

Рис. 2. Розподіл тангентальних компонентів тензора напружень на поверхнях соснових дошок із температурами $T=20^{\circ}\text{C}$, відносними вологостями поверхонь 12 % та допустимими перепадами вологи $\Delta W_{\text{доп}}$

Висновки. Визначено залежності допустимих перепадів вологи від геометричних розмірів для пиломатеріалів з параболічним розподілом вологовмісту в радіальному напрямку анізотропії деревини хвойних порід. Проведено аналіз отриманих результатів розрахунку і на його основі встановлено, що у випадку сушіння штабеля пиломатеріалів однакової товщини, але різної ширини, потрібно використовувати такі технологічні режими, які орієнтовані на дошку найбільшої ширини.

Література

1. Поберейко Б.П. Визначення допустимих перепадів вологи у висушуваних пиломатеріалах із врахуванням міцності деревини / Б.П. Поберейко, Л.О. Флуд, Т.М. Гончар, І.М. Лисишин // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.16. – С. 332-337.

Поберейко Б.П., Флуд Л.О. Влияние геометрических размеров на допустимый перепад влажности и распределение полей напряжений для пиломатериалов хвойных пород

Изложены результаты исследования влияния геометрических размеров на допустимый перепад влажности для тангенциальных пиломатериалов с параболическим распределением влажностного содержания в радиальном направлении анизотропии древесины хвойных пород. Проведен анализ полученных результатов и на его основании установлено, что в случае гидротермической обработки штабеля пиломатериалов одинаковой толщины, но разной ширины, нужно использовать такие технологические режимы, которые ориентированы на доску наибольшей ширины. Поскольку, чем шире доска, тем меньшее значение допустимого перепада влажности.

Ключевые слова: допустимый перепад влажности, компоненты тензора напряжений, граница прочности.

Pobereyko B.P., Flud L.O. The Influence of Geometrical Dimensions on Permissible Differential Moisture Distribution and Stress Fields for Softwood Lumber

The results of investigations concerning the influence of geometrical dimensions on the permissible differential moisture distribution for the tangential lumber with parabolic distribution of moisture content in the radial direction anisotropy softwood are described. The analysis of the obtained results is made, and it is the basis to state that in case of a hydrothermal treatment of sawn timber of equal thickness but different widths the technological modes, which are focused on the board of the greatest breadth, are to be used. It is proved that the wider the board, the smaller the value permissible differential humidity.

Key words: permissible differential moisture, components of the stress tensor, tensile strength.

УДК 621.396.67

Проф. Ю.Ф. Зіньковський, д-р техн. наук;
проф. Б.М. Уваров, д-р техн. наук –
НТУ України "Київський політехнічний інститут"

ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ПРИ ДІЇ МЕХАНІЧНИХ ВПЛИВІВ

Розглянуто показники надійності електронної апаратури, які є результатом механічних напружень, що виникають під час експлуатації в елементах конструкції за дії зовнішніх вібраційних та ударних впливів. Міцність та витривалість елементів електронної структури, несівної конструкції та плати-основи завжди забезпечується, якщо параметри механічних впливів не перевищують значень, вказаних у нормативних документах на експлуатацію відповідної групи апаратури. Виявлено, що визначальними для надійності чарунок та мікрозбірок є напруження у виводах елементів електронної структури та їх паяних з'єднаннях. Запропоновано методи розрахунку витривалості й надійності виводів та паяних з'єднань. Створено програми автоматизованого проектування для розрахунків цих показників та представлено результати імітаційного моделювання.

Ключові слова: електронна апаратура, вібрації, удари, механічні напруження, виводи електрорадіоелементів, паяні з'єднання, надійність, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Сучасна цивілізація характеризується широким застосуванням виробів електронної апаратури (ЕА) – практично немає жодної галузі діяльності людини чи технічної, де б не використовувалися різноманітні електронні засоби. Разом з тим, ЕА – особливий вид технічних пристроїв, характерні ознаки яких роблять їх унікальними серед інших технічних об'єктів.

По-перше, пристрої ЕА мають дуже широкий діапазон характеристик та параметрів; по-друге, діапазон зовнішніх дестабілізуючих впливів, під дією яких повинна функціонувати ЕА, у сукупності для всіх її видів також значно ширший, ніж у більшості технічних пристроїв; по-третє, її конструкції визначаються високою геометричною та кінематичною точністю, а технологія мікроелектронних пристроїв взагалі унікальна, тому що розміри структурних елементів (резисторів, конденсаторів, напівпровідникових діодів і транзисторів) в інтегральних мікросхемах (ІМС) дорівнюють нині 0,1-0,3 мкм, і вже наближуються до десятків нанометрів. Істотно важлива особливість ЕА – велике тиражування, масовість її пристроїв.

Показники надійності для ЕА завжди є визначальними, а статистичний аналіз відмов ЕА показує, що відносна їх кількість у процесі експлуатації, яке викликана дією механічних і теплових факторів, досягає 70-85 %, причому на частку перших припадає не менш ніж половина випадків. Тому важливо визначити, які елементи конструкції ЕА є найбільш вразливими для дії вібраційних та ударних зовнішніх впливів. Наведено результати дослідження впливу вібраційних та ударних навантажень на елементи конструкції найбільш розповсюджених структурно-конструктивних модулів (СКМ) ЕА – чарунок та мікрозбірок (МЗб) за допомогою імітаційного моделювання.

Чарунка та мікрозбірка як структурний елемент РЕА. Основними СКМ першого рівня (СКМ1) будь-якого ЕА є чарунки та МЗб – функціонально та конструктивно закінчені модулі, елементи електронної структури (ЕЕС) та функціональні вузли (ФВ) яких розміщені на полімерній, металевій чи керамічній друкованій платі (ДП). У деяких ЕА у СКМ1 зосереджені всі електромагнітні процеси, відтворення яких і визначає функціональне призначення пристрою; на частку інших елементів конструкції, які беруть участь у підтримці зазначених

процесів, залишаються тільки забезпечення електричних зв'язків між модулями; СКМ1 може мати спеціальний каркас, системи тепловідводу та екранування.

У конструктивній ієрархії ЕА СКМ1 входять у склад конструкцій другого рівня – блочних каркасів (СКМ2), а останні – у склад конструкцій найвищого, третього рівня (СКМ3): шафи, стояка, контейнера, пульта. У загальному об'ємі всієї різноманітної ЕА СКМ1 становлять не менш ніж 70-85 % структурних елементів, тому можна вважати, що їх потрібно розглядати як основні об'єкти, для яких насамперед і потрібно визначати їх функціональні характеристики.

Звичайно захист від зовнішніх механічних та кліматичних дестабілізуючих впливів здійснюють конструкції другого та третього рівня, які обладнують системами вібро- й удароізоляції та підтримки необхідного температурного режиму. Але на елементи конструкції СКМ1 також впливають вібраційні та ударні навантаження, тому необхідно з'ясувати, які з цих елементів можуть вийти з ладу під дією цих впливів.

Можна виділити такі об'єкти в конструкції СКМ1, у яких необхідно дослідити виникнення механічних напружень, які можуть призвести до їх руйнування та появи відмови: елементи несівної конструкції СКМ1: ДП та каркас; електрорадіоеlementи (ЕРЕ) та ФВ; виводи ЕРЕ та ФВ; паяні з'єднання виводів.

Елементи електронної структури майже ніколи не виходять з ладу під дією механічних впливів, тому що вони самі розраховані на перевантаження значно більші, ніж можуть виникнути у СКМ1 під час експлуатації. Так, наприклад, ІМС серії K500 допускають вібраційні перевантаження до 40 g, ударні – до 1000 g, для інших ІМС вони менші (вібраційні – 20 g, ударні – 150 g). Вібраційні перевантаження, що можуть виникнути на об'єктах різних груп ЕА (наземної, морської, авіаційної та ракетної), згідно з вимогами нормативних документів, не перевищують 10 g, ударні – 150 g.

Елементи несівних конструкцій СКМ1 (каркаси, панелі) мають значні запаси міцності та витривалості відносно напружень, що виникають у них під час дії вібрацій та ударів. Практика експлуатації ЕА показує, що відмов таких елементів за нормованих значень механічних дестабілізуючих впливів не буває.

Також достатньо міцними є пластини-основи чарунок та МЗб, про що свідчать результати експериментальних досліджень та імітаційного моделювання [1]. У реальній конструкції СКМ1 на частоті власних коливань плати, її деформації, напруження у матеріалі, отже, й на показники надійності впливають:

- розміри плати та механічні характеристики матеріалу;
- способи закріплення сторін плати чи її окремих точок;
- розміщення на платі ЕЕС та їх маси;
- характер механічних впливів (вібраційних та ударних).

Врахування впливу всіх цих параметрів при розрахунках міцності та витривалості ДП потребує великої кількості обчислювальних процедур, тому таку роботу варто виконувати за допомогою систем автоматизованого проектування (САПР) чи їх програмних модулів. Для розрахунку деформацій та міцності друкованих плат (ДП) створено програмний модуль (програма) Plata075, описаний у [2]. Результати імітаційного моделювання за допомогою цієї програми показали, що міцність та витривалість ДП за нормованих значень механічних дестабілізуючих впливів достатня.

Детальний аналіз показує, що об'єктами, міцність та витривалість яких може бути визначальними для надійності СКМ1, є виводи та паяні з'єднання останніх. Досліджено показники міцності, витривалості та надійності виводів ЕЕС та їх паяних з'єднань.

Міцність та витривалість виводів ЕЕС. Деформації друкованої плати призводять до деформацій виводів "навісних" елементів СКМ1 – ЕРЕ та ФВ, а ще й до виникнення напружень у їх паяних з'єднаннях.

Переважає більшість ЕРЕ, що встановлюються на ДП – корпусні ІМС, а на платах МЗб – безкорпусні мікросхеми; МЗб, водночас, встановлюють на ДП. Електричне з'єднання схем та збірок з платою здійснюється різної форми виводами, які припаюють до провідників друкованого малюнка.

Під час експлуатації за вібраційних та ударних впливів основна плата, а також і плати мікрозбірок, деформуються, що призводить також і до деформацій виводів ІМС, як наслідок – виникнення у них напружень, які можуть загрожувати цілісності виводу. Виводи більшості ЕЕС – це прямі та криві стрижні, а напруження в них, що виникають як результат деформацій їх кінців, можна розрахувати методами теорії міцності [3].

На перший погляд, абсолютні деформації виводів малі (іноді десятки частки міліметра), але порівняно з розмірами самих виводів відносні деформації можуть бути настільки великими, що це призведе до руйнації виводу.

На міцність та витривалість виводів ІМС та МЗб впливають деформації основної плати – лінійні зміщення та повороти її поверхні у місці кріплення виводів ІМС чи МЗб. Самі корпуси ІМС та МЗб можливо розглядати як абсолютно жорсткі тіла – перші внаслідок малих, порівняно з основною платою, розмірів, а других – тому, що їх корпуси дійсно мають жорсткість, значно більшу, ніж в основної плати (корпуси МЗб часто виготовляють з металів та кераміки).

Під час вібраційних та ударних впливів кінці виводів ІМС, з'єднані з провідниками друкованого малюнка, зміщуються відносно корпусу ІМС, й таких зміщень два види – лінійні δx , δy , кутові $\delta \theta_x$ та $\delta \theta_y$.

Прогини плати у СКМ1 найчастіше виникають від кінематичного збурдження зміщенням опор z_0 , для якого диференціальне рівняння деформацій має такий вигляд [4]:

$$m \frac{\partial^2 w(x, y, \tau)}{\partial \tau^2} + D(1 + j\gamma) \left[\frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, \tau)}{\partial y^4} \right] = m \frac{\partial^2 z_0(\tau)}{\partial \tau^2},$$

де: $w(x, y, \tau)$ – динамічні прогини; m – зведена маса, D – циліндрична жорсткість пластини; γ – коефіцієнт механічних втрат матеріалу; j – уявна одиниця; τ – час. Знайдені з цього рівняння прогини $w(x, y)$ дають можливість знайти кутові деформації:

$$\delta \theta_x = \frac{\partial [w(x, y)]}{\partial x}; \quad \delta \theta_y = \frac{\partial [w(x, y)]}{\partial y},$$

а після них – лінійні деформації у площині плати: $\delta x = 0,5h\delta \theta_x$; $\delta y = 0,5h\delta \theta_y$, де h – товщина плати.

Внаслідок лінійних та кутових деформацій виводів у них виникають напруження, які можуть призвести до руйнування виводу й появи відмови. Під час

розрахунку міцності виводів передусім необхідно врахувати напруження σ від згинальних моментів – вони найбільші, а останні виникають як результат зміщень δx , δy , δz та $\delta \theta_x$, $\delta \theta_y$.

Імовірність безвідмовної роботи деталей при механічних навантаженнях, згідно зі стандартами [4,5] за моделлю DM-розподілу (дифузійного монотонного) визначають функцією:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du.$$

$$\text{Відносний проміжок часу безвідмовної роботи } x: x = K_p \frac{N_c}{N_0} \left[\frac{\sigma}{\sigma_{-1}} \right]^m,$$

де: N_c – кількість циклів навантаження; N_0 – базове число циклів (абсциса точки зламу кривої втоми), за якого визначена межа витривалості σ_{-1} ; m – показник кривої втоми матеріалу; K_p – коефіцієнт режиму навантаження елемента конструкції.

Якщо конструкція складається з k елементів, і відмова будь-якого з них призведе до виходу з ладу всього пристрою, загальну ймовірність безвідмовної роботи необхідно розраховувати за формулою

$$P(\tau) = \prod_{i=1}^k P_i^{st}(\tau),$$

де τ – проміжок часу, для якого визначається $P(\tau)$.

Для розрахунків витривалості виводів створено програму ContConcl12 [2], яка дає змогу розраховувати міцність та витривалість виводів до 50 ІМС у стандартних корпусах, встановлених на платі. Вхідними даними для розрахунків є розміри плати, характеристики її матеріалу, способи її закріплення – так, як й у програмі Plata075.

У програму можуть вводитися координати встановлення найбільш розповсюджених ІМС у прямокутних корпусах трьох типів:

- виводи йдуть вздовж одної довгої сторони корпуса (корпуси типу 11 з числом виводів 3-18);
- виводи йдуть в один чи у два ряди вздовж двох довгих сторін корпуса (корпуси типів 21 та 41 з числом виводів 8-84);
- виводи йдуть в один ряд вздовж сторін квадратного корпуса (корпуси типів 42-45 з числом виводів 24-256).

За цією ж схемою можна розрахувати міцність виводів будь-яких ЕЕС – резисторів, конденсаторів, трансформаторів тощо. Для кожного ЕЕС необхідно ввести параметри виводів: n_x – число рядів виводів у напрямку осі X ; n_y – число рядів виводів у напрямку осі Y (наприклад, для конденсатора з двома виводами, спрямованого вздовж осі X , $n_x = 1$, $n_y = 2$); s – товщину; h – висоту; l – довжину.

Як приклад наведено результати розрахунків витривалості та надійності для чарунки, склотекстолітова плата якої має розміри 160×100×2 мм; на неї діють вібрації з частотою $f_s = 50$ Гц, амплітудою $a_s = 0,3$ мм (вібраційні перевантаження $n_s = 3$ g), удари з довжиною імпульса $\tau_y = 10$ мс, ударне перевантаження $n_y = 10$ g. Тривалість дії вібрації 1,5 год, число ударних імпульсів 12000.

Плата защемлена лівою та нижньою сторонами, інші сторони вільні. Схему розташування ІМС наведено на рис. 1, а одержані розрахунком результати – на рис. 2.

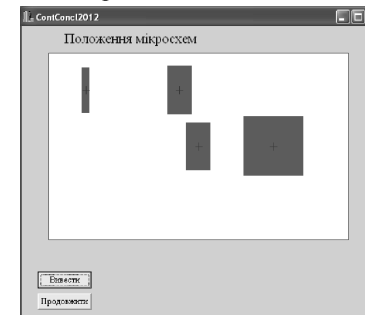


Рис. 1. Схема розташування ЕЕС на платі

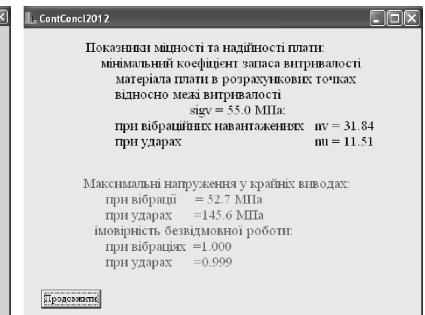


Рис. 2. Результати розрахунку

Як видно з результатів розрахунків, коефіцієнти запасу матеріалу плати досить великі; у виводах якоїсь ІМС напруження при ударах наближаються до допустимих, тобто вони й визначають надійність всієї чарунки.

Міцність та витривалість паяних з'єднань виводів. Аналіз показує, що у паяних з'єднаннях виводів можуть виникнути деформації, які порушують електричний контакт виводу та друкованого провідника.

Паяні з'єднання виводів ЕЕС з елементами друкованих провідників плати під час вібрацій та ударів також деформуються, під дією виникаючих напружень можуть втратити свою цілісність та викликати відмову у функціонуванні ЕА. Механічні характеристики припоїв значно нижчі, ніж у матеріалів провідників друкованого малюнка та виводів; крім того, припої пластичніші, тому під час вібраційних та ударних впливів деформації плати можуть привести до перевищення межі текучості припою та його пластичних деформацій.

За способом приєднання виводів до провідників друкованого малюнка самі паяні з'єднання можливо поділити на три види: у металізованому отворі (рис. 3).

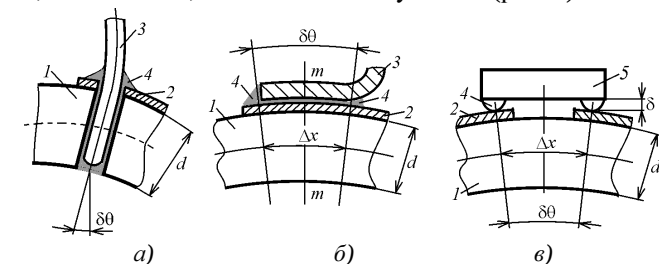


Рис. 3. Види паяних з'єднань:

а) у металізованому отворі; б) нахлесточне; в) стовпчикове

Паяних з'єднань у кожному СКМ може бути декілька сотень (а то й тисяч), тому для розрахунку їх надійності доцільно використовувати програму SoldCont12 [2], створену на базі програми Plata075; за методикою останньої роз-

раховуються деформації плати-основи в місцях розташування виводів та їх паяних з'єднань.

Структура, алгоритм та програмні модулі обох програм – ContConcl12 та SoldCont12 – ідентичні, відрізняються тільки модулями розрахунків міцності та надійності: для першої – виводів, для другої – паяних з'єднань.

Програма SoldCont12 визначає імовірність безвідмовної роботи СКМ1, враховуючи напружений стан паяних з'єднань і тому в її вхідному файлі SoldCont.dat повинні бути задані механічні характеристики припаю, розміри паяного з'єднання, різниця робочої та нормальної температур, яка викликає додатковий зсув шарів з'єднання, параметри вібраційних та ударних навантажень, а також тривалість дії вібрації (годин) та кількість ударних імпульсів.

У процесі роботи з програмою проектувальник вводить розміри корпусів ЕЕС, кількість виводів, види паяних з'єднань (у металізованому отворі чи нахлесточне), геометричні параметри з'єднань.

Для кожного ЕЕС необхідно ввести кількість виводів, для кожного з'єднання необхідно ввести його довжину l_v , товщину d_v , товщину шару припаю δ . Програма розраховує відносні деформації сусідніх виводів, а після них – дотичні напруження τ у кожному з паяних з'єднань та імовірність його безвідмовної роботи $P_i(x)$.

Я приклад наведено результати розрахунків витривалості та надійності паяних з'єднань для такої ж плати, як у попередньому прикладі; механічні дестабілізуючі впливи такі ж. Плата закріплена у чотирьох точках біля вершин. Схему розташування ІМС на платі наведено на рис. 4.

Результати розрахунку – показники міцності та надійності матеріалу плати, максимальні напруження у з'єднаннях, імовірність безвідмовної роботи для плати та з'єднань показані на рис. 5; у файл результатів будуть також записані всі вхідні дані, одержані значення власної частоти плати, вертикальних прогинів та перевантажень для заданих координатних точок плати.

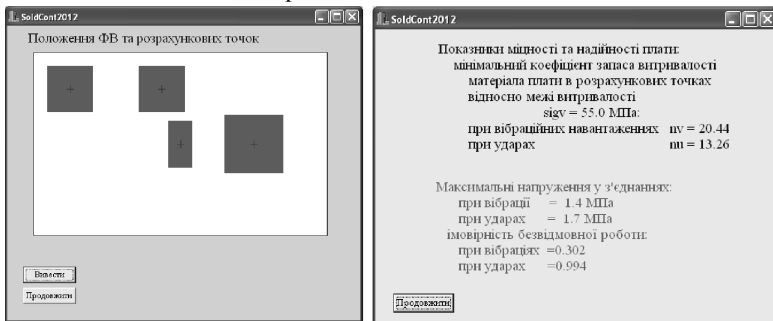


Рис. 4. Введення розмірів виводів ЕЕС

Рис. 5. Результати розрахунків та паяних з'єднань напружень та надійності плати й паяних з'єднань

Як видно з результатів, найбільш слабкими елементами СКМ1 є паяні з'єднання: при вібраційних впливах імовірність безвідмовної роботи всього $P(\tau) = 0,3$, що недостатньо для РЕА, до якого можуть пред'являтися високі вимоги до надійності. Останній функціональний показник можливо покращити, якщо застосувати більш міцний припай чи змінити конструкцію СКМ1.

Висновки:

1. Визначені конструкційні фактори, що впливають на надійність структурно-конструктивних модулів електронних апаратів – чарунок та мікробірок – під час дії дестабілізуючих механічних впливів.
2. Визначено, що істотний вплив на показники надійності мають механічні напруження у виводах елементів електронної структури та їх паяних з'єднаннях.
3. Запропоновано методику розрахунків механічних напружень у виводах елементів електронної структури електронного апарата та визначення показників надійності з врахуванням напружень у всіх виводах.
4. Запропоновано методику розрахунків механічних напружень у паяних з'єднаннях виводів та визначення показників надійності з врахуванням напружень у всіх з'єднаннях.
5. Створено програмні модулі систем автоматизованого розрахунку міцності, витривалості, деформацій та надійності виводів елементів електронної структури, паяних з'єднань виводів.

Література

1. Уваров Б.М. Надійність конструкції чарунок радіоелектронної апаратури за зовнішніх механічних впливів / Б.М. Уваров // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – Сер.: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – К.: Вид-во НТУУ "КПІ". – 2009. – Вип. 39. – С. 91-98.
2. Уваров Б.М. Проектування та оптимізація механостійких конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками / Б.М. Уваров, Ю.Ф. Зиньковський. – К.: Вид-во "Корнійчук", 2011. – 248 с.
3. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К.: Вид-во "Наук. думка", 1988. – 736 с.
4. Вайнберг Д.В. Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин / Д.В. Вайнберг. – К.: Вид-во "Будівельник", 1973. – 488 с.
5. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://document.ua/nadiinist-tehniki.-termini-ta-viznachennja-nor8506.html>
6. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. [Електронний ресурс]. – Доступний з <http://index.net.ua/ua/shop/bibl/500/doc/1408>

Зиньковский Ю.Ф., Уваров Б.М. Факторы, определяющие надёжность электронной аппаратуры при действии механических факторов

Рассмотрены показатели надёжности электронной аппаратуры, являющиеся результатом механических напряжений, возникающих во время эксплуатации в элементах конструкции при действии внешних вибрационных и ударных факторов. Прочность и выносливость элементов электронной структуры, несущей конструкции и платы-основы всегда обеспечивается, если параметры механических факторов не превышают значений, указанных в нормативных документах на эксплуатацию соответствующей группы аппаратуры. Выяснено, что определяющими для надёжности ячеек и микросборок являются напряжения в выводах элементов электронной структуры и их паяных соединениях. Предложены методы расчета выносливости и надёжности выводов и паяных соединений. Разработаны программы автоматизированного проектирования для расчетов этих показателей и представлены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: электронная аппаратура, вибрации, удары, механические напряжения, выводы электрорадиоэлементов, паяные соединения, надёжность, имитационное моделирование.

Zinkovsky Yu.F., Uvarov B.M. Agents Determining the Reliability of Electronic Equipment under the Influence of Mechanical Factors

Some reliability indicators of electronic equipment which are the result of mechanical tensions occurring during exploitation in structural elements under the influence of external vib-

ration and shock factors are considered. Strength and endurance of the electronic structure elements, the support structure and the base board are proved to be always provided if the parameters of mechanical factors do not exceed the values specified in the regulations for the operation of the specified equipment group. Determining for the reliability of cells and micro assemblies are found to be both electronic structure outputs and their solder joints tensions. The methods of endurance calculation and reliability of outputs and solder joints are designed. Programs have been developed for computer-aided design calculations of these indicators. Some simulation results are presented.

Key words: electronic equipment, vibration, shock, mechanical tension, electro-radio elements outputs, solder joints, reliability, simulation.

УДК 330.322.5(477)

Доц. Ю.В. Войцеховська, канд. екон. наук;

доц. А.О. Мавріна, канд. екон. наук; ст. викл. Г.Р. Копець, канд. екон. наук –
НУ "Львівська політехніка"

ІННОВАЦІЙНІ АСПЕКТИ ОНОВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Розглянуто проблеми економічної оцінки та вибору варіантів інноваційного оновлення технологічного обладнання виробничих систем. Поставлено завдання досягнути в процесі інноваційного розвитку максимальних результатів за певних інвестиційних витрат. Доведено, що для визначення пріоритетності реалізації інновацій доцільно використовувати параметр, який характеризує вартість капіталу, необхідного для заміщення одиниці поточних витрат. Запропоновано аналітичний вираз визначення цього параметра за показниками діючої та інноваційної техніки. Здійснено інтерпретацію розробленого методологічного підходу на прикладі конкретного технологічного процесу виготовлення пластмасових деталей, який включає три види операцій (вирізка заготовки, оброблення, свердління). Обґрунтовано висновок, що оптимальна послідовність оновлення обладнання забезпечує найбільш ефективну динаміку інноваційного розвитку виробництва.

Ключові слова: інноваційний розвиток, технологічне обладнання, оптимізація, виробничі ресурси, інвестиції, заміщення праці капіталом, ефективність.

Завдання інноваційного розвитку полягає в тому, щоб за певних інвестиційних витрат досягнути максимальних результатів, зокрема: найбільшого рівня прибутку, продуктивності праці, економії окремих видів витрат тощо. Якщо йдеться про прибуток, то останній тісно пов'язаний зі собівартістю продукції. У загальному аналітичному вигляді цей показник можна записати так:

$$C = c + \sum_{i=1}^n c_i r_i, \quad (1)$$

де: c – умовно-постійні витрати; r_i – витрати i -го виду виробничого ресурсу; c_i – ціна одиниці i -го виду ресурсу.

Один із ефектів інноваційного розвитку полягає в тому, що внаслідок впровадження інноваційних заходів або проектів одні види ресурсів заміщують інші. Наприклад, введення більш продуктивного устаткування при виконанні однієї ж і тієї самої виробничої програми приводить до абсолютного вивільнення працюючих. При цьому можуть виникнути також зміни в споживанні енергетичних ресурсів. Внаслідок характерними є зміни собівартості продукції і відповідно прибутку. Через це важливою є постановка і розв'язання задачі оптимального програмування інноваційного процесу.

Для спрощення аналізу основними складовими собівартості, які змінюються у процесі інноваційного розвитку, є три види виробничих ресурсів – виробничі фонди, кількість працюючих, енергетичні витрати. У принципі, збільшення кількості цих ресурсів не є складним.

Для цих припущень формулу (1) записано так:

$$C = c + a_\phi \Phi + c_1 n + c_2 r, \quad (2)$$

де: Φ – вартість виробничих фондів; n – чисельність працюючих; r – енергетичні витрати; a_ϕ – норма амортизаційних відрахувань; c_1 – заробітна плата одного працюючого; c_2 – ціна одиниці енергетичного ресурсу. Таким чином у спрощеному варіанті основними складовими витрат на виробництво продукції, котрі змінюються внаслідок реалізації заходів інноваційного характеру, є амортизація, оплата праці та енергетичні витрати.

Припущено, що діючі фонди (всі або їх частина) замінюються новими, більш прогресивними і вищого технічного рівня. При цьому варто очікувати зміни у кількості працюючих та енергетичних витратах. Проаналізовано варіант сталих обсягів продукції.

Тоді нова собівартість продукції становитиме величину, що дорівнює:

$$C' = c + a_\phi \Phi' + c_1 n' + c_2 r'. \quad (3)$$

У цьому балансовому рівнянні штрихами позначено нові величини досліджуваних факторів. Відповідно зміна собівартості продукції становитиме:

$$\Delta C = C - C' = a_\phi (\Phi - \Phi') + c_1 (n - n') + c_2 (r - r'). \quad (4)$$

Величина ΔC характеризує, як правило, зменшення собівартості продукції. Представлено цю величину у вигляді приростів:

$$\Delta C = a_\phi \Delta \Phi + c_1 \Delta n + c_2 \Delta r. \quad (5)$$

Якщо досліджувати кількість працюючих, що пов'язана з показником продуктивності праці, тоді отримано:

$$\Delta C = \Delta \Phi \left(c_1 \frac{\Delta n}{\Delta \Phi} - a_\phi \right), \quad (6)$$

де величина $\Delta \Phi$ – додатний приріст фондів.

Результати, що будуть отримані далі, легко узагальнюються під час врахування енергетичних та інших видів витрат. Варто зауважити, що відношення $L = \frac{\Delta \Phi}{\Delta n}$ характеризує вартість виробничих фондів, які потрібні для заміщення праці одного працюючого, тобто для його вивільнення. Мається на увазі, що обсяги продукції залишаються одними і тими ж у процесі вивільнення. Цей ефект досягається завдяки впровадженню більш продуктивної нової техніки.

Зміна собівартості з використанням параметра L може бути визначена за формулою

$$\Delta C = \Delta \Phi \left(\frac{c_1}{L} - a_\phi \right). \quad (7)$$

Отже, зниження собівартості продукції при впровадженні більш продуктивного устаткування залежить від його вартості та таких трьох параметрів, як: