідним каскадом на польових транзисторах. З інтегральних операційних підсилювачів як РП можуть використовуватися підсилювачі, що мають виводи для підключення зовнішнього керованого струмового дзеркала.

2. У процесі проектування РП атенюатор може бути включений на вході підсилювача, у каналі зворотного зв'язку, на виході або в проміжному каскаді. Атенюатори, включені на вході РП, звичайно працюють при малих рівнях сигналу, тому особливих вимог до їхнього динамічного діапазону не висувають.

3. У проектуванні інтегральних регульованих підсилювачів змінного струму можна застосовувати такі методи регулювання: 1) зміна режиму роботи транзистора за постійним струмом; 2) регулювання за допомогою керованих атенюаторів; 3) підсумовування вихідних сигналів окремих підсилювальних каскадів.

Список використаних джерел

1. Функциональные усилители с большим динамическим диапазоном [Текст] / под ред.

- В. М. Волкова. – Москва : Сов. радио, 1976. – 343 с.
2. Шило, В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре [Текст] / В. Л. Шило. – Москва : Сов. радио, 1979. – 368 с.
3. Павлов, В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств [Текст] / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. – Москва : Горячая линия; Телеком, 2005. – 322 с.
4. Миловзоров, О. В. Электроника [Электронный ресурс] : учеб. для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – Режим доступа : <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2014/FN/fn-37.pdf>. – Загл. с экрана.
5. Лукошкин, А. П. Усилители с широким динамическим диапазоном на микросхемах [Текст] / А. П. Лукошкин, И. Г. Киренский. – Москва : Радио и связь, 1981. – 120 с.
6. Золотова, Н. М. Линейный резистор, управляемый напряжением [Текст] / Н. М. Золотова // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 1. – С. 116–118.
7. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника [Текст] : учеб. для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Альянс, 2013. – 496 с.
8. Бобров, Н. В. Расчет радиоприемников [Текст] / Н. В. Бобров. – Москва : Радио и связь, 1981. – 240 с.
9. Шафер, Д. В. Расчет, настройка и испытания транзисторных усилителей с автоматической регулировкой усиления [Текст] / Д. В. Шафер. – Москва : Связь, 1974. – 105 с.
10. Моделирование и исследование принципов функционирования профессионального радиоприемного устройства преобразования частоты [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://revolution.allbest.ru/radio/00516402_0.html. – Загл. с экрана.
11. Кондратенко, О. П. Про один з режимів роботи параметричної системи [Текст] / О. П. Кондратенко, І. Л. Страшний // Системи озброєння і військова техніка: наук. журн. ХНУПС ім. І. Кожедуба. – 2016. – № 4 (48). – С. 30–32.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2019 р.

УДК 621.375:621.382.3

А. П. Кондратенко, С. С. Лукашенко

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ В СВЯЗНЫХ КАНАЛАХ КОМПЕНСАТОРОВ ПОМЕХ

Рассмотрены варианты реализации систем автоматического регулирования усиления транзисторных каскадов, которые обеспечивают устойчивый режим работы специализированного устройства подавления помех.

Для количественной оценки эффективности регулирования используется диапазон регулирования как наиболее часто используемый показатель. Показано, что на сегодняшний день более перспективны регулируемые операционные усилители с входным каскадом на полевых транзисторах. Сформулированы общие требования к системе АРУ, которая должна обеспечить необходимые величины выходящего напряжения во всем диапазоне дальности.

Проведен предварительный расчет структуры и общих характеристик регулируемого усилителя.

К л ю ч е в ы е с л о в а: динамический диапазон, транзисторный усилитель, система автоматического регулирования.

O. P. Kondratenko, S. S. Lukashenko

**SELECTION AND JUSTIFICATION OF A METHOD OF AMPLIFICATION ADJUSTMENT IN
COHERENT CHANNELS OF COMPENSATORS OF HINDRANCES**

The feature of the equalizing amplifiers is their capacity for the adjustments of technical descriptions in accordance to the general requirements of the radiotechnical system. In the case reviewed the application of such amplifiers is caused by the necessity of amplification of signals with the significant turn-down of amplitudes. General classification of the regulation methods of amplification of electronic amplifiers is defined.

The variants of realization of automatic control systems of amplification of transistor cascades that provide the steady operations of the specialized device are considered.

For the quantitative estimation of adjusting efficiency an adjusting range as the most often used index is used. It is shown that to date the equalizing operating amplifiers with an input cascade in the field transistors are more perspective. From the integral operating amplifiers the amplifiers that have connections to the external guided current-producing impedor can be used as the equalizing cascade amplifiers.

General requirements for self-adjustment amplifying system that must provide the required dimensions of tension in all range are set.

At planning of the equalizing amplifier an attenuator can be switched on at the input of an amplifier, in a reverse channel, at the output or at the intervening cascade. Attenuators switched on at the input usually work at the low levels of signal, that's why the special requirements to their dynamic range are not offered.

At the construction of the integral equalizing amplifiers of alternative current it is possible to apply the next methods of adjusting: 1) change of the mode of operations of transistor on a direct current; 2) adjusting by means of guided attenuators; 3) summing up the output signals of separate amplifying cascades.

The preliminary calculation of structure and general descriptions of the equalizing amplifier is conducted. In future the tasks of calculation will be accurate calculation of sizes of elements of the self-adjustment amplifying system, and also calculation and interpretation of description of an amplifier. The detailed calculations are beyond the scope of the article; if necessary it is needed to take advantage of the literature recommended in the end.

Key words: a dynamic range; transistor amplifier; automatic control system.

Кондратенко Олександр Павлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.

[http:// orcid.org/ 0000-0002-8995-4884](http://orcid.org/0000-0002-8995-4884)

Лукашенко Сергій Сергійович – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.

[http:// orcid.org/ 0000-0002-7121-9320](http://orcid.org/0000-0002-7121-9320)