

нієвих підкладок (рис. 4). Такими умовами можна вважати використання розчину кислот в об'ємному співвідношенні 2:1 з додатками незначних кількостей інгібітора та поверхневого активатора. При цьому час хімічної обробки становить 60 – 90 с. Сформована хімічними методами обробки поверхня кремнієвої підкладки SE, порівняно з планарною поверхнею SE, дозволяє досягнути кількох суттєвих переваг, а саме: характеризується насамперед низьким коефіцієнтом відбивання (до ~15 – 20 %), наявністю геометричного рельєфу, який легко піддається подальшим технологічним обробкам (створенню р/п переходу, пасивації) [7], а також можливістю створення на поверхні оптичної системи захоплення світлового потоку, що при неперпендикулярному входженні світлового променя у SE дозволяє йому краще поглинатись.

1. Menna, P., Di Francia, G. and La Ferrara // *V. Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*. 1995. 37. P. 13 – 24. 2. Kazmerski L.L. // *Photovoltaic: review of cell and module technologie. Renewable & Sustainable Energy Review*. 1997. 1 – 2. P. 61. 3. Uhlir A. // *Bell System Tech. J.* 1956. 35. P. 333. 4. Archer R. J. // *J. Phys. Chem. Solids*. 1960. 14. P. 104. 5. Turner D. R. // *J. Electrochem. Soc.* 1960. 107. P. 810. 6. Schwartz B. and Robbins H. // *J. Electrochem. Soc.* 1976. P. 1903 – 1909. 7. Yerokhov V., Melnyk I. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1999. 3. P. 291 – 323.

УДК 621.375.029.64

А.Й. Семенюк, Л.Д. Юрченко, М.М. Грозь, Л.М. Смеркло
Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

© Семенюк А.Й., Юрченко Л.Д., Грозь М.М., Смеркло Л.М., 2001

A. Semenyuk, L. Yurchenko, M. Groz, L. Smerklo

THE TEMPERATURE STABILIZATION OF PULSE TRANZISTOR VHF POWER AMPLIFIER

© Semenyuk A., Yurchenko L., Groz M., Smerklo L., 2001

Розглянуто особливості розробки потужних імпульсних НВЧ транзисторних підсилювачів у широкому діапазоні температур. Вибрано принцип термостабілізації і запропоновано схему термостабілізації імпульсного потужного НВЧ підсилювача потужності. Наведено результати експериментальних досліджень.

The details of the development of the microwave power pulse transistor amplifiers have been considered with regard to a wide temperature range. The principle of heat setting has been defined. The heat setting circuit of the power amplifier has been designed. The results of the experimental investigation have been presented.

Вступ. Проектування транзисторних схем завжди зазнає проблеми компенсації залежності параметрів транзисторів від температури, що необхідно для забезпечення стійкості і

надійності апаратури в широкому діапазоні робочих температур. Ця проблема особливо гостро проявляється при розробці потужних транзисторних імпульсних НВЧ підсилювачів і пов'язана з досягненням максимальної вихідної потужності та її стабільності в усіх умовах експлуатації незалежно від різноманітності характеристик радіоімпульсного сигналу. Актуальність термостабілізації значно зростає при проектуванні транзисторних підсилювачів потужності, для досягнення якої необхідно підсумовувати велику кількість однотипних генераторів з ідентичними фазовими та амплітудними характеристиками. Вирішення цієї проблеми разом з необхідністю мінімізації енергоспоживання вимагає застосування спеціалізованих схем температурної стабілізації робочого режиму підсилювальних елементів.

У цій роботі наведені результати розробки термостабілізованої схеми імпульсного НВЧ підсилювача потужності на біполярних транзисторах, яка призначена для розв'язання наведених вище проблем.

Формулювання задачі. При розробці системи термостабілізації імпульсного підсилювача враховували особливості впливу як температури, так і режиму роботи на параметри біполярного транзистора. При цьому насамперед враховувалась температурна залежність коефіцієнта передачі струму β , яка у кремнієвих транзисторів переважає над температурною залежністю решти фізичних параметрів (диференційних опорів переходів, зворотного струму колектора тощо) [1]. Ця залежність на практиці компенсується багатьма відомими способами стабілізації робочої точки транзистора. Однак робота потужного НВЧ транзистора в режимі підсилення радіоімпульсів має свої особливості.

Як відомо, режим роботи транзистора в активній області визначається постійними складовими напруги колектора U_k і струму емітера $I_e = I_k + I_b$. У підсилюваному сигналі щільність може змінюватись у значних межах (наприклад, при передачі кодових послідовностей або серій імпульсів різної тривалості). При цьому в транзисторі, який працює в режимі великого сигналу, відповідно змінюватиметься середній струм емітера, що призведе до плавання робочої точки транзистора [1] і нестабільності вихідної потужності при змінній щільності.

Отже, при розробці схеми термостабілізації ставилось за мету досягнення стабільності режиму роботи підсилювача в широкому діапазоні робочих температур незалежно від характеристик радіоімпульсного сигналу.

Вибір принципу термостабілізації. Для стабілізації робочого режиму потужних НВЧ транзисторів використовують джерела термозалежного зміщення, зокрема активні. Вони містять термозалежний елемент (діод або терморезистор) і підсилювач постійного струму (ППС). Джерело формує напругу живлення бази потужного транзистора і тим задає його початковий постійний колекторний струм I_{k0} . Такі схеми живлення бази потужних НВЧ транзисторів описані в [2, 3]

Для формування термозалежного зміщення призначені спеціалізовані потужні діоди, температурна залежність вольт-амперної характеристики яких у кожного типу підібрана для компенсації температурної залежності робочої точки певного класу потужних НВЧ транзисторів [3]. Виготовляються також інтегральні схеми активних джерел базового зміщення. Наприклад, мікросхема VD-01 виробництва фірми "RF Power Components, Inc." (США), яка живиться напругою від +5 до +30 В, при напрузі живлення +28 В забезпечує живлення бази потужного транзистора напругою порядку 0,7 В з температурним коефіцієнтом вихідної напруги мінус 2,4 мВ/°С і здатна розвинути постійний струм бази до 280 мА.

Такі схеми живлення бази забезпечують достатньо ефективну стабілізацію, але являючи собою генератори напруги, вони стабілізують початкову робочу точку транзистора

і тому більш придатні для застосування при роботі НВЧ транзистора у неперервному режимі при порівняно невеликій глибині амплітудної модуляції підсилюваного сигналу. Для використання в імпульсних підсилювачах такі схеми вимагають встановлення на своєму виході конденсатора великої ємності, який служить ємнісним накопичувачем і запобігає виникненню значного спаду вершини при зростанні тривалості імпульсу. Зрозуміло, що ємність повинна бути тим більша, чим триваліший радіоімпульс ми хочемо пропустити через підсилювач. Але це стосується тільки сигналів з щільністю $Q \geq 10 \dots 15$. При менших щільностях ($2 \leq Q \leq 10$) починають різко зростати постійні складові струмів бази і емітера, що порушує стабільність робочого режиму при змінній щільності.

Щоб позбутись зазначених недоліків, для термостабілізації підсилювача краще використати у колі живлення бази потужного транзистора замість генератора напруги генератор стабільного струму, у якого рівень стабілізації залежав би певним чином від температури.

Реалізація схеми термостабілізації підсилювача. Для термостабілізації підсилювача потужності було розроблено схему, яка зображена на рис. 1. У ній генератором стабільного струму є транзистор VT5 з обмежувальним резистором R11 в емітері і резистором при-в'язки R12 в колекторі.

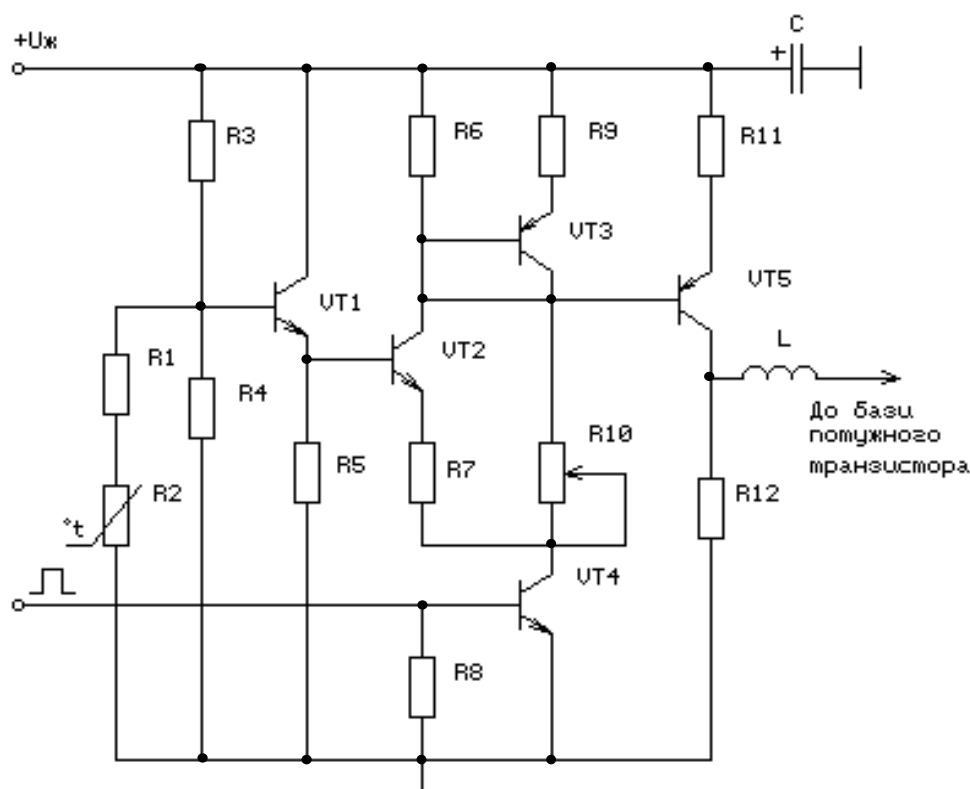


Рис. 1. Схема імпульсного активного термозалежного джерела зміщення

Транзистор VT3 у діодному включенні використано для компенсації температурних змін напруги U_{be} транзистора VT5. Резистори R9...R11 забезпечують потрібний робочий режим транзистора VT5. Опори резисторів вибираються такими, щоб залежно від параметрів застосованого НВЧ транзистора задати струм стабілізації на виході VT5, який би забезпечив стабільність робочої точки НВЧ транзистора в конкретних умовах. Необхідну напругу зміщення на базі НВЧ транзистора встановлюють за допомогою змінного резистора

R10. Паралельно останньому підімкнено регулюючий каскад на транзисторі VT2, на базу якого подається напруга зміщення від термозалежного подільника напруги, утвореного резисторами R1, R3, R4 та терморезистором R2, через емітерний повторювач VT1. Напруга зміщення НВЧ транзистора подається у коло його бази через дросель L. Особливістю схеми є те, що коло живлення бази транзистора VT5 замикається через ключ на транзисторі VT4, призначений для створення імпульсного режиму роботи джерела зміщення. Емітерний повторювач VT1 застосовано для створення можливості регулювати за допомогою єдиного термозалежного подільника режим роботи кількох ідентичних стабілізаторів струму без впливу на режим подільника. Це необхідно, наприклад, для термостабілізації схем з підсумовуванням потужностей кількох ідентичних НВЧ підсилювальних каскадів.

Джерело живлення бази НВЧ транзистора працює так.

На базу ключа VT4 подається прямокутний імпульс, тривалість і часове розташування якого відповідає підсилюваному в цей момент радіоімпульсу. При цьому транзистор VT4 відкривається і замикається коло зміщення транзистора VT5. Останній також відкривається і посиляє струм до бази НВЧ транзистора, створюючи на ній пряме зміщення. У паузах між імпульсами транзистори VT4 і VT5 закриті і напруга на колекторі VT5 дорівнює нулю. При цьому зміщення на базі НВЧ транзистора відсутнє і він не споживає струму.

Термостабілізація режиму НВЧ транзистора здійснюється так.

Транзистор VT2 і послідовно з'єднаний з ним резистор R7 утворюють регульований опір, який дорівнює сумі внутрішнього опору транзистора VT2 і резистора R7.

При зниженні температури навколишнього середовища збільшується опір терморезистора R2 у базовому подільнику транзистора VT1, напруга на його базі, а відповідно, і на емітері зростає. Зміщення на базі VT2 також зростає і він починає більше відкриватись, тобто зменшується його внутрішній опір. При цьому регулюючий каскад починає більше шунтувати резистор R10, струм через перехід емітер-база транзистора VT3 зростає, що спричиняє підвищення напруги U_{be} транзистора VT3, а також напруги на базі транзистора VT2 щодо шини живлення. Транзистор VT5 відкривається більше і починає стабілізувати струм на вищому рівні. Внаслідок цього базовий струм потужного НВЧ транзистора зростає, що призводить до збільшення його коефіцієнта підсилення потужності.

При підвищенні температури опір терморезистора зменшується, напруга на базі транзистора VT2 падає, і його внутрішній опір збільшується. При цьому напруга U_{be} транзистора VT3 зменшується і транзистор VT5 починає закриватись, Внаслідок цього базовий струм НВЧ транзистора зменшується, завдяки чому зменшується коефіцієнт підсилення з потужності.

Практичні результати реалізації термостабілізованого підсилювача. Побудована за таким принципом схема була застосована для термостабілізації імпульсного підсилювача потужності на транзисторах типу PH1516-100 фірми M/A COM., INC (США), які працюють в двадцятисантиметровому діапазоні і мають вихідну потужність 100 Вт, а підсилювач завдяки підсумовуванню досягнув вихідної імпульсної потужності 400 Вт.

Каскад на такому транзисторі досліджувався в діапазоні температур від мінус 50 до +50 °С. Була експериментально знята характеристика температурної залежності вихідної потужності каскаду без термостабілізації (при цьому базове зміщення подавалось від зовнішнього джерела) і визначений характер закону, за яким повинна змінюватись напруга зміщення бази НВЧ транзистора U_{be} , щоб вихідна потужність залишалась стабільною в усьому діапазоні робочих температур (рис. 2, крива 2).

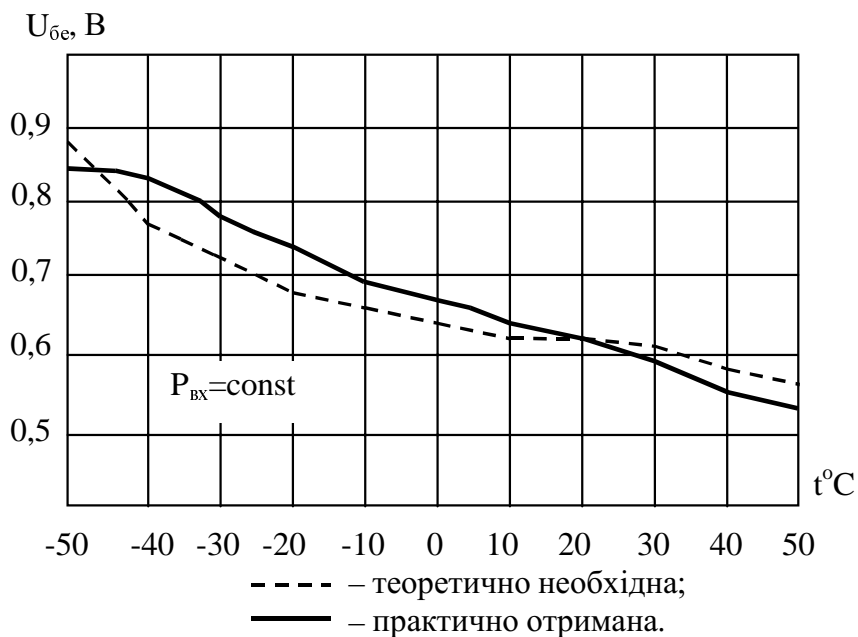


Рис. 2. Температурна залежність напруги зміщення бази термостабілізованого потужного НВЧ транзистора

Внаслідок розрахунків і експериментальної перевірки було підібрано таке співвідношення опорів резисторів R1...R4 термозалежного подільника напруги (див. схему рис. 1), при якому забезпечувалась температурна зміна U_{be} НВЧ транзистора за законом, найбільш наближеним до необхідного для підтримування постійного рівня вихідної потужності.

У досліджуваній схемі термостабілізації напруга зміщення на базі НВЧ транзистора в діапазоні температур змінювалась згідно з кривою 1 на рис. 2.

На рис. 3 показані для порівняння експериментально отримані відносні температурні залежності вихідної потужності підсилювального каскаду без термостабілізації і з термостабілізацією.

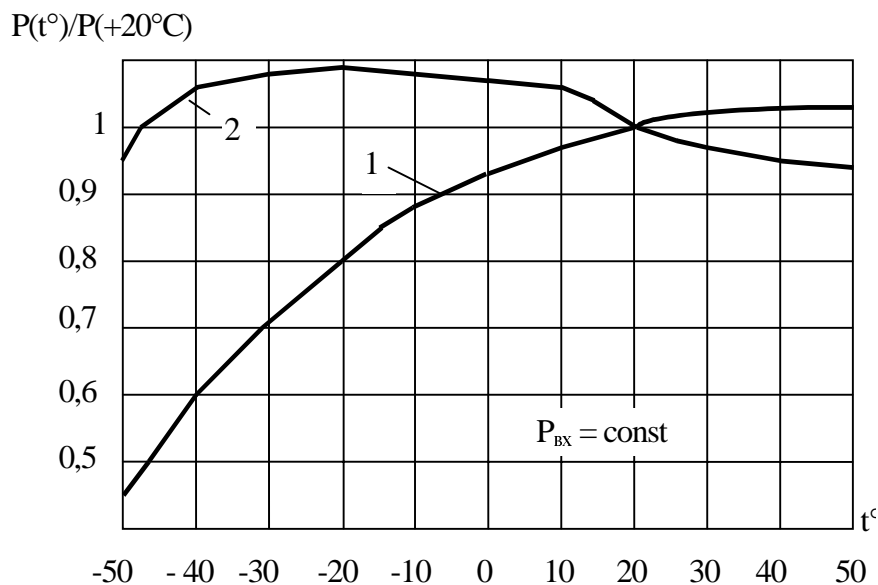


Рис. 3. Температурна залежність вихідної потужності НВЧ транзистора без термостабілізації (крива 1) і з термостабілізацією робочого режиму (крива 2)

З графіка (крива 1) видно, що при підвищенні температури порівняно нормальних умов підсилення каскаду дещо зростає, а при зниженні падає дедалі крутіше, причому найбільший спад спостерігається при температурах, нижчих від мінус 20 °С.

У практично реалізованій схемі термостабілізованого каскаду, як видно з кривої 2 на рис. 3, вихідна потужність каскаду в усьому діапазоні робочих температур коливається від 0,95 до 1,09 значення потужності в нормальних умовах (при +20 °С), що рівнозначно нерівномірності $\pm 0,3$ дБ і є цілком задовільним результатом.

Висновки. 1. Побудова активного джерела термозалежного зміщення потужного НВЧ транзистора на базі генератора струму з застосуванням імпульсного режиму його роботи дозволяє практично усунути вплив змін характеристик підсилюваного радіоімпульсного сигналу на режим роботи підсилювача.

2. Використання імпульсного режиму роботи генератора зміщення зменшує значення постійних складових струмів в колах підсилювача і тим сприяє зменшенню енергоспоживання. У результаті каскади з застосуванням транзисторів, що працюють в режимі АВ, за економічністю не поступаються каскадам в режимі С.

3. Запропонована схема активного джерела термозалежного зміщення дозволяє реалізувати імпульсний транзисторний НВЧ підсилювач потужності, який здатний працювати в широкому діапазоні робочих температур і відзначається стабільністю робочого режиму при змінах характеристик радіоімпульсного сигналу.

4. Розроблена схема активного джерела термозалежного зміщення забезпечила стабілізацію параметрів імпульсного НВЧ транзистора в широкому діапазоні температур, чим дозволила підсумувати велику кількість однотипних потужних транзисторів і отримати потужний мініатюрний НВЧ підсилювач, здатний працювати в жорстких умовах експлуатації.

1. В.С. Руденко, В.И. Сенько, В.В. Трифонюк, Е.Е. Юдин. *Промышленная электроника*. – К.: Техніка, 1979. 2. Л.И. Ленец, Н.Б. Петешин. *Термостабилизация режима транзистора в широком диапазоне температур*. – *Полупроводниковая электроника в технике связи. Сборник статей под ред. И.Ф. Николаевского*. 1986. 26. С.46 – 50. 3. *Biasing Consideration for Linear (Class A, AB) Bipolar Power Transistors*. – *RF and Microwave Semiconductors. Discrete, Monolithic and Multifunction/ – 1995, M/A COM. INC. P. 18 – 68 – 18 – 70*.