

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА РОБОТУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЛАТ РЕА

В роботі досліджувався вплив вібрацій на функціональні плати, визначено власні частоти коливань розрахунковими та експериментальними методами для знаходження резонансів, щоб уникати роботи апаратури у цих режимах.

Ключові слова: вібрація, функціональна плата, власна частота коливань.

L. O. KOVTUN, V. P. ROIZMAN, O. K. JANOVITSKIY
Khmelnytsky National University

STUDY OF VIBRATION INFLUENCE ON WORK OF FUNCTION CARDS OF REA

Abstract – circuit boards, walls of structure, and some other structural elements of products of REA in operating conditions not only themselves may be influenced by vibration and shock loads, but also to transfer these loads are mounted on these blocks, and chips electric radioelements. If wages and other supporting elements experience resonant vibrations, these dynamic loads are increasing many times and can lead to breakdowns or failures due to REA deviation parameters are located on blocks and elements beyond the committed specifications. The work is dedicated to finding the frequencies of the calculated and experimental methods and the possible resonances to avoid malfunction of these regimes.

Analysis of the research showed that the range of operating frequencies and circuit boards with complex shape fluctuations, indicating that the strain most boards and modules installed on them.

Keywords: vibration, functional plata, the natural frequency of oscillation.

Вступ

Функціональні монтажні плати, днища шасі, стінки корпусів і деякі інші конструктивні елементи виробів РЕА в експлуатаційних умовах не тільки самі можуть перебувати під впливом вібраційних та ударних навантажень, але і передавати ці навантаження на змонтовані на них блоки, мікросхеми та електрорадіоелементи. Якщо плати та інші несучі елементи піддаються впливу резонансних коливань, наприклад в системах керування процесами в легкій промисловості [6], то ці динамічні навантаження зростають багаторазово і можуть призвести до поломок або відмов РЕА із-за відхилень параметрів розташованих на них блоків та елементів за межі, що допущені технічними умовами.

Тому особлива увага повинна бути приділена знаходженню власних частот коливань розрахунковими і експериментальними методами, а, отже, і можливих резонансів, щоб уникати роботи апаратури у цих режимах.

Зазвичай, при розрахунках монтажні плати, стінки корпусів та інші плоскі прямокутні конструкції РЕА, розглядають у вигляді еквівалентних їм однорідних прямокутних пластин, теорія коливань яких досить складна, об'ємна, сповнена спрощених припущень і не є завершеною.

Тому нижче ми наведемо лише елементи цієї теорії та основні формули для розрахунку власних частот вільних поперечних коливань прямокутних пластин, без докладних висновків цих формул.

1. Елементи теорії коливань прямокутних пластин

Пластинкою будемо називати геометричний об'єкт, у якого товщина H не менше, ніж у п'ять разів менше довжини і ширини (рис. 1).

Виберемо прямокутну систему координат, в якій осі X і U лежать в серединній площині пластинки, а вісь Z перпендикулярна цій площині.

Назвемо серединною площиною площину, що рівновіддалена від сторін пластинки: вона ділить товщину пластинки H навпіл. Саме в цій площині і лежать осі координат X і U .

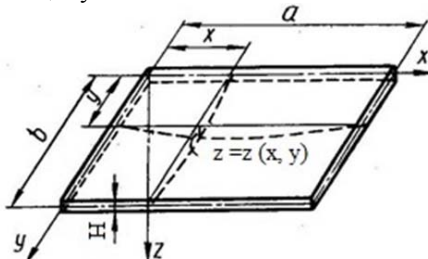


Рис. 1. Умовне зображення пластинки

Під дією поперечного рівномірного інерційного навантаження, пластинка згинається і серединна площина перетворюється на серединну пружну поверхню, яка ділить пластинку на розтягнуту і стиснуту зони, подібно до того, як в балках нейтральні волокна і нейтральна вісь перетину.

Як і для балок, вертикальні переміщення точок серединної поверхні називаються прогинами пластинки і позначаються буквою Z . Вони обираються малими в порівнянні з товщиною пластинки H .

Як і для балок, з точністю до другого порядку можна вважати, що волокна серединної поверхні при деформації (вигині) пластинки не змінюють своєї довжини, тобто подібно нейтральній осі і нейтральним волокнам серединна поверхня є нейтральною поверхнею і всі точки серединної поверхні при деформації отримують переміщення в напрямку осі Z .

Подібно гіпотезі плоских перетинів в теорії вигину балок в теорії пластинок приймається кінематична гіпотеза чи гіпотеза прямих нормалей, відповідно до якої площини, нормальні до серединної

площини пластинки до її деформації залишаються нормальними до неї і при деформації.

Картина деформацій пластинки схожа на картину деформацій балки, але пластинка деформується в двох площинах – XZ і YZ одночасно.

Точки, що належать серединній площині з точністю до малих другого порядку отримують тільки вертикальні переміщення, а саме прогини Z, а точки віддалені від серединної площини по вертикалі на деякій відстані по вертикалі отримують не тільки вертикальні переміщення, а й горизонтальні, які можуть бути розкладені на переміщення – в напрямку осі X і в напрямку осі Y.

Згідно з гіпотезою прямих нормалей, кожна з нормалей до серединної площини при деформації останньої переміщується в просторі як абсолютно жорсткий відрізок, рівний товщині пластинки H. Тобто, щоб визначити положення всіх точок деформованої пластинки потрібно в кожній точці серединної поверхні відновити перпендикуляри довжиною H/2.

Таким чином, якщо отримано рівняння серединної поверхні, то знайдені положення всіх точок пластинки, а значить, і за законом Гука можна знайти всі напруги і вирішувати питання міцності із застосуванням теорій міцності.

Таким чином, основним питанням є знаходження функції, тобто основного рівняння для пластинки.

Вивід цього рівняння ґрунтується на викладених вище гіпотезах, досить громіздкий і його можна, знайти у відповідній літературі, наприклад [1].

Це рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{dt^2} = \frac{P}{D}. \quad (1)$$

Або ввівши [1] гармонійний оператор, званий оператором Лапласа

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2)$$

і бігармонійний оператор

$$\Delta \Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}. \quad (3)$$

Отримують основне рівняння деформацій пластини у вигляді

$$\Delta \Delta z + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{dt^2} = \frac{P}{D}, \quad (4)$$

де z, см – прогин; P, кг/см² – інтенсивність розподіленої по поверхні пластинки навантаження; γ, кг/см² – об'ємна вага матеріалу пластинки; g, кг/см² – прискорення сили тяжіння; H, см – товщина пластинки; $D = EH^2 / (12(1 - \mu^2))$ кг•см/см – циліндрична щільність; E – модуль пружності матеріалу пластинки; μ – коефіцієнт Пуансон. Окремі випадки цього рівняння описують більш конкретні питання.

Наприклад, якщо P є функцією часу t, то рівняння (1) описує вимушені поперечні коливання пластинки від змінного за часом розподіленого навантаження, а якщо P не залежить від часу, то вільні, тобто власні поперечні коливання, від постійного навантаження, а якщо P = 0, то отримують рівняння

$$\Delta \Delta w + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{dt^2} = 0, \quad (5)$$

описує власні коливання ненавантаженої пластинки.

У задачі про вільні коливання навантаженням є сила інерції $m \cdot a = \frac{\gamma H}{g} \frac{\partial^2 z}{dt^2} = -m \frac{\partial^2 z}{dt^2}$, де a – прискорення, а $m = \gamma H / g$ погонна маса.

Підставивши цей вираз в (5), отримаємо

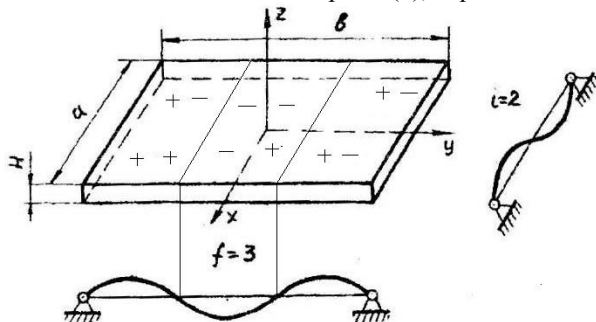


Рис. 2. Розрахункова схема пластини і можливі форми її коливань

$$m \frac{\partial^2 z}{dt^2} + D \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0. \quad (6)$$

Розв'язок рівняння (6) для випадку, коли всі краї пластини вільно сперті, буде мати вигляд

$$Z(x, y, t) = W(x, y) e^{i\omega_0 t}. \quad (7)$$

Амплітудна функція W(x, y) звана власною формою коливань пластини, визначається виразом

$$W(x, y) = A_i f \sin(i\pi x / a) \cdot \sin(f\pi y / b), \quad (8)$$

де a, b - довжина і ширина пластини; i, f - число півхвиль синусоїди в напрямку осей X і Y.

Залежність проілюстрована на рис. 2 – будь-яка пряма паралельна осі X, перетворюється на синусоїду, яка містить в інтервалі (0, a) і напівхвилю (на рис. 2 $i = 2$), а пряма, паралельна осі Y - f напівхвилю (на рис. 2 $f = 3$).

Вузловими лініями плата розбита на 6 ділянок та знаки на ділянках показують напрямок вигину ділянок у момент дослідження: знак «+» означає вигин вгору, а знак «-» – вниз, причому знаки, показані зліва вигин у площині ZY, а праворуч – в площині ZX.

Можна побачити, що цей розв'язок задовольняє граничним умовам на контурі

$$z = 0 \quad \text{і} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0 \quad \text{і} \quad x = a;$$

$$z = 0 \quad \text{і} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad \text{при} \quad y = 0 \quad \text{і} \quad y = b,$$

які означають рівність нулю прогинів і згинальних моментів на краях (опорах) пластини.

Підставляючи розв'язок в (6), отримуємо

$$\left(\frac{i\pi}{a}\right)^4 + 2\left(\frac{i\pi}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{f\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{f\pi}{b}\right)^4 = \omega_0 \frac{\rho H}{D}, \tag{9}$$

$$\omega_0 = \pi^2 \left[(i/a)^2 + (f/b)^2 \right] \cdot \sqrt{D/\rho H}, \tag{10}$$

де ρ – щільність матеріалу.

Розглянутий метод визначення власної частоти коливань застосуємо і для випадку, коли прямокутна плата вільно оперта на двох протилежних краях, що в основному відповідає найбільш часто застосовуваному способу закріплення функціональних плат (ФП) в Т-подібних напрямних (в поверхових конструкціях), при наближеному вирішенні диференціальних рівнянь.

У тих випадках, коли умови закріплення пластин не задовольняють таким вимогам, застосовують наближені методи Релея, Релея-Рітца, Бубнова-Гальоркіна та ін.

Так, наприклад, з рівнянь коливань прямокутних пластин по методу Релея-Рітца можна отримати наступний вираз для власних частот коливань [2, 3]

$$\omega_0 = \frac{C \cdot H}{a^2 \cdot 10^4} \Gamma_{\text{ц}}, \tag{11}$$

де H - товщина пластини; a - довжина пластини; C - частотна постійна:

$$C = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\mu^2) \cdot \rho}}, \tag{12}$$

де g – прискорення вільного падіння; ρ – щільність матеріалу; a – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення сторін пластини.

Значення частотної постійної C , знайденої на основі методу Релея-Рітца з урахуванням різних варіантів закріплення плат (рис. 3), наведено в табл. 1. Коефіцієнт a узятий із розрахунку пластин І. А. Орловської.

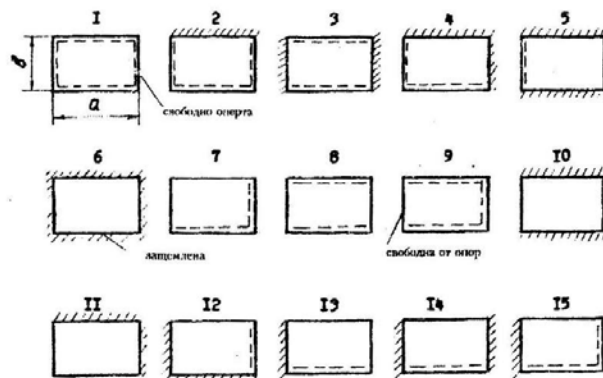


Рис. 3. Схеми закріплення пластини

Якщо пластина виготовлена не зі сталі (як, наприклад, функціональна плата), то у вираз (11) вводиться поправочний коефіцієнт на матеріал:

$$K_M = \sqrt{\frac{E \cdot \rho_c}{E_c \cdot \rho}}, \tag{13}$$

де E та E_c – модулі пружності відповідно матеріалу плати і сталі; ρ і ρ_c – щільність матеріалу і сталі, які застосовуються.

Таблиця 1

Схема закріплення пластини	Значення частотної постійної С							
	Відношення сторін пластини a/b							
	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4
1.	25	29	47	76	117	170	234	375
2.	25	31	56	101	165	245	347	603
3.	54	56	69	93	131	181	244	406
4.	38	42	65	107	170	251	351	607
5.	33	44	76	139	230	349	494	866
6.	54	48	86	145	234	352	497	868
7.	2	4	8	13	17	21	25	34
8.	8	16	38	70	112	165	230	394
9.	4	10	28	58	99	151	216	380
10.	10	19	58	124	217	336	479	855
11.	9	11	18	28	43	62	85	144
12.	10	16	42	88	152	134	335	591
13.	9	10	13	18	23	28	33	43
14.	5	16	56	122	215	335	481	853
15.	5	12	40	86	150	233	333	590

Якщо функціональна плата, яка несе на собі радіоелементи, рівномірно навантажена, то у вираз (11) вводять поправочний коефіцієнт на вагу елементів:

$$K_B = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_3 / Q_n}}, \quad (14)$$

де Q_3 – вага елементів розміщених на платі; Q_n – вага плати.

З урахуванням наведених поправок, формулу для наближеного визначення 1-ї власної частоти коливань рівномірно навантаженої функціональної плати можна записати у вигляді:

$$\omega_0 = \frac{K_M \cdot K_B \cdot C \cdot H}{a^2} \cdot 10^4 \text{ Гц.} \quad (15)$$

Наведемо у якості прикладу, запозичені з [3] значення поправочного коефіцієнта K_M для деяких матеріалів (табл. 2) і коефіцієнта K_B на вагу елементів, рівномірно розподілених по пластині (табл. 3).

Таблиця 2

Значення поправочного коефіцієнта k_M для деяких матеріалів	
Матеріал	k_M
Сталь	1
Молібден	1,1
Сплави магнію	0,97
Алюмінієві сплави	0,95
Титан	0,93
Гетинакс	0,54
Епоксидна смола	0,52
Фенольна смола	0,47

Таблиця 3

Значення поправочного коефіцієнта k_M для різних співвідношень ваги елементів і пластини								
Оз/Оп	1	2	4	6	8	10	12	24
k_M	0,71	0,6	0,44	0,38	0,33	0,3	0,28	0,2

Однак, на практиці власні частоти коливань плат часто не збігаються з величинами, знайденими розрахунковим шляхом в силу ряду інших причин: наявності навісного монтажу на платах і нерівномірного його розподілу за площею; наявності струмопровідних доріжок, що призводить до зміни характеристик жорсткості плати; неможливістю розрахунку зусиль затягування при закріпленні плат в блоці і т. п.

Крім того, через зв'язаність коливань, при резонансах одні елементи втягують в коливання інші (значить, змінюються і маси, і жорсткості і т. п.). Отже, знайдені розрахунковими методами значення власних частот коливань матимуть наближене значення, а більш точні їх значення можна отримати лише експериментальними методами.

2. Визначення форм і частот коливань плат та інших виробів експериментальними методами

Експериментальне визначення динамічних характеристик друкованих плат зазвичай проводиться на віброустановці і вимагає певної навички, великих витрат електричної енергії, при цьому оператор знаходиться під впливом електромагнітних полів і шумів різної інтенсивності.

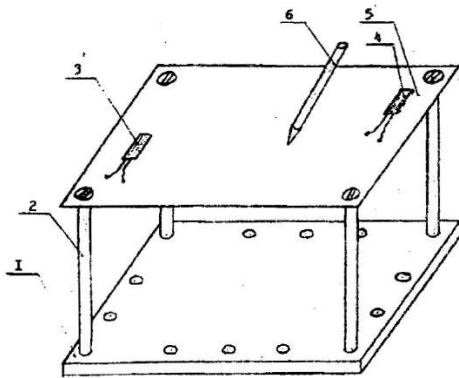


Рис. 4. Установка для експериментального визначення форм і частот коливань плат

Нами розроблена експериментальна установка для визначення форм і частот коливань друкованих плат та інших деталей РЕА. Установка (рис. 4) складається з масивної підстави 1 і чотирьох (або шести) стійок 2.

Випробувана плата 5 чи інша деталь радіоелектронного виробу, яку можна віднести до пластин, кріпиться до стійок, або встановлюється в напрямні таким же чином, як і в експлуатаційних умовах.

Для створення механічних коливань плати використовується зворотний п'єзоелектричний ефект [4]. До п'єзокристалу 3, який приклеюється в зручному місці на платі (краще з нижньої сторони) підводиться синусоїдальна напруга від звукового генератора. Для визначення резонансних частот коливань використовується п'єзокристал 4, приклеєний до плати (прямий п'єзоелектричний ефект). Своїми виводами цей кристал приєднується до електронного осцилографу та електронного частотоміру (цифровому).

Про резонанси плати судять за максимальним значенням амплітуди напруг другого п'єзокристалу, а про форму – шляхом обходу плати п'єзошупом або п'єзоолівцем 6.

Переваги даної установки полягають у тому, що тут не потрібно високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, малі витрати електричної енергії, при цьому оператор не схильний до дії електромагнітних полів і шумів різної інтенсивності.

Установка може бути виготовлена практично в будь-якій майстерні і її вартість значно нижче вартості промислової віброустановки.

Підставка виготовляється зі сталі або чавуну, стійки зі сталі. Якщо ж плата в радіовиробі кріпиться іншим способом, то замість стійок 2 на підставу встановлюються опори, що відповідають тим, або іншим умовам закріплення.

Показана на рис. 4 установка була багаторазово використана нами при вібродослідженнях ряду плат і корпусних деталей РЕА.

Перевага цього методу полягає в тому, що він дає можливість визначення форм і частот коливань не тільки в лабораторних умовах, а й безпосередньо на місці установки апаратури.

Для визначення форм коливань функціональних плат, корпусних деталей, ІМС та інших деталей пропонується, також, наступний майже забутий метод Гука-Хладні.

Ернест Флоренс Фрідріх Хладні – німецький (словацького походження) фізик і дослідник метеоритів, музикант, член-кореспондент Петербурзької Академії наук у XVIII столітті повторив експерименти англійського вченого Роберта Гука, який в 1680 році в Стендфордському університеті, водячи смичком по краю пластини, що покрита борошном, помітив, як відбувається деформація пластини.

У XX столітті замість смичка стали використовувати гучномовець з електричним генератором, що стоять під пластиною, щоб більш точно налаштувати частоту.

Складні малюнки, утворені вузловими лініями піску або борошна, на тонких пластинках Хладні вивчав більш серйозно, ніж Гук, і вони увійшли в історію під назвою фігур Хладні.

Ця ідея Гука-Хладні була використана нами для вивчення форм коливань реальних функціональних плат РЕА на описаній вище установці.

Змочену гасом поверхню досліджуваної деталі (плати, ІМС та ін.) посипають дрібним кварцом. Змінюючи частоту збурюючої сили помічають, що при деяких частотах амплітуди коливань різко зростають. Це вказує на збіг частот збурюючих навантажень і власних частот коливань, тобто на резонанс. При цьому в місцях пучностей коливань піщинки скидаються в ті місця, де плата не коливається, тобто у вузли коливань. Там піщинки залишаються в спокої, позначаючи вузли коливань. У цих місцях шукають і найбільші напруження. Даним методом були визначені форми і частоти коливань функціональних плат з мікромодулів 4-х типорозмірів для чотирьох варіантів розташування плати, а також визначено форми і частоти коливань корпусних деталей базової несучої конструкції в трьох взаємно напрямках.

Приклади знайдених вузлів коливань функціональних плат показані на рис. 7.5 ... 7.19 при різних положеннях плати та модулів:

Таким чином, розташування кварцу при резонансних коливаннях показувало на вузли, а, отже, дозволяло уявити саму форму коливань. Крім того, на функціональних платах та мікромодулях кожного типорозміру закріплювали за допомогою епоксидної смоли (або пластиліну) п'єзокристали, сигнали від яких надходили на двопробний осцилограф С1 -18. Це давало можливість візуально спостерігати момент виникнення резонансу плат і модулів, встановлених на цих платах, робити порівняння амплітуд і фаз коливань. Результати спостережень, отримані при плавній зміні збуджуючої частоти від 20 до 5000 Гц по кожній платі окремо, для різних ФП наведено в табл. 4... 7.

Таким чином, як видно з табл. 4... 7 на випробувальних платах і ФП у всьому діапазоні частот, при дослідженні на вібростійці за технологією № НГО.005.024.ТУ, є широкий спектр резонансних частот. Так, наприклад, у ФП типу ЗУ41, розташованих горизонтально - виявлено 10 резонансів, а при вертикальному розташуванні ММ- 22 резонанси.

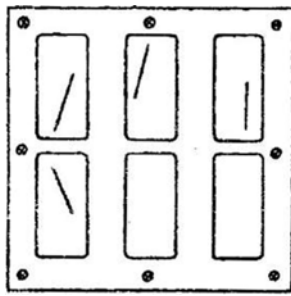


Рис. 5. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0=2783$ Гц

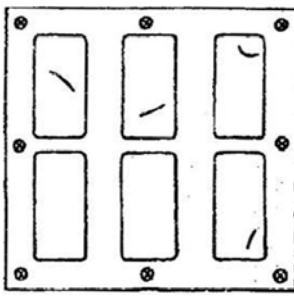


Рис. 6. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 3373$
Гц

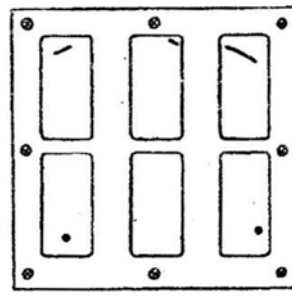


Рис. 7. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0=3501$ Гц

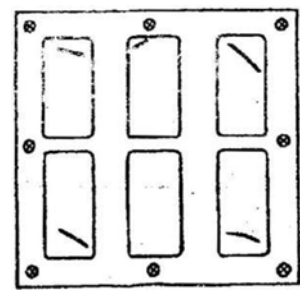


Рис. 8. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 3666$
Гц

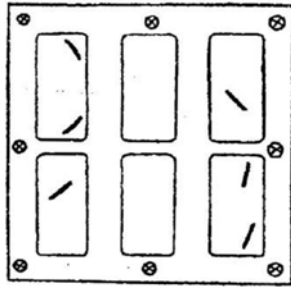


Рис. 9. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 2580$
Гц

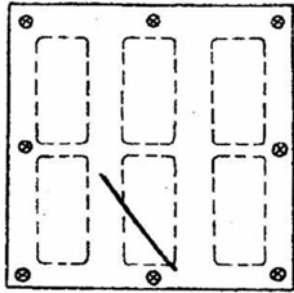


Рис. 10. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 2061$
Гц

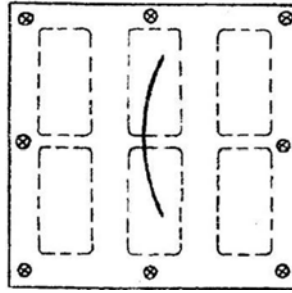


Рис. 11. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0=2227$ Гц

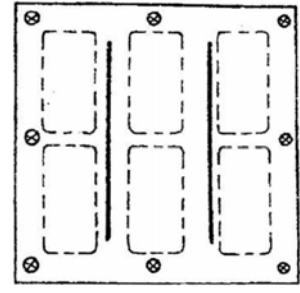


Рис. 12. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 2799$
Гц

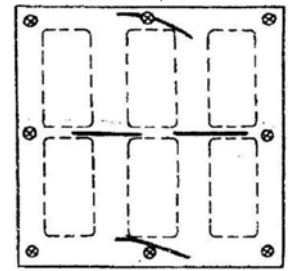


Рис. 13. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 3336$
Гц

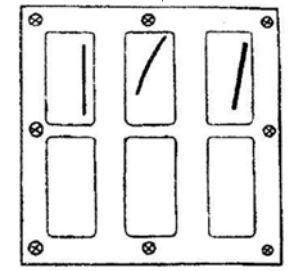


Рис. 14. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 2798$
Гц

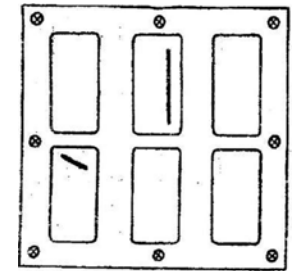


Рис. 15. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0=2354$ Гц

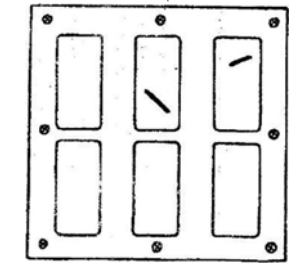


Рис. 16. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 4107$
Гц

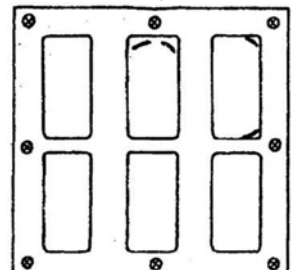


Рис. 17. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 4652$
Гц

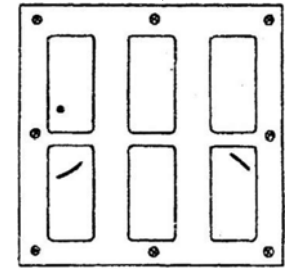


Рис. 18. Розташування вузлів
коливань ФП при $\omega_0 = 2122$
Гц

- а) горизонтально модулями вгору (рис. 5... 8);
б) горизонтально модулями вниз (рис. 9 ... 13);
в) вертикально з вертикальним розташуванням
довгого ребра модуля (рис. 14...15);
г) вертикально з горизонтальним розташуванням
довгого ребра модуля (рис. 16 ... 18).

Аналогічна картина має місце і у мікромодулів інших типів. Знайдені резонансні частоти близькі, а іноді й збігаються з частотами, на яких проводяться вібровипробування за технологією ПГО.005.024 ТУ. Отримані, за допомогою двопробеневого осцилографа С1-18, результати дали можливість визначити зразкове співвідношення амплітуд коливань ФП і об'єднуючих плат. У більшості випадків [5] амплітуди коливань ФП при резонансах були більше амплітуд коливань плат, перевершуючи їх іноді в 20 ... 50 разів.

У деяких випадках амплітуди плат перевищували амплітуди коливань модулів в 1,5...15 разів або були однакові.

Наявність настільки великої кількості резонансних частот у ІМС і об'єднуючих плат можна пояснити тим, що як ІМС так і плати з'єднуються з пристосуванням для випробувань не досить жорстко, а саме пристосування, як було встановлено раніше, теж має ряд резонансних частот в діапазоні 0...5000 Гц.

Слід також мати на увазі, що випробування мікромодулів і функціональних плат проводилося при їх закріпленні на пристосуванні ЩВ 1810-4358 ММ, у якого було виявлено 6 резонансних частот в діапазоні 0...5000 Гц (табл. 8).

Таблиця 4

Власні частоти коливань плоских мікромодулів 4У21 і функціональних плат в системі ФП – плати – пристосування – вібростол

ЗУ 41 горизонт. плата			ЗУ 41 вертикал. ліва			ЗУ 41 вертикал права		
плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$
150			318			470		
180				632	1/1	692		10/1
244								
				1031			754	1/3
262				1094			936	1/2
438				1267	1/20		1182	
530'	530*			1600	1/8		1305	
	761	1/15		1909	1/5		1175*	
	868	1/10		2131	1/7,5	141		
	1186	1/2		2807			1665	
	1272	1/1		3289			1891	1/1
	2174	2/1		3513	1/10		2199	1/2
	2621	1/2		3648	1/5	265		10/1
2802		5/1		4060	1/50	329		15/1
3053		2/1	4286			345		2/1
	3702	1/3				376		7/1
	4027	1/1				409		2/1
	4310	1/2,5					4245	1/1
4705		1,5/1					4254	1/1,5
						457		10/1
							4732	3/1

Таблиця 5

Власна частота коливань плоских мікромодулів 4У21 і функціональних плат в системі ФП – плати – пристосування – вібростол

ПІ59 горизонт. плата		ПІ59 вертикал. ліва			ПІ59 вертикал. права		
плата	модуль	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$
672'	672'		651		920	920	1/10
	955		773		1004	1004	1/40
1265	1265	1001	1001	1/2		1633	1/20
	1350	1199	1199	1/4	1881	1881	1/6
1502	1502	1270	1270	1/3	2136	2136	1/3
	1555	1348	1348	7/10	3222	3222	1/10
1634	1634	1552	1552		3633	3633	1/15
2123		1825	1825	2/1	4006	4006	1/3
2379	2379	1866	1866		4413		
2810	2810	2163*	2163				
	3192	2382	2382				
			2950				
3672	3672	3580					
3994	3994*	4073					

Таблиця 6

Власна частота коливань плоских мікромодулів 4У21 і функціональних плат в системі ММ – плати – пристосування – вібростол (* – власні частоти з найбільшими амплітудами коливань)

ЗУ 41 горизонт.плата			ЗУ 41 вертикал. ліва			ЗУ 41 вертикал. права		
плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$	плата	модуль	$A_{пл}/A_M$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
750	750*		802			124		15/1
	1285		1163			134		4/1
1576	1576	1/20	1318		1/4		1605*	1/5
	1849	1/10	1630		1/10	184	1840	1/1
2113	2113	1/5	1904		1/15	190	1908	1/1
2280		4/1	2097		1/15	207	2078	1/3
	2464	1/25		2119	1/17		2376	1/10

Продовження табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	3220	1/10	2310*	2310			2472	1/7,5
	3374	1/8		2400	1/4		2706	1/8
	3674	1/25	2472	2472	1/10		2892	1/1
	3954	1/25	2677	2677	1/2	373		3/1
	4625	1/20	2848	2848	1/20		4232	1/4
	4961			2870	1/6			
				3164	1/10			
			3459		1/3			
				3650	1/20			
			3620		1/7			
			4024		1/15			
			4516	4516				
			4959	4959				

Таблиця 7

Власні частоти коливань плоских мікромодулів ІТ32 і функціональних плат в системі ММ – плати – пристосування – вібростол (* – власні частоти з найбільшими амплітудами коливань)

ІТ32 горизонтальна плата - модуль	ІТ32 вертикальна плата - модуль
659	659
1094	1094
1624	1625
2132	1810
2332	2137
2815*	2406
3559	2804
4091	3291
3501	

Таблиця 8

Резонансні частоти пристосування ЦВ 1810-4358 ММ, встановленого на столі вібростенда УВЕ 10/5000

Резонансна частота, Гц					
1100	1500	1900	2100	3600	4250

Хмельницький, 1988. – С. 88-89.

6. Горященко К.Л. Тенденції розвитку сучасної силової елементної бази для керування пристроями легкої промисловості / К.Л. Горященко, С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2004. – № 5. – Ч.1. – С. 174-177.

Висновки

Аналіз результатів досліджень показує, що в діапазоні експлуатаційних частот і функціональні плати і ММ мають складні форми коливань, що говорить про деформації самих плат, так і встановлених на них модулів.

Література

1. Писаренко. Сопrotивление материалов / Писаренко. – К. : Техника, 1967.
2. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / Карпушин В. Б. – М. : Сов. радио, 1971. – 344 с.
3. Токарев М. Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / Токарев М. Ф., Талицкий Е. Н., Фролов В. А. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Нестер Н. А. Применение пьезокристаллов для исследования форм и частот колебаний печатных плат / Н. А. Нестер, В. П. Ройзман, М. И. Хавкин // Теория и практика конструирования и обеспечения надежности и качества РЭА. – Москва, 1978. – С. 100.
5. Нестер Н. А. Пути повышения качества контроля технологического процесса испытаний изделий РЭА / Н. А. Нестер, М. И. Хавкин // Материалы 14 межвузовского научно-методического семинара.

References

1. Pisarenko. Soprotyivlenie materialov Tehnika, Kiev, 1967.
2. Karpushin V. B. Vibracii i udary v radioapparature. M. : Sov. radio, 1971. – 344 s.
3. Tokarev M. F., Talickij E. N., Frolov V. A. Mehanicheskie vozdejstvija i zashhita radiojelektronnoj apparatury. – M. : Radio i svjaz', 1984. – 224 s.
4. Nester N. A., Rojzman V. P., Havkin M. I. Primenenie p'ezokristallov dlja issledovanija form i chastot kolebanij pechatnyh plat. V kn. : Teorija i praktika konstruirovaniya i obespechenija nadezhnosti i kachestva RJeA. Moskva, 1978, – S. 100.
5. Nester N. A., Havkin M. I. Puti povyshenija kachestva kontrolja tehnologicheskogo processa ispytaniy izdelij RJeA. Materialy 14 mezhvuzovskogo nauchno-metodicheskogo seminar. Hmel'nickij, 1988. – S. 88-89.
6. Gorjashhenko K.L., Gorjashhenko S.L. Tendencii razvitu suchasnoj silovoj elementnoj bazi dlja keruvannja pristrojami legko promislovosti. Herald of Khmelnytsky National University. – 2004. – № 5. – Ch.1. – S. 174-177

Рецензія/Peer review: 2.12.2014 р. Надрукована/Printed: 19.1.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.