

Р. А. КАРПЕНКО, В. І. ЗАГАН

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ДОСЛІД ВПЛИВУ СТАРІННЯ НА ШУМИ ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Прийнято вважати, що власні шуми транзисторів складаються з трьох складових: термічного шуму, шуму за рахунок дробового ефекту і так званого надмірного шуму [1].

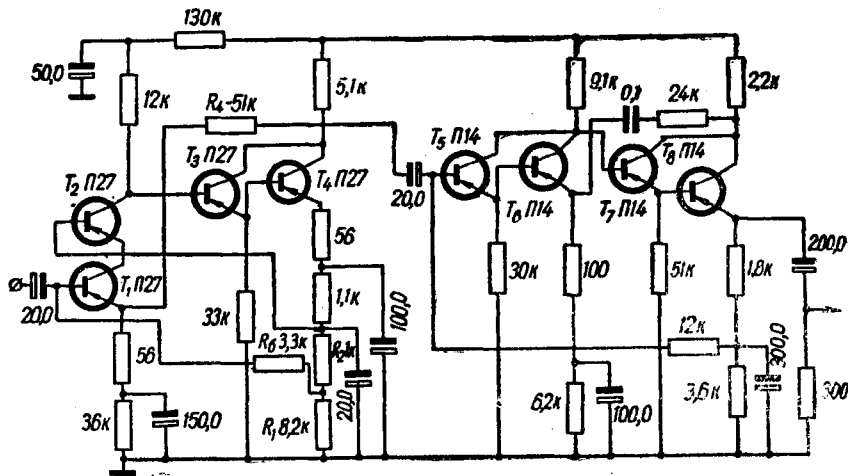


Рис. 1. Принципова схема підсилювача.

Оскільки поверхневі процеси та струм  $I_{к0}$  не залишаються постійними у часі, то і величини складових шумів, пропорційні їм, також повинні змінюватися в часі.

Був поставлений експеримент з метою визначити, чи змінюються шуми підсилювача в процесі старіння транзисторів та якими складовими обумовлена ця зміна. Для цього досліджувався спектральний склад шумів малощумлячого підсилювача, призначеного для роботи від ємнісного датчика. Принципова схема підсилювача наведена на рис. 1.

Перший малощумлячий каскад, зібраний на чотирьох транзи-

сторах, був виконаний у трьох варіантах; параметри транзисторів підбирали з допустимим розкидом для даного типу. Дані транзисторів наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри транзисторів, заміряні до і після старіння

| Екземпляр № 1                 |                |                |                |                |                |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                               | № транзисторів | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> |
| $\alpha$                      | до старіння    | 0,91           | 0,972          | 0,973          | 0,969          |
|                               | після старіння | 0,967          | 0,967          | 0,972          | 0,966          |
| $I_{\kappa 0}$<br>мка         | до старіння    | 2              | 1              | 1              | 1              |
|                               | після старіння | 1,1            | 0,6            | 0,4            | 0,4            |
| $h_{22} \cdot 10^{-6}$<br>ммо | до старіння    | 1,1            | 0,6            | 0,5            | 0,5            |
|                               | після старіння | 1,12           | 0,76           | 0,6            | 0,61           |

Екземпляр № 2

|                               | № транзисторів | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\alpha$                      | до старіння    | 0,981          | 0,981          | 0,99           | 0,985          |
|                               | після старіння | 0,984          | 0,981          | 0,99           | 0,985          |
| $I_{\kappa 0}$<br>мка         | до старіння    | 1              | 1              | 1              | 1              |
|                               | після старіння | 0,8            | 1              | 0,8            | 1              |
| $h_{22} \cdot 10^{-6}$<br>ммо | до старіння    | 0,5            | 0,6            | 0,4            | 0,3            |
|                               | після старіння | 0,45           | 0,6            | 0,4            | 0,35           |

Екземпляр № 3

|                               | № транзисторів | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\alpha$                      | до старіння    | 0,994          | 0,994          | 0,994          | 0,992          |
|                               | після старіння | 0,991          | 0,993          | 0,994          | 0,991          |
| $I_{\kappa 0}$<br>мка         | до старіння    | 1              | 1              | 1              | 1              |
|                               | після старіння | 0,6            | 0,4            | 1              | 1              |
| $h_{22} \cdot 10^{-6}$<br>ммо | до старіння    | 0,2            | 0,3            | 0,2            | 0,3            |
|                               | після старіння | 0,4            | 0,35           | 0,3            | 0,35           |

Оскільки підсилювач розраховувався для роботи в області низьких частот, то величина струму емітера перших двох транзисторів, що визначає граничну частоту надмірного шуму, була взята мінімальною і дорівнювала 0,1 ма. При такому малому струмі істотна термостабілізація робочих точок транзисторів. У схемі рис. 1 термостабілізація здійснювалася комбінованим негативним зворотним зв'язком по постійному струму і по напрузі. Блок-схема вимірювання наведена на рис. 2.

Як додатковий підсилювач використовували підсилювач вольтметра МВЛ-3; для вимірювання спектрального складу застосову-

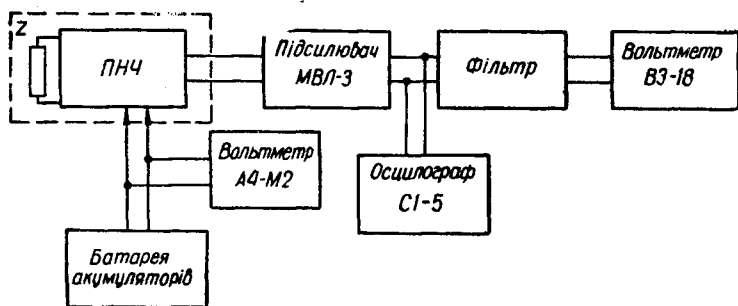


Рис. 2. Блок-схема вимірювання шумів.

вали: в діапазоні 50—500 гц — фільтри низької частоти, в діапазоні 0,5—20 кгц — низькочастотний спектрометр СКЧ-3 у режимах ручного пошуку, в діапазоні частот 10—50 кгц — фільтри спектрометра надзвучових частот типу СУЧ.

У всіх випадках розраховувались інтегральні смуги пропускання підсилювача, тому що фільтри мали різні смуги.

Оскільки в межах смуги пропускання фільтрів спектр шумів різко змінювався, то було б помилкою зводити абсолютні рівні шумів, знятих на різних частотах, до однієї смуги, бо похибки обчислень дуже великі. Тому на всіх наведених графіках під значеннями середніх частот фільтрів проставлені відповідні їм інтегральні смуги пропускання підсилювача.

Напруги шумів, зведені до входу підсилювача для різних еквівалентів та різних екземплярів вхідних каскадів, визначали по рівню вихідних шумів, заміряних вольтметром середньоквадратичних значень (ВЗ-18),

$$\bar{U}_{ш\text{ вх}\Sigma} = \frac{\bar{U}_{ш\text{ вих}\Sigma}}{K_U}, \quad (1)$$

де  $K_U$  — коефіцієнт підсилення тракту по напрузі.

На рис. 3 зображені криві залежності напруг шумів від частоти, зняті на початку дослідів (суцільні криві) і після 2800 годин збері-

гання підсилювача (пунктирні криві). Для визначення співвідношення між власними шумами транзистора та шумами активної складової вхідного ланцюга вимірювали модуль та фазу вхідних опорів усіх трьох екземплярів вхідних каскадів підсилювача.

Вимірювання  $Z_{вх}$  у діапазоні частот 50 гц — 50 кгц було необхідно для більш точного визначення напруги шумів активної складової опору вхідного ланцюга, зведених до входу підсилювача,

$$\bar{U}_{шR_{зв}} = \bar{U}_{шR} \left| \frac{Z_{вх}}{Z_{вх} + Z} \right|, \quad (2)$$

де  $\bar{U}_{шR}$  — середньоквадратичне значення напруги шумів активної складової опору вхідного ланцюга в режимі холостого ходу;

$Z$  — опір вхідного ланцюга підсилювача.

Для ємнісного еквівалента значення  $\bar{U}_{шR}$  знаходили по формулі (2)

$$\bar{U}_{шR}^2 = \frac{4kT}{2\pi} \int_{\omega_H}^{\omega_B} \frac{r}{1 + \omega^2 \tau^2} d\omega = \frac{4kT}{2\pi C} [\arctg \tau \omega_B - \arctg \tau \omega_H], \quad (3)$$

де  $\tau = rc$ ;

$r = R_{\sigma\Sigma} = R_6 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$  — сумарний опір в ланцюгу бази транзистора  $T_1$  (див. рис. 1);

$C$  — ємність еквівалента.

Для активного еквівалента, який вмикався на вхід підсилювача послідовно з конденсатором великої ємності (400 мкф),  $\bar{U}_{шR}$  знаходили по формулі Найквіста для еквівалентного опору

$$R_{екв} = \frac{R_{\sigma\Sigma} R_{дж}}{R_{\sigma\Sigma} + R_{дж}}.$$

Власні шуми транзистора, зведені до входу підсилювача,  $\bar{U}_{ш тр_{зв}}$  визначали з рівності

$$\bar{U}_{ш вх\Sigma} = \sqrt{\bar{U}_{шR_{зв}}^2 + \bar{U}_{ш тр_{зв}}^2} \quad (4)$$

Криві залежності власних шумів транзисторів від частоти для різних еквівалентів після старіння наведені на рис. 4.

На рис. 3 і 4 наведені результати, одержані для вхідного каскаду з середніми з можливих значень параметрів транзисторів даного типу.

З аналізу графіків для низьких частот 50—500 гц впливає:

1. Шуми підсилювача визначаються головним чином власними шумами транзистора. Абсолютна різниця середніх значень влас-

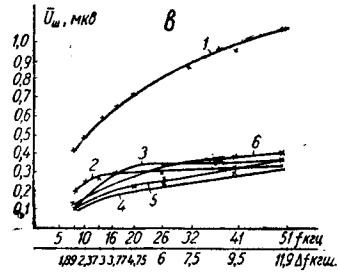
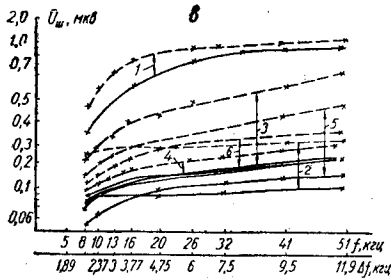
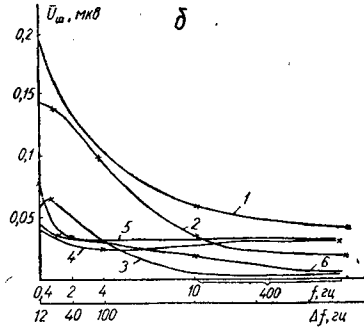
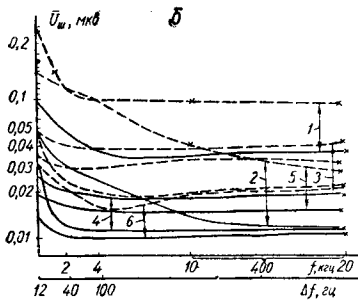
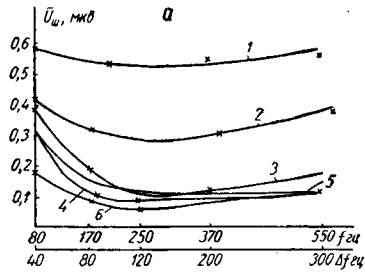
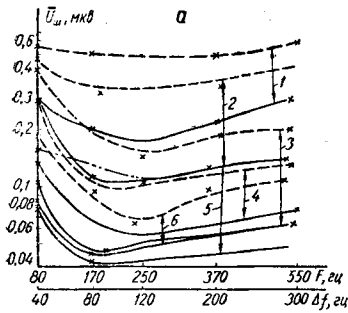


Рис. 3. Криві залежності абсолютного рівня шумів підсилювача, зведеного до входу, від частоти для різних еквівалентів джерела сигналу:

а — діапазон низьких частот; б — діапазон звукових частот; в — діапазон надзвукових частот; 1 —  $C=300$  нФ; 2 —  $C=0,01$  мкФ; 3 —  $R=16$  к; 4 —  $C=0,5$  мкФ; 5 —  $R=0,39$  ком; 6 —  $C=20$  мкФ.

Рис. 4. Криві залежності абсолютного рівня власних шумів транзисторів від частоти для різних еквівалентів джерела сигналу:

а — діапазон низьких частот; б — діапазон звукових частот; в — діапазон надзвукових частот (цифрові позначення такі ж, як на рис. 3).

них шумів підсилювача (рис. 3) пояснюється різними величинами еквівалентів опору джерела сигналу

$$\bar{U}_{ш\text{ грзв}} = \bar{U}_{ш\text{ гр}} \left| \frac{Z}{Z + Z_{вх}} \right|, \quad (5)$$

де  $U_{\text{штр}}$  — власні шуми транзистора в режимі холостого ходу вхідного ланцюга.

2. Характер зміни рівня шумів при зміні частоти, а також пов'язаної з нею смуги пропускання говорить про те, що в цьому діапазоні частот переважає спад рівня шумів із зростанням частоти. Останнє свідчить про те, що шум підсилювача визначається надмірним шумом транзисторів.

3. Про відносні зміни у часі власних шумів транзисторів правильніше за все судити по кривих співвідносними еквівалента 6, оскільки при цьому у всьому діапазоні частот сумарні шуми визначаються власними шумами транзистора. В середньому можна вважати, що власні шуми транзисторів в області надмірних шумів за період старіння 2800 годин зросли в 1,5—2 рази.

4. Зміщення мінімуму кривої можна пояснити зміщенням граничної частоти, до якої надмірні шуми істотні.

5. Для еквівалентів 3 та 4 на частотах 80 та 170 *гц* також можна вважати, що сумарні шуми дорівнюють власним шумам, однак в цьому випадку абсолютний приріст набагато більший, ніж у випадку еквівалента 6. Це можна пов'язати з тим, що при збільшенні опору джерела сигналу зменшується глибина негативного зворотного зв'язку, яким охоплений перший каскад. Тому відносна зміна шумів виявляється більш різко.

3 розгляду кривих для діапазона частот 0,5—20 *кГц* випливає:

1. Граничні частоти надмірних шумів різняться для різних еквівалентів джерела сигналу: чим більше еквівалентний опір джерела сигналу, тим вища частота.

2. Якщо сумарні шуми визначаються головним чином шумами еквівалента джерела, розбіг у рівнях шумів у процесі старіння слід віднести за рахунок зміни величини вхідного опору, а значить, і коефіцієнта передачі  $e$ . р. с. шумів джерела сигналу до входу підсилювача.

В інших випадках зміни рівня шуму для частот від 8 *кГц* та вище повинні визначатися змінами термічних та дробових шумів, зокрема зміною  $r_6$  та струму  $I_{к0}$ . Дані табл. 1 свідчать, що величини параметрів транзисторів після старіння  $\alpha$ ;  $h_{22}$ ;  $I_{к0}$  практично не змінилися, тому зміни рівня шумів головним чином визначаються зміною вхідного опору. В [3] відмічається, що активна складова провідності емітер — база дифузійних транзисторів головним чином обумовлена рекомбінацією носіїв на вільній поверхні бази та ефектом розтікання останніх вздовж бази до її зовнішньої клеми. Також відомо, що вхідна провідність та  $I_{к0}$  малошумлячих транзисторів П13Б змінюються у часі (вхідна провідність падає, а  $I_{к0}$  зростає).

Результати цих праць підтверджують висновок даної статті, що зміни шумів у часі обумовлені головним чином поверхневими явищами та можуть бути пояснені зміною вхідного опору. Збіль-

шення активної складової вхідного опору приводить до збільшення власних шумів транзистора, а збільшення модуля вхідного опору — до збільшення шумів активної складової опору вхідного ланцюга, зведених до входу.

Характер змін шумів в часі у розглядуваному діапазоні частот для інших екземплярів, що дублюють вхідний каскад, залишався тим же, що і в наведеному; різнилися лише абсолютні значення шумів ( $-50$  —  $+80\%$ ). Сумарна похибка вимірювання дорівнювала  $20\%$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Потрясай В. Ф., Рыжов А. С., Сулягин В. Л. Шумы транзисторов.— Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение». Под ред. Я. А. Федотова. «Советское радио», 1960, вып. 5.
2. Криксунов В. Г. Низкочастотные усилители. Гостехиздат УССР, 1961.
3. Мигулин И. Н., Чаповский М. З. Зависимость входной проводимости транзисторов от температуры тока коллектора. — «Радиотехника и электроника», 1963, № 12.

*Р. А. КАРПЕНКО, В. И. ЗАГАН*

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАРЕНИЯ НА ШУМЫ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

##### Краткое содержание

Анализируются шумы транзисторного усилителя с комбинированной обратной связью после длительного его хранения (2800 часов). Показано, что в результате хранения усилителя шумы его возросли. Изменения уровня шума усилителя связываются с изменением во времени входной проводимости транзисторов.

*R. A. KARPENKO, V. I. ZAGAN*

#### AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGING ON THE NOISE OF A TRANSISTOR AMPLIFIER

##### Summary

The noise of a combined feedback amplifier after long storage (2800 hours) is analysed. It is shown, that as a result of the amplifier storage its noise has increased. The change of the noise level of the amplifier is connected with the change of the transistor input admittance with time.