

В.М. Кичак, В.В. Стронський

Порівняльний аналіз показників надійності мажоритарних ланок на логічних елементах

Національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна

Інтегральна мікросхема (ІМС) умовно розділена на складові частини : логічний елемент, корпус, кристал, коло живлення. Складові частини відмов ІМС поділені на ті, що призводять до відмови логічного елемента (ЛЕ), або всієї ІМС. Запропоновано при розрахунках фізичним методом інтенсивностей відмов ЛЕ, кола живлення враховувати відмови провідників та зовнішніх виводів. З урахуванням цього уточнено значення інтенсивності відмов кристала ІМС, а також ймовірність безвідмовної роботи другої мажоритарної ланки. Знайдено вимогу до складових частин ймовірностей безвідмовної роботи за допомогою якої проводиться порівняльний аналіз мажоритарних ланок. Наведено таблиці з початковими даними і розрахунками інтенсивностей відмов та ймовірностей безвідмовної роботи складових частин ІМС і мажоритарних ланок.

Ключові слова: інтегральна мікросхема, логічний елемент, мажоритарна ланка, ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, площа, дефекти.

Стаття постуила до редакції 15.04.2007; прийнята до друку 18.12.2007.

Вступ

Якщо мажоритарні ланки типу “два з трьох” знаходяться на трьох різних корпусах інтегральних мікросхем (ІМС), тоді на відміну від мажоритарних ланок, що знаходяться в одному корпусі ІМС, зникає залежність між логічними схемами однієї ланки і відмови будь-якої ІМС (розколина або тріщина кристала) не порушує нормальну роботу логічного пристрою. В цьому випадку звичайні розрахунки ймовірностей безвідмовної роботи обох схем не дають бажаного результату [1].

I. Постановка задачі

Як відомо, ймовірність безвідмовної роботи мажоритарної ланки на трьох різних корпусах ІМС знаходиться наступним чином [2]:

$$P_{M1}(t) = P_1^2(t) \cdot [3 - 2 \cdot P_1(t)], \quad (1)$$

де t – довготривалість роботи ІМС; $P_1(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи корпусів ІМС, де задіяно по одному логічному елементу 2І – НІ з чотирьох [3].

Для другої схеми мажоритарної ланки на одному корпусі ІМС, де задіяно три логічних елемента 2І – НІ з чотирьох, маємо [3]:

$$P_{M2}(t) = P_{ЛЕ2}^2(t) \cdot [3 - 2 \cdot P_{ЛЕ2}(t)] \cdot P_{КОР2}(t) \cdot P_{КЖ}(t) \cdot P_{КР}(t), \quad (2)$$

де $P_{ЛЕ2}(t)$, $P_{КОР2}(t)$, $P_{КЖ}(t)$, $P_{КР}(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи логічного елемента, корпуса, кола живлення, кристала ІМС, що використовуються для другої схеми мажоритарної ланки. Проте, не всі відмови кристалу призводять до відмови всієї ІМС.

Ефективність використання обох варіантів мажоритарних ланок залежить від технології виготовлення компонентів ІМС, методів з'єднання провідників, типу корпусів ІМС.

II. Мета роботи

Для обраної біполярної технології виготовлення ІМС, для різних варіантів типів корпусів та методів з'єднання провідників, за допомогою фізичного методу розрахунків показників надійності напівпровідникових мікросхем за раповими відмовами [4], знайти вимоги до складових частин ймовірностей безвідмовної роботи при яких перша схема мажоритарної ланки на трьох різних корпусах ІМС буде мати кращі показники надійності ніж друга схема мажоритарної ланки на одному корпусі ІМС та порівняти показники надійності обох схем.

Знайдемо аналітичні вирази вимог до складових частин ймовірностей безвідмовної роботи двох варіантів мажоритарних ланок, що порівнюються.

III. Вимоги до складових частин ймовірностей безвідмовної роботи мажоритарних ланок

Інтенсивність відмов кристалів ІМС мажоритарних ланок знаходиться наступним чином [4]:

$$\lambda_{KPi} = \lambda_{OKP} \cdot S_{KPi} + \lambda_{OKPKP}, \quad (3)$$

де $i = 1, i = 2$ відповідно перша та друга схеми мажоритарних ланок; $\lambda_{OKP}, \lambda_{OKPKP}$ – інтенсивності відмов внаслідок поверхневих і структурних дефектів кристала (на 1 мм^2 площі) та неякісного кріплення кристала; S_{KPi} – площа кристала (в мм^2), що

використовується в ІМС першої та другої схем мажоритарних ланок. Одиничні відмови внаслідок поверхневих і структурних дефектів призводять до відмови логічного елемента ІМС, а відмови внаслідок неякісного кріплення кристала призводять до відмови всієї ІМС. Перетворимо формулу (3) для знаходження ймовірностей безвідмовної роботи кристалів ІМС з урахуванням складових частин відмов:

$$P_{KPi}(t) = P_{OKPi}(t) \cdot P_{OKPKP}(t). \quad (4)$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи другої схеми мажоритарної ланки з урахуванням формул (2), (4) та наслідків одиничних відмов кристалу, набуває вигляду:

$$P_{M2}(t) = P_{ЛЕ2}^2(t) \cdot P_{OKP2}^2 \cdot P_{КОР2}(t) \cdot P_{ЛЖ2}(t) \cdot P_{OKPKP}(t) \cdot [3 - 2 \cdot P_{ЛЕ2}(t) \cdot P_{OKP2}(t)]. \quad (5)$$

Подамо $P_1(t)$ з формули (1) у вигляді добутка зі складових частин:

$$P_1(t) = P_{ЛЕ1}(t) \cdot P_{КОР1}(t) \cdot P_{КЖ1}(t) \cdot P_{ОКР1}(t) \cdot P_{ОКРКР}(t), \quad (6)$$

де $P_{ЛЕ1}(t), P_{КОР1}(t), P_{КЖ1}(t), P_{ОКР1}(t), P_{ОКРКР}(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи логічного елемента, корпусу, кола живлення та внаслідок поверхневих і структурних дефектів кристала, а

також неякісного кріплення кристала ІМС першої мажоритарної ланки.

Знайдемо інтенсивності раптових відмов логічних елементів фізичним методом [4,5] з урахуванням відмов металізації (за виключенням кола живлення), термокомпресійних або зварюваних і паяних з'єднань провідників (за виключенням двох виводів кола живлення) та коефіцієнтів навантаження компонентів:

$$\lambda_{ЛЕ} = \sum_{m=1}^n K_m \cdot (\lambda_{ОДФ} \cdot N_{ДФm} + \lambda_{ОПВ} \cdot S_{КОМm}) + \sum_{m=n+1}^f K_m \cdot (\lambda_{ОМЕТ} + \lambda_{ООК} + \lambda_{ОПВ}) \cdot S_{МЕТm} + M_1 \cdot (2\lambda_{ЗВp} + \lambda_{ПЗ}), \quad (7)$$

де n – кількість компонентів ІМС (транзисторів, діодів, резисторів); $(f - n - 1)$ – кількість ділянок металізації; K_m – коефіцієнт навантаження m -го компонента або ділянки металізації; $\lambda_{ОДФ}, \lambda_{ОПВ}, \lambda_{ОМЕТ}, \lambda_{ООК}$ – інтенсивності відмов внаслідок дефектів однієї стадії дифузії, дефектів від сторонніх включень в корпусі (на 1 мм^2 площі), дефектів металізації (на 1 мм^2 площі), дефектів оксиду (на 1 мм^2 площі); $N_{ДФm}$ – кількість стадій дифузії при формуванні m -го компонента ІМС; $S_{КОМm}, S_{МЕТm}$ – площі на кристалі (в мм^2) m -го компонента та ділянки металізації з m -им номером;

$M_1 = 3$ – кількість виводів логічного елемента 2І – НІ за виключенням двох виводів кола живлення; $\lambda_{ЗВp}, \lambda_{ПЗ}$ – інтенсивності відмов для ультразвукового зварювання ($p = 1$), термокомпресії ($p = 2$) провідників та пайки зовнішніх виводів.

Відмови корпусу ІМС та кола живлення призводять до відмови всієї ІМС. Значення інтенсивності відмов внаслідок пошкодження пластмасового та металокерамічного корпусів ІМС наведені в роботі [4]. Інтенсивність відмов кола живлення з урахуванням відмов провідників і зовнішніх виводів та поверхневих і структурних дефектів кристала має вигляд:

$$\lambda_{КЖ} = (\lambda_{ОМЕТ} + \lambda_{ООК} + \lambda_{ОПВ} + \lambda_{ОКР}) \cdot S_{КЖ} + M_2 \cdot (2 \cdot \lambda_{ЗВp} + \lambda_{ПЗ}), \quad (8)$$

де $S_{КЖ}$ – площа кола живлення (в $мм^2$) на кристалі ІМС; $M_2 = 2$ – кількість виводів кола живлення. Інтенсивності раптових відмов та ймовірності безвідмовної роботи логічних елементів, корпусів, кристалів і кола живлення будемо вважати однаковими для обох схем мажоритарних ланок. Виграш по показниках безвідмовної роботи першої

мажоритарної ланки над другою знаходиться як відношення $P_{M1}(t)$ до $P_{M2}(t)$, яке повинно бути більшим за одиницю [1, 3]. З урахуванням формул (1),(5),(6) та спрощень виразів отримаємо відношення $P_{M1}(t)$ до $P_{M2}(t)$:

$$\frac{P_{КОР}(t) \cdot P_{КЖ}(t) \cdot P_{ОКРКР}(t) \cdot [3 - 2 \cdot P_{ЛЕ}(t) \cdot P_{КОР}(t) \cdot P_{КЖ}(t) \cdot P_{ОКР}(t) \cdot P_{ОКРКР}(t)]}{3 - 2 \cdot P_{ЛЕ}(t) \cdot P_{ОКР}(t)} > 1. \quad (9)$$

Позначимо у виразі (9):
 $X_1(t) = P_{КОР}(t) \cdot P_{КЖ}(t) \cdot P_{ОКРКР}(t)$,
 $B_1(t) = P_{ЛЕ}(t) \cdot P_{ОКР}(t)$. Тоді нерівність (9) перетвориться наступним чином:
 $2 \cdot B_1(t) \cdot X_1^2(t) - 3 \cdot X_1(t) + 3 - 2 \cdot B_1(t) < 0. \quad (10)$

Знайдемо рішення нерівності (10) відносно $X_1(t)$:

$$X_1(t) > \frac{3 - \sqrt{9 - 8 \cdot B_1(t) \cdot [3 - 2 \cdot B_1(t)]}}{4 \cdot B_1(t)}, \quad (11)$$

Таблиця 1

Початкові дані для розрахунку показників надійності мажоритарних ланок

Інтенсивність відмов	в 10^{-9} год $^{-1}$	Площі компонентів	Значення в $мм^2$	Площі Компонентів та ділянок металізації	Значення в $мм^2$	Площі ділянок металіз ації	Значення в $мм^2$
$\lambda_{ОДЦФ}$ (1 стадія)	0,42	S_{VT1}	0,0267	S_{R4}	0,0087	S_{MET6}	0,0015 (0,000013)
$\lambda_{ОМЕТ_2}$ (на 1мм)	3,4	S_{VT2}	0,0149	$S_{КР}$	0,2470	S_{MET7}	0,021 (0,000013)
$\lambda_{ООК_2}$ (на 1мм)	10,0	S_{VT3}	0,0276	$S_{КЖ}$	0,031	S_{MET8}	0,0007 (0,000013)
$\lambda_{ОПВ_2}$ (на 1мм)	0,65	S_{VT4}	0,0276	S_{MET1}	0,0169 (0,000020)	S_{MET9}	0,0008 (0,000013)
$\lambda_{ОКР_2}$ (на 1мм)	0,57	S_{VD}	0,0113	S_{MET2}	0,0222 (0,000020)	S_{MET10}	0,0022 (0,000013)
$\lambda_{ОКРКР}$	6,0	S_{R1}	0,0309	S_{MET3}	0,0345 (0,000053)	S_{MET11}	0,0077 (0,000020)
$\lambda_{3B1},$ λ_{3B3}	1,3	S_{R1}	0,0156	$S_{MET4},$ S_{MET14}	0,0015 (0,000013)	S_{MET12}	0,0048 (0,000013)
$\lambda_{3B2},$ λ_{3B4}	0,7	S_{R3}	0,0160	S_{MET5}	0,0075 (0,000013)	S_{MET13}	0,0130 (0,000013)

Таблиця 2

Результати розрахунків інтенсивностей відмов та ймовірностей безвідмовної роботи ІМС

Інтенсивності відмов	Значення в 10^{-9} 1/год	Ймовірності безвідмовної роботи	Значення для часу: $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ год
$\lambda_{ЛЕ1}, \lambda_{ЛЕ3}$	20,678	$P_{ЛЕ1}(t), P_{ЛЕ3}(t)$	0,99997932
			0,999979322
			0,99979322
			0,9979322
$\lambda_{ЛЕ2}, \lambda_{ЛЕ4}$	21,173	$P_{ЛЕ2}(t), P_{ЛЕ4}(t)$	0,999997883
			0,999978827
			0,99978827
			0,9978827
$\lambda_{КЖ1}, \lambda_{КЖ3}$	7,043	$P_{КЖ2}(t), P_{КЖ4}(t)$	0,999999263
			0,999992627
			0,99992627
			0,9992627
$\lambda_{КЖ2}, \lambda_{КЖ4}$	7,373	$P_{КЖ2}(t), P_{КЖ4}(t)$	0,999999263
			0,999992627
			0,99992627
			0,9992627
$\lambda_{ОКР} \cdot S_{КР}$	0,141	$P_{ОКР}(t)$	0,999999986
			0,999999859
			0,99999859
			0,999859
$\lambda_{ОКРКР}$	6,0	$P_{ОКРКР}(t)$	0,9999994
			0,999994
			0,99994
			0,9994
$\lambda_{КОР1}, \lambda_{КОР2}$	1,5	$P_{КОР1}(t), P_{КОР2}(t)$	0,99999985
			0,9999985
			0,999985
			0,99985
$\lambda_{КОР3}, \lambda_{КОР4}$	8,0	$P_{КОР3}(t), P_{КОР4}(t)$	0,9999992
			0,999992
			0,99992
			0,9992

$$X_1(t) < \frac{3 + \sqrt{9 - 8 \cdot B_1(t) \cdot [3 - 2 \cdot B_1(t)]}}{4 \cdot B_1(t)} \quad (12)$$

Значення складових частин $X_1(t)$:

$P_{КОР}(t), P_{КЖ}(t), P_{ОКРКР}(t)$ та $B_1(t)$: $P_{ЛЕ}(t), P_{ОКР}(t)$ знаходяться в межах від 0,99 до 1,0 (для часу роботи $0 < t < 10^5$ год), тому нерівність (11) буде

виконуватись для всіх $0 < t < 10^5$ год. Якщо вимога (12) виконується, то в цьому випадку перша схема мажоритарної ланки на трьох різних корпусах ІМС має більшу ймовірність безвідмовної роботи ніж друга схема на одному корпусі ІМС, де задіяно три логічних елемента 2І – НІ з чотирьох.

IV. Порівняльний аналіз показників надійності мажоритарних ланок

Для топології ІМС SN7400 (аналог 155ЛІА3) з чотирма логічними елементами

2І – НІ транзисторно-транзисторної логіки [6] перевіряємо виконання умови (12), позначивши праву частину формули (12) як $A_1(t)$ і порівнюємо показники надійності першої та другої схем мажоритарних ланок з урахуванням формул (1),(5),(6) та часу роботи від 10^2 до 10^5 год.

В якості початкових даних для розрахунку інтенсивностей раптових відмов та ймовірностей безвідмовної роботи ІМС фізичним методом використовуються площі компонентів ІМС і ділянок металізації [6], а також інтенсивності відмов

внаслідок дефектів та пошкоджень ІМС [4,5]. Початкові дані для розрахунку показників надійності схем мажоритарних ланок на логічних елементах наведено в табл. 1 [4-6].

В табл. 1 в дужках наведено площі перерізу ділянок металізації, котрі використовуються при розрахунках коефіцієнтів навантаження.

Результати розрахунків інтенсивностей відмов та ймовірностей безвідмовної роботи ІМС з урахуванням навантаження в станах логічних “0” і “1” [4,7] лабораторних механічних навантажень, температури $20^\circ - 40^\circ \text{C}$, висоти до 1 км [4], часу роботи від 10^2 до 10^5 год наведено в табл. 2.

Результати розрахунків ймовірностей безвідмовної роботи для двох мажоритарних ланок по формулах (1),(5),(6),(12) з урахуванням значень складових частин ймовірностей безвідмовної роботи, наведених в табл.2 для часу роботи ІМС від 10^2 до 10^5 год та чотирьох варіантів типів корпусів і технологій з’єднань провідників наведено в табл. 3.

Як бачимо з табл.3, вимога (12) $X_j(t) < A_j(t)$, де j – номер варіанта, виконується для всіх $j = 1...4$, та часу роботи від 10^2 до 10^5 год. Тоді відношення $P_{M1}(t)$ до $P_{M2}(t)$ повинно бути більшим за

Таблиця 3

Результати розрахунків ймовірностей безвідмовної роботи мажоритарних ланок для 4 варіантів корпусів ІМС та технологій з’єднань провідників

Варіант	Ймовірності Безвідмовної роботи	Час роботи, год			
		10^2	10^3	10^4	10^5
1	$P_{M11}(t)$	1,0	0,999999997	0,999999626	0,999962653
	$P_{M21}(t)$	0,999998546	0,999985455	0,99985445	0,998533352
	$X_1(t)$	0,999998546	0,999985457	0,999854576	0,998546318
	$A_1(t)$	1,0	0,999999999	0,999999999	0,999999999
2	$P_{M12}(t)$	0,999999999	0,999999996	0,999999607	0,999960895
	$P_{M22}(t)$	0,999998513	0,999985125	0,99985114	0,998499753
	$X_2(t)$	0,999998513	0,999985127	0,999851276	0,998513342
	$A_2(t)$	1,0	0,999999999	0,999999999	0,999999999
3	$P_{M13}(t)$	0,999999999	0,999999997	0,999999475	0,999947721
	$P_{M23}(t)$	0,999997896	0,999978955	0,999789454	0,997884208
	$X_3(t)$	0,999997896	0,999978957	0,999789584	0,997897165
	$A_3(t)$	1,0	1,0	1,0	1,0
4	$P_{M14}(t)$	0,999999999	0,999999993	0,999999455	0,999945646
	$P_{M24}(t)$	0,999997863	0,999978625	0,999786148	0,99785062
	$X_4(t)$	0,999997863	0,999978627	0,999786285	0,997864211
	$A_4(t)$	1,0	1,0	1,0	0,999999999

одиницю, що видно з табл. 3 для всіх значень j та часу роботи. Таким чином, на ІМС SN7400 перша схема мажоритарної ланки має кращі показники ймовірності безвідмовної роботи, ніж друга схема.

Висновки

1. Зазначено, що відмови корпусу ІМС кола живлення та внаслідок неякісного кріплення кристала призводять до відмови всієї ІМС, а відмови компонентів ІМС, ділянок металізації та внаслідок поверхневих і структурних дефектів кристала призводять до відмови логічних елементів ІМС.

2. Уточнено значення інтенсивності відмов кола живлення та логічного елемента з урахуванням відмов провідників і зовнішніх виводів та дефектів

кристала, а також значення ймовірності безвідмовної роботи другої мажоритарної ланки з урахуванням складових частин відмов кристала.

3. Знайдено вимогу (12) до складових частин ймовірностей безвідмовної роботи ІМС при виконанні якої перша схема мажоритарної ланки має кращі показники надійності, ніж друга схема.

4. Доведено, що перша схема мажоритарної ланки на трьох ІМС SN7400 має кращі показники надійності, ніж друга схема на одній ІМС SN7400.

Кичак В.М. – д.т.н., професор, зав. кафедри телекомунікаційних систем та телебачення;
Стронський В.В. – асистент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.

- [1] В.В. Белецкий. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры. Энергия, М. 360 с. (1977).
- [2] А.А. Чернышев. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Радио и связь, М. 256 с. (1988).
- [3] В. Кичак, В.Стронський. Оцінка надійності логічних пристроїв з частковим використанням логічних елементів в корпусах інтегральних мікросхем // *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування. Матеріали 1-ї Міжнародної конференції*. Вінниця, с. 34. (2005).
- [4] *Микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов. В 9 кн. / Под ред. Л.А. Коледова. Кн.5 И.Я. Козырь. Качество и надежность интегральных микросхем. Высшая школа, М. 144 с. (1987).*
- [5] Э.А. Матсон. *Конструкции и технология микросхем: Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов*. Выш. шк. Мн. 207 с. (1985).
- [6] Р. Эндерлайн. *Микроэлектроника для всех / Пер. с немец. Под ред. И.М. Цидильковского*. Мир, М. 190 с. (1989).
- [7] Н.М. Соломатин. *Логические элементы ЭВМ: Практ. Пособие для вузов, 2-е изд., перераб. и доп.* Вышш. шк., М. 160 с. (1990).

V.M. Kichak, V.V. Stronsky

Comparative Analysis of Reliability Indexes Majorities Links on Logical Elements

National technical university, 95, Khmelnytske shosse Str, Vinnytsa, 21021, Ukraine

An integral microcircuit (IMC) de bene esse is parted on component parts : logical element(LE), corps, crystal, circle of food. Component parts of refusals of IMC are parted on those, that result in the refusal of LE or IMC. At calculations by the physical method of intensities of refusals LE, circle of food to take into account the refusals of explorers and external conclusions is offered. Taking into account it the value of intensity of refusals of crystal of IMC, and also probability of faultless work of the second majority link is specified. The requirement is found to component parts of probabilities of faultless work which the comparative analysis of majorities links is conducted by. Tables are resulted with initial data and calculations of intensities of refusals and probabilities of faultless work of component parts of IMC and majorities links.