



Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Методические указания

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КОНСТРУКТОРСКИХ РАСЧЕТОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ**

ЧАСТЬ 5

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КОНСТРУКТОРСКИХ РАСЧЕТОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Часть 5

*Методические указания
к курсовому и дипломному проектированию*

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.37/.39

ББК 32.844

П78

Рецензент С.А. Мешков

П78 Программное обеспечение конструкторских расчетов радиоэлектронных и электронных вычислительных средств / О.Н. Камышная, В.В. Маркелов, Е.В. Резчикова, В.А. Солоньев; Метод. указания к курсовому и дипломному проектированию. Ч. 5. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – с. 35, ил.
ISBN 5-7038-1609-2

Представлены методика расчета на механические воздействия ячеек и блоков электронной аппаратуры, а также описание программы, разработанной на основе методики.

Для студентов старших курсов.

Ил. 9. Табл. 6.

УДК 621.37/.39

ББК 32.844

ISBN 5-7038-1609-2

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000

1. ПРОГРАММА РАСЧЕТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БЛОКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

1.1. Общие сведения

Программа, составленная в среде Delphi 2.0, является полностью самодокументированной и соответствует дисциплинам “Конструирование радиоэлектронных средств”, “Конструирование электронных вычислительных средств” и “Микроячейки и микроблоки”.

Для использования данной программы необходимо наличие на ЭВМ операционной системы Windows 95.

1.2. Функциональное назначение

Программа позволяет выполнять следующие виды расчетов:

- расчет собственной частоты колебаний балки;
- расчет собственной частоты колебаний платы с радиоэлементами;
- расчет виброперемещения основания;
- расчет максимального виброускорения платы и максимального прогиба платы;
- расчет на ударные воздействия (определение ударного ускорения и максимального относительного перемещения).

Программа дает возможность проводить все виды расчетов при различных способах закрепления сторон платы.

Для определения способов закрепления сторон платы введены следующие коды:

- 0 – если сторона платы свободна;
- 1 – если сторона платы оперта;
- 2 – если сторона платы закреплена;
- 3 – если плата закреплена в четырех точках.

После проведения каждого вида расчета результаты выводятся на печать.

Анализ результатов расчета вибропрочности сводится к следующему:

для микросхем, транзисторов, резисторов и т.д. амплитуда виброускорения должна быть меньше допустимых ускорений $a_{\text{доп}}$ (которые определяют в процессе анализа элементной базы): $a_{\text{в max}} < a_{\text{доп}}$;

для элементов радиоэлектронных средств (РЭС) типа пластин стрела прогиба $\delta_{\text{в}}$ на расстоянии l не должна превышать допустимое значение $\delta_{\text{доп}}$ – допустимое значение стрелы прогиба на длине l (табл. 1): $\delta_{\text{в}} < \delta_{\text{доп}} l^2 = \delta_1$;

для печатных плат с электрорадиоэлементами (ЭРЭ) должно выполняться условие $\delta_{\text{в}} < 0,003b$, где b – размер стороны печатной платы, параллельно которой устанавливают элементы.

Если условия вибропрочности не выполняются, то необходимо изменить конструкцию РЭС, увеличив жесткость несущих элементов, либо применить амортизаторы.

Анализ результатов расчета ударопрочности сводится к следующему:

для ЭРЭ ударное ускорение $a_{\text{у}}$ должно быть меньше допустимых ускорений $a_{\text{у доп}}$, определяемых из технических условий $a_{\text{у}} < a_{\text{у доп}}$;

для элементов РЭС типа пластин максимальное относительное перемещение $z_{\text{max}} < \delta_{\text{доп}} l^2$ ($\delta_{\text{доп}}$ определяют из табл. 1);

Т а б л и ц а 1

Допустимые значения стрелы прогиба, $\delta_{\text{доп}}$, мм фольгированных материалов

Номинальная толщина листа, мм	Одностороннее фольгирование		Двустороннее фольгирование	
	Гетинакс	Стекло-текстолит	Гетинакс	Стекло-текстолит
0,8	109	109	55	22
1,0	109	109	55	22
1,5	55	30	27	11
2,0	40	25	20	11
2,5	30	15	15	11
3,0	30	15	15	11

для печатных плат с элементами $z_{\text{max}} < 0,003b$, где b – размер стороны печатной платы, параллельно которой устанавливаются элементы;

для амортизированных систем $z_{\text{max}} < z_{\text{св}}$, где $z_{\text{св}}$ – свободный ход амортизатора.

1.3. Исходные данные

Исходные данные для расчета собственной частоты колебаний балки:

- l – длина пролета балки (из сборочного чертежа), м;
- E – модуль упругости балки (табл. 2), Па;
- I – момент инерции балки (из расчета), м⁴;
- m' – приведенная погонная масса (из расчета), кг/м;
- Z_5 – код закрепления балки (из сборочного чертежа).

Исходные данные для расчета собственной частоты колебаний платы:

- a, b, h – длина большей, меньшей стороны платы, толщина платы (из сборочного чертежа), м;
- E – модуль упругости платы (см. табл. 2), Па;

Таблица 2

Характеристики материалов, применяемых в РЭС

Материал	$E \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	ν	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	$\Lambda \cdot 10^2$
СТЭФ толщиной 1,33 мм	3,3	0,279	2,47	2...10
МТЭ толщиной 1,22 мм	3,5	0,214	1,98	2...10
НФД толщиной 0,92 мм	3,45	0,238	2,32	2...10
СФ с печатной схемой	3,02	0,22	2,05	2...10
Сталь	22	0,3	7,8	2...10
Алюминий	7,3	0,3	2,7	2...10

ν – коэффициент Пуассона (см. табл. 2);

KZ_1, KZ_2, KZ_3, KZ_4 – коды закрепления сторон платы (из сборочного чертежа);

m_i – масса i -го ЭРЭ, установленного на плате (из сборочного чертежа, ГОСТа, ОСТА, ТУ на ЭРЭ), кг;

x_i, y_i – координаты расположения ЭРЭ на плате (из сборочного чертежа), м;

M_1 – масса платы с элементами, учитываемыми как распределенная масса (на основании ТЗ и сборочного чертежа), кг.

Исходные данные для расчета виброперемещения основания платы:

f_n – минимальная частота внешнего воздействия (из ТЗ), Гц;

f_b – максимальная частота внешнего воздействия (из ТЗ), Гц;

Δ_f – требуемый при расчете шаг изменения частоты (из ТЗ), Гц;

P_4 – вид возбуждения: силовое или кинематическое (из ТЗ);

n_0 – амплитуда возмущающего виброускорения (из ТЗ).

Исходные данные для расчета максимального виброускорения и максимального прогиба платы:

ε – показатель затухания, $0 < \varepsilon < 1$;

x, y – координаты точки, в которой требуется провести расчет виброускорения и виброперемещения (из ТЗ и сборочного чертежа), м;

P_4 – вид возбуждения: силовое или кинематическое (из ТЗ).

Исходные данные для расчета на ударные воздействия:

P_5 – форма ударного импульса: прямоугольная или полусинусоидальная (из ТЗ);

τ – длительность ударного импульса (из ТЗ), с;

H_y – амплитуда ускорения ударного импульса (из ТЗ), g .

1.4. Теоретическая часть

Целью расчета является определение действующих на элементы изделия перегрузок при действии вибрации и ударов, а также максимальных перемещений. При необходимости производится выбор и расчет системы амортизации.

1.4.1. Расчет на действие вибрации

Исходные данные. Периодическая вибрация характеризуется спектром, т.е. суммой гармонических составляющих (рис. 1, где f_i и a_{0i} – частота и виброускорение i -й гармоники). Коэффициент виброперегрузки n_{vi} , амплитуды виброускорения a_{0i} и виброперемещения ξ_{0i} связаны между собой соотношениями

$$n_{vi} = \frac{G_{0i}}{g} = \frac{4\pi^2 f_i^2 \xi_{0i}}{g}$$

1. Определение частоты собственных колебаний отдельных конструктивных элементов РЭС.

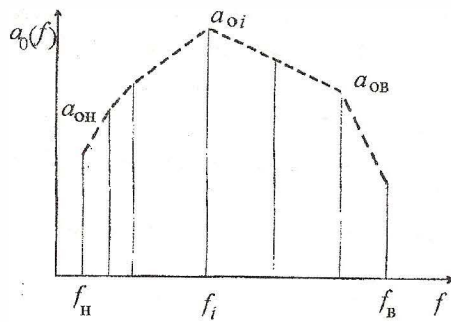


Рис. 1. Зависимость виброускорения i -й гармоники a_{oi} от частоты f

Частоту собственных колебаний *равномерно нагруженной пластины* при действии синусоидальной вибрации определяют по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{K_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{M} a \cdot b} = \frac{1}{2\pi} \frac{K_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}}$$

K_α – коэффициент, зависящий от способа закрепления сторон пластины, соотношения сторон и номера гармоники (выбирают по табл. 3); M – масса пластины с элементами; a и b – длина и ширина пластины; D – цилиндрическая жесткость, $D = E \cdot h^3 / 12(1 - \nu^2)$ (здесь E – модуль упругости; h – толщина пластины; $\nu = 0,25 \dots 0,3$ – коэффициент Пуассона); где $\rho = \frac{M}{a \cdot b}$ – поверхностная масса платы.

Если прогиб и угол поворота на краю пластины равны нулю, то край считают жестко защемленным. Если прогиб и изгибающий момент равны нулю, то край – опертый, и, если изгибающий момент и перерезывающая сила равны нулю, то край – свободный. Для пластины, закрепленной в четырех точках:

$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2} \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right) \sqrt{\frac{D}{M} a \cdot b},$$

где b – короткая сторона платы.

Значения коэффициента K_α Таблица 3

Тип закрепления платы О-О-О-О*					
Соотношение сторон a/b					
Номер гармоники	0,4	2/3	1,0	1,5	2,5
1	11,4487	14,2561	19,7392	32,0762	71,5564
2	16,1862	27,4156	49,3480	61,6850	101,1634
3	24,0818	43,8649	49,3480	98,6960	150,5115
4	35,1358	49,3480	78,9568	111,0330	219,5987
5	41,0576	57,0244	98,6960	128,3049	256,6097
6	45,7950	78,9568	98,6960	177,6529	286,2185
7	49,3480	80,0535	128,3049	180,1203	308,4251
8	53,6906	93,2129	128,3049	209,7291	335,5665
9	66,7185	106,3724	167,7833	239,3379	416,9908
Тип закрепления платы О-З-О-З					
1	12,1347	17,3730	28,9509	56,3481	145,4839
2	18,3647	35,3445	54,7431	78,9836	164,7387
3	27,9657	45,4294	69,3270	123,1719	202,2271
4	40,7500	62,0544	94,5853	146,2677	261,1053
5	41,3785	62,3131	102,2162	170,1112	342,1442
6	47,0009	88,8047	129,0955	189,1219	392,8746
7	56,1782	94,2131	140,2045	212,8169	415,6906
8	56,6756	97,4254	154,7757	276,0012	444,9682
9	68,7486	101,0788	170,3465	276,0125	455,3054
Тип закрепления платы О-З-О-О					
1	11,7502	15,5783	23,6463	42,5278	103,9227
2	17,1872	31,0724	51,6743	69,0031	128,3382
3	25,9171	44,5644	58,6464	116,2671	172,3804
4	37,8317	55,3926	86,1345	120,9956	237,2502
5	41,2070	59,4627	100,2698	147,6353	320,7921
6	46,3620	83,6060	113,2281	184,1006	322,9642
7	52,9007	88,4384	133,7910	193,8025	346,7382
8	54,8720	93,6758	140,8456	243,4964	391,0659
9	66,6637	108,1069	168,9585	260,2020	429,2420

Тип закрепления плиты О-З-О-С					
Соотношение сторон a/b					
Номер гармоники	0,4	2/3	1,0	1,5	2,5
1	10,1888	10,9752	12,6874	16,8225	30,6277
2	13,6036	20,3355	33,0651	45,3024	58,0804
3	20,0971	37,9552	41,7019	61,0178	105,5470
4	29,6219	40,2717	63,0148	92,3073	149,4569
5	39,6382	49,7317	72,3976	93,8293	173,1060
6	42,2425	64,1889	90,6114	141,7834	182,8110
7	42,9993	67,8993	103,1617	149,6055	235,0155
8	49,5740	89,3571	111,8964	162,2413	260,6371
9	58,0019	94,5150	131,4287	181,1868	305,2218
Тип закрепления плиты О-О-О-С					
1	10,1259	10,6712	11,6845	13,7111	18,8009
2	13,0570	18,2995	27,7563	43,5723	50,5405
3	18,8390	33,6974	41,1967	47,8571	100,2321
4	27,5580	40,1307	59,0655	81,4789	110,2259
5	39,3377	48,4082	61,8606	92,6925	147,6317
6	39,6118	57,5929	90,2941	124,5635	169,1026
7	42,6964	64,7281	94,4837	132,8974	203,7304
8	48,7745	89,1859	108,9185	158,9180	257,4791
9	54,2497	89,2725	115,6857	161,4205	277,4280
Тип закрепления плиты О-С-О-С					
1	9,7600	9,6983	9,6314	9,5582	9,4841
2	11,0368	12,9813	16,1348	21,6192	33,6228
3	15,0626	22,9535	36,7256	38,7214	38,3629
4	21,7064	39,1052	38,9450	54,8443	75,2037
5	31,1771	40,3560	46,7381	65,7922	86,9684
6	39,2387	42,6847	70,7401	87,6262	130,3576
7	40,5035	54,2400	75,2834	103,9665	155,3211
8	43,6698	66,2301	87,9867	105,1608	156,1248
9	44,9416	73,1982	96,0405	152,7784	199,8452

Тип закрепления плиты 3-3-3-3					
Соотношение сторон a/b					
Номер гармоники	0,4	2/3	1,0	1,5	2,5
1	23,648	27,010	35,992	60,772	147,80
2	27,817	41,716	73,413	93,860	173,85
3	35,446	66,143	73,413	148,82	221,54
4	46,702	66,552	108,27	149,74	291,89
5	61,554	79,850	131,64	179,66	384,71
6	63,100	100,850	132,24	226,92	394,37
Тип закрепления плиты 3-3-3-О					
1	23,440	25,861	31,829	48,167	107,07
2	27,022	38,102	63,347	85,507	139,66
3	33,799	60,325	71,084	123,99	194,41
4	44,131	65,516	100,83	143,99	270,48
5	58,034	77,563	116,40	158,36	322,55
6	62,971	92,154	130,37	214,78	353,43

*Приняты следующие обозначения закрепления сторон:
О – опертая, З – заземленная, С – свободная.

Частоту собственных колебаний балочных конструкций определяют по следующей общей формуле:

$$f_0 = \frac{\varphi}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m^l}},$$

где φ – коэффициент, зависящий от способа закрепления (рис. 2, табл. 4); l – длина пролета балки; I – момент инерции; m^l – приведенная погонная масса

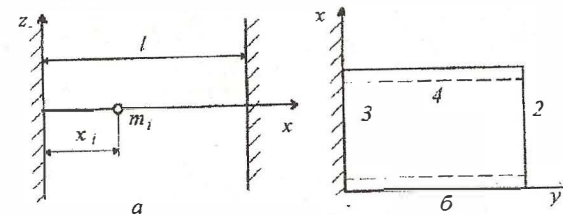


Рис. 2. Схема закрепления балки а и пластины б:
1 – 4 – виды закрепления (см. табл. 4)

Таблица 4
Зависимость коэффициента φ от способа закрепления

№	Эскиз закрепления	φ	№	Эскиз закрепления	φ
1		3,56	3		1,57
2		2,45	4		0,56

$$m' = m'_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n K_i m_i,$$

здесь m'_0 – равномерно распределенная погонная масса; m_i – i -я сосредоточенная масса; n – число сосредоточенных масс на балке; K_i – коэффициент приведения сосредоточенной массы m_i к равномерно распределенной (рис. 3).

Частоты собственных колебаний РЭС на амортизаторах определяют по следующим формулам:

в условиях полной симметрии системы амортизации (рис. 4, а):

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}}{m}}; \quad f_{02} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{yi}}{m}}; \quad f_{03} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{zi}}{m}};$$

$$f_{04} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{zi}y_i^2 + K_{yi}z_i^2}{I_x}}; \quad f_{05} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}z_i^2 + K_{zi}x_i^2}{I_y}};$$

$$f_{06} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}y_i^2 + K_{yi}x_i^2}{I_z}};$$

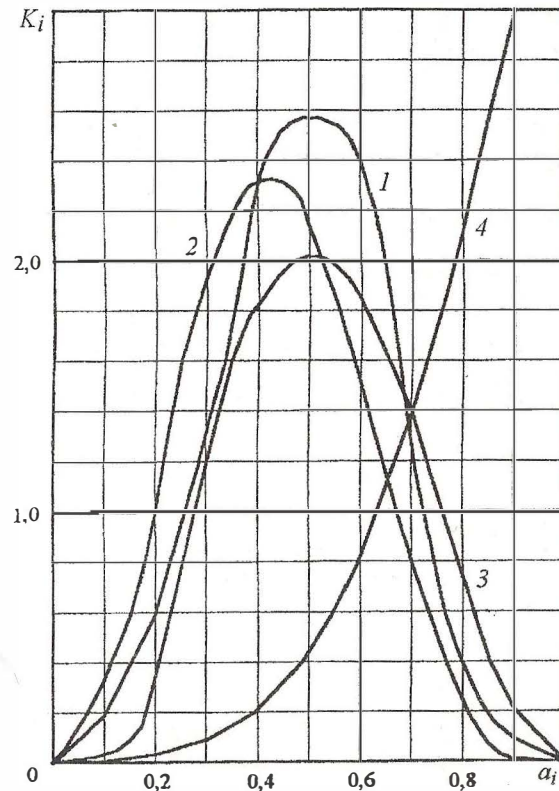


Рис. 3. Значение коэффициента K_i в зависимости от относительной абсциссы сосредоточенной массы $a_i = x_i/l$ и вида закрепления (1-4 – виды закрепления, см. табл. 4)

для системы амортизации, симметричной относительно двух вертикальных плоскостей xOz и yOz , (рис. 4, б):

$$f_{03} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{zi}}{m}}; \quad f_{06} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}y_i^2 + K_{yi}x_i^2}{I_z}};$$

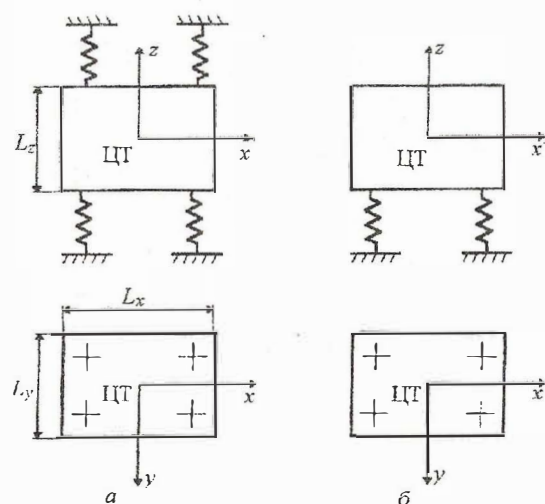


Рис. 4. Системы амортизации блоков РЭС:

а - в условиях полной системы амортизации; б - для системы амортизации, симметричной относительно двух вертикальных плоскостей (ЦТ - центр тяжести)

$$f_{07,08} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}}{m} + \sum_{i=1}^N \frac{K_{zi}x_i^2 + K_{xi}z_i^2}{I_y} \right)} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}}{m} - \sum_{i=1}^N \frac{K_{zi}x_i^2 + K_{xi}z_i^2}{I_y} + 4 \sum_{i=1}^N \frac{K_{xi}z_i^2}{mI_y}};$$

$$f_{09,010} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N \frac{K_{yi}}{m} + \sum_{i=1}^N \frac{K_{yi}z_i^2 + K_{zi}y_i^2}{I_x} \right)} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{K_{yi}}{m} - \sum_{i=1}^N \frac{K_{yi}z_i^2 + K_{zi}y_i^2}{I_x} + 4 \sum_{i=1}^N \frac{K_{yi}z_i^2}{mI_x}};$$

где f_{01}, f_{02}, f_{03} - частоты собственных линейных колебаний вдоль осей Ox, Oy, Oz ; f_{04}, f_{05}, f_{06} - частоты собственных крутильных колебаний вдоль осей Ox, Oy, Oz ; f_{07}, f_{08} - частоты собственных сложных колебаний в плоскости xOz ; f_{09}, f_{010} - частоты собственных сложных колебаний в плоскости yOz ; m - масса блока; K_{xi}, K_{yi}, K_{zi} - коэффициенты жесткости i -го амортизатора вдоль осей Ox, Oy, Oz ; x_i, y_i, z_i - координаты i -го амортизатора; L_x, L_y, L_z - размеры блока прямоугольной формы. I_x, I_y, I_z - осевые моменты инерции для блока с равномерно распределенной массой по объему,

$$I_x = \frac{1}{2}m(L_z^2 + L_y^2), \quad I_y = \frac{1}{2}m(L_z^2 + L_x^2), \quad I_z = \frac{1}{2}m(L_x^2 + L_y^2).$$

2. Определение коэффициента динамичности.

Для механической системы с одной степенью свободы коэффициенты динамичности рассчитывают по следующим формулам:

для силового возбуждения (рис. 5, а):

$$K_{дин} = \theta \varphi = \frac{S_B}{z_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \eta^2}},$$

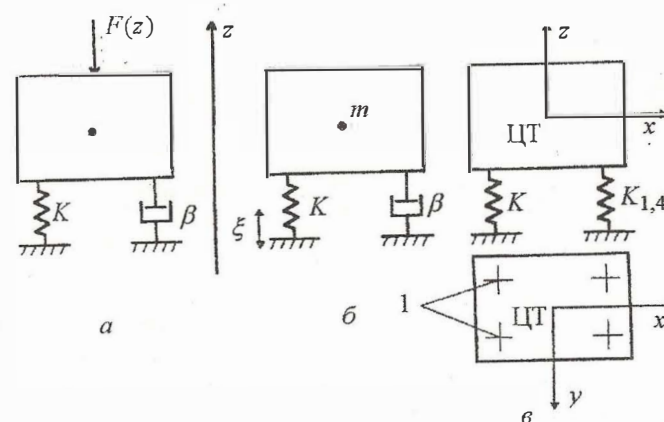


Рис. 5. Схемы силового (а), кинематического (б) возбуждения блока и рациональной амортизации блока (в)

S_B – амплитуда вынужденных колебаний; z_{CT} – статическое смещение системы под действием силы F_0 ; $z_{CT} = F_0/k$; (здесь F_0 – амплитуда возбуждающей силы $F(t)$; k – жесткость системы); $\eta = f/f_0$ – коэффициент расстройки; (здесь f – частота возбуждения; f_0 – частота собственных колебаний системы); ε – показатель затухания.

для кинематического возбуждения (рис. 5, б):

$$K_{дин} = \mu = \frac{S_B}{\xi_0} = \frac{\sqrt{1\varepsilon^2\eta^2}}{\sqrt{(1-\eta^2) + \varepsilon^2\eta^2}},$$

где ξ_0 – амплитуда виброперемещения основания.

Показатель затухания ε , коэффициент затухания δ , декремент затухания Λ (см. табл. 2) и коэффициент вязкого трения β связаны между собой следующими формулами:

$$\varepsilon = \frac{\Lambda}{\pi}; \quad \Lambda = \frac{\pi\beta}{\sqrt{km}}; \quad \delta = \frac{\beta}{2m}.$$

Коэффициент динамичности рассчитывают во всем диапазоне частот вибрации; его значения могут быть представлены в виде таблицы или графика (рис. 6).

При кинематическом возбуждении пластины за счет гармонического колебания ее закрепленных краев с амплитудой виброперемещения S_0 коэффициент передачи по ускорению будет являться функцией координат; он может быть определен по формуле

$$\gamma(x, y) = \frac{a_B(x, y)}{a_0} = 1 + \sum_{i, f=1}^{\infty} \frac{K_{ij}(x, y)n_{if}^2}{1 - n_{if}^2 + j\varepsilon_{if}n_{if}}, \quad (1)$$

где $a_B(x, y)$ – амплитуда виброускорения точки пластины с координатами x, y ; $a_0 = \omega^2 S_0$ – амплитуда виброускорения краев пластины; $K_{ij}(x, y)$ – коэффициент формы колебаний; n_{if} – коэффициент расстройки относительно частоты собственных колебаний if -й пространственной формы; ε_{if} – показатель затухания if -й формы колебаний.

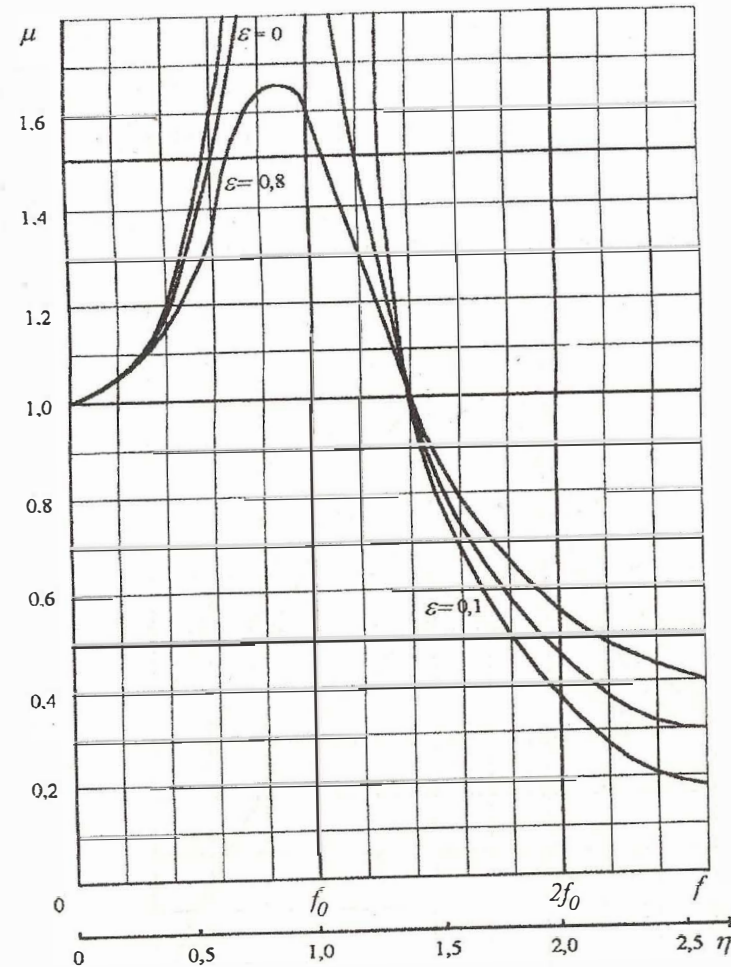


Рис. 6. Значение коэффициента динамичности μ в зависимости от частоты вибрации f_0

Так как коэффициент расстройки высших типов упругих волн $K_1(\xi)$ для реальных конструкций плат в РЭС значительно меньше единицы, можно ограничиться лишь основ-

ным типом колебаний. В этом случае формула (1) упрощается:

$$\gamma(x, y) = |\dot{\gamma}(x, y)| = \frac{\sqrt{(1 + [K_1(x)K_1(y) - 1]\eta_{11}^2)^2 + \varepsilon_{11}^2\eta_{11}^2}}{\sqrt{(1 - \eta_{11}^2)^2 + \varepsilon_{11}^2\eta_{11}^2}}$$

Значения коэффициента $K_1(\xi)$ для различных условий закрепления углов пластины приведены на рис. 7.

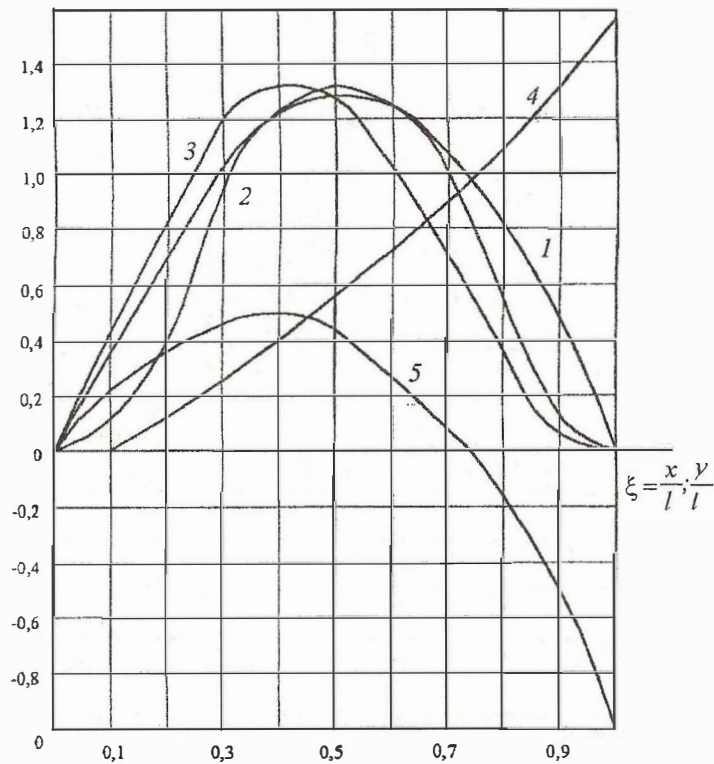


Рис. 7. Значение коэффициента расстройки $K_i(\xi)$ для различных условий закрепления краев пластины: 1 - OO; 2 - 33; 3 - O3; 4 - 3C; 5 - OC (O - опертый край; 3 - защемленный край; C - свободный край)

3. Определение виброускорения и виброперемещения элементов РЭС.

Для механической системы с одной степенью свободы амплитуды виброускорения a_B и виброперемещения S_B рассчитывают по следующим формулам: при силовом возбуждении

$$a_B(f) = n_B(f)\theta(f)g;$$

$$S_B(f) = \frac{n_B(f)\theta(f)g}{4\pi^2 f_0^2};$$

при кинематическом возбуждении

$$a_B(f) = 4\pi^2 f_0^2 \xi_0(f)\mu(f) = a_0(f)\mu(f);$$

$$S_B(f) = \xi_0(f)\mu(f),$$

где $\xi_0(f) = \frac{a_0(f)}{4\pi^2 f_0^2}$ - амплитуда виброперемещения основания.

Для пластины:

при силовом возбуждении

$$a_B(x, y, f) = \frac{n_B(f)K_1(x)K_1(y)g}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2\eta^2}};$$

$$S_B(x, y, f) = \frac{n_B(f)K_1(x)K_1(y)g}{4\pi^2 f_0^2 \sqrt{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2\eta^2}};$$

при кинематическом возбуждении

$$a_B(x, y, f) = 4\pi^2 f_0^2 \xi_0(f)\gamma(x, y, f) = a(f)\gamma(x, y, f);$$

$$S_B(x, y, f) = \xi_0(f)\gamma(x, y, f).$$

Результаты расчета удобно представить в виде таблицы или графика. Для пластины необходимо рассчитывать максимальное виброускорение на поверхности.

4. Определение максимального прогиба пластины относительно ее краев.

При силовом возбуждении

$$\delta_B = S_B(x, y, f)_{\max}.$$

При кинематическом возбуждении

$$\delta_B = |S_B(x, y, f) - \xi_0(f)|_{\max}.$$

5. Определение выполнения условия вибропрочности. Вибропрочность оценивают по следующим критериям:

для радиоэлементов (микросхемы, транзисторы, резисторы и т.д.) амплитуда виброускорения должна быть меньше допустимых ускорений $a_{\text{доп}}$, т.е. $a_{B\max} < a_{\text{доп}}$; значения $a_{\text{доп}}$ определяют в процессе анализа элементной базы;

для элементов РЭС типа пластин стрела прогиба на расстоянии l не должна превышать значения δ_1 , вычисляемого по формуле $\delta_1 = \delta_{\text{доп}} l^2$, где $\delta_{\text{доп}}$ — допустимая стрела прогиба на длине 1 м (для фольгированных стеклотекстолита и гетинакса определяют по табл. 1), т.е. $\delta_B < \delta_{\text{доп}} l^2$;

для печатных плат с радиоэлементами должно выполняться условие $\delta_B < 0,003b$, где b — размер стороны печатной платы, параллельно которой установлены элементы.

Если условия вибропрочности не выполняются, то необходимо изменить конструкцию РЭС, увеличив жесткость несущих элементов. Радикальным способом обеспечения вибропрочности является применение схемы рациональной амортизации (рис. 5, в).

1.4.2. Расчет на действие удара

Ударные воздействия характеризуются формой и параметрами ударного импульса (рис. 8). Максимальное воздействие на механическую систему оказывает импульс прямоугольной формы.

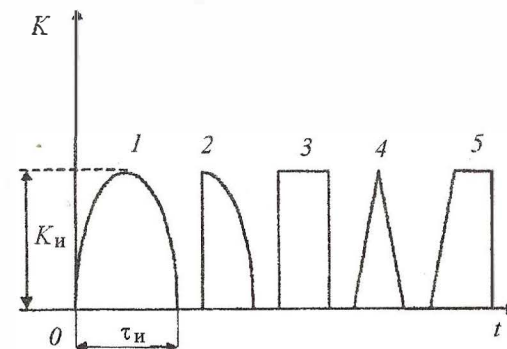


Рис. 8. Характерные формы ударного импульса и его параметры (K_n — амплитуда ударного импульса)

1. Определение условной частоты ударного импульса:

$$\omega = \frac{\pi}{\tau_{\text{и}}},$$

где $\tau_{\text{и}}$ — длительность ударного импульса.

2. Определение коэффициента передачи при ударе:

для прямоугольного импульса

$$K_y = 2 \sin \frac{\pi}{2\nu};$$

для полусинусоидального импульса

$$K_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu},$$

где ν — коэффициент расстройки, $\nu = \omega/2\pi f_0$ (здесь f_0 — частота собственных колебаний механической системы).

3. Расчет ударного ускорения: $a_y = H_y K_y$, где H_y — амплитуда ускорения ударного импульса.

4. Определение максимального относительного перемещения:

для полусинусоидального импульса

$$Z_{\max} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \frac{\nu}{\nu^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\nu};$$

для прямоугольного импульса

$$Z_{\max} = \frac{2H_y}{2\pi f_0} \sin \frac{\pi}{2\nu}.$$

5. Проверка выполнения условий ударопрочности по следующим критериям:

для радиоэлементов ударное ускорение должно быть меньше допустимого, т.е. $a_y < a_{y \text{ доп}}$, где $a_{y \text{ доп}}$ определяют из анализа элементной базы;

для элементов РЭС типа пластин должно выполняться условие

$$Z_{\max} < \delta_{\text{доп}} l^2,$$

где $\delta_{\text{доп}}$ определяют из табл. 1;

для печатных плат с радиоэлементами

$$Z_{\max} < 0,003b,$$

где b – размер стороны печатной платы, параллельно которой установлены радиоэлементы;

для амортизированных систем

$$Z_{\max} < Z_{\text{св}},$$

где $Z_{\text{св}}$ – свободный ход амортизатора.

Частным случаем ударного воздействия является удар при падении прибора. Действующую при этом перегрузку определяют следующим образом: находят относительную скорость соударения

$$V_0 = V_y + V_{\text{от}},$$

где $V_y = \sqrt{2gH}$ – скорость прибора в момент соударения (здесь H – высота падения прибора); $V_{\text{от}} = V_y K_B$ – скорость отскока; (здесь K_B – коэффициент восстановления скорости – (см. табл. 5);

определяют действующее на прибор ускорение.

Т а б л и ц а 5

Значение коэффициента восстановления скорости от материала соударяющихся тел

Материалы соударяющихся тел	K_B	Материалы соударяющихся тел	K_B
Сталь – Сталь	0,94	Сталь – Сухая земля	0,68
Сталь – Бетон	0,90	Сталь – Пенопласт	0,55

Условие прочности проверяют по ударному ускорению (см. п. 5).

1.4.3. Расчет платы, нагруженной сосредоточенными массами (электрорадиоэлементами)

По методам расчета собственных частот платы с элементами можно условно разделить на три группы:

1. Печатные платы с легкими навесными элементами (бескорпусные интегральные схемы, ЭРЭ в виде ЧИПов, МОП и КМОП кристаллы), равномерно распределенные по всей поверхности платы.

2. Печатные платы, на которых размещен радиоэлемент с массой, значительно превышающей массы остальных ЭРЭ (например, трансформаторы, реле, транзисторы).

3. Печатные платы, произвольно нагруженные радиоэлементами с различными массами.

Для плат первой группы массой ЭРЭ можно пренебречь или включить ее в массу пластины и затем рассчитывать спектр ее собственных частот как для ненагруженной пластины.

При расчете собственных частот плат второй группы крупный радиоэлемент принимают за элемент с сосредоточенной массой с координатами y_1 и y_2 :

$$F_{n_1 n_2} = f_{n_1 n_2} \left(1 + \frac{4m_s}{m_*} \left(\sin \frac{\pi n_1 y_1}{a} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi n_2 y_2}{b} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}},$$

где $f_{n_1 n_2}$ – спектр собственных частот соответствующей ненагруженной платы; m_s – масса радиоэлемента; m_* – сумма масс ЭРЭ и платы, $m_{платы} = dabh$ (здесь d – удельная плотность материала платы; a, b – размеры печатной платы в плане; h – толщина платы); y_1, y_2 – координаты ЭРЭ; n_1, n_2 – волновые числа.

При расчете спектра собственных частот ячеек, относящихся к третьей группе, каждый ЭРЭ, установленный на плате, считают сосредоточенной массой m_s с координатами y_1, y_2 . Формула расчета:

$$F_{n_1 n_2} = f_{n_1 n_2} \left(1 + \sum_{s=1}^N \frac{4m_s}{m_*} \left(\sin \frac{\pi n_1 y_1}{a} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi n_2 y_2}{b} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Порядок расчета собственных частот плат с ЭРЭ следующий:

1. Используя методику, описанную выше, рассчитать частоту свободной (ненагруженной ЭРЭ) платы.
2. Определить по ТУ массы ЭРЭ.
3. Определить по КД координаты каждого элемента относительно начала координат.
4. Определить по формуле частоту платы с радиоэлементами.

Структурная схема алгоритма расчета конструкций РЭС и электронных вычислительных средств (ЭВС) представлена в приложении.

2. ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОГРАММЫ

2.1. Расчет пластины

1. Выбрать пункт меню «Расчет».
2. В появившемся подменю выбрать пункт «Пластина».
3. В появившемся окне «Расчет пластины» ввести исходные данные.

3.1. Переключатель «Вид нагрузки» установить в одно из двух положений:

равномерно распределенная;
сосредоточенная масса.

3.2. Переключатель «Вид возбуждения» установить в одно из двух положений:

кинематическое;
силовое.

3.3. Переключатель «Форма ударного импульса» установить в одно из двух положений:

прямоугольная;
полусинусоидальная.

3.4. Ввод значений переменных, необходимых для расчетов, осуществить в строке ввода. Для получения справки о переменной и ее размерности необходимо подвести указатель мыши к строке ввода данной переменной – через несколько секунд появится строка подсказки.

3.5. С помощью бегунка «Способ закрепления» установить способ закрепления пластины.

3.6. Если переключатель «Вид Нагрузки» установлен в положение «равномерно распределенная», то активизируется кнопка «Добавление элемента». При нажатии этой кнопки появится окно для ввода координат установки и сосредоточенной массы.

3.7. После нажатия кнопки «Расчет» в окне «Результаты расчета» появятся результаты расчетов. Если

введены не все исходные данные, то появится сообщение об этом и расчет проводиться не будет.

3.8. После нажатия кнопки «**Закреть**» появится диалоговое окно с вопросом, хотите ли вы сохранить результаты расчета в файле. При нажатии кнопки «**Да**» появится стандартное диалоговое окно сохранения файла.

2.2. Расчет балки

1. Выбрать пункт меню «**Расчет**».
2. В появившемся подменю выбрать пункт «**Балка**».
3. В появившемся окне «**Расчет балки**» ввести исходные данные.

3.1. Переключатель «**Форма ударного импульса**» установить в одно из двух положений:

- прямоугольная;
- полусинусоидальная.

3.2. Ввод значений переменных, необходимых для расчетов, осуществляется в строке ввода. Для получения справки о переменной и ее размерности необходимо подвести указатель мыши к строке ввода данной переменной, и через несколько секунд появится строка подсказки.

3.3. После нажатия кнопки «**Расчет**» в окне «**Результаты расчета**» появятся результаты расчетов. Если введены не все исходные данные, то появится сообщение об этом и расчет проводиться не будет.

3.4. После нажатия кнопки «**Закреть**» появится диалоговое окно с вопросом, хотите ли вы сохранить результаты расчета в файле. При нажатии кнопки «**Да**» появится стандартное диалоговое окно сохранения файла.

2.3. Окончание работы с программой

1. Выбрать пункт меню «**Файл**».
2. В появившемся подменю выбрать пункт «**Выход**».

3. ТЕСТОВЫЕ ПРИМЕРЫ

Тестовый пример № 1

Рассчитать собственные частоты ненагруженной платы из стеклотекстолита толщиной 1 мм в рамке по контуру. Размеры платы 60 × 60 мм.

Исходные данные:

$$a = 6 \text{ см};$$

$$b = 6 \text{ см};$$

$$a/b = 1;$$

$$E = 3 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2;$$

$$h = 0,1 \text{ см};$$

$$\mu = 0,25;$$

$$d = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{см}^4.$$

Расчет:

$$\rho = hd = 0,1 \cdot 2,3 \cdot 10^{-6} = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{см}^3;$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = \frac{3 \cdot 10^5 (0,1)^3}{12(1-0,25^2)} = 26,7;$$

$$f_i = \frac{\lambda_i}{72\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho}} = \frac{\lambda_1}{72\pi} \sqrt{\frac{26,7 \cdot 10^7}{2,3}} = 47,6 \lambda_i;$$

$$\lambda_1 = 19, \quad f_1 = 19 \cdot 47,6 = 904 \text{ Гц};$$

$$\lambda_2 = 45, \quad f_2 = 45 \cdot 47,6 = 2142 \text{ Гц};$$

$$\lambda_3 = 45, \quad f_3 = 45 \cdot 47,6 = 2142 \text{ Гц};$$

$$\lambda_4 = 59, \quad f_4 = 59 \cdot 47,6 = 2808,4 \text{ Гц};$$

$$\lambda_5 = 90, \quad f_5 = 90 \cdot 47,6 = 4284 \text{ Гц};$$

$$\lambda_6 = 100, \quad f_6 = 100 \cdot 47,6 = 4760 \text{ Гц}.$$

Тестовый пример № 2

Рассчитать собственную частоту платы нагруженной, как показано на рис. 9, радиоэлементами. Исходные данные — см. тестовый пример № 1.

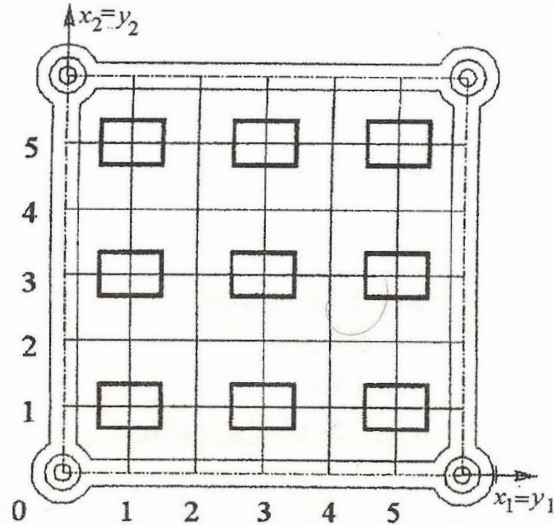


Рис. 9. На плате установлено девять микросхем с планарными выходами (масса одной микросхемы 0,3 г)

Расчет:

$$m_s = \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{980} = 3,06 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{с}^2 / \text{см};$$

$$m_* = 0,1 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 2,3 \cdot 10^{-6} = 8,3 \cdot 10^{-6};$$

$$\frac{4m_s}{m_*} = \frac{4 \cdot 3,06 \cdot 10^{-7}}{8,3 \cdot 10^{-6}} = 0,147;$$

$$\sum_{N=1} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 1}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 1}{6} \right)^2 = 9,2 \cdot 10^{-3};$$

$$\sum_{N=2} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 3}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 1}{6} \right)^2 = 3,7 \cdot 10^{-2};$$

$$\sum_{N=3} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 5}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 1}{6} \right)^2 = 9,2 \cdot 10^{-3};$$

$$\sum_{N=4} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 1}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 3}{6} \right)^2 = 3,7 \cdot 10^{-2};$$

$$\sum_{N=5} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 3}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 3}{6} \right)^2 = 0,147;$$

$$\sum_{N=6} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 5}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 3}{6} \right)^2 = 3,7 \cdot 10^{-2};$$

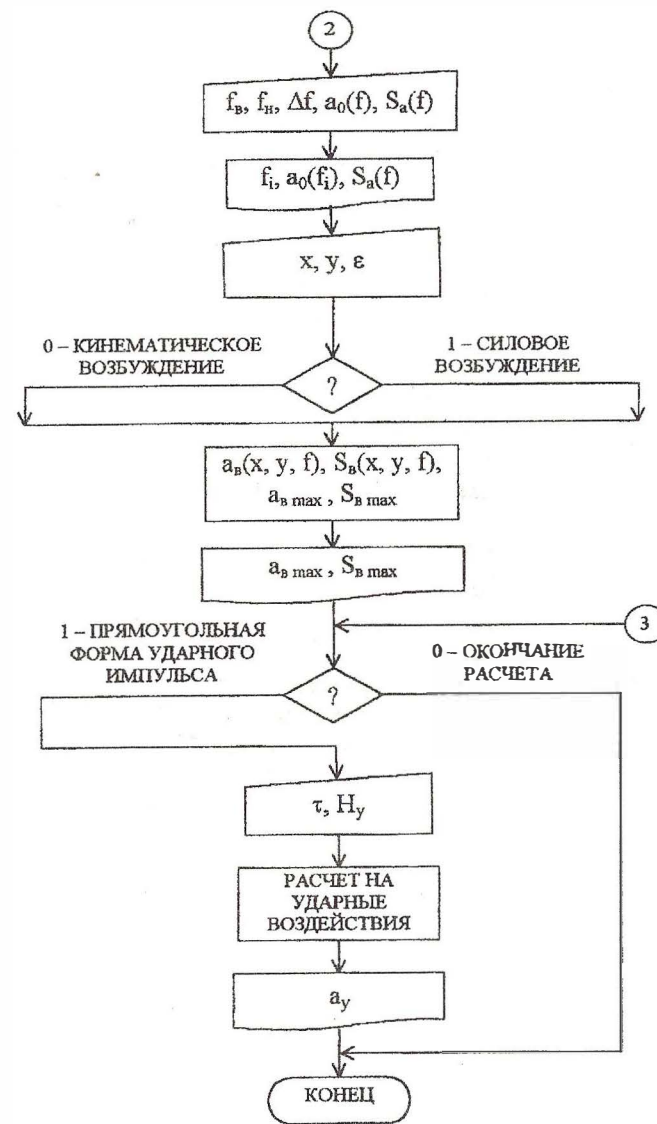
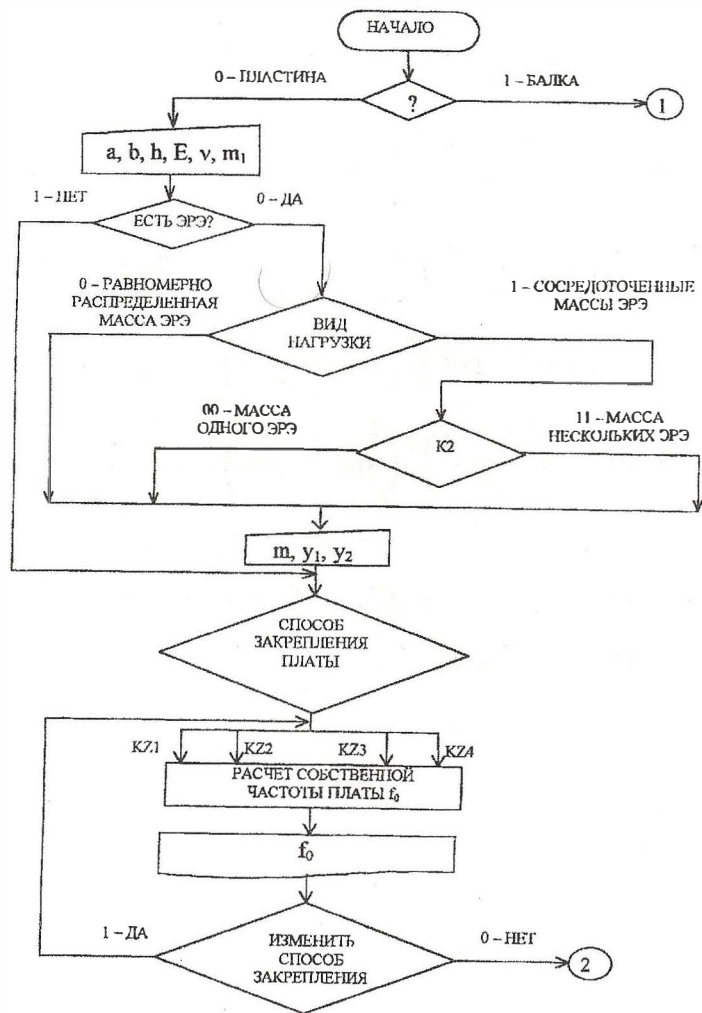
$$\sum_{N=7} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 1}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 5}{6} \right)^2 = 9,2 \cdot 10^{-3};$$

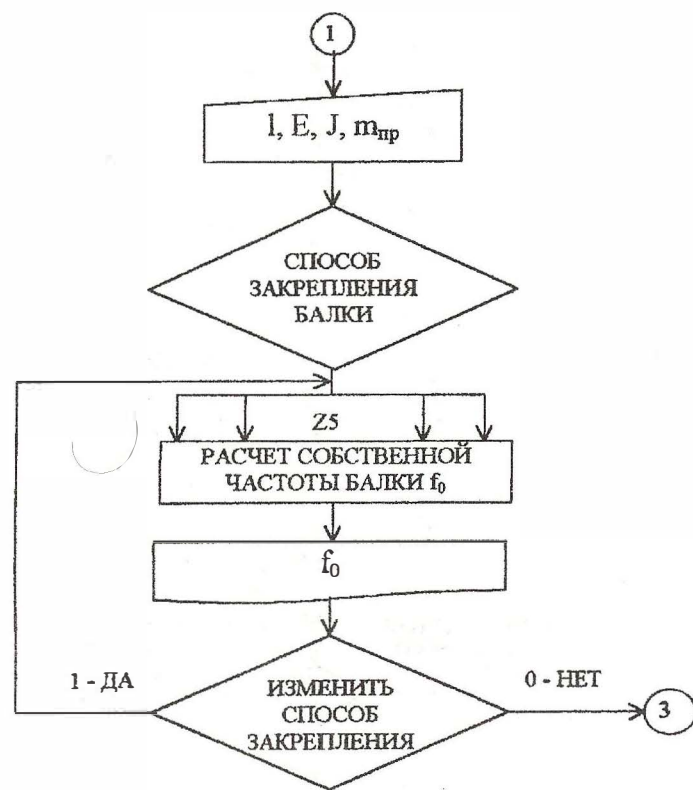
$$\sum_{N=8} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 3}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 5}{6} \right)^2 = 3,7 \cdot 10^{-2};$$

$$\sum_{N=9} 0,147 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 5}{6} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi \cdot 1 \cdot 5}{6} \right)^2 = 9,2 \cdot 10^{-3};$$

$$F = 940 \left(1 + 9,2 \cdot 10^{-3} + 3,7 \cdot 10^{-2} + 9,2 \cdot 10^{-3} + \right. \\ \left. + 3,7 \cdot 10^{-2} + 0,147 + 3,7 \cdot 10^{-2} + 9,2 \cdot 10^{-3} + 3,7 \cdot 10^{-2} + \right. \\ \left. + 9,2 \cdot 10^{-3} \right)^{-1/2} = 817 \text{ Гц.}$$

Структурная схема алгоритма расчета конструкций РЭС и ЭВС на механические воздействия





СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеканов А.Н. Расчеты конструкций ЭВС и РЭС на механические воздействия. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980.
2. Чеканов А.Н., Камышная Э.Н. Вероятностные расчеты в САПР несущих конструкций ЭВС и РЭС. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1986.
3. The free vibration of rectangular plates // Journal of Sound and Vibration. 1973. № 31 (3). P. 257-293.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ПРОГРАММА РАСЧЕТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БЛОКОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ	3
1.1. Общие сведения	3
1.2. Функциональное назначение	3
1.3. Исходные данные	5
1.4. Теоретическая часть	7
1.4.1. Расчет на действие вибрации	7
1.4.2. Расчет на действие удара	20
1.4.3. Расчет платы, нагруженной сосредоточенными массами (ЭРЭ)	23
2. ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОГРАММЫ	25
2.1. Расчет пластины	25
2.2. Расчет балки	26
2.3. Окончание работы с программой	26
3. ТЕСТОВЫЕ ПРИМЕРЫ	27
Приложение	30
Список рекомендуемой литературы	33

Редакция заказной литературы
Эмилия Николаевна Камышная
Виктор Васильевич Маркелов
Елена Викентьевна Резчикова
Владимир Анатольевич Соловьев

Программное обеспечение
конструкторских расчетов радиоэлектронных
и электронных вычислительных средств

Ча с т ь 5

Заведующая редакцией *Н.Г. Ковалевская*
Редактор *Е.К. Кошелева*
Корректор *М.А. Василевская*

Изд. лиц. № 020523 от 25.04.97 г.

Подписано в печать 22.04.99. Формат 60x84/16. Бумага тип. №2.

Печ. л. 2,25. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,03.

Тираж 100 экз. Изд. № 27. Заказ № 28

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.