

УДК 623.004.67

В.А. Бородавка, Н.І. Лисун

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ШУМІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДАТЧИКАХ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Аналізуються фізичні процеси, що протікають у напівпровідних матеріалах при подачі на них електромагнітної потужності первинного інформаційного сигналу, а також вплив на ці процеси абсолютної температури напівпровідника.

Ключові слова: шум, датчик.

Вступ

Постановка задачі. Важливо відзначити, що всі види датчиків перетворення (ДП), що працюють в електромагнітному діапазоні – від довгої частини світлового діапазону до рентгенівського, і незалежно від того в "точковому" або в "плівковому" вигляді реалізований перетворюючий первинний сигнальний елемент, мають електричні шуми. Виникнення електричних шумів в напівпровідникових ДП обумовлено фізичними процесами, що протікають в напівпровідниках матеріалах при подачі на них електромагнітної потужності первинного інформаційного сигналу $\Phi(P)$, а також значно залежить і від абсолютної температури напівпровідника, що впливає на лінійність функції перетворення. Тому вилучення або придушення цих завад має актуальне значення при конструюванні і експлуатації інформаційно-вимірювальних систем.

Аналіз літератури. В відомій літературі [1 – 3] розглядаються методи побудови вимірювальних перетворювачів, але в цій літературі не визначаються питання, що пов'язані з дослідженням впливу електричних шумів у напівпровідникових датчиках перетворення.

Метою статті є дослідження виникнення електричних шумів у напівпровідникових ДП що обумовлені фізичними процесами, які протікають в напівпровідниках матеріалах при подачі на них електромагнітної потужності первинного інформаційного сигналу.

Основний матеріал

Виникнення електричних шумів в напівпровідникових ДП обумовлено фізичними процесами, що протікають в напівпровідниках матеріалах при подачі на них електромагнітної потужності первинного інформаційного сигналу $\Phi(P)$, а також значно залежить і від абсолютної температури напівпровідника. Дослідження показали, що мінімальна потужність шумів $P_{\text{ш min}}$ напівпровідникових ДП при нормальній температурі для відношення сигнал/шум, що дорівнює 1, може бути розрахована

$$P_{\text{ш min}} \sim 10^{-15}/\sqrt{f}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

де f – середня частота спектру електромагнітних коливань, що подаються на ДП, Гц, тобто в максимумі кривої чутливості детектора. Наявність шумів при перетворенні електромагнітних сигналів, природно знижує чутливість напівпровідникових ДП і вона не може бути меншою ніж тієї, що визначено в (1).

Первинний інформативний сигнал $\Phi(P)$, менший за потужністю ніж $P_{\text{ш min}}$, неможливо буде виділити на тлі шумів, хоча при цьому сам процес перетворення сигналу $\Phi(P)$ в сигнал $X(P)$ в ДП і буде відбуватися. Відзначимо ще одну важливу закономірність, яка виходить з формули (1), на низьких частотах електромагнітного випромінювання шуми ДП можуть бути на кілька порядків менше, ніж на дуже високих радіочастотах та в рентгенівському діапазоні. Останнє зумовлює можливості і області застосування ДП, принцип яких заснований на перетворенні електромагнітного первинного сигналу. Другий приклад, що стосується невизначеності калібрування, відноситься до ДП, що перетворює первинний інформативний сигнал, фізично представляє собою тиск або зусилля у вторинний сигнал X , зручний для посилення, обробки та індикації. Датчики-перетворювачі, у яких первинний сигнал Φ уявляє собою тиск (зусилля), за своїми принципами перетворення вельми різноманітні. Це можуть бути, наприклад механічні ДП і ДП, що працюють на прямому п'єзоэффекті; типові криві невизначеності калібрування показані на рис. 1 і відносяться до подібних ДП. Як видно з графіків рис. 1, на початку робочого діапазону невизначеність калібрування дуже висока, і пояснюється це пониженою чутливістю до початкової деформації металевого елемента-перетворювача зі зниженою чутливістю за електричною напругою (поверхневому заряду) п'єзодатчика при дуже малих тисках на його поверхню. У середній частині робочого діапазону невизначеність калібрування ДП тиску залежить тільки від точності технічних засобів, що застосовуються для калібрування і якості зразкових ДП.

У верхній частині робочого діапазону при великих тисках, істотно, невизначеність калібрування розглянутих ДП повинна різко зростати, оскільки пружні властивості металевих елементів перетворювачів виходять з області лінійної деформації (тобто

вже не підкоряються закону Гука), а внутрішній об'єм п'єзокварцевого ДП значно збіднений рухомими зарядами, і навіть підвищений тиск практично не здатний збільшити заряд на його поверхні.

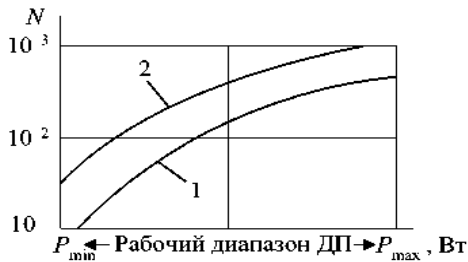


Рис. 1. Типові графіки невизначеності калібрування N ДП тиску в межах їх робочого діапазону: 1 – калібрування звичайними технічними засобами; 2 – прецизійна калібрування високоточними технічними засобами за високоточним зразковим ДП

Як правило, включаючи розглянуті типи ДП тиску, і всі можливі інші види і типи ДП по своєму схемоконструктивному рішенню, за фізичними властивостями перетворюючого елемента і за способом включення в систему вимірювання реалізуються так, щоб вилучити їх роботу при перевантаженнях вхідного сигналу Φ . Тому і типові графіки невизначеності рис. 1 побудовані з урахуванням цього правила.

Наведені приклади по невизначеності калібрування ще раз підтверджують постулат щодо побудови та застосування ДП будь-якого виду і типу (як пасивних, так і активних) – прагнення вилучити або максимально зменшити з процесу перетворення первинного сигналу у вторинний вплив причин, що призводять до лінійних і нелінійних спотворень. З плином певного проміжку часу експлуатації будь-які засоби вимірювання (включаючи і ті, що входять до ДП) втрачають свої метрологічні характеристики, які досягнуті в результаті початкових калібрувань.

Справа в тому, що матеріали, з яких вони виготовлені, з часом старіють, а також через зношування та впливу дестабілізуючих факторів експлуатації, вони розрегулюються, і тому засоби вимірювання втрачають свої первинні характеристики, тобто вже не можуть забезпечити необхідний рівень інформативності.

Як нам вже відомо, під інформативністю контролю і вимірювання розуміємо одержання інформації про об'єкт контролю або про об'єкт отримання інформації даних про них з допустимою похибкою і з заданою надійністю в період експлуатації. Сказане повною мірою відноситься і до ДП, як до пристроїв прийому, вимірювання і перетворення первинного інформативного сигналу $\Phi(P)$.

Розглянемо два принципово різних способи забезпечення заданої інформативності (працездатності ДП під час їх експлуатації) і технічних засобів контролю і вимірювання будь-якої складності.

Перший спосіб полягає в прагненні спроектувати і виготовити високоточні і стабільні за своїми

метрологічними характеристиками ДП і засоби вимірювання на весь період їх експлуатації. Тоді первісне калібрування гарантує експлуатаційні норми за метрологічними характеристиками на весь період їх експлуатації. Як видно, перший спосіб забезпечує повну взаємозамінність ДП, так як метрологічні характеристики будь-якого ДП з партії даного виду будуть в межах допустимих норм повторювати необхідні метрологічні характеристики і зберігати їх протягом усього часу їх експлуатації.

Однак не всі види ДП і технічні засоби вимірювання можуть бути реалізовані за першим способом і обмеження все ті ж: граничні можливості технології і кінцева фізична однорідність вихідних матеріалів у поєднанні з високими вимогами до їх експлуатаційних характеристик. До того ж виготовлення високоточних і високостабільних ДП завжди вимагає додаткових витрат на їх виробництво та пов'язане з обов'язковим застосуванням якісних матеріалів. Це положення ілюструє рис. 2, на якому показано як росте відносна вартість $C_{\text{від}}$ мініатюрних ДП в залежності від точності виготовлення їх конструкцій $T_{\text{від}}$. Хоча перший спосіб технічно складний і економічно не вигідний, в деяких спеціальних випадках все ж таки доводиться виготовляти ДП і технічні засоби вимірювань по обговореному першому способу, коли потрібно на весь період експлуатації мати високоточні і стабільні характеристики – типовий приклад – ДП і вимірювальні прилади для аерокосмічного приладобудування

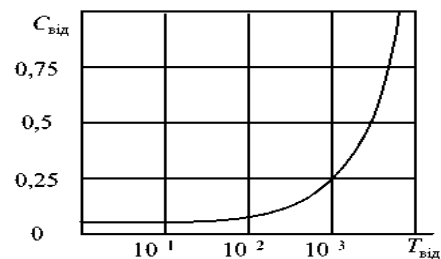


Рис. 2. Збільшення відносної вартістю сотні виготовлення мініатюрних ДП залежно від відносної точності $T_{\text{від}}$ виготовлення конструктивного параметра, що представляє його функціональне призначення

Другий спосіб реалізації ДП і технічних засобів вимірювання передбачає їх проектування і виготовлення зі зниженими значеннями метрологічних характеристик і зі зниженою стабільністю останніх. При цьому знижується складність і вартість їх виготовлення, але з'являється обов'язкова необхідність проведення в період експлуатації контрольно-відновлювальних операцій і періодично проводити калібрування, які прийнято називати атестаціями. Реалізація за другим способом ДП, та й будь-якої контрольно-вимірювальної апаратури, але з періодичними контрольно-відновлюваними операціями, дозволяє при відносно невисокій вартості виробництва гарантувати досить високі експлуатаційні характеристики. Зрозуміло, що

застосування контрольно-відновлюваних операцій для ДП можливо тільки в тому випадку, якщо це допускає їх конструктивне рішення, що забезпечує доступ і регулювання їх чутливого елемента та інших допоміжних вузлів, тобто якщо ДП ремонтно-придатний. Результати узагальнених порівняльних досліджень першого і другого способів серійного виробництва ДП і засобів вимірювання в графічному вигляді представлені на рис. 3.

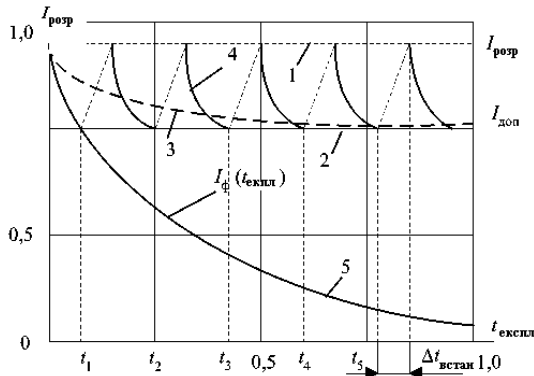


Рис. 3. Графічна інтерпретація інформативності ДП і технічних засобів вимірювання, виготовлених першим і другим способами

В якості основного змінного параметра в цьому дослідженні прийнята інформативність I , а контрольно-відновлювальні операції в період експлуатації, що спрямовані на підтримку її на рівні не нижче допустимого; на графіках рис. 3 пряма 1 і 2, відповідно, розрахункове і допустиме зниження інформативності I_p і $I_{доп}$ при заданому часу експлуатації $t_{експл}$. Крива 3 показує зміну інформативності при виготовленні ДП по першому способі. ДП під час експлуатації $I_{експл}$ має значення інформативності не нижче $I_{доп}$. Крива 4 ілюструє зміну інформативності ДП, що виготовлений за другим способом – більш дешевого; як видно, при досягненні часу експлуатації t_1 ДП має рівень інформативності нижче допустимого $I_{доп}$. Ламана крива 4 – це зміна інформативності ДП і засобів вимірювання, що допустимі в результаті проведення ремонтно-відновлювальних операцій та періодичних атестацій в період його експлуатації, а крива 5 падіння інформативності ДП, що виготовлені за другим способом, а також без ремонтно-відновлювальних операцій.

Пунктирні частини кривої 4 ілюструють відновлення інформативності ДП і засобів вимірювання до розрахункового рівня, але на цю операцію затрачається час $\Delta t_{від}$ і таких операцій за весь час експлуатації ДП може бути декілька, наприклад n , (на рис. 3 це тимчасові точки t_2, t_3, t_4, t_5 і т. д., з яких повинні починатися ремонтно-відновлювальні операції).

Зрозуміло, що $\Delta t_{від} n$ – час, який виключається з повного часу експлуатації ДП і засобу вимірювання, тобто призводить до деяких економічних витрат $C_{п}$, $\Delta t_{від} n$ і, крім того, періодичні ремонтно-відновлювальні операції та калібрування (атестації) вимага-

ють в свою чергу додаткових витрат $C_{доп} n$ на придбання відповідних технічних засобів і оплату праці.

Результати порівняльних досліджень в узагальненому вигляді, що представлені на рис. 3, дозволяють зробити два важливих висновки.

По-перше, необхідна інформативність ДП і технічних засобів вимірювання може бути досягнута двома способами: високоточним з – виготовленням зі стабільними характеристиками, коли їх інформативність повільно зменшується за весь час експлуатації $t_{експл}$ від I_p до $I_{доп}$ (крива 3 на рис. 3), у результаті відносно дешевого виробництва, але з обов'язковими ремонтно-відновлювальними операціями і періодичними атестаціями, за рахунок яких рівень інформативності підтримується не нижче допустимого $I_{доп}$ (ламана крива 4 на рис. 3).

По-друге, є можливість порівняння за критерієм повної вартості виготовлення й експлуатації ДП і технічних засобів вимірювання, що реалізуються по першому і другому способам. Подібне економічне порівняльне дослідження розробниками і технологами завжди проводиться, і суть його зводиться до наступного. Нехай $C_{\Sigma I}$ – сумарна вартість виготовлення ДП і технічних засобів вимірювання першим способом, включаючи і вартість їх первинного ступінчастого і наскрізного калібрування – в цьому випадку експлуатаційні витрати відсутні. У той час як повна вартість виготовлення і експлуатації ДП і технічних засобів вимірювання, що виготовляються за другим способом буде складатися з суми наступних приватних витрат:

$$C = C_{виг} + C_{доп} n + C_{п} (\Delta t_{від} n) + C_{ск}, \quad (2)$$

де $C_{виг}$ – вартість виготовлення і первинних калібрувань; $C_{ск}$ – додаткові витрати, викликані тим, що ремонтно-відновлюваним операціям і калібруванню в процесі експлуатації піддається вся контрольно-вимірювальна апаратура разом з ДП; інші складові формулі (2) зрозумілі з наведених вище міркувань.

Рішення рівняння (3) формалізує завдання пошуку мінімально можливих витрат на виготовлення та експлуатацію ДП і засобів вимірювань – $C_{\Sigma II opt}$ [min, max].

$$\frac{\partial [C_{\Sigma II} (\dots)]}{\partial (I_{доп})} = 0. \quad (3)$$

Порівняння за абсолютними значеннями $C_{\Sigma I}$ з $C_{\Sigma II opt}$ [min, max] дозволяє за економічним критерієм встановити який із способів виготовлення та експлуатації ДП і засобів вимірювань більш вигідний.

Зауважимо, що особливо в аерокосмічному приладобудуванні і для забезпечення контролю в спеціальних технологічних процесах, і для фізичних досліджень доводиться будувати і застосовувати ДП і технічні засоби вимірювання підвищеної точності і стабільності у відповідності з їх функціональним призначенням, і тоді економічний критерій їх реалізації втрачає сенс.

Висновки

1. Загальним для ДП є залежність їх характеристик від зовнішніх дестабілізуючих факторів, і, в першу чергу, залежність характеристик від температури.

2. Для отримання максимальної інформації інформативний параметр Р повинен бути максимально можливим.

3. За результатом перетворення величини Φ у величину Х ДП (тобто при його функціонуванні) втрати інформативного параметра Р повинні бути мінімальні.

Список літератури

1. Воробьев Е.А. Управление качеством изготовления изделий радиоприборостроения: текст лекций; ЛИАП / Е.А. Воробьев. – Л., 1991.

2. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки: навч. посіб. / В.М. Чинков. –МО; 2001. – 424 с.

3. Полищук С.С. Вимірювальні перетворювачі: підручн. / С.С. Полищук. – К.: Вища школа, 2003. – 352 с.

Надійшла до редколегії 26.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ШУМОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В.А. Бородавка, Н.И. Лисун

Анализируются физические процессы, что протекают в полупроводниковых материалах при подаче на них электромагнитной мощности первичного информационного сигнала, а также влияния на эти процессы абсолютной температуры полупроводника.

Ключевые слова: шум, датчик.

RESEARCHES ORIGIN OF ELECTRIC NOISES IN SEMICONDUCTOR SENSORS OF TRANSFORMATION

V.A. Borodavka, N.I. Lysun

Analyze the physical processes that occur in the semiconductor materials feeding them Parvin electromagnetic bearing-down of the information signal, as well as the influence on these processes is the absolute temperature of the semiconductor.

Keywords: noise, sensor.