

УДК 321.396.6:658.018.2

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

П. В. Тарадаха

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теоретичної радіотехніки і радіовимірювань

© Тарадаха П. В., 2014

Наведені технології побудови формалізованої, математичної та комп’ютерної моделі технологічного процесу виготовлення біполярних інтегральних мікросхем, а також результати оптимізації цього процесу за критерієм мінімуму сумарних виробничих та експлуатаційних витрат.

Ключові слова: моделювання та оптимізація технологічних процесів, оптимізація технологічного процесу виготовлення біполярних інтегральних мікросхем.

Вступ та постановка задачі

Згідно з ДСТУ 2925-94 “Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення” оптимальне значення показника якості продукції – це значення, “... за яким досягається або найбільший ефект від експлуатації чи споживання продукції за даних витрат на її створення і експлуатацію чи споживання, або заданий ефект при найменших витратах, або найбільше співвідношення ефекту до витрат”. З наведеного визначення випливають три стратегії і відповідно три задачі забезпечення якості продукції. Перша задача – це досягнення максимального рівня якості при фіксованому рівні усіх витрат. Друга – мінімізація затрат при певному рівні якості. Третя – вибір компромісного варіанта між рівнем якості продукції і витратами на її забезпечення. Як перша, так і дві наступні задачі є задачами пошуку оптимальних рішень. Особливо це важливо для стадії виготовлення продукції – основної стадії, на якій формуються потрібні показники якості продукції.

Розроблені в [1, 2] принципи і методи моделювання та оптимізації складних виробничо-технологічних процесів виготовлення радіоелектронної апаратури (РЕА) призначені для розв’язання вказаної вище комплексної задачі забезпечення якості та надійності РЕА на стадії її виготовлення та експлуатації за критерієм мінімуму сумарних виробничих та експлуатаційних витрат. На основі запропонованої методології розроблене програмне забезпечення під загальною назвою “програмно-методичний комплекс ОПТАН”, який уже використовувався під час розв’язання конкретних практичних задач [3–6], передусім для дослідження процесів виготовлення РЕА, зокрема друковані плати, осцилографи, побутові підсилювачі тощо.

Метою роботи є встановлення можливості використання методології для моделювання технологічних процесів (ТП) виготовлення виробів електронної техніки – на прикладі біполярних інтегральних мікросхем (ІМС). Результатом таких досліджень є економічно обґрунтовані варіанти ефективності процедур контролю досліджуваного ТП. Вибір для дослідження саме такого ТП зумовлений декількома причинами: такий процес належить до класу типових ТП, відомий перелік використовуюваного технологічного та контрольного обладнання, накопичений достатній обсяг інформації щодо дефектності окремих технологічних операцій (ТО).

Технологія побудови формалізованих та математичних моделей

Математична модель технологічного процесу – це система математичних співвідношень, умов, обмежень тощо, що відображають в аналітичному вигляді зв’язки між встановленими властивостями, характеристиками і параметрами процесу. Побудові такої моделі передують два етапи: складання формалізованої моделі (опису) техпроцесу та побудова математичної моделі шляхом отримання відповідних математичних співвідношень.

Перший етап – складання формалізованої моделі (опису) техпроцесу. Основне призначення формалізованих моделей полягає в розробленні принципів і способів, що дозволяють перейти від реальних ТП до їх математичних моделей.

Технологічний процес виготовлення зображається у вигляді складної системи, яка складається з багатьох підсистем. Поділ процесу на окремі підсистеми ("елементарні комірки") проводиться так, що кожна із них призначена для формування та контролю i -ї властивості виробу на k -му кроці ТП (рис. 1).

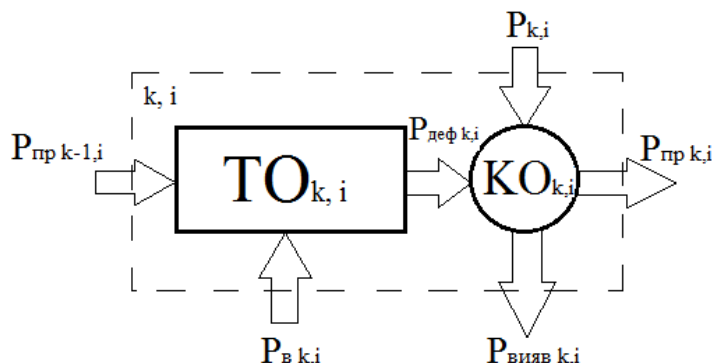


Рис. 1. Зображення фрагменту формалізованої моделі технологічного процесу у вигляді елементарної комірки

У наведеній моделі вхідними параметрами є $P_{пр k-1, i}$ – імовірність надходження дефектів з попереднього кроку ТП, $P_{в k, i}$ – імовірність введення дефектів при формуванні i -ї властивості виробу на k -му кроці. Вихідні параметри: $P_{пр k, i}$ – імовірність пропуску дефектів з k -го кроку ТП на наступний, $P_{вияв k, i}$ – імовірність виявлення дефектів по i -ї властивості. $P_{к, i}$ – параметр керування, який характеризує імовірність правильного контролю i -ї властивості виробу на k -му кроці ТП.

Між наведеними на рис. 1 параметрами існує такий зв'язок:

$$P_{деф k, i} = P_{пр k-1, i} + P_{в k, i} \cdot (1 - P_{пр k-1, i}) \quad (1)$$

$$P_{пр k, i} = P_{деф k, i} \cdot (1 - P_{к, i}) \quad (2)$$

$$P_{вияв k, i} = P_{деф k, i} \cdot P_{к, i} \quad (3)$$

Запропонований підхід до побудови формалізованих моделей ТП, враховуючи позначення на рис. 1, дозволяє отримати повну формалізовану модель, варіант якої наведено на рис. 2. Діагональні елементи цієї моделі фактично відповідають реальним технологічним операціям, а всі інші фіксують можливі зміни властивостей виробів, які сформовані на попередніх кроках під час виконання наступних і є формальними операціями.

Другий етап – це побудова математичної моделі шляхом отримання відповідних математичних співвідношень між властивостями, характеристиками, параметрами тощо, що входять у формалізовану модель.

Рекурентність співвідношень (1)–(3) дозволяє отримати зв'язки між усіма параметрами формалізованої моделі і таким чином мати математичну модель структури, зображеної на рис. 2. Як бачимо, формалізована модель технологічного процесу складається з багатьох взаємопов'язаних "елементарних комірок", зображених на рис. 1. Повна математична модель в цьому випадку є доволі громіздкою, тому на практиці такі моделі зображаються математичними структурами, що істотно спрощує всю процедуру моделювання та дослідження ТП загалом. Порядок формування таких матриць та правила роботи з ними відображені в [2].

Критерієм оптимальності ТП є мінімум сумарних виробничих та експлуатаційних витрат C_{Σ} . Параметром оптимізації (відповідно і параметром керування ТП) вибрано глибину контролю k . Для конкретного прикладу функція C_{Σ} задається у вигляді:

$$C_{\Sigma} = (k \cdot C_{кон}) + (C_k \cdot P_{деф} \cdot P) + (C_{експ} \cdot P_{пр}), \quad (4)$$

де k – параметр глибини контролю, $P_{пр}$ – матриця імовірностей пропуску дефектів; $P_{в}$ – матриця імовірностей введення дефектів; P – матриця імовірностей правильного контролю; $C_{кон}$ – витрати, по-

в'язані з проведенням операцій контролю; C_k – витрати на усунення дефектів, виявлених під час контролю; $C_{експ}$ – витрати на усунення дефектів виробництва, виявлених на стадії гарантійної експлуатації.

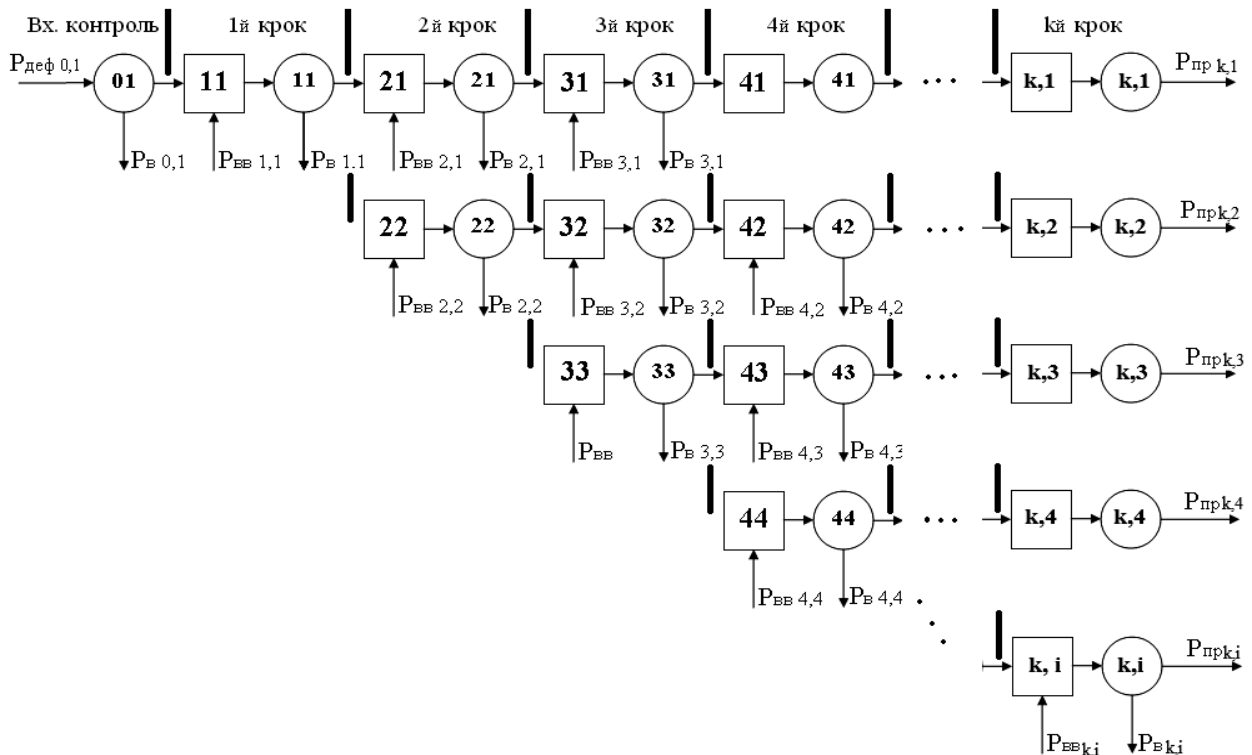


Рис. 2. Формалізована модель технологічного процесу

Результати моделювання та дослідження технологічного процесу виготовлення біполярних інтегральних мікросхем

Відомо, що конструкторсько-технологічною особливістю виготовлення біполярних ІМС є використання групових методів виготовлення, які передбачають одночасне формування великої кількості окремих напівпровідникових структур (елементів) на кожній технологічній операції. У цьому випадку поява дефекту хоча б в одній структурі на будь-якій ТО приводить до забракування ІМС загалом. Часто ці дефекти виявляються на кінцевих стадіях ТП, що істотно збільшує сумарні витрати на виготовлення ІМС. Така ситуація змушує особливу увагу приділяти організації системи контролю як на кожній технологічній операції зокрема, так і ТП загалом. З цього погляду саме для такого ТП особливо актуальним є оцінити ефективність базового варіанта контролю, а також комплексне дослідження та оптимізація контролю з метою формування як оцінок щодо ефективності організації системи контролю, так і розробки рекомендацій з його удосконалення.

Для прикладу вибраний типовий варіант реалізації технологічного процесу виготовлення біполярних інтегральних мікросхем, який складається із 16 основних технологічних операцій [7]:

- очищення пластин р-типу після полірування; визначення їх якості;
- початкове окиснення; контроль наявності пор і товщини оксиду;
- фотолітографія для створення області схованого колектора (використовується шаблон І);
- дифузія для створення прихованого шару колектора; контроль поверхневого опору області схованого колектора;
- зняття оксиду;
- осадження епітаксійного шару кремнію n-типу; контроль опору і дефектності епітаксійного шару;
- повторне окиснення; контроль наявності пор і товщини оксиду;

- фотолітографія для проведення дифузії в ізолюючу область і область бази (шаблон II);
 - дифузія, що формує область бази та ізолюючого кінця;
 - окиснення і фотолітографія для створення області емітера (шаблон III);
 - дифузія для створення області емітера та замикання ізолюючого кільця;
 - перша фотолітографія для створення областей n^+ під омичні контакти до емітера і колектора (шаблон IV);
 - друга літографія для створення дифузією областей p^+ під омичний контакт до області бази (шаблон V);
 - металізація алюмінієм;
 - фотолітографія для створення контактів (шаблон VI); впалювання алюмінію;
 - металізація і фотолітографія для створення міжз'єднань (комутації) (шаблон VII);
- електричний контроль на функціонування; скрайбування; збирання; виявлення відмов та відбракування; аналіз відмов та коригування технологічного процесу.

Потрібно зазначити, що кожна із розглянутих технологічних операцій є укрупненими і в реальному виробництві можна розбивати на низку елементарних операцій, переходів і т.д., кількість і послідовність яких регламентується відповідними технологічними документами. Деталізація процесу залежить від мети дослідження, наявних вхідних даних та інших факторів.

Вхідні дані для аналізу вибраного ТП зібрані з багатьох джерел переважно експертним методом і є усередненими. Крім того, витратні показники приведені до одного конструктивного елемента ІМС. Для конкретних мікросхем фактичні витрати можуть істотно відрізнятися і залежати від числа таких елементів в одній структурі та інших факторів і вибирається в кожному випадку індивідуально.

Для практичного моделювання та аналізу ТП виготовлення ІМС використаний програмний комплекс ОПТАН, який дає змогу провести оптимізацію цього процесу трьома методами: методом покрокового перебору, "золотого січення" та методом Хука-Джівса (Hooke-Jeeves). Результати оптимізації наведені у таблиці. Порівняльна діаграма значень параметрів глибини контролю на кожній технологічній операції наведена на рис. 3.

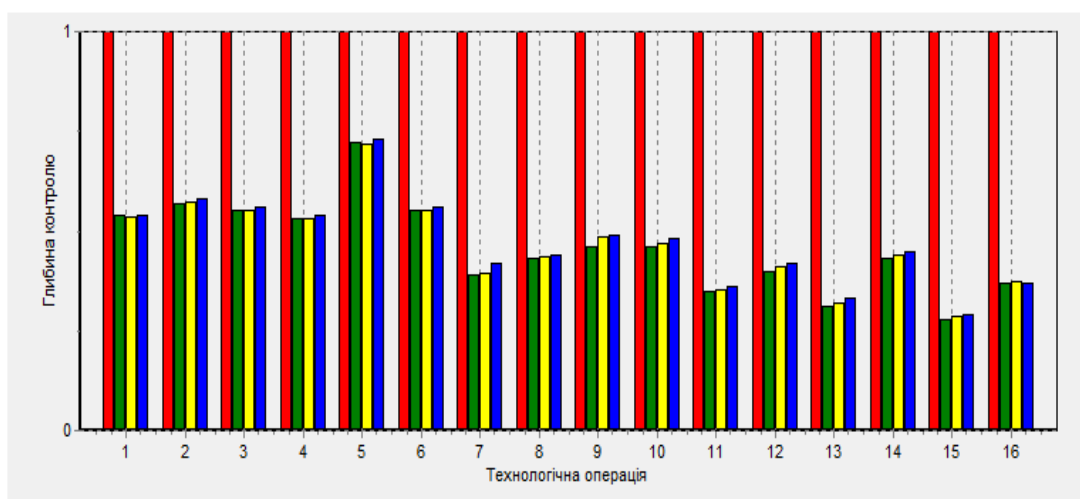


Рис. 3. Результати оптимізації глибини контролю ТП виготовлення біполярних ІМС (на рівні 1 позначена глибина контролю для базового варіанта)

Аналіз таблиці і рис. 3 показує, що всі три методи оптимізації дали практично однакові результати. Також бачимо, що оптимальні значення глибини контролю на всіх ТО є меншими за базові. Це свідчить про те, що контроль ТП є надлишковим. Такий факт дозволяє зробити висновок

про можливість послаблення вимог до контролю і це може зменшити сумарні витрати – з 21,8 відносних одиниць для базового процесу (БП) до 16,5 (таблиця). Однак це одночасно може призвести до деякого збільшення пропущених дефектів, хоча ці дефекти будуть “дешевими”. На прикладі це виглядає так. Можна, наприклад, дефектну заготовку інтегральної мікросхеми пропустити на наступні етапи ТП і лише після цього, уже на завершальних стадіях виготовлення, виявити пропущений дефект. Загальні витрати виготовлення, зрозуміло, в цьому випадку будуть великими. Можна навпаки – зразу виявити дефект, зняти з виробництва і таким чином істотно зменшити витрати, пов’язані з таким забракуванням. Якщо навіть кількість дефектів збільшиться, але вони будуть виявлятися на ранніх стадіях ТП, то в сумі, як показали дослідження, витрати на виготовлення можна зменшити.

Тому вибір остаточного компромісного варіанта залишається за спеціалістами-технологами.

Результати оптимізації ТП виготовлення біполярних ІМС

| | Метод покрової оптимізації | Метод “золотого січення” | Метод Хука-Джівса (Hooke-Jeeves) | |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------|
| k ₁ | 0,54 | 0,54 | 0,54 | |
| k ₂ | 0,57 | 0,57 | 0,58 | |
| k ₃ | 0,55 | 0,55 | 0,56 | |
| k ₄ | 0,53 | 0,53 | 0,54 | |
| k ₅ | 0,72 | 0,72 | 0,73 | |
| k ₆ | 0,55 | 0,55 | 0,56 | |
| k ₇ | 0,39 | 0,39 | 0,42 | |
| k ₈ | 0,43 | 0,44 | 0,44 | |
| k ₉ | 0,46 | 0,49 | 0,49 | |
| k ₁₀ | 0,46 | 0,47 | 0,48 | |
| k ₁₁ | 0,35 | 0,35 | 0,36 | |
| k ₁₂ | 0,4 | 0,41 | 0,42 | |
| k ₁₃ | 0,31 | 0,32 | 0,33 | |
| k ₁₄ | 0,43 | 0,44 | 0,45 | |
| k ₁₅ | 0,28 | 0,28 | 0,29 | |
| k ₁₆ | 0,37 | 0,37 | 0,37 | |
| Сумарні витрати | БП=21,815214 | 16,50104 | 16,495528 | 16,491786 |

Із аналізу діаграми розподілу глибини контролю (рис.3) можна зробити висновок про практично рівномірний розподіл вимог до контролю на всіх ТО. Однак можна виділити перелік ТО, на яких значення глибини контролю дещо більші за попередні – це 5, 10, 12, 14 та 16 технологічні операції. Пояснити це можна так. На перших чотирьох операціях накопичується певна кількість дефектів і після виконання п’ятої ТО (зняття оксиду) в результаті жорсткішого контролю вони виявляються. Це блокує надходження дефектів на наступну важливу операцію – осадження епітаксiального шару кремнію n-типу. На 6–9 технологічних операціях знову формується потік дефектів, які більш інтенсивно виявляються після 10 ТО (окиснення і фотолітографія для створення області емітера). Потім відбувається аналогічна процедура формування і розрідження дефектів. Повніше вони повинні виявлятися після першої літографії для створення областей p⁺ під омичні контакти до емітера й колектора та після металізації алюмінієм. Контроль після завершення технологічного процесу (16 ТО) також передбачається жорсткіший, оскільки це практично вихідний контроль якості виготовлення інтегральних схем загалом. Такий ступінчастий принцип організації контролю гарантуватиме потрібний рівень якості виробів за мінімальних витрат.

Висновки

1. Проведені дослідження повністю підтверджують можливість використання запропонованого підходу до моделювання та оптимізації процесів виготовлення як радіоелектронної

апаратури, так і виробів електронної техніки. Можна передбачити, що запропонована технологія моделювання також є придатною для аналізу процесів забезпечення якості виробів машинобудування, енергетики та інших галузей.

2. Встановлено, що оптимальні значення глибини контролю на всіх технологічних операціях процесу виготовлення біполярних інтегральних мікросхем менші від одиниці. Це є підставою для зменшення вимог до контрольних операцій, що також приведе до зменшення сумарних витрат на 24 % – з 21,8 відносних одиниць до 16,5. Але із зменшенням вимог до контролю може зрости імовірність вихідної дефектності, проявиться ефект "дешевих" дефектів при збереженні мінімуму сумарних витрат.

3. Для більшості раніше проаналізованих варіантів ТП був характерний нерівномірний перерозподіл вимог до контрольних операцій – жорсткіші вимоги переносилися на початкові стадії. Для ТП виготовлення біполярних мікросхем спостерігається практично рівномірний розподіл вимог. Хоча на рис. 3 бачимо, що для перших шести контрольних операцій все ж фіксуються відносно більші оптимальні значення глибини контролю – від 0,53 до 0,72. Це дозволяє заблокувати проходження дефектів на наступні стадії ТП і гарантувати меншу вихідну дефектність та витрати.

- [1] Бобало Ю.Я., Недоступ Л.А., Кіселичник М.Д. Якість, надійність радіоелектронної апаратури. Елементи теорії і методи забезпечення: монографія // Вид-во "Львівської політехніки", 2013.
- [2] Бобало Ю. Я., Кіселичник М.Д., Недоступ Л.А. Системний аналіз якості виробництва прецизійної радіоелектронної апаратури // Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 1996.
- [3] Бобало Ю. Я., Бондарев А.П., Кіселичник М.Д., Надобко О.В., Недоступ Л.А., Тарадаха П.В., Чирун Л.В., Шестакевич Т.В. Результати впровадження програмно-методичного комплексу моделювання та оптимізації процесів забезпечення якості РЕА на стадії її виготовлення // Східно-європейський журнал передових технологій, 1/3(61) (2013) 51-55 – ISSN 1729-3774.
- [4] Bobalo Yu., Bondariev A., Kiselychuk M., Nadobko O., Nedostup L., Taradakh P. Chyrun L., Shestakevich T. "Program-methodical complex for modeling and optimization of processes to ensure the quality at the manufacturing stage REE" // Visnik of the Lviv Polytechnic National University: "Radioelectronics and telecommunications", 738 (2012) 206-212 (In Ukrainian).
- [5] Bobalo Yu., Nedostup L., Nadobko O., Kiselychuk M., Lazko O. OPTAN – Software for Modelling, Analysis and Optimization of Electronic Devices Process Improvement // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 85(4) (2009) 59-61. – ISSN 0033-2097.
- [6] Кіселичник М.Д., Надобко О.В., Недоступ Л.А., Чирун Л.В., Шестакевич Т.В. Програмний комплекс для вирішення задач моделювання та оптимального керування процесами забезпечення якості радіоелектронної апаратури // матеріали конф. AUTOMATICS-2011, Львів, с. 394-395.
- [7] Готра З.Ю. Технологія електронної техніки: навч. посібник у 2 т., Т. 2. // Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2010.

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF MANUFACTURING BIPOLAR INTEGRATED MICROCHIPS

P. V. Taradakha

Lviv Polytechnic National University

Department of Theoretical Radioengineering and Radiomeasurements

© *Taradakha P. V.*, 2014

Technologies of creation of the formalized, mathematical and computer model of technological process of manufacturing a bipolar integrated microchips are given. Results of optimization of this process on criterion of a minimum summary manufacturing and operational costs are given also.

Key words: modeling and optimization of technological processes, optimization of the technological process of manufacturing a bipolar integrated microchips.

УДК 539.1+539.2