

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Д. В. Михалевський, В. М. Кичак**

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ  
ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА РІВНЕМ  
НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ШУМУ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2014

УДК 621.382  
ББК 32.85  
М69

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 27.03.2014 р.)

Рецензенти:

**О. М. Шинкарук**, доктор технічних наук, професор

**В. П. Манойлов**, доктор технічних наук, професор

**Михалевський, Д. В.**

М69 Неруйнівний контроль виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму : монографія / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 112 с.

ISBN 978-966-641-586-1

В монографії розглядаються питання неруйнівного вхідного та вихідного контролю виробів електронної техніки за рівнем власних низькочастотних шумів. Запропоновано нові шумові моделі біполярних та польових, а також інтегральних транзисторів, які враховують джерела шуму елементів схеми вмикання та зворотні зв'язки. Для підтвердження моделей було проведено експериментальні дослідження зв'язку інформативного параметра контролю з якісним показником надійності. На розроблені моделі було запропоновано засоби безпосереднього, відносного та спектрального контролю, для операцій вхідного та вихідного досліджень виробів електронної техніки.

УДК 621.382  
ББК 32.85

ISBN 978-966-641-586-1

© Д. Михалевський, В. Кичак, 2014

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	3
ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	5
1.1 Класифікація методів неруйнівного контролю.....	6
1.2 Особливості неруйнівного контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотних шумів.....	9
1.3 Види власних шумів виробів електронної техніки в діапазоні низьких частот.....	11
1.4 Основні методи вимірювання низькочастотних шумів .....	15
РОЗДІЛ 2 ШУМОВІ МОДЕЛІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ .....	16
2.1 Шумова модель біполярного транзистора.....	16
2.2 Шумова модель інтегрального транзистора.....	24
2.3 Шумова модель польових транзисторів .....	28
2.4. Шумова модель інтегрального операційного підсилювача.....	35
2.5 Експериментальні дослідження шумових характеристик виробів електронної техніки .....	45
2.6. Оцінка інтервалу та можливості контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотних шумів.....	48
РОЗДІЛ 3 ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ШУМУ .....	53
3.1 Засіб безпосереднього контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму .....	53
3.2 Засіб відносного контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму .....	64
3.3 Засіб спектрального контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму .....	71
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ .....	82
4.1 Побудова вимірювального каналу засобів контролю.....	82
4.2. Оцінювання швидкодії засобів контролю .....	87
4.3 Оцінювання вірогідності контролю .....	90
ВИСНОВКИ.....	101
ЛІТЕРАТУРА .....	104
Додаток А Схема ввімкнення логічного блока .....	111

## ВСТУП

В теперішній час спостерігається значний розвиток електронних компонентів. Елементна база постійно вдосконалюється і, як свідчить практика, технологічні процеси виготовлення не є ідеальними. В результаті цього на підприємствах, що виготовляють радіоелектронну апаратуру, потрапляють потенційно ненадійні вироби, в разі відмови яких можуть бути значні матеріальні втрати. Для попередження цього існують різні методи контролю якості напівпровідникових приладів на етапі вихідного контролю у виробника та вхідного контролю у споживача виробів електронної техніки, який виготовляє радіоелектронну апаратуру на їх основі.

Що стосується ситуації виготовлення виробів електронної техніки в Україні, то питання оцінювання якості і прогнозування їх надійності є найбільш актуальним. З одного боку, щоб забезпечити конкурентоздатність виготовлених електронних компонентів, а, з іншого боку, забезпечити високу надійність виготовленої радіоелектронної апаратури, яка побудована на зарубіжній елементній базі, оскільки, для різних партій компонентів однієї серії існує імовірність наявності ненадійних виробів електронної техніки.

Як відомо, найбільш ефективними методами прогнозування надійності є методи неруйнівного контролю, що передбачають проведення контролю із збереженням початкових характеристик виробів, які досліджуються. Але найбільш перспективними на даний час є методи контролю надійності виробів за рівнем низькочастотних шумів.

Суттєвим недоліком відомих методів і засобів контролю якості виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму є їх низька вірогідність контролю, що обумовлюється неповною відповідністю математичних моделей і недосконалістю апаратних засобів, що спричиняє недостатню достовірність результатів контролю, які не відповідають сучасному рівню розвитку електронних виробів. В зв'язку з цим, є необхідним розв'язання науково-технічної задачі підвищення вірогідності існуючих і створення нових методів та засобів контролю надійності виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму, на етапі вихідного контролю у виробників цих виробів, та на етапі вхідного контролю на підприємствах, що виготовляють радіоелектронну апаратуру.

## РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

*Надійність* – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування (ДСТУ 2860-94).

*Надійність виробів електронної техніки (ВЕТ)* є комплексною властивістю, яка залежить від якості їх конструкції і технології виготовлення, а також режиму роботи і умов експлуатації.

*Контроль надійності* – це передбачення виникнення відмови виробу електронної техніки у майбутньому (надійний, ненадійний), на основі аналізу зміни інформативного параметра (ГОСТ 27.001-95).

При поставці виготовлених партій ВЕТ від заводу виробника, надійність окремих виробів не завжди відповідає встановленим нормам. В таких партіях завжди присутні вироби, із погіршеними технічними характеристиками, через які виникають відмови, що призводить до значних матеріальних затрат на етапі конструювання радіоелектронної апаратури. Наявність ненадійних ВЕТ залежить від конструктивно-технологічних факторів, заводу виробника і навіть від дати виготовлення [1–3]. Так, наприклад, партії інтегральних схем однієї серії, що виготовлені на різних підприємствах, мають різну кількість ненадійних виробів, а для різних серій, виготовлених на одному підприємстві характерні однакові дефекти.

В результаті цього як і у нас, так і за кордоном по мірі вдосконалення і мініатюризації ВЕТ та радіоелектронних пристроїв на їх основі, гостро стоїть питання про розробку нових методів і засобів для підвищення якості і надійності ВЕТ. Вдосконалення ведеться за двома напрямками: перший напрямок – вдосконалення конструктивних матеріалів, технологічних процесів, виробничого обладнання, конструкцій і схемотехнічних рішень; другий напрямок – вдосконалення і оптимізація існуючих, а також розробка нових методів та засобів контролю і прогнозування надійності ВЕТ.

Одним із перспективних напрямків в цій області є дослідження методів неруйнівного контролю, тому обмежимося розглядом їх, оскільки методи руйнівного контролю потребують значних матеріальних затрат і приводять до неідеальності ВЕТ, що досліджуються.

## 1.1 Класифікація методів неруйнівного контролю

*Неруйнівний контроль* – це проведення будь-якого вимірювання встановленого інформативного параметра, який дозволяє встановити границі якості досліджуваного ВЕТ, без зміни його характеристик до процедури контролю [4].

Як відомо, термінологічного визначення з технологічного контролю не існує, тому під неруйнівним контролем розуміють контроль, що дозволяє за дослідженими характеристиками визначити замасковані дефекти ВЕТ.

*Методи неруйнівного контролю* (МНК) знайшли найбільш широке використання в технології контролю ВЕТ завдяки своїй високій функціональності, точності, науковій і методичній строгості. Головна перевага цих методів полягає в тому, що при їх використанні конструктивно-технологічна і функціональна структура виробу зберігається [5].

МНК, не змінюючи якості параметрів і характеристик виробу, дозволяють за непрямими вторинними ознаками виявити приховані дефекти, або розкрити такі особливості, які спричиняють потенційну ненадійність виробів. Вони дають можливість досліджувати вироби в процесі розробки, виробництва, випробувань і експлуатації, а також можуть застосовуватися для оцінки якості технологічних процесів з метою виявлення ненадійних виробів, які не задовольняють вимоги технічних умов.

Класифікація видів і методів неруйнівного контролю наведена в ГОСТ 27.001-95. МНК базується на взаємодії проникаючого або відбитого фізичного поля від виробу, що контролюється. Відповідно до ГОСТ – МНК можна розділити на такі види (рис. 1.1).

*Магнітні* МНК є видом неруйнівного контролю, що базуються на аналізі взаємозв'язку магнітного поля із досліджуваним ВЕТ.

*Електричні* МНК використовують електричне поле, яке взаємодіє із контрольованим ВЕТ, або власне електричне поле контролюючого об'єкта, яке в подальшому реєструється вимірювальним приладом.

*Теплові* МНК використовують зміну теплового або температурного полів, які виникають внаслідок дефектів досліджуваних ВЕТ.

*Оптичні* МНК використовують пристрої реєстрації оптичного випромінювання, які взаємодіють із контрольованими ВЕТ.

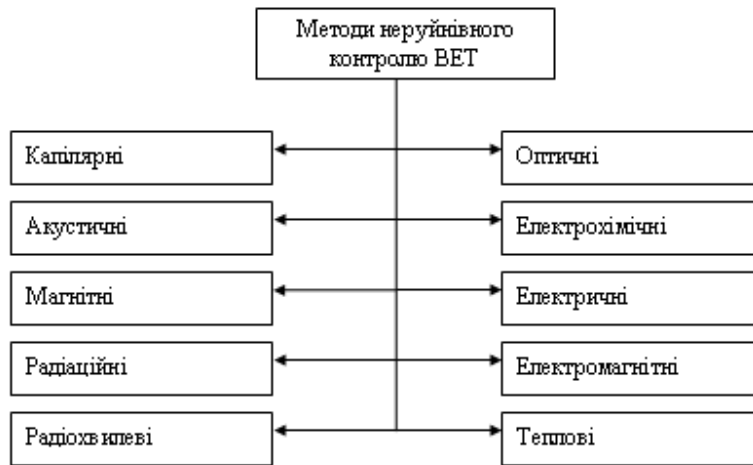


Рисунок 1.1 – Методи неруйнівного контролю ВЕТ

*Радіаційні* МНК використовують аналіз іонізуючого випромінювання, яке проходить крізь ВЕТ. В якості випромінювання можуть використовуватись будь-який вид іонізуючих променів.

*Акустичні* МНК використовують дію механічних хвиль на досліджуваному ВЕТ. На основі аналізу зміни параметрів діючих хвиль робиться оцінка надійності.

*Капілярні* МНК використовують проникання невидимого або слабо видимого газу в дефектні області напівпровідника ВЕТ.

*Електромагнітні* МНК використовують аналіз взаємодії електромагнітного поля струмового перетворювача із електромагнітними полями, які наводяться у досліджуваному ВЕТ.

*Радіохвилеві* МНК використовують реєстрацію зміни електромагнітних хвиль радіодіапазону, які взаємодіють із контрольованим ВЕТ.

При виготовленні виробів електронної техніки використовуються як фізико-технічні методи, так і статистичні методи контролю [5]. Фізико-технічні методи контролю базуються на вимірюванні або визначенні фізичних параметрів виробу і використовуються для постійного контролю.

*Статистичний* метод використовується при вибірковому контролі. Використання статистичного методу дозволяє оцінити якість продукції, яка випускається, своєчасно виявити причини появи браку і усунути їх шляхом певного регулювання технологічного процесу.

Програма проведення вибірових досліджень може бути різною, але у всіх випадках повинен бути передбачений комплекс засобів для ви-

явлення ненадійних пристроїв, аналіз причин їх ненадійної роботи і визначення показників надійності досліджуваних пристроїв.

*Прогнозування відмов* необхідно відрізнити від поняття прогнозування надійності [5], яке є поняттям статистичного прогнозування кількісних параметрів надійності. Прогнозування відмов включає операції, які дозволяють на основі аналізу змін прогнозуючого параметра пристрою передбачити можливість виникнення відмов і визначити потенційно ненадійні вироби. Прогнозування кількісних показників надійності є окремим випадком прогнозування відмов. Таким чином прогнозування відмов ВЕТ, як неруйнівний метод контролю якості, дозволяє провести відбракування потенційно ненадійних і відбір високоякісних пристроїв, а також визначати якість готової продукції та проводити оцінку показників надійності.

Існує чотири основних методи прогнозування відмов ВЕТ [5]:

1. Метод виявлення дефектів і дослідження кінетики процесів на цих дефектах. Цей метод базується на використанні різносторонніх контрольних випробувань і методів неруйнівного контролю якості в процесі випробувань на виробництві.

2. Використання критичних до відмов параметрів. Критичними до наближення відмов і такими, що характеризують потенційну надійність виробу, вважаються параметри, значення яких визначають втрату працездатності пристрою на самих початкових стадіях розвитку відмови. Цей метод викликає великий інтерес, оскільки включає вибір, обґрунтування і вимірювання такого прогнозуючого параметра.

3. Метод дослідження в граничних робочих режимах, який включає в себе контроль основних параметрів ВЕТ в умовах підвищених теплових і електричних навантажень і дозволяє отримати інформацію про відмови за короткий час. Недолік цього методу полягає в визначенні дійсного значення коефіцієнта прискорення для визначення кількісних параметрів надійності. Тому ці дослідження можуть виявити відмови, які ніколи не проявляться в нормальних умовах роботи ВЕТ.

4. Статистичне прогнозування кількісних показників надійності, яке передбачає оцінювання параметрів надійності за певний час. Цей метод базується на використанні математичного прогнозування випадкового процесу. Недоліком такого методу є необхідний збір великої кількості інформації про вимірювання інформативного параметра, чи сукупності параметрів, для кожного виробу.



Отже всі методи мають спільну рису – вимірювання прогнозуючого параметра, який дозволяє оцінити якість ВЕТ без погіршення їх властивостей. Найбільш широко розповсюдженими є візуальний контроль, який використовується для досліджень поверхневих характеристик пристрою, а також методи електричного контролю до яких належить контроль шумових характеристик ВЕТ.

## **1.2 Особливості неруйнівного контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотних шумів**

Основна задача експериментальних робіт з дослідження зв'язку відмов ВЕТ із їх власними шумами, полягає у виявленні кореляційної залежності між ними, або нестабільністю параметрів виробів, які проявляються при випробуваннях і експлуатації. Такі дослідження разом із ретельним фізико-хімічним аналізом виробів із наявними дефектами, дозволяють розробити методи неруйнівного контролю з метою відбору високостабільних і надійних ВЕТ.

Використання методу контролю потенційно надійних і стабільних ВЕТ, із використанням вимірювання їх рівня низькочастотного шуму дозволяє або зовсім відмовитись від низки затратних і ресурсоемних методів контролю, або суттєво підвищити їх ефективність.

На даний час розроблено нові методи прогнозування потенційно ненадійних ВЕТ та інтегральних схем. В роботі [6] запропоновано методи оцінки надійності напівпровідникових біполярних транзисторів при знятті залежності шумової характеристики від значення шуму емітер-колектор. Цей метод перевірявся на транзисторах КТ3102. Недоліком такого підходу є необхідність аналізу всіх точок отриманої характеристики із характеристикою надійного ВЕТ. Інший спосіб передбачає отримання коефіцієнта тангенса кута нахилу залежності значення величини шуму від величини струму для кожного виробу.

Також в [6] запропоновано комбінований метод прогнозування надійності ВЕТ за рівнем НЧ шуму. Для цього заміряють рівень шумової напруги до і після дії нагрівання до температури 100 °С. Після цього визначаються коефіцієнти нестабільності, за якими визначається надійність виробу. Із недоліків можна зазначити час проведення досліджень, який може тривати до трьох годин і є імовірність прояву дефектів, які б могли не проявитись при нормальному режимі роботи ВЕТ.

Аналогічними методами розділення за надійністю для інтегральних схем, на основі вимірювання шуму в колі , «живлення – загальна точка», є методи наведені в [7, 8]. Метод був продемонстрований на дванадцяти аналогових інтегральних схемах типу ОРА735, які виконані за технологією КМОН. Для кожної з них в діапазоні значень напруги живлення 2,7..12 В вимірювалось середньоквадратичне значення напруги шуму методом прямого вимірювання на виходах «живлення – загальна точка» на частоті 1000 Гц для вимірювальної смуги в 200 Гц. Для визначення надійності необхідно оцінити коефіцієнт відносної інтенсивності шуму при найменшій критичній і середній напругах живлення.

Інший метод базується на проведенні експериментальних досліджень залежності середньоквадратичного значення шумової напруги для дефектної структури, що має температурну залежність. В результаті цього на частоті 1000 Гц, при нарузі живлення 8 В, для ІС типу ОРА735 було досліджено шумову характеристику при нормальній температурі і при температурах 0 °С і 100 °С. Аналогічною є необхідність у визначенні коефіцієнта інтенсивності шуму.

Метод розділення інтегральних схем за надійністю з використанням напруги їхнього шуму, виміряного в колі , «вхід – загальна точка» [9] полягає у виявленні потенційно ненадійних схем із дефектами у вхідному колі, що є найбільш чутливим до наявності дефектів в структурі. Для виявлення схем із дефектами у вхідних колах вимірюється інтенсивність шуму в колі «вхід – загальна точка» при двох значеннях струму. Ці значення струму знаходяться з вимірювань випадкової вибірки: перше значення вибирається рівним такому значенню, коли залежність інтенсивності шуму від прямого струму для всіх схем близька до прямої, друге значення струму – при початку різкого зростання значення інтенсивності. За відносною величиною зміни значень інтенсивності шуму визначається потенційна ненадійність схем. Метод перевірявся для двадцяти логічних схем типу К137ЛЕ2, виконаних за біполярною технологією. Для них вимірювалося значення інтенсивності шуму на виходах «вхід – загальна точка». Вимірювання для випадкової вибірки проводились при двох значеннях струму: 6 мА і 10 мА. Для визначення надійності проводиться визначення відносного коефіцієнта шуму.

### 1.3 Види власних шумів виробів електронної техніки в діапазоні низьких частот

В будь-якому електронному приладі генеруються внутрішні електричні шуми, які на відміну від різного роду перешкод і електромагнітних завад не можуть бути усунені повністю [10]. Шуми виникають внаслідок теплового руху заряджених частинок, вони відрізняються повною відсутністю регулярності в часі, тобто є хаотичними. Проте середня потужність шумів і середня щільність розподілу потужності по спектру частот (спектральна щільність) зазвичай є величинами, які можна визначити. Наприклад основними типами шумів в біполярних транзисторах – є теплові, дробові і шуми типу  $1/f$ . Види власних шумів ВЕТ, які є наявними в діапазоні низьких частот можна представити так, як показано на рис. 1.2.

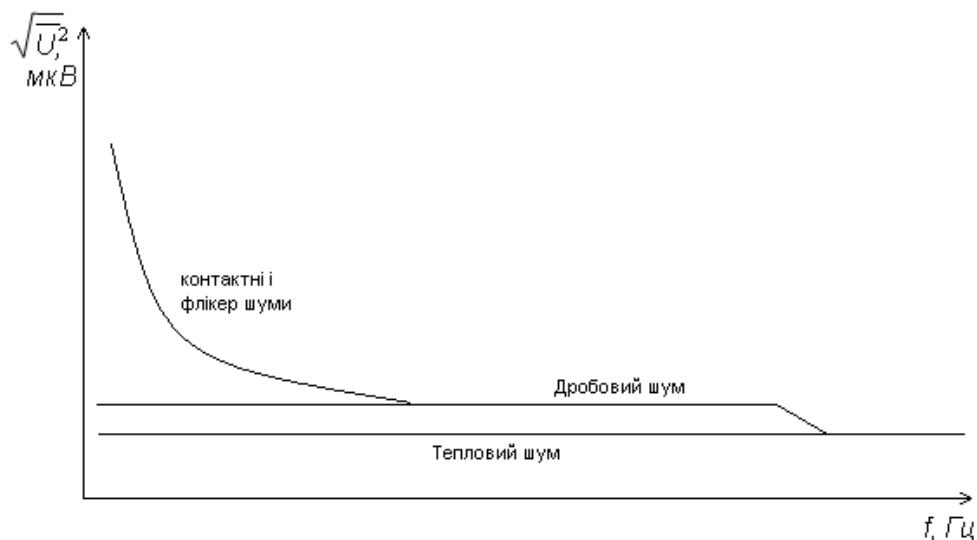


Рисунок 1.2 – Власні шуми ВЕТ в області низьких частот

Таким чином, аналізуючи склад шумів в області НЧ, видно, що для забезпечення високої вірогідності контролю ВЕТ, необхідно враховувати всі їх види. Розглянемо їх.

*Тепловий шум.* Тепловий шум, який часто називають шумом Джонсона, виникає внаслідок випадкового характеру теплового руху вільних електронів в резистивному матеріалі і виявляється як флуктуації напруги на розімкнених клеммах. Середній квадрат флуктуації напруги

холостого ходу  $e$  досліджуваного елемента визначається за формулою Найквіста [10]:

$$\overline{e_R^2} = 4kTR\Delta f ,$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура досліджуваного елемента, К;  $R$  – активна складова електричного опору досліджуваного елемента, Ом;  $\Delta f$  – ширина смуги частот в якій досліджуються флуктуації напруги, Гц.

Енергетичний спектр теплового шуму, тобто потужність на одиницю смуги частот, не залежить від частоти аж до надвисоких частот  $hf \gg kT$ , тому цей вид шуму відносять до шумів із «білим» спектром [10, 11].

У напівпровідникових приладах теплові шуми виникають на омичних опорах. У біполярних транзисторах тепловий шум практично визначається опором бази  $r_b$ .

*Дробовий шум.* Дробовий шум проявляється як випадкові флуктуації струмів через електронно-дірковий перехід в напівпровідниках. Він обумовлений дискретною природою заряду, який переноситься окремими електронами, і аналогічний дробовим шумам, що виникають в електровакуумних лампах. Середній квадрат струму дробового шуму визначається формулою Шотткі [10]:

$$\overline{i^2} = 2qI\Delta f ,$$

де  $\overline{i^2}$  – середній квадрат струму дробового шуму,  $A^2$ ;  $q$  – заряд електрона ( $1,6 \cdot 10^{-19} Кл$ );  $I$  – постійний струм через р-п перехід, А.

У біполярному транзисторі дробові шуми можна відобразити за допомогою двох статистично незалежних джерел, одне з яких відображає флуктуації струму бази, а інше – флуктуації струму колектора. Так само як і тепловий шум, дробовий має спектр, не залежний від частоти до надвисокого діапазону, і може бути віднесений до шумів з білим спектром.

Наведена вище формула для дробового шуму виведена з припущення, що носії заряду, які створюють струм, діють незалежно один від одного. Це справедливо, коли заряди долають деякий бар'єр, як наприклад, у разі струму через діодний перехід, де заряди переміщуються за рахунок дифузії, проте це не так для випадку, коли ми маємо

справу з металевими провідниками, де між носіями заряду існує тісна кореляція.

В [12] представлена залежність, яка враховує вказані вище недоліки. Таким чином

$$\overline{i^2} = 2q\Gamma^2 I\Delta f ,$$

де  $\Gamma$  – фактор заглушення дробового шуму просторового заряду.

*Контактні шуми.* Контактні шуми називаються флуктуаціями провідності внаслідок неякісного контакту між двома матеріалами. Вони проявляються кожного разу, коли два провідники з'єднуються один з одним, наприклад в перемикачах і контактах реле. Контактні шуми зустрічаються, крім того, в транзисторах і діодах через недосконалості контактів, а також в композиційних резисторах та вугільних мікрофонах, що містять в собі сплавлені між собою маленькі частинки.

Контактний шум прямо пропорційний величині постійного струму. Густина розподілу потужності вимірюється як величина, обернено пропорційна  $f$ , а розподіл амплітуд має вигляд гаусової кривої [12, 13]. Цей вид шумів можна виразити так:

$$\overline{e_{\text{конт}}^2} = \frac{K^2 I_c^2}{f} \Delta f , \quad (1.1)$$

де  $I_c^2$  – середнє значення постійного струму, який протікає через контакт;  $f$  – частота;  $K$  – постійна, яка залежить від виду матеріалу контакту і його конфігурації.

Слід відзначити, що величина контактних шумів внаслідок їх характеристики виду  $1/f$  на низьких частотах може досягати значних значень. Більшість теоретичних методів, які запропоновані для визначення контактних шумів, базуються на припущенні, що на частотах нижчих деякої відомої, амплітуда шумів є постійною. Але вимірювання контактних шумів до декількох циклів за добу, все ще показують характеристику типу  $1/f$ .

*Шуми типу  $1/f$*  своєю назвою зобов'язані характерному спектру щільності потужності, приблизно обернено пропорційному частоті. Шум, енергетичний спектр якого обернено пропорційний до частоти, також називають фліккер-шумом. Цей шум спостерігається у всіх типах електронних приладів, включаючи всі напівпровідникові прилади,

що підтверджують результати досліджень багатьох авторів, наприклад роботи [14–23]. Оскільки енергетичний спектр флікер-шуму зменшується із зростанням частоти, то найбільш інтенсивним флікер-шум є у діапазоні звукових частот, особливо в нижній його частині, і в області інфразвукових частот.

Основним джерелом флікер-шуму в сучасних транзисторах є область просторового заряду емітерного переходу [10]. Немає загальноприйнятого пояснення цього типу шуму. Найчастіше його пов'язують з поверхневими станами – локалізованими поблизу поверхні напівпровідника дозволеними рівнями енергії, які можуть захоплювати на деякий час вільні носії. Випадкова зайнятість поверхневих станів викликає флуктуації поверхневого потенціалу, внаслідок чого модулюються швидкість поверхневої рекомбінації і відповідний струм, що веде до виникнення флікер-шуму. Частотна залежність флікер-шуму пояснюється як результат плавного розподілу постійних часу захоплення (періоду, протягом якого носії локалізовані в поверхневих станах). Експерименти показують, що потужність флікер-шуму емітерного переходу пропорційна щільності поверхневих станів і росте при збільшенні прямого струму через перехід та визначається аналогічно до формули (1.1).

*Імпульсний шум*, який інколи називають шумом тріскаючого зерна, вперше був виявлений в напівпровідникових діодах, а також має місце в інтегральних схемах [24].

На відміну від інших розглядуваних шумів, імпульсні шуми обумовлені технологічними дефектами, що показують дослідження [25], і їх можна усунути, покращивши технологію виготовлення. Ці шуми зумовлюються дефектами в переході напівпровідникового виробу (зазвичай у вигляді металевих домішок). Імпульсні шуми проявляються як різкі викиди і супроводжуються дискретною зміною рівня. Тривалість шумових імпульсів коливається в межах від мікросекунд до секунд. Імпульси змінюються за неперіодичним законом, і середня швидкість повторення знаходиться в межах від декількох сотень імпульсів в секунду, до одного імпульсу за хвилину. Разом з тим, у будь-якого пристрою амплітуда імпульсних шумів фіксована, оскільки вона є функцією параметрів дефекту переходу контакту. Зазвичай, ця амплітуда значно перевищує амплітуду теплових шумів і це перевищення може знаходитись в межах від двох до ста разів.

## 1.4 Основні методи вимірювання низькочастотних шумів

Теоретичні дослідження процесів, які описують низькочастотні шуми і відмови напівпровідникових пристроїв, дозволяють зробити висновки про можливість контролю якості ВЕТ за рівнем низькочастотного шуму [26–30]. Тому експериментальні дослідження низькочастотних шумів ВЕТ представляють як теоретичний, так і практичний інтерес. Як відомо [10], головну інформацію про внутрішні шуми містить спектральна щільність потужності шумів. Дослідження спектральної щільності потужності шуму дозволяє отримати певну інформацію про характер процесів, які протікають в активних областях ВЕТ.

Для аналізу шумових властивостей ВЕТ, автори часто віддають перевагу вимірюванню коефіцієнта шуму [5]. Цей параметр є досить простою і універсальною характеристикою. Але при аналізі фізичних процесів в напівпровідникових пристроях логічніше вимірювати спектральну густину потужності шуму, яка достатньо широко характеризує випадковий процес [11]. Крім того, знання спектральної густини потужності шуму дозволяє легко вирахувати діюче значення електрорушійної сили і струмів в досліджуваному пристрої, зв'язок яких з джерелами шумів досить простий.

Також, для вимірювань електричних шумів використовуються методи порівняння, компенсаційний, модуляційний і метод безпосереднього вимірювання шумової напруги.

Вимірювання шумів першим методом зводиться до порівняння досліджуваних шумів з еталонним сигналом або шумом. При такому методі відпадає необхідність точного калібрування установки, оскільки вимірюються відносні величини.

Компенсаційний і модуляційний методи вимірювань забезпечують високу чутливість і точність вимірів. Але ці переваги реалізуються тільки на високих частотах. Тому ці методи використовуються при дослідженні теплових і дробових шумів в діапазоні середніх і високих частот. Використання цих методів для контролю надійності за рівнем НЧ шуму є недоцільним.

Метод безпосереднього вимірювання спектральної густини потужності шуму на певній частоті базується на вимірюванні ефективної напруги шуму за допомогою високочутливого вимірювача із відомою смугою пропускання. Очевидно, що межа чутливості установки, при цьому методі вимірювання, визначається внутрішніми шумами самого вимірювача.

## РОЗДІЛ 2

### ШУМОВІ МОДЕЛІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

При розробці фізико-технічних методів неруйнівного контролю за рівнем НЧ шуму необхідно встановити залежність основного інформативного параметра від фізичних властивостей і параметрів ВЕТ та фізичної природи механізмів відмов. Для операції контролю необхідно провести теоретичну оцінку допустимого рівня шуму потенційно надійного виробу, визначити оптимальний режим роботи і найбільш оптимальну смугу частот, де інформативний параметр проявляється найкраще.

Для контролю ВЕТ, як інформативний параметр пропонується використовувати рівень власних шумів в діапазоні НЧ. На даний час розроблено багато шумових моделей, але для здійснення достовірного контролю їх недостатньо. Вони не враховують шуми елементів схеми задання режиму роботи ВЕТ, зворотні та паразитні зв'язки, які мають вплив на загальний рівень шуму на вході вимірювальної схеми. Таким чином на першому етапі підвищення вірогідності контролю сучасних методів та засобів для їх реалізації, постає задача про вдосконалення існуючих математичних моделей, які б максимально точно відтворювали всі фактори, що мають вплив на інформативний параметр при вимірюваннях.

#### 2.1 Шумова модель біполярного транзистора

Інформативним параметром для проведення контролю за рівнем НЧ шуму обрано середньоквадратичне значення шумової напруги  $\overline{U_{ш}^2}$ . При побудові шумових моделей результат буде акцентовано на загальному виразі, що описує рівень цього параметра на вході схеми, як передбачає методика розрахунку [10]. Одним із найбільш поширених представників ВЕТ є транзистор. Встановлено [31], що для отримання найбільш достовірних шумових характеристик необхідно вмикати досліджуваний транзистор за схемою зі спільним емітером, як на рис. 2.1.

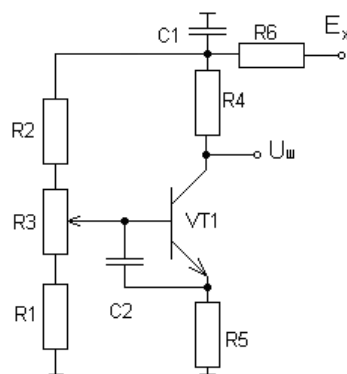


Рисунок 2.1 – Схема задання режиму роботи транзистора



Як видно із схеми, на рівень власних шумових характеристик транзистора при вимірюванні мають вплив параметри елементів схеми задання режиму роботи. Місця прояву власних шумів біполярного транзистора, згідно з його структурою [32], можна показати так, як на рис. 2.2.

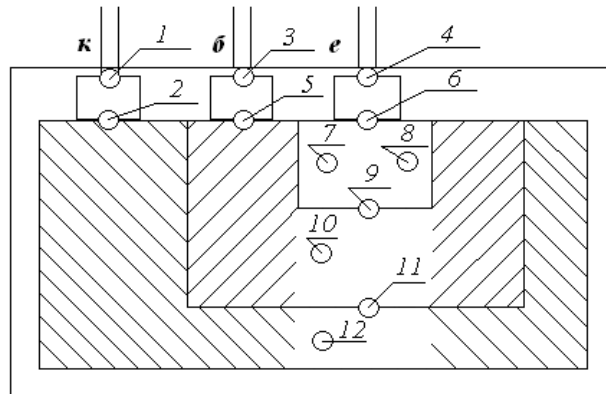


Рисунок 2.2 – Внутрішня структура і місця прояву шумів біполярного транзистора

Розглядаючи наведений вище рисунок, можна сказати, що виникнення дефектів проходить в робочій області транзистора: як у кристалах напівпровідника (12, 7 виникнення дробових шумів, 10 – теплових шумів, 8 – флікер шумів), так і в областях контактів і з'єднань (1–6, 9, 11 – контактні шуми).

Враховуючи відомі джерела шумів у біполярному транзисторі, шумову модель в діапазоні НЧ частот можна представити як на рис. 2.3.

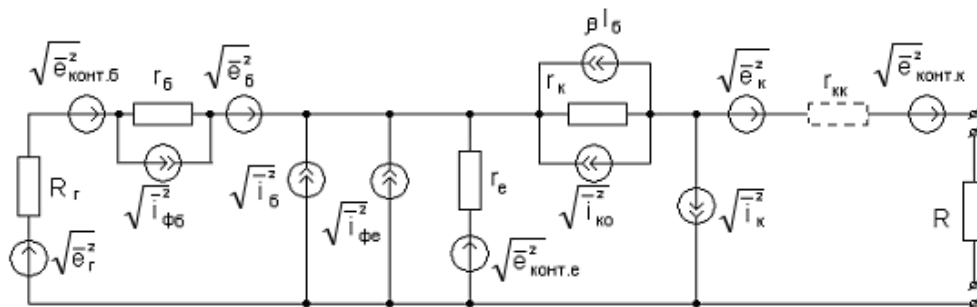


Рисунок 2.3 – Шумова модель біполярного транзистора

Джерела  $\overline{e_{\text{б}}^2}$ ,  $\overline{e_{\text{к}}^2}$  є тепловими шумами бази і колектора відповідно та мають однакову природу [10]:

$$\overline{e_{\bar{o}}^2} = 4kTr_{\bar{o}}\Delta f ;$$

$$\overline{e_{\kappa}^2} = 4kTr_{\kappa}\Delta f ,$$

де  $r_{\bar{o}}$  – диференційний опір бази транзистора;  $r_{\kappa}$  – диференційний опір колектора.

Генератори  $\overline{e_{\text{конт.}\bar{o}}^2}$ ,  $\overline{e_{\text{конт.}e}^2}$ ,  $\overline{e_{\text{конт.}\kappa}^2}$  є джерелами контактних шумів, які виникають при проходженні струму через дефектні області з'єднань внутрішніх провідників і контактів бази, емітера, колектора та записуються відповідно [10]:

$$\overline{e_{\text{конт.}\bar{o}}^2} = K_{\bar{o}} \frac{I_{\bar{o}}^n}{f^a} \Delta f ; \quad \overline{e_{\text{конт.}e}^2} = K_e \frac{I_e^n}{f^a} \Delta f ;$$

$$\overline{e_{\text{конт.}\kappa}^2} = K_{\kappa} \frac{I_{\kappa}^n}{f^a} \Delta f , \quad (2.1)$$

де  $K_{\bar{o}}$ ,  $K_e$ ,  $K_{\kappa}$  – коефіцієнти, які залежать від роду дефектів і матеріалу та характеризують внутрішню структуру напівпровідника;  $n$  – коефіцієнт, величина якого не перевищує 2 і залежить від об'ємної і поверхневої складових струму.

Джерела шумового струму  $\overline{i_{\bar{o}}^2}$ ,  $\overline{i_{\kappa}^2}$  є дробовими шумами бази і колектора:

$$\overline{i_{\bar{o}}^2} = 2qI_{\bar{o}}\Delta f ;$$

$$\overline{i_{\kappa}^2} = 2qI_{\kappa}\Delta f .$$

Шум, який виникає в області базового, емітерного та колекторного переходів, так званий 1/f-шум (флікер-шум) визначається як [10]:

$$\overline{i_{\phi}^2} = K \frac{I^n}{f} \Delta f , \quad (2.2)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від стану поверхні і характеризується сильним розкидом значень для різних пристроїв.

З урахуванням [10] вирази для еквівалентної шумової напруги і струму на виході можна записати так

$$\overline{e^2} = \overline{e_{\bar{o}}^2} + \overline{e_{\text{конт.}\bar{o}}^2} + \overline{i_{\bar{\phi}\bar{o}}^2 r_{\bar{o}}^2} + \overline{i_{\bar{o}}^2 r_{\bar{o}}^2} + \overline{i_{\bar{\phi}e}^2 r_{\bar{o}}^2} + \overline{e_{\text{конт.}e}^2} + \frac{\overline{i_{\bar{k}}^2 (r_{\bar{o}} + r_e (\beta + 1))^2}}{\beta^2} +$$

$$+ \frac{(\overline{i_{\bar{\phi}k}^2} + \overline{i_{\bar{k}0}^2})(r_{\bar{o}} + r_e)^2 (\beta + 1)^2}{\beta^2} + \frac{\overline{e_{\text{конт.}k}^2} (r_{\bar{o}} + r_e (\beta + 1) + \beta r_{\bar{o}})^2}{\beta^2 r_k^2}; \quad (2.3)$$

$$\overline{i^2} = \overline{i_{\bar{o}}^2} + \overline{i_{\bar{\phi}\bar{o}}^2} + \overline{i_{\bar{\phi}e}^2} + \frac{\overline{i_{\bar{k}}^2}}{\beta^2} + \frac{(\overline{i_{\bar{\phi}k}^2} + \overline{i_{\bar{k}0}^2})(\beta + 1)}{\beta^2} + \frac{\overline{e_{\text{конт.}k}^2} (\beta + 1)^2}{\beta^2 r_k^2}. \quad (2.4)$$

Із наведеного вище виразу видно, що вплив шумів емітера і контактів має значний прояв в області низьких частот і зі збільшенням частоти поступово зменшується.

Флікер-шум колектора на всіх частотах є меншим за флікер-шум бази та емітера і не залежить від колекторної напруги. Тому при аналізі шумових характеристик транзисторів ним нехтують.

При математичному моделюванні шумових характеристик транзисторів зазвичай враховують внутрішні параметри транзистора. Результати розрахунків мають наближені значення і не збігаються з експериментальними значеннями. Це є справедливим для ВЕТ, в яких рівень власних шумів є високим [33]. Для малошумних ВЕТ, при вимірюванні, на вході вимірювача буде присутня складова теплового шуму схеми задання режиму роботи [34].

Таким чином, враховуючи параметри схеми на рис. 2.1, загальну шумову картину досліджуваного ВЕТ можна представити, як показано на рис. 2.4.

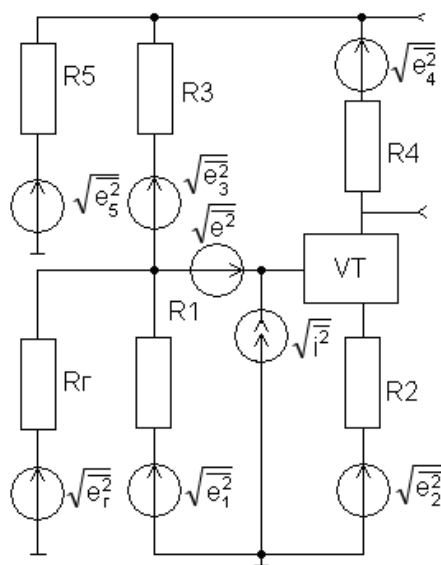


Рисунок 2.4 – Джерела шуму, обумовлені параметрами схеми

Проведемо розрахунок шумових характеристик моделі транзистора, ввімкненого за схемою спільний емітер, із використанням генератора шуму на вході, використовуючи правило додавання джерел шуму. При малих значеннях напруги та струму електричне коло можна вважати лінійним [10]. При цьому припустимо, кожне джерело шуму, яке діє у схемі, є незалежним. Джерела  $\overline{e_1}$ ,  $\overline{e_2}$ ,  $\overline{e_3}$ ,  $\overline{e_4}$ ,  $\overline{e_5}$ ,  $\overline{e_2}$  є тепловим шумом, а джерела  $\overline{e}$  і  $\overline{i}$  визначаються еквівалентними значеннями шумової моделі, які можна отримати за формулами (2.3) і (2.4) відповідно.

Загальне середньоквадратичне значення шумової напруги визначається сумою складових реакції схеми на кожен окрему складову елемента схеми. Використовуючи методику розрахунку електричних кіл [35], для шумового генератора на вході  $\overline{e_2^2}$  складову шуму можна записати:

$$\overline{U_2^2} = \overline{e_2^2} \left[ \frac{R_4 R_1}{\left( \frac{R_4 R_5 R_1}{(R_4 + R_5) \left( \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_1 \right)} + R_2 \right) \left( \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_3 \right)} \right]^2.$$

Складові шуму за рахунок базового подільника  $R_1$  та  $R_3$  на рис. 2.4 такі:

$$\overline{U_3^2} = \overline{e_3^2} \left[ \frac{R_4 R_5}{\left( \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_3 + \frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1} \right) (R_4 + R_5)} \right]^2;$$

$$\overline{U_1^2} = \overline{e_1^2} \left[ \frac{(R + R_3) R_2 R_4 R_5}{(R + R_3 + R_2) (R_4 + R_5) \left( R_4 R_2 \frac{R + R_3}{R + R_3 + R_2} + R_3 R_1 \right)} \right]^2;$$

## ЛІТЕРАТУРА

1. Горлов М. И. Технологические тренировки интегральных схем / М. И. Горлов, П. Ю. Коваленко // Микроэлектроника. – 2000. – Т. 29, № 5. – С. 395–400.
2. Способы разбраковки потенциально ненадежных полупроводниковых приборов / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, Е. П. Николаева, А. П. Жарких // Твердотельная электроника и микроэлектроника. сб. научных трудов. – Воронеж : ВГТУ. – 2003. – С. 79–89.
3. Вравчев А. С. Возможности низкочастотного шума как прогнозирующего параметра при оценке качества и надежности изделий электронной техники / А. С. Врачев // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах : науч-техн. сем. материалы докладов. – 1996. – С. 191–197.
4. Каневский И. Н. Неразрушающие методы контроля / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ. 2007. – 243 с.
5. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов / В. С. Пряников. – М. : Энергия, 1978. – 112 с.
6. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании / М. И. Горлов, Д. Ю. Смирнов, Ю. Е. Сегал, А. В. Емельянов // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 6. – С. 89–92.
7. Горлов М. И. Возможность отбраковки полупроводниковых приборов по уровню низкочастотного шума / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, Д. Ю. Смирнов // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. – С. 198–201.
8. Горлов М. И. Разделение интегральных схем по надежности с использованием  $1/f$  шума / М. И. Горлов, Д. Ю. Смирнов, Д. Л. Ануфриев // Известия вузов. Электроника. – 2006. – № 1. – С. 84–89.
9. Патент №2234104 Российской Федерации Способ определения потенциально ненадежных полупроводниковых приборов / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, А. П. Жарких, Д. Ю. Смирнов, заяв. и патен-

тообл. Воронежский государственный технический университет. – заявл. № 2003105569/28, 26.02.2003 ; опубл. 10.08.2004. Бюл. № 22.

10. Придорогин В. М. Шумовые свойства транзисторов на низких частотах / В. М. Придорогин. – М. : Энергия, 1976. – 160 с.
11. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах / М. Букингом. – М. : Мир, 1986. – 399 с.
12. Воронцов В. Н. Контроль качества и прогнозирование надежности электронной техники по электрофизическим параметрам : дис. на соиск. доктора техн. наук : 05.11.13 / Владимир Николаевич Воронцов. – СПб., 2002. – 311с.
13. Нічого В. О. Шумові властивості контактних дефектів у біполярному транзисторі / В. О. Нічого, О. П. Остап, П. Б. Дуб // Відбір і обробка інформації : міжвід. зб. наук. пр. – 2002. – Вип. 16. – С. 28–32.
14. Кешнер М. С. Шум типа  $1/f$  / М. С. Кешнер – М.: Академия Тринитаризма. – № 77-6567. – 2004. – 108 с.
15. Холкин В. Ю. Модели процесса возникновения  $1/f$ -шума в полупроводниковых структурах / В. Ю. Холкин // Прикладная физика. – 2009 – № 4 – С. 68–74.
16. Орешкин П. Т. Низкочастотные шумы диодов Шотки / П. Т. Орешкин, С. И. Кордюков, А. Л. Денисов // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т. 30. – Вып 7. – С. 1449–1450.
17. Low frequency noise analysis as a diagnostic tool to assess the quality of  $0.25\mu\text{m}$  Ti-silicided poly lines / E. P. Vandamme, I. D. Wolf, A. Lauwers, L. K. J. Vandamme // Microelectronics Reliability. – 1998. – V. 38. – № 6–8. – Pp. 925–929.
18. Vorontsoff V. N. Noise and thermoelectrodynamic diagnostics of semiconductor Instruments / V. N. Vorontsoff, V. Y. Kholkin // Suss. J. Nondestruct Test. – 1996. – Vol. 31. – No. 3. – P. 220–222.

19. Jeroen Bakker. Noise and degradation of amorphous silicon devices. Diss. Doctor of philosophy. Proefschrift Universiteit Utrecht. Met Samenvatting in het Nederlend. 2003.
20. 1/f Noise and Generation/Recombination Noise in SiGe HBTs on SOI / N. Lukyanchikova, N. Garbar, A. Smolanka, and other // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2005. – № 52 (7). – Pp. 1468–1477.
21. Low-frequency noise in epitaxially grown Schottky junction / A. C. Young, J. D. Zimmerman, E. R. Brown, A. C. Gossard // Journal of applied physics. – 2007. – № 101. – Pp. 91–97.
22. Low frequency noise in Si and Si/SiGe/Si PMOSFETs. / S. M. Thomas, J. P. Martin, J. F. Dominic, and other // Whall Journal of telecommunication and information technology. – 2007. – № 2. – Pp. 64–67.
23. Мирошникова И. Н. О природе взрывных и избыточных шумов в фотодиодах на основе антимионида индия / И. Н. Мирошникова, С. А. Соколик, И. Б. Барлашов // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах : материалы докладов науч-техн. сем. – 1995. – С. 208–216.
24. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт. – М. : Мир, 1979. – 320 с.
25. Леонтьев Г. Е. Импульсный шум в биполярных транзисторах / Г. Е. Леонтьев // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докладов науч-техн. сем. – 1998. – С. 45–49.
26. Способы разбраковки транзисторов по ампер-шумовых характеристикам / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, Е. П. Николаева, А. П. Жарких // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докладов науч.-тех. сем. – 2003. – С. 309–313.
27. Прогнозирование потенциально ненадежных полупроводниковых приборов по критериям низкочастотного спектра / М. И. Горлов,

- В. А. Емельянов, А. П. Жарких, А. Строгонов // Инженерная микроэлектроника. – 2004. – № 6. – С. 19–27.
28. Горлов М. И. Определение ненадежных полупроводниковых приборов по шумам / М. И. Горлов, А. П. Жарких, В. А. Емельянов // Петербургский журнал электроники. – 2005. – № 1. – С. 19–27.
29. Low frequency noise as a reliability diagnostic tool in compound semiconductor transistors / N. Labat, N. Malbert, C. Maneux, A. Touboul // Microelectronics and reliability. – 2004. – V. 44, № 9–11. – Pp. 1361–1368.
30. Alexander A. B. Noise and Fluctuations Control in Electronic Devices (Hardcover) / A. B. Alexander. – American Scientific Publishers, 2002. – 420 p.
31. Михалевський Д. В. Оцінка якості інтегральних транзисторів за допомогою низькочастотних шумів / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак, В. В. Стронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. – С. 177–181.
32. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники : учебное пособие для вузов. / И. П. Степаненко. 2-е изд. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2003. – 488 с.
33. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях / А. Ван дер Зил. Пер с англ. А. К. Нарышкина – М. : Мир, 1979. – 394 с.
34. Михалевський Д. В. Вплив зворотного зв'язку на шумові характеристики транзистора в низькочастотному діапазоні / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування : матеріали III Міжнародної наук.-техн. конф.: (31 травня - 2 червня 2007р). – Вінниця, 2007. – С. 73.
35. Електроніка і мікросхемо техніка : підруч. для студ. вищ. навч. зак. освіти / В. І. Сенко, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та інш. – Х. : Фоліо, 2002. – 510 с.
36. Михалевський Д. В. Дослідження шумових характеристик інтегральних транзисторів / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак // Сучасні



- проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: міжнар.: матеріали I Міжнародної наук.-техн. конф. (2–5 червня 2005р). – Вінниця, 2005. – С. 36.
37. Михалевський Д. В. Шумова модель польових транзисторів для прогнозування їх надійності за рівнем низькочастотного шуму / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак, О. В. Крупський // Наукові праці, Вінниця ВНТУ. – 2009. – № 4. – С. 1–7.
38. Жигальский Г. П. Избыточные шумы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник / Г. П. Жигальский // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44. – № 12. – С. 1413–1430.
39. Робинсон Ф. Н. Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях / Ф. Н. Х. Робинсон. – М. : Атомиздат, 1980. – 362 с.
40. Михалевський Д. В. Вдосконалення шумової математичної моделі операційного підсилювача / Д. В. Михалевський // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций : тезисы доповідей 4 міжнар. наук.-техн. конф. (21–25 квітня 2008р.) : – Севастополь, 2008. – С. 180.
41. Михалевський Д. В. Математична шумова модель інтегральних операційних підсилювачів для прогнозування надійності за рівнем низькочастотного шуму / В. М. Кичак, Д. В. Михалевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 102–108.
42. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС / Л. Фолкенберри. – М. : Мир, 1985. – 572 с.
43. Михалевський Д. В. Метод контролю якості виробів електронної техніки за НЧ шумами / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак // Сучасні наукові дослідження – 2006: матеріали 2-ї міжнар. наук.-практ. конф. (20–28 лютого 2006р.). – Дніпропетровськ, 2006. – С. 30–33.
44. Технологические методы повышения надежности ИС в процессе серийного производства / М. И. Горлов, А. В. Андреев, Л. П. Ануфриев, В. А. Емельянов // Микроэлектроника. – 2004 – Т. 33. – № 1. – С. 24–34.

45. Михалевський Д. В. Метод безпосереднього прогнозування надійності виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 196–203.
46. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219 с.
47. Винокуров В. И. Электрорадиоизмерения : учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов / В. И. Винокуров, С. И. Каплин, И. Г. Петелин ; под. ред. В. И. Винокурова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 351 с.
48. Коломбет Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е. А. Коломбет. – М. : Радио и связь, 1991. – 376 с.
49. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 150 с.
50. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1991. – 304 с.
51. Измерения и контроль в микроэлектронике : Учебное пособие по специальностям электронной техники / Н. Д. Дубовой, В. И. Осокин, А. С. Очков и др. ; под ред. А. А. Сазонова. – М. : Высш. шк., 1984. – 367 с.
52. Михалевський Д. В. Метод відносного прогнозування надійності виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 5. – С. 141–146.
53. Kester W. Programmable Gain Amplifiers / W. Kester, J. Bryant // Op Amp Applications. – Analog Devices Inc. – 2002 – 25 p. ISBN 0-916550-26-5.
54. Азаров О. Д. Математична модель компаратора з регульованою чутливістю для швидкодіючого багаторозрядного АЦП з ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік // Наукові праці Він-

- ницького національного технічного університету. – 2008. – № 1. – С.1–11. Режим доступу до журналу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-1>.
55. Хоровиц П. Искусство схемотехники : в 3-х т.: Т. 1. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Мир, 1993. – 413 с.
56. Михалевський Д. В. Метод спектрального прогнозування надійності виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 196–203.
57. Михалевський Д. В. Використання цифрової фільтрації при прогнозуванні надійності виробів електронної техніки / Д. В. Михалевський // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций : 20–25 квітня 2009р. : тези доповідей 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. – Севастополь, 2009. – С. 185.
58. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.
59. Омельченко В. О. Теорія електричного зв'язку. Ч. 1 / В. О. Омельченко, В. Г. Санніков. – К. : ІСДО, 1994. – 304 с.
60. Поджаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук. – К. : УМК ВО, 1991. – 240 с.
61. Волков И. К. Случайные процессы : учеб. для вузов / И. К. Волков, С. М. Зуев, Г. М. Цветкова, под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 448 с.
62. Третьяк Л. Н. Обработка результатов наблюдений : учебное пособие / Л. Н. Третьяк. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

*Наукове видання*

**Михалевський Дмитро Валерійович  
Кичак Василь Мартинович**

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ  
ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ  
ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ШУМУ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Д. Михалевським

Підписано до друку 9.10.2014 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,47  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014–48

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.