

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи
з дисципліни

**«Метрологічна надійність засобів інформаційно-вимірювальної
техніки»**

для студентів спеціальності
152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(освітня програма: «Якість, стандартизація та сертифікація»)
денної й заочної форм навчання

2023

Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни «Метрологічна надійність засобів інформаційно-вимірювальної техніки» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» (освітня програма: «Якість, стандартизація та сертифікація») денної й заочної форм навчання/Укл.: О.В.Томашевський, Г.В. Сніжної – Запоріжжя: НУ«ЗП», 2023.– 25 с.

Укладачі: Томашевський О.В., доц., канд. техн. наук;
Сніжної Г.В., проф., доктор техн. наук

Рецензент: Погосов В.В., проф., доктор фіз.-матем. наук

Відповід. за випуск: Коротун А.В., доц., канд. фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
мікро- та наноелектроніки

Протокол № 5
від «17» лютого 2023 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол № 5
від «23» лютого 2023 р.

ЗМІСТ

МЕТА ТА ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	4
1 ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	5
2 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ІМС НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ	8
2.1 Поняття механізму відмовлень	8
2.2 Механізми відмовлень металізації в результаті електроміграції.....	9
2.3 Механізми корозії й окислювання металізації	10
2.4 Механізми відмовлень контактів.....	10
3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	11
3.1 Розрахунок інтенсивності відмов ІМС.....	11
3.2 Розрахунок інтенсивності відмов конструктивних елементів	11
3.3 Розрахунок інтенсивності відмов міжелементних з'єднань	12
3.4 Розрахунок інтенсивності відмов елементів кристала	12
3.5 Розрахунок середнього та гамма – відсоткового часу наробки до відмови при постійній інтенсивності відмов	14
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	16
ДОДАТОК А. ДОВІДКОВІ ДАНІ	17
ДОДАТОК Б. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ІМС.....	21

МЕТА ТА ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Ціль курсової роботи - одержати поняття про функціональну й структурну організацію комп'ютерних систем інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), вивчити методи оцінки надійності таких систем, освоїти методику розрахунку надійності елементної бази, як вирішальної складової при оцінці надійності системи.

Розрахунок ґрунтується на загальній моделі надійності для нерезервованих систем і моделях прискорення механізмів відмови елементної бази.

Кожний студент одержує індивідуальне завдання з вихідними даними. У вихідних даних вказуються:

- конструктивні й технологічні особливості елементної бази інтегральних схем, що входять у системні блоки й роблять вплив на їх показники надійності;

- коефіцієнти навантаження, що характеризують вплив прискорювальних факторів.

Курсова робота повинна містити:

- короткий опис функціональної й структурної організації ІВС;
- огляд методів оцінки надійності ІВС;
- опис основних механізмів відмов елементної бази;
- методику виконання розрахунків, отримані результати розрахунків і їхній аналіз;
- список використаної літератури.

Курсова робота повинна бути оформлена відповідно до СТП "Курсові й дипломні проекти (роботи)". Обсяг пояснювальної записки не менше 30 сторінок.

1 ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Розглянемо завдання оцінки надійності інформаційно-вимірювальної системи (ІВС). Оцінка надійності ІВС є складною багатоплановою проблемою, у якій можна виділити два напрямки:

- оцінка надійності роботи апаратної частини (технічних засобів);
- оцінка надійності функціонування програмного забезпечення.

Обмежимося розглядом надійності ІВС тільки залежно від надійності роботи апаратної частини (технічних засобів). У цьому випадку узагальнюючим показником надійності системи може бути імовірність відсутності відмов і збоїв технічних засобів.

Апаратну частину системи можна розглядати як ієрархічну структуру, на верхньому рівні якої перебуває властиво апаратна частина, розглянута як єдине ціле, на наступному рівні модулі (блоки) з певними функціями; потім плати, і на останнім ієрархічному рівні - активні й пасивні елементи плат. Оцінка надійності на кожному ієрархічному рівні має свої особливості.

Відмови на апаратному рівні найбільше часто обумовлені відмовами елементної бази й з'єднань, а збої зв'язують зі зміною рівнів сигналів у цифрових кодах, які несуть інформацію. При цьому спостерігаються зміни в розрядах 1 на 0 або 0 на 1, або те й інше разом, але в різних розрядах, наслідком чого є зміна значення коду на інше. Причинами апаратних збоїв можуть бути тимчасова приховані дефекти зборки або деградація електронних компонентів, також вплив різного виду випромінювань, різкий стрибок напруги в електромережі, несприятливі кліматичні умови, некваліфіковані дії обслуговуючого персоналу й т.п.

Надійність апаратної частини ІВС можна визначати на основі методів, які використовуються для розрахунку надійності будь-якої технічної системи.

Для характеристики властивості надійності технічної системи вкрай важко (практично неможливо) не тільки визначити детерміновану залежність між зухвала відмова факторами й часом його виникнення, але й конкретизувати сама безліч таких факторів. Це дає

підставу думати, що події відмов і відновлень у загальному випадку носять випадковий характер, і пояснює правомірність застосування апарата теорії ймовірності й математичної статистики для формулювання відповідної математичної моделі. Основою такої моделі в теорії надійності є функція надійності $P(t)$, що по визначенню дорівнює ймовірності того, що в заданому інтервалі часу або в межах заданого наробітку при заданих режимах і умовах експлуатації відмов у системі не виникає.

У теорії надійності вираження для $P(t)$ здобуває остаточної вид:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.1)$$

Залежність (1.1) прийнято називати основним законом надійності. Інтенсивність відмови $\lambda(t)$ часто використовується як розрахунковий показник, особливо для систем, що складаються з багатьох елементів, оскільки має властивість адитивності, проілюструвати яке можна наступним прикладом.

Нехай система складається із двох елементів, інтенсивності відмов яких рівні відповідно $\lambda_1(t)$ і $\lambda_2(t)$. При цьому передбачається, що відмови елементів є незалежними подіями, а відмові системи в цілому наступає при відмові хоча б одного з них.

У загальному випадку, якщо система складається з n елементів, для яких виконується умова незалежності відмов, і для системи в цілому відмова визначається в тому випадку, коли відмовить хоча б один елементів, має місце співвідношення:

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (1.2)$$

де $\lambda_i(t)$ - інтенсивності відмов i -го елемента системи

Якщо система містить N_i елементів i -го типу, а n_i означає кількість різновидів елементів системи, то

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^{n_i} N_i \lambda_i(t) \quad (1.3)$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи визначиться як

$$P_c(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_c(t) dt \right] \quad (1.4)$$

ІВС можуть бути є резервованими або нерезервованими системами. Відмова апаратної частини комп'ютерної системи викликається відмовою якого-небудь модуля, у свою чергу відмова модуля - відмовою плати, і т.д. Модуль, що відмовив, або плату можна відремонтувати (відновити), замінивши несправні елементи, що необхідно враховувати при оцінці їхньої надійності. Елементи плат (інтегральні схеми, конденсатори й ін.) ставляться до не відновлюємо виробам. Виходячи з особливостей структури апаратної частини комп'ютерних систем, для оцінки її надійності потрібне залучення математичного апарата теорії надійності, що дозволяє оцінити надійність невідновлюваних і відновлюваних об'єктів і об'єктів з резервуванням.

Будемо розглядати випадок нерезервованої системи. Нерезервована система - це система, що складається з n елементів, відмова кожного з яких спричиняє відмова системи. У тому випадку, якщо прийняти допущення про статистичну незалежність відмов системи, то інтенсивність відмов системи:

Отриманий вираз представляє загальну модель надійності нерезервованій комп'ютерної системи.

При проведенні розрахунку надійності ІВС приймемо, що визначальним джерелом відмов є відмови інтегральних мікросхем (ІМС) і технологія їхнього виготовлення однакова.

2 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ІМС НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Поняття механізму відмовлень

У практиці надійності використовуються два традиційних шляхи для підняття надійності ІМС. Один з них спрямований на вимір фактичної надійності приладів з метою одержання достовірних даних, необхідних для розрахунку надійних характеристик апаратури. В даний час у силу винятково високого динамізму в області напівпровідникової електроніки усе більша перевага віддається другому шляху, зв'язаному з удосконалюванням приладів, підвищенням їхньої надійності. Знання, чому той чи інший прилад надійний чи ненадійний, своєчасна розробка і вживання необхідних заходів по збільшенню його надійності куди важливіше, ніж знання дійсного рівня його надійних характеристик. Ця обставина викликала до життя такі напрямки в надійності, як фізична надійність, фізика механізмів відмовлень, що спрямовані на вивчення механізмів відмовлень. В умовах росту складності інтегральних мікросхем вивчення фізичних процесів механізмів відмовлень має, принаймні, дві мети. Перша з них за допомогою аналізу приладів, що відмовили, пізнавати зухвалі їх причини, поліпшувати на цій основі технологію виготовлення приладів і здійснювати заходу щодо удосконалюванню правильності їхнього застосування. Друга мета - через розкриття і пізнання фізичних явищ, що приводять до відмовлень, удосконалювати існуючі і створювати нові моделі надійності приладів, використовувані для контролю надійності розроблювальних приладів і для прогнозування надійності приладів, що знаходяться в серійному виробництві.

З погляду надійності недостатньо чи знати установити, з яким видом відмовлення ми маємо справу. Куди істотніше пізнати причини, приведших до відмовлення. Це головна мета аналізу відмовлень.

У напівпровідникових приладах і інтегральних мікросхемах з ідеальною структурою фізико-хімічні процеси при нормальній експлуатації повинні протікати з дуже малими швидкостями, унаслідок того, що активні області знаходяться в нейтральному середовищі, ізольовані герметичним корпусом від зовнішніх агресивних впливів, а режими застосування забезпечують незначний перегрів структури.

Викладені вище обставини у свій час послужили основою для припущення винятково високої довговічності напівпровідникових приладів, обчислювальної сотнями років. Висловлене припущення деякою мірою знаходить своє підтвердження в тім, що усталосні явища і зносові відмовлення в напівпровідникових приладах до тепер не спостерігалися. Однак наявність у структурі приладів різних дефектів і недосконалостей, що істотно прискорює фізико-хімічні процеси в них при впливі електромагнітних і теплових полів і механічних навантажень, дають підставу, як це було показано вище, розглядати реальні інтегральні мікросхеми як термодинамічні хитливі системи, що містять дефекти і недосконалості.

Розглянемо деякі механізми відмовлень, характерні для найбільш розповсюджених інтегральних мікросхем.

2.2 Механізми відмовлень металізації в результаті електроміграції

Внутрішні міжелементні з'єднання активних структур інтегральних мікросхем виконуються шляхом нанесення алюмінієвої плівки товщиною близько 1 мкм на поверхню кристала з наступної фотолітографією відповідно до топології розведення. З ростом складності напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем зростає як довжина розведення, так і площа поверхні кристала, займана нею. У процесі експлуатації інтегральних мікросхем металеве розведення піддається токовим і тепловим навантаженням. Усе це створює сприятливі умови для протікання різних процесів деградації металевого розведення, що приводять до зміни її первісних властивостей, і в ряді випадків до раптових відмовлень.

Явище електродифузії чи електроміграції полягає в тім, що в металевих провідниках у визначених умовах при проходженні постійного струму великої щільності (близько $10^6 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$) спостерігається перенос матеріалу провідника з району негативного контакту до позитивного.

Однак незважаючи на те, що дослідженню процесів електроміграції, присвячена велика кількість робіт, дотепер прийнятої теоретичної моделі процесу створити поки не удалося.

Середній наробіток до відмовлення через обрив металізації, викликаної електродифузією, визначають з наступного вираження :

$$t = K \cdot J^{-n} \exp(A_a/kT) \quad (2.1)$$

де K - константа, що залежить від матеріалу плівки, її структури і геометрії; J - щільність струму, $A \cdot cm^{-2}$; n - показник ступеня, рівний 1, коли відмовлення переважно визначаються структурою плівки. У випадку, коли у формуванні відмовлення домінує значення набуває градієнт температури $n=3$; E_a - енергія активації процесу електродифузії, рівна 0,5...0,7 еВ. При підвищених щільностях струму верхнє значення для енергії активації є переважним.

2.3 Механізми корозії й окислювання металізації

Проникнення води в герметизований корпус, адсорбція її на поверхні металізації, через пори і тріщини в захисні покриттях, а також наявність іонних забруднень на поверхні кристала сприяють виникненню корозії металізації, що носить, як правило, електрохімічний характер. Найбільш небезпечними для алюмінію є іони натрію, калію і хлору. Швидкість корозії істотно залежить від напруги, подаваного на схему. Різниця потенціалів 5В і більш достатня для того, щоб виникла інтенсивна корозія. Відбувається розрив відшаровування металізації.

2.4 Механізми відмовлень контактів

В конструкції інтегральних мікросхем широко застосовується алюмінієве розведення для створення межелементних з'єднань на кристалі і золотий і алюмінієвий дріт для створення внутрішніх з'єднань між контактними площадками на кристалі і корпусі приладу.

Приєднання внутрішніх виводів із золотого дроту до контактних площадок на кристалі здійснюється термокомпресійним зварюванням при температурі підкладки порядку 300°C. У процесі термокомпресії відбувається взаємна дифузія металів, що зварюються, у результаті чого і створюється міцне з'єднання в місці контакту. Однак одночасно з дифузією в місці контакту алюміній і золото вступають у хімічну реакцію з утворенням інтерметалічних з'єднань інтерметалідів.

Процеси утворення прошарків інтерметалідів, порожнеч і тріщин по периметрі контакту знижують його міцність, підвищують контактний опір, що в кінцевому рахунку приводить до поступового чи раптового відмовлення контакту, тобто до його обриву.

3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок інтенсивності відмов ІМС

Розрахунок інтенсивності відмов ІС передбачає використання інформації про надійність аналогічних елементів серійно виготовлених ІС, враховуючи залежність показників надійності від дії прискорюючих факторів (температура, електричний режим) і технології виготовлення.

При розрахунку припускається, що відмова будь-якого елемента призводить до відмови ІС, і для розрахунку інтенсивності відмов ІС (λ_{IC}) використовується загальна модель виду:

$$\lambda_{IC} = K_{\Pi} (\lambda_{KE} + \lambda_{ЕК} + \lambda_{МЗ}), \quad (3.1)$$

де K_{Π} - коефіцієнт вида при цьому, що характеризує систему відбраковочних випробувань, або коефіцієнт жорсткості випробувань;

λ_{KE} - інтенсивність відмов конструктивних елементів;

$\lambda_{ЕК}$ - інтенсивність відмов елементів кристала;

$\lambda_{МЗ}$ - інтенсивність відмов міжелементних з'єднань.

Розрахуємо окремо інтенсивність відмов конструктивних елементів, елементів кристала та міжелементних з'єднань.

3.2 Розрахунок інтенсивності відмов конструктивних елементів

Інтенсивність відмов конструктивних елементів λ_{KE} визначається:

- λ_K - інтенсивністю відмов корпусу;
- λ_{KK} - інтенсивністю відмов з'єднання кристала з основою корпусу;
- $\lambda_{TKЗ}$ - інтенсивністю відмов термокомпресорного з'єднання.

Однак інтенсивність відмов λ_{KE} залежить не тільки від λ_K , λ_{KK} , $\lambda_{TKЗ}$, але й від площі кристала та від кількості термокомпресорних з'єднань. Розрахунок λ_{KE} проводиться за формулою:

$$\lambda_{KE} = \lambda_K + \alpha_{кр} \lambda_{KK} + p \lambda_{TKЗ}, \quad (3.2)$$

де $\alpha_{кр}$ - коефіцієнт впливу площі кристала;

p - кількість термокомпресорних з'єднань.

3.3 Розрахунок інтенсивності відмов міжелементних з'єднань

В ІС у загальному випадку можливо відокремити ділянки металізації, що знаходяться під різним електричним та температурним навантаженням. Позначимо кількість таких різнонавантажених ділянок - L та їх площі S_i , де $i=1, L$.

Розрахунок інтенсивності відмов міжелементних з'єднань виконується за формулою:

$$\lambda_{ME} = \lambda_M \sum_{i=1}^L \gamma_i S_i, \quad (3.3)$$

де λ_M - інтенсивність відмов металізації одиничної площі, що залежить від ширини металізованої доріжки.

3.4 Розрахунок інтенсивності відмов елементів кристала

На інтенсивність відмов елементів кристала $\lambda_{ЕК}$ впливають наступні фактори:

- інтенсивність відмов активних елементів λ_a та кількість активних елементів N_a ;
- інтенсивність відмов інших (пасивних) елементів в кристалі λ_n та їх кількість N_n ;
- теплові та електричні режими, що враховуються за допомогою коефіцієнта режиму α ;
- якість підзатворного діелектрика при використанні МДН-транзисторів як активного елемента, що враховується коефіцієнтом β - коефіцієнт впливу товщини оксиду.

З урахуванням зазначених факторів, розрахунок інтенсивності відмов елементів кристала відбувається за формулою:

$$\lambda_{ЕК} = \alpha \beta (N_a \lambda_a + N_n \lambda_n). \quad (3.4)$$

Інтенсивність відмов визначається ступенем інтеграції ІС, активним елементом, що використовується, та особливостями технології виготовлення. Згідно початковим даним (ступінь інтеграції 4, активний елемент- МДП-структура) $\lambda_a = 0,3 \cdot 10^{-10} 1/\text{год}$.

Коефіцієнт режиму α розраховується за формулою:

$$\alpha = 0,1 \cdot K_y \quad (3.5)$$

де K_y – загальний коефіцієнт прискорення.

Розрахунок K_y проводиться за формулою (3.6) з урахуванням зазначених механізмів відмов і коефіцієнтів, що характеризують прискорюючі фактори.

$$K_y = \sum_{i=1}^L q_i \cdot K_i \quad (3.6)$$

де q_i - доля ймовірності відмови ІМС в загальному потоці відмов внаслідок розвитку i -го механізму відмови при нормальних умовах і режимі праці;

K_i - коефіцієнт прискорення i -го механізму відмови.

Якщо i -ий механізм відмови інтенсифікується кількома прискорюючими факторами, то коефіцієнт K_i являє собою добуток коефіцієнтів прискорення всіх діючих факторів.

Прискорюючими факторами для заданих механізмів відмов являються підвищення температура і підвищені електричні режими.

Для характеристики підвищених температурних і електричних режимів використовуються коефіцієнти, які характеризують навантаження за температурою, струмом і напругою:

$$K_{\text{нт}} = (1/T_0 - 1/T_{\text{п}}); \quad (3.7)$$

$$K_{\text{нж}} = j_{\text{п}}/j_0; \quad (3.8)$$

$$Q = j_0/j_{\text{мах}}; \quad (3.9)$$

$$K_{\text{ни}} = U_{\text{п}}/0,7U_{\text{проб}}; \quad (3.10)$$

$$\Delta U_{\text{н}} = U_{\text{п}} - U_0, \quad (3.11)$$

де $T_{\text{п}}$, $j_{\text{п}}$, $U_{\text{п}}$ - підвищені значення температури, щільності струму та напруги;

T_0 , j_0 , U_0 - температура, щільність струму та напруга при нормальному режимі;

$j_{\text{мах}}$ - максимально припустима щільність струму;

$U_{\text{проб}}$ - пробивна напруга діелектричного шару.

Для визначення коефіцієнта прискорення, виходячи зі значень прискорюючих факторів при різноманітних i -тих механізмах відмови, існує ряд моделей. В якості моделей коефіцієнта прискорення від температури ($K_{\text{т}}$) використовується рівняння Ареніуса:

$$K_{\text{т}} = \exp[E_a/k(1/T_0 - 1/T_{\text{п}})] = \exp(K_{\text{нт}} \cdot E_a/k), \quad (3.12)$$

де E_a – енергія активації механізмів відмови, еВ;

k – постійна Больцмана, що дорівнює $8,6 \cdot 10^{-5}$ еВ/К.

В якості моделі коефіцієнта прискорення при інтенсифікації механізмів відмови підвищеним струмом пропонується ступенева залежність

$$K_{Ii} = K_{nI}^n \quad (3.13)$$

де n – константа моделі, яка розрізняється в залежності від механізму відмови.

В якості моделі коефіцієнта прискорення при інтенсифікації механізму відмови підвищеною напругою пропонується експоненційна залежність:

$$K_{Ui} = \exp(\alpha \cdot \Delta U_n), \quad (3.14)$$

де α – константа моделі.

Далі розрахуємо загальний коефіцієнт прискорення з урахуванням заданих механізмів відмов:

3.5 Розрахунок середнього та гамма – відсоткового часу наробки до відмови при постійній інтенсивності відмов

Середній час наробки до відмови $\bar{t}$ являє собою математичне очікування часу наробки до відмови

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (3.15)$$

і може бути виражений через ймовірність безвідмовної роботи як

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (3.16)$$

При постійній інтенсивності відмов $P(t)$ середній час наробки до відмови підпорядковується експоненційному розподілу, і тоді

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda_{IC}}. \quad (3.17)$$

Підставляючи чисельне значення λ_{IC} , отримане за формулою (3.1), отримаємо

$$t = 1/\lambda_{IC} = 4,009 \cdot 10^8 \text{ год}$$

Гамма-відсотковий час наробки до відмови t_γ визначається як час, протягом якого відмова не виникає з імовірністю γ .

Для експоненційного розподілу вираз для t_γ отримується

$$P(t_\gamma) = \exp(-\lambda_{IC} t_\gamma);$$

$$t_\gamma = -\frac{1}{\lambda_{IC}} \ln P(t_\gamma) = -\frac{1}{\lambda_{IC}} \ln \gamma. \quad (3.18)$$

Таким чином, при заданому значенні γ і відомій постійної інтенсивності відмов можна визначити середній час наробітку до відмови $\bar{t}$ й гамма-процентний час наробітку до відмови t_γ .

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. **Фізичні основи надійності інтегральних схем** / За редакцією Ю.Г.Міллера. [Текст] М.: Радянське радіо, 1976. - 320с.
2. **Томашевський О.В.** Комп'ютерні технології статистичної обробки даних / Навчальний посібник. [Текст] / О.В.Томашевський, В.П.Рисіков – Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет, 2015. – 175 с.
3. **Метрологічне забезпечення контролю якості продукції:** монографія / [Ігнаткін В. У., Туз Ю. М., Левківський К. М., Томашевський О. В.]. за ред. Ігнаткін В. У. – Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, – 2017. – 202 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/309>
4. **Ігнаткін В.У.** Основи метрології / Навчальний посібник. [Електронний ресурс] / Ігнаткін В.У., Томашевський О.В., Матюшин В.М. - Запоріжжя:ЗНТУ, 2017-119 с.. – Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/2174>

ДОДАТОК А. ДОВІДКОВІ ДАНІ

Таблиця А1 - Значення коефіцієнта виду приймання (K_p) залежно від системи відбракувальних випробувань

Система випробувань	K_p
По ОСТ в 11073.012	0,1
По ОСТ в 110398 (з ЕТТ)	0,2
По ОСТ 110398 (без ЕТТ)	0,5
За ГОСТ 18725 (з ЕТТ)	1,0
За ГОСТ 18725 (без ЕТТ)	2,0

Таблиця А2 - Залежність інтенсивності відмов корпусу (λ_k) від типу корпусу

Тип корпусу	$\lambda_{до} \cdot 10^7, 1/ч$
2126.48-6	0,15
2123.40-6	0,1
2121.28-5	0,08
2130.24-1	0,07
2103.16-6	0,06
401. 14-5	0,05
301. 12-1	0,03
301. 8-2	0,02

Примітка: Тип корпусу визначений відповідно до класифікації ДЕРЖСТАНДАРТ 17467-72 і ДЕРЖСТАНДАРТ 17467-79.

Таблиця А3 - Залежність інтенсивності відмов з'єднання кристала з підставою корпусу ($\lambda_{кк}$) від способу кріплення

Спосіб кріплення	$\lambda_{кк} \cdot 10^7, 1/ч$
На клей, контактол	0,01
На евтектику	0,0045
Методом дисперсійної пайки в корпусах з кількістю виводів:	
До 28	0,06
Більше 28	0,08

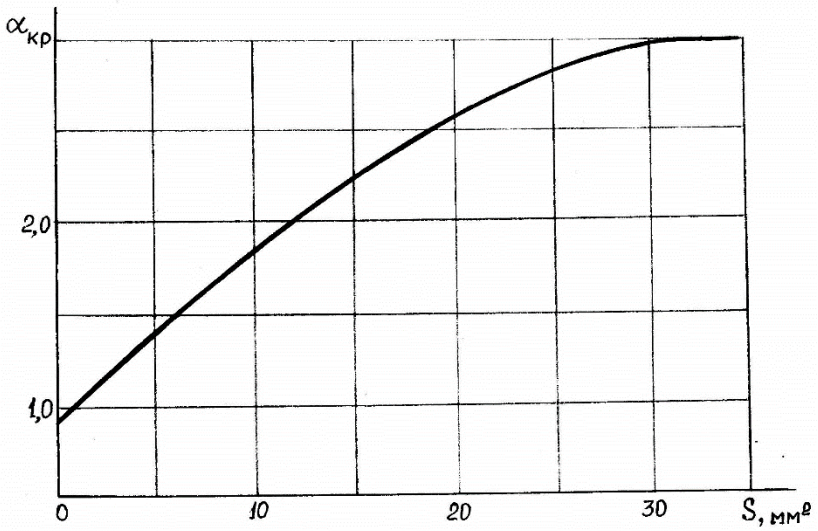
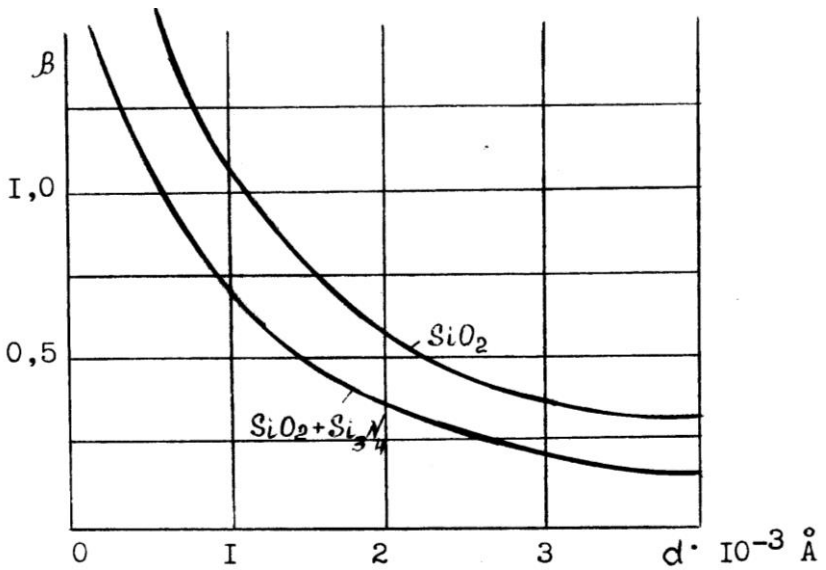
Таблиця А4 - Залежність інтенсивності відмов термокомпресійного з'єднання ($\lambda_{\text{ткс}}$) від матеріалів, що з'єднують

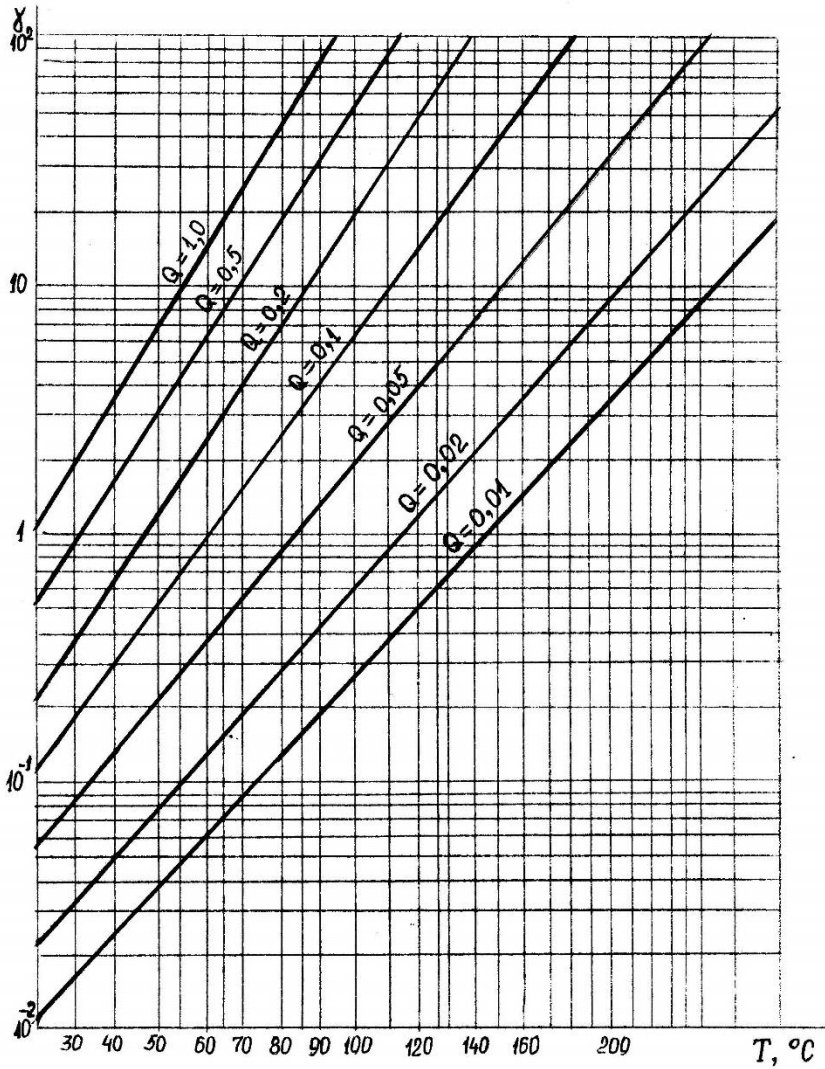
Матеріали, що з'єднують	$\lambda_{\text{ткс}} \cdot 10^7, 1/\text{ч}$
Au - Al	0,003
Al - Al	0,0015

Таблиця А5 - Залежність елементів відмов активних елементів (λ_a) від ступеня інтеграції й технології виготовлення

Найменування елемента	$\lambda_a \cdot 10^7, 1/\text{ч}$
р-п-р, п-р-п транзистор, виготовлений за біполярною технологією з ізоляцією р-п переходом:	
I, II ступінь інтеграції	0,0075
III ступінь інтеграції	$2,5 \cdot 10^{-3}$
IV ступінь інтеграції	$0,8 \cdot 10^{-3}$
р-п-р, п-р-п транзистор, виготовлений на кремнієвих структурах з діелектричною ізоляцією (КСДІ)	0,009
р-п-р, п-р-п транзистор, виготовлений на ДИКЭД структурах (діелектрично ізолюваний кремній електронно-дірковий)	0,012
МДП-транзистор:	
I, II ступінь інтеграції	$1,0 \cdot 10^{-3}$
III ступінь інтеграції	$0,3 \cdot 10^{-3}$
IV ступінь інтеграції	$0,1 \cdot 10^{-3}$
V ступінь інтеграції	$0,03 \cdot 10^{-3}$
VI ступінь інтеграції	$0,01 \cdot 10^{-3}$

Продовження Додатку А

Рисунок А1 – Залежність коефіцієнта $\alpha_{кр}$ від площі кристалуРисунок А2 - Залежність коефіцієнта β від товщини діелектрика

Рисунок А3 - Залежність коефіцієнта γ від температури та величини Q

ДОДАТОК Б. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ІМС

Таблиця Б1 - Вихідні дані для розрахунку надійності ІМС

№	Впливаючі фактори та їх характеристики	Познач.	Можливі значення	ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Коефіцієнт виду прийомки	$k_{п}$	0.1 0.2 0.5 1.0 2.0	0.5	2.0	0.1	0.5	1.0	0.2	1.0	2.0	0.5	0.2
2	Інтенсивність відмов корпусу, год ⁻¹	$\lambda_{к}, 10^{-7}$	0.15 0.1 0.08 0.07 0.06 0.03	0.1	0.03	0.03	0.08	0.03	0.15	0.03	0.07	0.1	0.07
3	Площа кристала, мм ²	S	10-30	10	30	25	28	24	12	18	16	20	10
4	Інтенсивність відмов з'єднання кристал-корпус, год ⁻¹	$\lambda_{кк}, 10^{-7}$	0.01, 0.0045, 0,06, 0,08	0.01	0,06	0,08	0.01	0.01	0,06	0,08	0.01	0.01	0,06
5	Інтенсивність відмов термокомпресійного з'єднання, год ⁻¹ з	$\lambda_{тз}, 10^{-10}$	3, 1.5	1.5	3	3	1.5	3	3	3	1.5	3	3
6	Кількість термокомпресійних з'єднань	n	14 16 24 28 40 48	40	28	24	14	14	14	40	48	24	28
7	Ступінь інтеграції ІС	-	I II III IV V VI	IV	II	II	I	I	I	IV	V	II	II
8	Активний елемент	-	Біполярн. транзит.(БТ), МНД-структ. (МНД)	БТ	БТ	БТ	БТ	МНД	БТ	БТ	БТ	БТ	БТ

№	Впливаючі фактори та їх характеристики	Познач.	Можливі значення	ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	Співвідношення активних та пасивних елементів ІС	N_A/N_P	0.5 0.6 0.7	0.5	0.7	0.6	0.7	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5
10	Вид ізоляції	-	p-n перехід (p-n), КСДІ, ДІКЕД	ДІКЕД	КСДІ	ДІКЕД	ДІКЕД	КСДІ	ДІКЕД	КСДІ	КСДІ	ДІКЕД	КСДІ
11	Температура	$T^{\circ}C$	25 30 35 40 45 50 - 160	40	30	25	50	40	30	25	50	30	60
12	Коефіцієнт режиму (для МНД- транзит.)	α	0.2, 0.4, 0.6, 0.8					0.2					
13	Коефіцієнт навантаження по струму	k_I	1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0	1.2	1.8	2.0	1.2	-	1.6	1.4	2.0	1.2	1.2
14	Коефіцієнт навантаження по напрузі	k_u	0.2 0.4 0.6 0.8	0.6	0.2	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	0.2	0.6	
15	Механізми відмов	-	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	2, 3, 4	1, 4, 5	2, 3, 4	1, 2, 3	-	5, 6, 7	2, 3, 4	1, 2, 3	2, 6, 7	2, 3, 4
16	Відносні долі ймовірності відмови внаслідок дії конкретного відмови (відповідно до зазначеного у п.15 механізму)		0 - 1	однакові									
17	Товщина під затворного діелектрика SiO_2	$d \cdot 10^{-2}, \text{ нм}$	0.2 - 4	0,5	4	2	2	1	1	2	3	4	2

№	Впливаючі фактори та їх характеристики	Познач.	Можливі значення	ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	Ймовірність безвідмовної роботи для розрахунку t_T	γ	0.8 – 0.99	0,9	0,95	0,95	0,9	0,9	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9
19	Інтенсивність відмов пасивних елементів ІС, год ⁻¹	$\lambda_{п}, 10^{-7}$	10^{-5}										
20	Площина електрично різнонавантажених ділянок ІС, мм ²	S	1 2 3 4 6 8	2	2	3	3	1	4	4	3	2	4
21	Коефіцієнти електричного навантаження ділянок ІС	Q	1.0 0.5 0.2 0.1 0.05 0.02 0.01	0,5	0.1	1.0	0.5	0.1	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0
22	Ширина стежки металізації, мкм	w	5-10 3-5 1- 3	5-10	3-5	3-5	3-5	2	5-10	3-5	5-10	3-5	3-5
23	Коефіцієнт виду прийомки	$k_{п}$	0.1 0.2 0.5 1.0 2.0	0.5	1.0	0.1	2.0	0.5	2.0	0.1	2.0	1.0	0.2
24	Інтенсивність відмов корпусу, год ⁻¹	$\lambda_{кк}, 10^{-7}$	0.15 0.1 0.08 0.07 0.06 0.03	0.08	0.06	0.03	0.08	0.1	0.1	0.03	0.15	0.07	0.06
25	Площа кристалу, мм ²	S	10-30	30	25	28	24	24	12	18	16	20	10
26	Інтенсивність відмов з'єднання кристал-корпус, год ⁻¹	$\lambda_{ккк}, 10^{-7}$	0.01, 0.0045, 0,06, 0,08	0.01	0.01	0,06	0,08	0.01	0.01	0,06	0,08	0,08	0.01
27	Інтенсивність відмов термокомпресійного з'єднання, год ⁻¹ з	$\lambda_{тз}, 10^{-10}$	3, 1.5	3	1.5	3	3	3	1.5	3	1.5	3	3

№	Впливаючі фактори та їх характеристики	Познач.	Можливі значення	ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
28	Кількість термокомпресійних з'єднань	n	14 16 24 28 40 48	14	40	28	24	14	14	40	48	24	28
29	Ступінь інтеграції ІС	-	I II III IV V VI	I	IV	II	II	I	I	IV	V	II	II
30	Активний елемент	-	Біполярн. транзит.(БТ), МНД-структ. (МНД)	БТ	БТ	БТ	БТ	МНД	БТ	БТ	БТ	БТ	БТ
31	Співвідношення активних та пасивних елементів ІС	N_A/N_P	0.5 0.6 0.7	0.6	0.7	0.5	0.7	0.5	0.7	0.6	0.7	0.5	0.6
32	Вид ізоляції	-	p-n перехід (p-n), КСДІ, ДІКЕД	ДІКЕД	КСДІ	ДІКЕД	ДІКЕД	КСДІ	ДІКЕД	КСДІ	КСДІ	ДІКЕД	КСДІ
33	Температура	Т°С	25 30 35 40 45 50 - 160	30	25	50	30	20	50	30	60	30	25
34	Коефіцієнт режиму	α	0.2, 0.4, 0.6, 0.8					0,09					
35	Коефіцієнт навантаження по струму	k_I	1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0	1.2	1.6	1.8	1.4	-	1.8	1.8	1.2	1.8	1.6
36	Коефіцієнт навантаження по напрузі	k_u	0.2 0.4 0.6 0.8	0.4	0,8	0.2	0.6	0,6	0,8	0.2	0.6	0.6	0.4
37	Механізми відмов	-	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	2, 3, 4	1, 2, 3	2, 6, 7	2, 3, 4	-	2, 3, 4-	5, 6, 7	2, 3, 4	1, 4, 5	2, 3, 4

№	Впливаючі фактори та їх характеристики	Познач.	Можливі значення	ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	Відносні долі ймовірності відмови внаслідок дії конкретного відмови (відповідно до зазначеного у п.15 механізму)		0 - 1	Однак.ові.	Однак.ові.	Однак.ові.	Однак.ові.	,	Однак.ові.	Однак.ові.	Однак.ові.	Однак.ові.	Однак.ові.
39	Товщина під затворного діелектрика SiO ₂	$d \cdot 10^{-2}$, нм	0.2 - 4	1	2	3	4	2	0,5	4	2	2	1
40	Ймовірність безвідмовної роботи для розрахунку t_T	γ	0.8 – 0.99	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9	0,95	0,95	0,95	0,95	0,9
41	Інтенсивність відмов пасивних елементів ІС, год ⁻¹	$\lambda_n, 10^{-7}$	10^{-5}										
42	Площина електрично різнонавантажених ділянок ІС, мм ²	S	1 2 3 4 6 8	2	3	4	3	2	6	6	8	2	2
43	Коефіцієнти електричного навантаження ділянок ІС	Q	1.0 0.5 0.2 0.1 0.05 0.02 0.01	1.0	0.5	0.5	1.0	0,5	0.1	1.0	0.5	0.1	0.5
44	Ширина стежки металізації, мкм	w	5-10 3-5 1- 3	3-5	3-5	5-10	3-5	4	3-5	3-5	5-10	5-10	3-5