

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

В. Л. Ланин

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики и
радиоэлектроники в качестве пособия для специальности
1-41 80 02 «Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и изделий электронной техники»*

Минск БГУИР 2015

УДК 519.87(076)

ББК 22.18я73

Л22

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра конструирования и производства приборов
Белорусского национального технического
университета (протокол №5 от 15.12.2014);

генеральный менеджер открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ»,
доктор технических наук, профессор Л. П. Ануфриев

Ланин, В. Л.

Л22 Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления приборов электронной техники : пособие / В. Л. Ланин. – Минск : БГУИР, 2015. – 66 с. : ил.

ISBN 978-985-543-134-4.

Пособие содержит описание практических занятий по математическому моделированию технологических процессов методами полного факторного эксперимента и Бокса – Уилсона, а также по оптимизации конструкций приборов и технологических устройств методом конечных элементов. Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков по моделированию и оптимизации технологических процессов с применением прикладных пакетов программ по учебной дисциплине «Математическое моделирование процессов и приборов».

УДК 519.87(076)

ББК 22.18я73

ISBN 978-985-543-134-4

© Ланин В. Л., 2015

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие №1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....4

Практическое занятие №2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ БОКСА –УИЛСОНА..... 16

Практическое занятие №3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ..... 25

Практическое занятие №4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ SMD-КОМПОНЕНТОВ НА ПЛАТЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЯХ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МОНТАЖОМ.....41

Практическое занятие №5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНО-МОНТИРУЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ С КОНТАКТНЫМИ ПЛОЩАДКАМИ ПЛАТЫ.....49

Практическое занятие №6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА SOLID WORKS..... 55

Литература 65

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Теоретические сведения

Моделирование с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ) проводится по заранее разработанному плану и имеет следующие преимущества: четкую логическую схему проведения процесса исследования; сокращение объема экспериментальных данных, повышение надежности интерпретации полученных результатов; формализацию процесса построения модели и возможность ее оптимизации. При планировании эксперимента искомая модель технологического процесса представляется в виде полинома определенного порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1.1)$$

где y – выходной параметр (критерий оптимизации);

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты уравнения регрессии.

Основой планирования является четкая программа проведения опыта на выбранных экспериментатором уровнях. Центр плана, т. е. точка, в окрестности которой ставится серия опытов, выбирается на основе априорных сведений о процессе. Для удобства обработки результатов опыта вводится кодирование независимых входных факторов X_i :

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (1.2)$$

где X_{0i} – основной уровень;

ΔX_i – интервал варьирования.

Факторы в процессе эксперимента принимают нормированные значения, равные +1 и –1 (табл. 1.1). Число опытов в полном факторном эксперименте зависит от числа факторов K и определяется как $N=2^K$. Для $K=3$ матрица планирования приведена в табл. 1.2. Для оценки выходного параметра получают математическую модель в виде

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1.3)$$

Коэффициенты регрессий определяют по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i; \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_j \bar{y}_i. \quad (1.4)$$

Таблица 1.1

Начальные условия эксперимента

Значения факторов	X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень X _{0i}			
Интервал варьирования ΔX _i			
Верхний уровень (+1)			
Нижний уровень (-1)			

Дисперсия среднего арифметического в строке матрицы

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (1.5)$$

где m – количество параллельных опытов.

Дисперсия коэффициентов регрессии

$$\sigma \{ \bar{y}_i \} = \frac{\sum \sigma_i^2}{N}. \quad (1.6)$$

Таблица 1.2

Матрица планирования эксперимента 2³

Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Выходной параметр			
									y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}
1	+	+	+	+	+	+	+	+				
2	+	+	-	+	-	+	-	-				
3	+	-	+	+	-	-	+	-				
4	+	-	-	+	+	-	-	+				
5	+	+	+	-	+	-	-	-				
6	+	+	-	-	-	-	+	+				
7	+	-	+	-	-	+	-	+				
8	+	-	-	-	+	+	+	-				

Оценку значимости коэффициентов регрессии проводят с помощью *t*-критерия Стьюдента. Если $b_i < t_{\text{табл}} \sigma \{ b_i \}$, то коэффициент считается незначимым. Значения критерия Стьюдента $t_{\text{табл}}$ определяются по справочным дан-

ным в зависимости от числа степеней свободы $f_1=N(m-1)$ и выбранного уровня значимости. Для оценки адекватности полученной математической модели используют *F-критерий Фишера*:

$$F = \frac{\sigma_{ag}^2}{\sigma^2 \{y\}}, \quad (1.7)$$

где σ_{ag}^2 – дисперсия адекватности, определяемая как

$$\sigma_{ag}^2 = \frac{1}{N-\alpha} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1.8)$$

где α – число значимых членов в уравнении регрессии;

\hat{y}_i – значение выходного параметра, полученное расчетным путем из математической модели.

Если $F < F_{\text{табл}}$, то модель признается адекватной. $F_{\text{табл}}$ определяется в зависимости от числа степеней свободы $f_1=N(m-1)$, $f_2=N-\alpha$ и выбранного уровня значимости. При $F > F_{\text{табл}}$ модель считается неадекватной и эксперимент необходимо повторить, уменьшив интервалы варьирования либо увеличив количество параллельных опытов m . Для ускорения процесса вычисления статистических характеристик используют прикладные пакеты программ.

После проведения ПФЭ дальнейшие действия должны сводиться к нахождению оптимальных сочетаний факторов, чтобы приблизить данный процесс к оптимальному. На первом этапе по коэффициентам в уравнении регрессии судят о том, как сильно и в каком направлении влияет каждый фактор на параметр оптимизации. Увеличение фактора при положительном коэффициенте увеличивает значение функции y , увеличение факторов при отрицательном коэффициенте уменьшает значение функции. Абсолютные значения коэффициентов возрастают с увеличением интервалов варьирования.

Далее анализируются эффекты взаимодействия. Если эффект взаимодействия двух факторов имеет положительный знак, то для увеличения функции y требуется одновременное увеличение или уменьшение значений этих факторов, а для уменьшения y значения факторов должны одновременно изменяться в разных направлениях.

В технологии производства изделий микроэлектроники проволочный монтаж остается одним из основных методов сборки интегральных микросхем (ИС) и полупроводниковых приборов, что объясняется высокой автоматизаци-

ей процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства, а также к геометрическим размерам изделий. Для монтажа алюминиевых проволочных выводов и ленточных перемычек к контактными площадкам кристалла и траверсам корпуса обычно используют ультразвуковую (УЗ) микросварку, основными параметрами которой являются электрическая мощность, время, статическая нагрузка на инструмент и частота УЗ-колебаний (рис. 1.1).

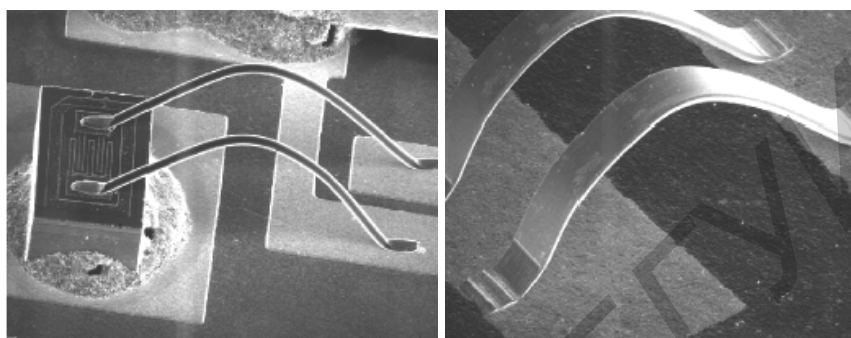


Рис. 1.1. Сварные соединения проводниками круглого и плоского сечения

Электрическая мощность, передаваемая от генератора к преобразователю, влияет на амплитуду УЗ-колебаний инструмента и сдвиговые напряжения в зоне сварки, под действием которых преодолевается сила трения, вызванная сжатием соединяемых элементов. При малых значениях амплитуды колебаний сварное соединение не образуется, а при больших – свариваемые элементы могут разрушиться. Поэтому для большинства процессов УЗ-микросварки оптимальная амплитуда колебаний инструмента не должна превышать 2–5 мкм.

Время УЗ-микросварки определяется процессами разрушения оксидных пленок на соединяемых элементах и объемным взаимодействием материалов в твердой фазе. Увеличение времени микросварки до 0,2–0,3 с повышает прочность соединений благодаря усилению диффузионного взаимодействия, но при дальнейшем увеличении времени воздействия ультразвука наступает усталостное разрушение соединений.

Статическая нагрузка на инструмент непосредственно влияет на усилие сжатия соединяемых элементов, определяет деформацию проволочного вывода и в конечном итоге стабильность сварного соединения. Ориентировочно нагрузку на инструмент выбирают в диапазоне 20–40 сН. Практически все технологические параметры системы УЗ-микросварки настолько тесно связаны, что неудачный выбор одного из них меняет установленные значения других.

В состав УЗ-системы микросварки входят ультразвуковой генератор (УЗГ) и ультразвуковой преобразователь (УЗП), преобразующий подводимую электрическую энергию в энергию механических колебаний. Конструкция УЗП состоит из следующих составных частей (рис. 1.2): пьезокерамического вибратора, состоящего из четырех или шести пьезокерамических колец, стянутых между собой шпилькой с металлическими накладками; цилиндрического держателя, закрепленного в узле волновода и предназначенного для крепежа УЗП в сварочной головке установки; волновода или акустического трансформатора.

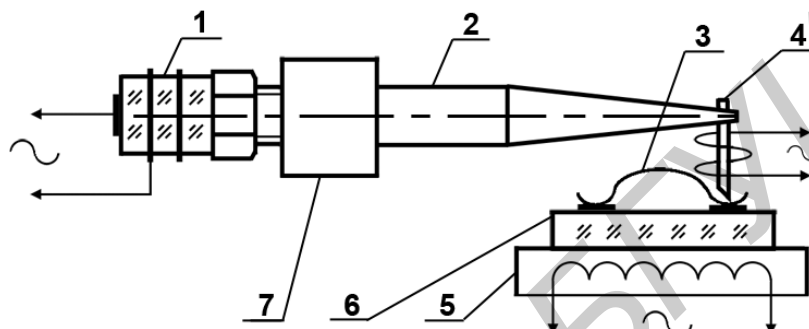


Рис. 1.2. Схема УЗ-микросварки:

1 – УЗ-преобразователь; 2 – волновод; 3 – микропроводник; 4 – инструмент;
5 – нагреватель; 6 – кристалл; 7 – держатель

На конце волновода закреплен микроинструмент с помощью торцевого зажима. Сечение волновода обычно уменьшается к концу волновода, там, где крепится микроинструмент, чем достигается необходимый коэффициент усиления механических колебаний.

Для получения контактных соединений часто применяют пайку, которую для повышения надежности активируют различными видами энергии. Воздействие энергии ЭМ-колебаний позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов высокой частоты (ВЧ), но и активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяных соединений в процессах ВЧ-пайки зависит от следующих факторов: скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности нагрева, его регулируемости во времени и по сечению паяемых деталей.

Воздействие ВЧ-энергии на паяемые детали и припой проявляется в виде высокопроизводительного бесконтактного нагрева с помощью наведенных в металле вихревых токов. Скорость нагрева может быть увеличена до 10 раз по

сравнению с пайкой в печи, а область пайки локализуется в пределах участка, определяемого конструкцией индуктора (рис. 1.3).

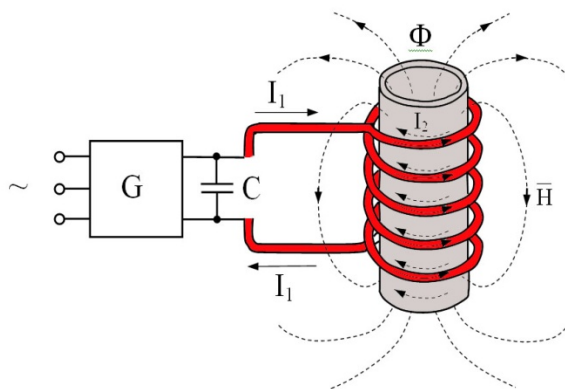


Рис. 1.3. Схема индукционной системы нагрева

Внешний вид установки индукционного нагрева представлен на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Установка индукционного нагрева с кольцевыми индукторами:
1 – генератор; 2 – кольцевой индуктор

Скорость ВЧ-нагрева пропорциональна мощности, выделяемой в зоне нагрева:

$$P_{уд} = \frac{U_{эф}^2 \cdot \cos\varphi \cdot \eta}{R_H}, \quad (1.9)$$

где $U_{эф}$ – эффективное напряжение на индукторе;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности ВЧ-нагрева;

η – КПД ВЧ-нагрева;

R_H – электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева.

Коэффициент мощности ВЧ-нагрева зависит от величины зазора h между деталью и индуктором, а также от глубины проникновения токов ВЧ и магнитной проницаемости материала детали:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \sqrt{2} \frac{h}{\delta \cdot \mu}\right)^2}}, \quad (1.10)$$

где δ – глубина проникновения тела ВЧ.

Эффективное напряжение на индукторе зависит от типа ВЧ-генератора и может находиться от 500 до 1500 В, при этом мощность нагрева изменяется от 1 до 10 кВт. Учитывая, что

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_d}{\mu_0 \cdot \mu \cdot f}}, \quad (1.11)$$

получим

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \sqrt{2\mu_0} \cdot h \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho_d \cdot \mu}}\right)^2}}, \quad (1.12)$$

где ρ_d – удельное электрическое сопротивление, материала детали;

μ_0 – магнитная постоянная;

μ – относительная магнитная проницаемость.

При увеличении зазора h от 1 до 10 мм коэффициент мощности для диамагнетиков падает почти в 10 раз, а для ферромагнетиков уменьшается в 3–4 раза. Поэтому для диамагнитных материалов необходимо уменьшить величину зазора до значений, обеспечивающих нормальную работу индуктора. КПД ВЧ-нагрева определяется соотношением электрических сопротивлений индуктора $R_{и}$ и детали $R_{д}$:

$$\eta = \frac{R_{д}}{R_{д} + R_{и}} = \frac{1}{1 + R_{и} / R_{д}}. \quad (1.13)$$

Учитывая, что ток ВЧ в индукторе протекает в основном слое глубиной $\delta_{и}$, а длина индуктора зависит от его диаметра витка $D_{и}$ и числа витков N , получим

$$R_{и} = \frac{\rho_{и} \cdot \pi \cdot D_{и} \cdot N}{\pi \cdot d_{и} \cdot \delta_{и}} = \frac{N \cdot D_{и} \cdot \sqrt{\rho_{и} \cdot \mu_0 \cdot f}}{d_{и}}, \quad (1.14)$$

где $d_{и}$ – диаметр трубки индуктора.

Учитывая, что $\rho_{и}$, μ_0 – константы, и приняв размерность частоты в МГц, получим

$$R_{\text{и}} = 0,15ND_{\text{и}}\sqrt{f/d_{\text{и}}} . \quad (1.15)$$

Для процесса ВЧ-нагрева используется схема, показанная на рис. 1.5.

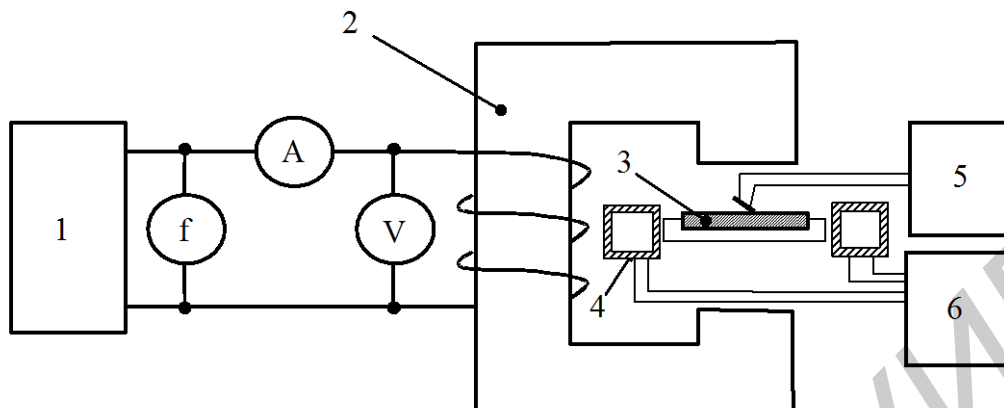


Рис. 1.5. Схема исследования ВЧ-нагрева:
1 – НЧ-генератор; 2 – магнитный сердечник; 3– деталь; 4 – индуктор; 5 – измеритель температуры; 6 – ВЧ-генератор

Порядок выполнения задания

Получить индивидуальное задание для моделирования технологического процесса.

Вариант 1. Моделирование методом ПФЭ процесса УЗ-микросварки проволочных алюминиевых выводов толщиной 35 мкм к контактными площадкам, покрытым гальваническим сплавом Ni-In, с целью замены золотого покрытия. Критерий оптимизации – прочность микросварного соединения на разрыв P , сН. В качестве независимых технологических факторов выбрать: x_1 – электрическая мощность на выходе УЗ-генератора (P , Вт); x_2 – время УЗ-сварки (t , с); x_3 – статическая нагрузка на УЗ-инструмент (F , г). Начальные условия эксперимента и матрица планирования приведены в табл. 1.3.

1. Загрузить программу PFE и с помощью клавиш «Начальные условия», «Матрица планирования», «Массив данных» и по очереди ввести начальные условия эксперимента, матрицу планирования и массив данных (рис. 1.6). При необходимости выполнить корректировку вводимых данных.

2. Получить математическую модель процесса (рис. 1.7) и проверить ее адекватность. Провести анализ влияния факторов и выбрать их оптимальные значения.

3. Графическую интерпретацию уравнения регрессии осуществить на плоскостях X_1, X_2 при $X_3 = \text{const}$, X_1, X_3 при $X_2 = \text{const}$ и X_2, X_3 при $X_1 = \text{const}$.

Таблица 1.3

Начальные условия и матрица планирования УЗ-микросварки

Условия эксперимента					Факторы					
					W, Вт (x_1)		t , с (x_2)		F, сН (x_3)	
Основной уровень x_0					0,20		0,20		20	
Интервал варьирования Δx_i					0,05		0,05		5	
Верхний уровень (+1)					0,25		0,25		25	
Нижний уровень (-1)					0,15		0,15		15	
Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	Параметр оптимизации y_i , сН				\bar{y}_i , сН	$S^2(\bar{y})$
					1	2	3	4		
1	+	+	+	+	4,6	5,4	5,4	6,4		
2	+	+	-	+	7,4	8,4	8,6	8,6		
3	+	-	+	+	7,1	7,1	9,1	8,6		
4	+	-	-	+	9,7	7,9	12,2	8,6		
5	+	+	+	-	8,6	9,4	9,7	9,4		
6	+	+	-	-	13,4	10,2	11,7	9,4		
7	+	-	+	-	12,7	14,7	11,1	10,7		
8	+	-	-	-	13,0	12,5	12,9	14,2		

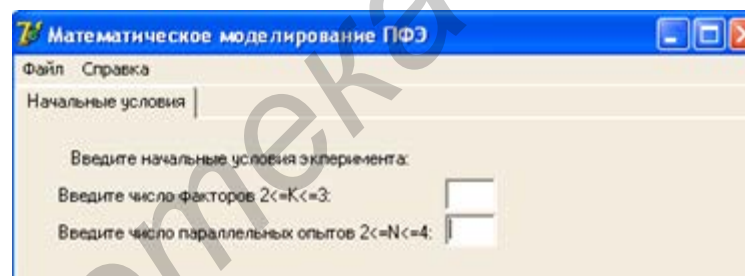


Рис. 1.6. Окно программы моделирования методом ПФЭ

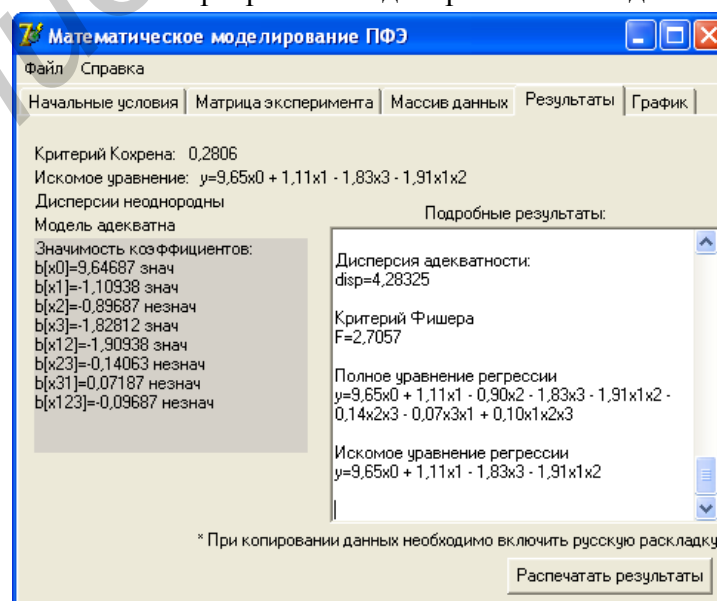


Рис. 1.7. Окно вывода данных программы ПФЭ

Вариант 2. Моделирование и оптимизация процесса УЗ-микросварки.

В качестве параметра оптимизации выбрана прочность микросварного соединения P , зависящая от следующих исследуемых факторов: электрической мощности, подводимой к преобразователю, W , времени микросварки t и статической нагрузки на инструмент F . УЗ-микросварка алюминиевой проволоки А999КО толщиной 35 мкм осуществлялась к контактными площадкам корпусов типа 401.14–1, имеющих гальванические покрытия сплавом Ni–В толщиной 5 мкм. Прочность микросварных соединений оценивалась на установке 12МП0,05 при скорости нагружения инструмента 10 сН/с в диапазоне 0,1–20 сН с фиксацией усилия с точностью $\pm 1,5\%$. Начальные значения факторов, матрица планирования и результаты полного факторного эксперимента приведены в табл. 1.4.

1. Загрузить программу PFE и с помощью клавиш «Начальные условия», «Матрица планирования», «Массив данных» по очереди ввести начальные условия эксперимента, матрицу планирования и массив данных. При необходимости выполнить корректировку данных.

2. Получить математическую модель процесса и проверить ее адекватность. Провести анализ влияния факторов и выбрать их оптимальные значения.

3. Графическую интерпретацию уравнения регрессии осуществить на плоскостях X_1, X_2 при $X_3 = \text{const}$, X_1, X_3 при $X_2 = \text{const}$ и X_2, X_3 при $X_1 = \text{const}$.

Таблица 1.4

Условия, матрица планирования и результаты эксперимента

Условия эксперимента					Факторы				\bar{y}_i , сН	$S^2(\bar{y})$
					W , Вт (x_1)		t , с (x_2)			
Основной уровень x_0					0,25		0,15		30	
Интервал варьирования Δx_i					0,05		0,05		5	
Верхний уровень (+1)					0,30		0,20		35	
Нижний уровень (-1)					0,20		0,10		25	
Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	Параметр оптимизации y_i , сН				\bar{y}_i , сН	$S^2(\bar{y})$
					1	2	3	4		
1	+	+	+	+	13,4	12,5	12,4	14,2		
2	+	+	-	+	13,4	10,2	11,6	12,6		
3	+	-	+	+	9,1	8,1	9,5	8,6		
4	+	-	-	+	9,7	7,9	12,2	8,6		
5	+	+	+	-	8,6	9,4	9,7	9,4		
6	+	+	-	-	8,4	8,2	9,8	9,4		
7	+	-	+	-	12,7	14,7	11,1	10,7		
8	+	-	-	-	6,0	5,5	5,9	6,4		

Вариант 3. Моделирование процесса электромагнитного нагрева деталей токами высокой частоты. В качестве параметра оптимизации выбрана скорость нагрева, поскольку она является одним из важнейших параметров процесса пайки. Исследуемые параметры процесса: частота F , амплитуда напряжения на выходе генератора A , и амплитуда тока подмагничивания $I_{п}$.

Частота колебаний контролировалась на выходе УЗ-генератора с помощью электронного частотомера с точностью 0,1 кГц; амплитуда напряжения и тока измерялась с помощью универсального цифрового вольтметра; время пайки – секундомером с точностью 0,1 с; температура припоя – термопарой Х-К и измерителя температуры Щ-4540 с точностью 1 °С. Условия и матрица планирования эксперимента приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Условия и матрица планирования эксперимента

Условия эксперимента				Факторы						
				$U, В (x_1)$		$F, кГц (x_2)$		$I_{п}, А (x_3)$		
Основной уровень x_0				150		30		5		
Интервал варьирования Δx_i				50		10		5		
Верхний уровень (+1)				200		40		10		
Нижний уровень (-1)				100		20		0		
№ опыта	x_1	x_2	x_3	Скорость нагрева $Y_i, °С/с$					$Y_i, °С/с$	$S^2(y)$
				1	2	3	4	5		
1	-	-	-	6,0	6,7	5,9	6,3	6,4		
2	-	-	+	7,0	7,3	7,2	7,4	7,5		
3	-	+	-	4,2	4,1	4,3	4,5	4,0		
4	-	+	+	4,8	4,9	5,3	5,0	5,4		
5	+	-	-	4,3	4,2	4,1	4,2	4,4		
6	+	-	+	5,3	5,3	5,2	5,5	5,4		
7	+	+	-	3,0	2,7	3,0	3,1	2,9		
8	+	+	+	4,2	4,0	4,1	4,0	4,3		

Проверить достоверность коэффициентов в уравнении регрессии и адекватность полученной модели, используя табл. 1.6–1.8.

Таблица 1.6

Значения критерия Кохрена для $P = 0,05$

G	N						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,9958	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8332	0,7880
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6530	0,6025
4	0,9065	0,7674	0,6841	0,6287	0,5895	0,5365	0,4884

Таблица 1.7

Квантили распределения Стьюдента $t_{\text{табл}}$

f	$P=0,05$	$P=0,01$
8	2,31	3,36
12	2,18	3,05
16	2,12	2,92
24	2,06	2,80
30	2,04	2,75

Таблица 1.8

Значения $F_{0,05}$ (верхние значения) и $F_{0,01}$ (нижние значения)

f_2	f_1				
	4	5	6	7	8
10	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06
20	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45
	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56

В содержание отчета включить схему технологического процесса, исходную матрицу ПФЭ, анализ математической модели и ее графическую интерпретацию.

Практическое занятие №2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ БОКСА – УИЛСОНА

Теоретические сведения

Задача оптимизации сводится к нахождению таких условий проведения процесса, при которых критерий оптимизации достигает экстремума. Функцию $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$, связывающую критерий оптимизации с входными параметрами, варьируемыми при исследовании, называют *функцией отклика*, а ее геометрическое изображение в факторном пространстве – *поверхностью отклика*. Экстремальное значение отклика достигается многократным последовательным продвижением в факторном пространстве несколькими методами.

Одним из них является *метод крутого восхождения (Бокса – Уилсона)*, который объединяет характерные элементы методов Гаусса – Зайделя и градиента. Так, шаговое движение при этом методе осуществляется в направлении наибольшего изменения функции (в направлении градиента), но в отличие от метода градиента корректировка направления движения производится не после каждого шага, а после достижения частного экстремума целевой функции, как при методе Гаусса – Зайделя. Практически поиск оптимума методом крутого восхождения выполняется следующим образом:

1) вблизи исходной точки x_0 проводится эксперимент для определения $\text{grad } y(x_0)$, результаты эксперимента подвергаются статистическому анализу, определяются коэффициенты b_i уравнения;

2) вычисляется произведение $b_i \Delta x_i$, где Δx_i – шаг варьирования параметра x_i при исследовании поверхности отклика в окрестностях исходной точки. Фактор, для которого произведение будет максимальным, принимается за базовый $\delta_6 \Delta x_6$;

3) для базового фактора выбирается шаг движения λ_6 по направлению к оптимуму, после этого вычисляются размеры шагов при крутом восхождении по остальным переменным процесса; при движении к оптимуму по градиенту все исследуемые параметры должны изменяться пропорционально коэффициентам наклона поверхности отклика b_i :

$$\lambda_i = \frac{b_i \Delta k_i}{b_\sigma \Delta k_\sigma}; \quad (2.1)$$

4) проводятся «мысленные» опыты, которые заключаются в вычислении по уравнению

$$y(x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (2.2)$$

значений целевой функции в точках факторного пространства, лежащих на пути к экстремуму; при этом i -я координата n -й точки

$$x_{n+1} = x_n + h \frac{\lambda_i}{\Delta x_i}, \quad (2.3)$$

где $h = \overline{1, m}$; $i = \overline{1, k}$; $\lambda_i = b_i \Delta x_i = b_i + \frac{\Delta x_i}{n}$.

Прогнозируемое значение выходного параметра

$$y_{\text{пр}} = b_0 + h \sum b_i \frac{\lambda_i}{\Delta x_i}; \quad (2.4)$$

5) поскольку каждый цикл крутого восхождения приближает к поверхности отклика с большой крутизной, рекомендуется для каждой последующей серии опытов выбирать шаг меньший, чем в предыдущей;

б) эксперимент прекращается, когда все или почти все коэффициенты b_i уравнения получаются незначимыми или равными нулю, что говорит о выходе в область экстремума целевой функции.

Шаговое движение к экстремуму продолжается до тех пор, пока не будет достигнута «почти стационарная» область, которая не может быть описана линейным выражением. Здесь сильнее проявляется взаимодействие факторов, характеризуемых коэффициентами при квадратичных членах полинома, поэтому область обычно удается описать с помощью полинома второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2. \quad (2.5)$$

Для вычисления полинома второго порядка число уровней должно быть, как минимум, три, т. е. на единицу больше степени полинома. Однако применение ПФЭ типа 3^k нерационально вследствие резкого увеличения объема экспериментов. Сократить их численность можно, используя так называемые *центральные композиционные планы* (ЦКП). Их особенностью является добавление нескольких специально спланированных экспериментальных точек к матрице ПФЭ для получения плана второго порядка. При k факторах общее число опытов ЦКП

$$N = 2^k + 2k + m_0, \quad (2.6)$$

где $2k$ – «звездные» точки;

m_0 – число опытов в центре плана.

Таким образом, к линейной модели добавляются так называемые «звездные» точки с координатами $(0, \alpha)$, лежащие на сфере диаметром 2α (рис. 2.1), и опыты в центре плана. Бокс и Уилсон предложили выбирать плечо α и количество центральных точек ($m_0=1$) так, чтобы план второго порядка оставался ортогональным (ЦКОП).

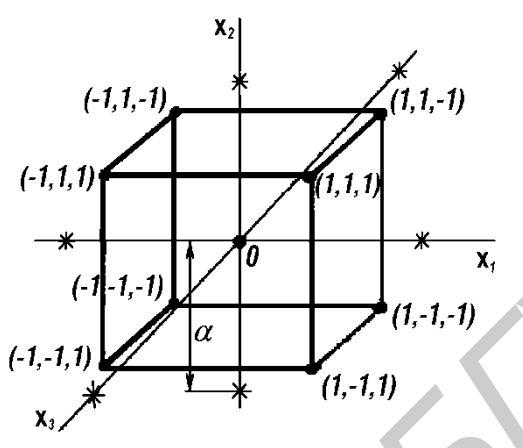


Рис. 2.1. Координационная решетка ЦКОП

При $k = 3$ он содержит всего 15 опытов, тогда как при ПФЭ $3^3 = 27$. В силу ортогональности плана все коэффициенты определяются независимо друг от друга:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i x_j \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N (x_i x_j)^2},$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i^2 / N) \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N \left(x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i^2 / N \right)^2}. \quad (2.7)$$

В отличие от линейного полинома при ортогональном планировании второго порядка оценки коэффициентов полинома находятся с неодинаковыми дисперсиями $\sigma^2\{b_i\} = \sigma^2\{b_{ij}\}$, а дисперсия при квадратичных членах уравнения регрессии – по формуле

$$\sigma^2\{b_{ii}\} = \frac{S^2(\bar{y})}{\sum_{i=1}^N \left(x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) / N \right)^2}. \quad (2.8)$$

Обработка результатов при реализации ЦКОП также предполагает статистические проверки гипотез воспроизводимости результатов экспериментов, значимости коэффициентов и адекватности моделей. Полученная модель второго порядка используется для нахождения оптимальных технологических режимов. Для этого модель методами аналитической геометрии приводится к канонической форме. При преобразовании освобождаются от линейных членов путем переноса начала координат в точку O , соответствующую B_0 , затем от эффектов взаимодействия путем поворота осей координат вокруг точки O (рис. 2.2). Для двух независимых переменных уравнение в канонической форме имеет вид

$$Y - Y_{01} = B_{11}^2 (x'_1)^2 + B_{22}^2 (x'_2)^2.$$

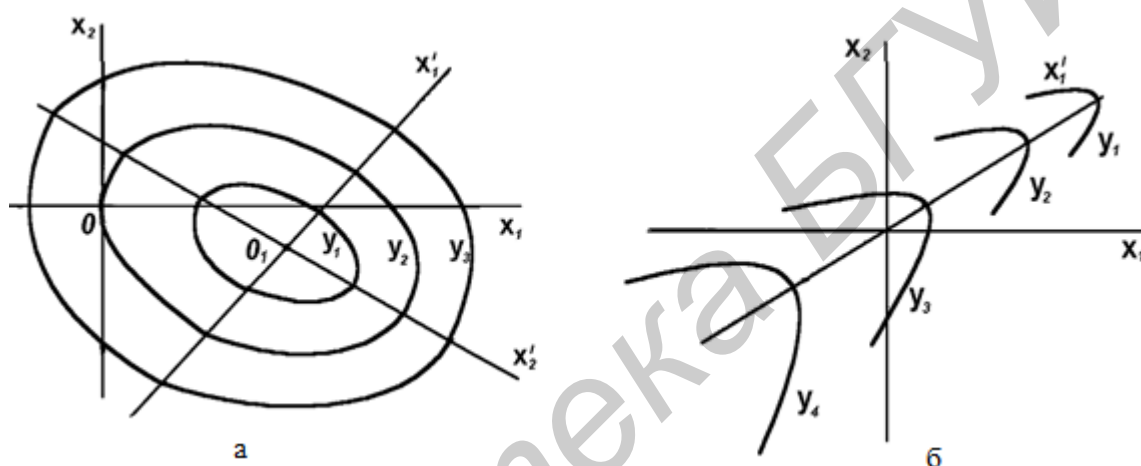


Рис. 2.2. Поверхности отклика функций:

а – эллиптическая; б – типа нарастающего возвышения

Поверхность отклика в зависимости от вида уравнения может быть трех типов. Если коэффициенты B_{11} и B_{22} имеют одинаковые знаки, то поверхность отклика – эллиптический параболоид, центр которого – искомый экстремум (рис. 2.2, а). В этом случае для нахождения оптимальной точки можно воспользоваться и не приведенным уравнением второго порядка, для чего приравняются нулю значения частных производных $\partial Y / \partial x_i = b_i + 2b_{ij} + b_{ij}x_j = 0$ и решается система уравнений. При разных знаках B_{11} и B_{22} поверхность отклика относится к типу минимакса, или «седла». Для нахождения оптимальных технологических режимов нужно двигаться по благоприятному крылу «седла». Если один из коэффициентов B_{ij} равен нулю, то поверхность отклика имеет форму нарастающего возвышения (рис. 2.2, б). Для отыскания оптимума следует двигаться по гребню, пока это допускают возможности процесса.

Порядок выполнения задания

Получить индивидуальное задание для моделирования технологического процесса.

Вариант 1. Реализовать метод крутого восхождения для оптимизации математической модели процесса УЗ-микросварки проволочных выводов интегральных микросхем в виде $y = 9,81 + 1,42x_1 + 1,27x_2 + 2,21x_3$.

1. Определяем шаг варьирования: $\Delta i = \Delta x_i / 10$. Шаг движения $\lambda_i = b_i \Delta i$. Тогда
 $\lambda_1 = 0,005 \cdot 1,42 = 0,007$; $\lambda_2 = 0,005 \cdot 1,27 = 0,006$;
 $\lambda_3 = 0,5 \cdot 2,21 = 1,105$.

2. Находим значения факторов x в начале опыта:
 $x'_1 = x_1^{\text{НОМ}} + \Delta x_1 b_1 = 0,15 + (0,005 \cdot 1,42) = 0,157$;
 $x'_2 = x_2^{\text{НОМ}} + \Delta x_2 b_2 = 0,15 + (0,005 \cdot 1,27) = 0,156$;
 $x'_3 = x_3^{\text{НОМ}} + \Delta x_3 b_3 = 10 + (0,5 \cdot 2,21) = 11,1$.

3. Начинаем «крутое восхождение» в сторону увеличения переменных x_1, x_2, x_3 , которые выбираем на уровне -1 . Проводим «мысленные опыты», результаты которых заносим в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Реализация «крутого восхождения»

Характеристики фактора и номера опыта	Выходные факторы			Расчетное значение Y_i	Экспериментальные данные
	$x_1 (P, \text{Вт})$	$x_2 (t, \text{с})$	$x_3 (F, \text{сН})$		
Коэффициент b_i	1,42	1,27	2,21	—	—
Шаг варьиров. Δi	0,005	0,005	0,5	—	—
Нач. точка:	0,15	0,15	10	—	—
в 1-м опыте	0,157	0,156	11,1		10,45
во 2-м опыте	0,164	0,162	12,2		11,60
в 3-м опыте	0,171	0,168	13,3		12,42
в 4-м опыте	0,178	0,174	14,4		14,00
в 5-м опыте	0,185	0,180	15,5		12,20
в 6-м опыте	0,192	0,186	16,6		10,30

Введите полученные результаты в приложение в подсвечивающиеся окна. Для получения результата нажмите кнопку «Рассчитать». Пример окна приложения изображен на рис. 2.3.

Рассчитать

Хар-ка фактора № опыта	Выходные факторы			ȳ расчетн.	ȳ эксперим.
	X ₁ (P, Вт)	X ₂ (t, с)	X ₃ (F, сН)		
коэффициент, b ₁	1.42	1.27	2.21	-	-
шаг варьирования, Δi	0.005	0.005	0.5	-	-
начальная точка	0.15	0.15	10	-	-
1-й реализ. опыт	0.157	0.156	11.1	12.26	10.45
2-й реализ. опыт	0.164	0.163	12.2	14.71	11.60
3-й реализ. опыт	0.171	0.169	13.3	17.16	12.42
4-й реализ. опыт	0.178	0.175	14.4	19.6	14.00
5-й реализ. опыт	0.185	0.182	15.5	22.05	12.20
6-й реализ. опыт	0.193	0.188	16.6	24.5	10.30

Рис. 2.3. Окно ввода приложения в «крутое вхождение»

4. Определяем, в каком опыте наибольшее усилие отрыва подтверждается экспериментальными данными. На этом опыте «восхождение» прекращаем. Далее переходим к исследованию функции в стационарной области.

Вариант 2. Получить модель методом ЦКОП. Начальные условия эксперимента и матрица ЦКОП приведены в табл. 2.2. С помощью программы OPTIMUM получить уравнение регрессии. Для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы $f_1 = N(m-1) = 15(4-1) = 45$ критерий Стьюдента $t = 2,0$.

1. Проверить значимость коэффициентов полинома по критерию Стьюдента и полученную модель на адекватность с помощью F -критерия Фишера для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы $f_1 = N - \alpha = 15 - 8 = 7$, $f_2 = N(m-1) = 15(4-1) = 45$.

Таблица 2.2

Матрица центрального композиционного ортогонального плана

Значения факторов		x_1		x_2		x_3			
Основной уровень x_i		0,13		0,125		5			
Интервал варьирования Δx_i		0,01		0,025		2			
Верхний уровень (+1)		0,14		0,150		7			
Нижний уровень (-1)		0,12		0,100		3			
Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_{cp}	$S^2(y)$
1	+	+	+	+					
2	+	+	-	+					
3	+	-	+	+					
4	+	-	-	+					
5	+	+	+	-					
6	+	+	-	-					
7	+	-	+	-					
8	+	-	-	-					
9	+	$+\alpha$	0	0					
10	+	$-\alpha$	0	0					
11	+	0	$+\alpha$	0					
12	+	0	$-\alpha$	0					
13	+	0	0	$+\alpha$					
14	+	0	0	$-\alpha$					
15	+	0	0	0					

2. Исходные значения ввести в подсвечивающиеся окна. Приложение автоматически подставит нужные значения для каждого из опытов. При нажатии кнопки «Рассчитать» и ввода критерия Стьюдента (исходя из таблицы) будет получено итоговое уравнение регрессии. Пример окна приложения изображен на рис. 2.4.

Далее приводим уравнение поверхности второго порядка к наиболее простому (каноническому) виду:

$$a_{11} \cdot x_1^2 + a_{22} \cdot x_2^2 + a_{33} \cdot x_3^2 + 2 \cdot a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + 2 \cdot a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + 2 \cdot a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + 2 \cdot a_1 \cdot x_1 + 2 \cdot a_2 \cdot x_2 + 2 \cdot a_3 \cdot x_3 + a_0 = 0.$$

Значение факторов		X ₁		X ₂		X ₃						
Основной уровень Xi		0.13		0.125		5						
Интервал варьирования ΔXi		0.01		0.025		2						
Верхний уровень (+1)		0.14		0.15		7						
Нижний уровень (-1)		0.12		0.1		3						
№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y	S ² (Y)
1	+	+	+	+	+	+	+	12.3	12.4	11.7	12.13	0.1433
2	+	+	-	+	+	+	+	13.4	13.7	13.9	13.67	0.0633
3	+	-	+	+	+	+	+	14	14.2	14.6	14.27	0.0933
4	+	-	-	+	+	+	+	15.5	15.6	15	15.37	0.1033
5	+	+	+	-	+	+	+	1.2	1.44	1.54	1.39	0.0305
6	+	+	-	-	+	+	+	2.3	2.44	2.33	2.36	0.0054
7	+	-	+	-	+	+	+	1.66	1.67	1.9	1.74	0.0184
8	+	-	-	-	+	+	+	4.33	3.33	2.3	3.32	1.0303
9	+	+α	0	0	α ²	0	0	2.3	1.9	3	2.40	0.3100
10	+	-α	0	0	α ²	0	0	3.4	4.3	3	3.57	0.4433
11	+	0	+α	0	0	α ²	0	6.66	7.77	6	6.81	0.8001
12	+	0	-α	0	0	α ²	0	9.9	10.1	11.2	10.40	0.4900
13	+	0	0	+α	0	0	α ²	2.3	4.4	3.2	3.30	1.1100
14	+	0	0	-α	0	0	α ²	2.5	2.7	2.8	2.67	0.0233
15	+	0	0	0	0	0	0	1.6	1.7	3	2.10	0.6100

Рис. 2.4. Окно приложения матрицы центрального композиционного ортогонального плана

3. Таким образом, полученная модель адекватно описывает экспериментальные данные. Для построения поверхности отклика составляем определитель:

$$\begin{vmatrix} -1,79 - \lambda & -0,165 & 0,275 \\ -0,165 & -1,13 - \lambda & 0 \\ 0,275 & 0 & -1,86 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Вычисляем определитель методом треугольников.

Решая определитель, получаем кубическое уравнение:

$$\lambda^3 + 4,78\lambda^2 + 4,75\lambda + 3,627 = 0.$$

4. Используя стандартную программу расчета на ПЭВМ, находим корни уравнения. Уравнение поверхности отклика в каноническом виде имеет вид

$$-\left(\frac{x_1}{0,293}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{0,354}\right)^2 + \left(\frac{x_3}{0,411}\right)^2 = 1.$$

Графическая поверхность отклика имеет форму эллипсоида, полуоси которого: $a = 0,293$, $b = 0,354$, $c = 0,411$.

Анализ модели второго порядка показывает, что линейные члены (кроме x_2) практически незначимы, увеличились коэффициенты двойного и даже тройного взаимодействия факторов ($x_1 x_2 x_3$), коэффициенты при квадратичных членах уравнения значимы. Это свидетельствует о достижении области оптимума исследуемой функции. Анализ поверхности отклика может определить диапазон оптимальных значений технологических параметров УЗ-микросварки.

Для нахождения оптимальных значений технологических параметров УЗ-микросварки решим систему уравнений второго порядка. Для этого установим значение $x_3 = 0$ и приравняем нулю производные оставшегося уравнения

$$Y = 12,4 + 0,165x_1 + 0,53x_2 - 1,79x_1^2 - 1,13x_2^2 :$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial x_1} &= 0,165 - 3,58x_1 = 0, \\ \frac{\partial Y}{\partial x_2} &= 0,53 - 2,26x_2 = 0. \end{aligned} \right\}$$

Решив систему уравнений относительно x_1 и x_2 , получили $x_1 = 0,046$, $x_2 = 0,234$, а оптимум функции соответствует 12,6 сН. В целях выяснения однофакторных зависимостей в исследуемой области факторного пространства сделаны сечения соответствующих поверхностей отклика. Максимальные значения прочности получены при $x_1 = 1$ и $x_2 = -0,5; +0,5$.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ
И УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Теоретические сведения

Для моделирования параметров приборов и технологических устройств, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру, применяют метод конечных элементов (МКЭ), который заменяет задачу отыскания функции оптимизации на задачу отыскания конечного числа ее приближенных значений в отдельных точках-узлах. При этом если исходная задача относительно функции состоит из функционального уравнения, например дифференциального уравнения с соответствующими граничными условиями, то задача метода конечных элементов относительно ее значений в узлах представляет собой систему алгебраических уравнений. Основой метода является возможность разложить любую непрерывную функцию в бесконечный ряд по некоторым базисным функциям. Таким образом, существуют функции, удовлетворяющие определенным требованиям, по которым любую функцию $f(x)$ можно представить на отрезке $[a; b]$ в виде

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \psi_k(x); \quad x \in [a; b], \quad (3.1)$$

где a_k – константы, зависящие от отрезка, базисных функций $\psi_k(x)$.

Аппроксимация заключается в выборе базисных функций и последующем поиске коэффициентов a_k из предположения

$$f(x) = \sum_{k=0}^K a_k \psi_k(x). \quad (3.2)$$

С уменьшением максимального размера элементов увеличивается число узлов и неизвестных узловых параметров. Вместе с этим повышается возможность более точно удовлетворить уравнениям задачи и тем самым приблизиться к искомому решению. Для линейных задач, когда неизвестные функции и операции над ними входят во все соотношения задачи только в первой степени,

метод конечных элементов получил достаточно полное математическое обоснование. В общем случае алгоритм практического применения метода конечных элементов состоит из четырех этапов:

1. Выделение конечных элементов (разбиение исследуемой области на конечные элементы).

2. Определение аппроксимирующей функции для каждого элемента. На этом этапе значение непрерывной функции φ в произвольной точке его конечного элемента аппроксимируется полиномом $\varphi(e)$:

$$\varphi(e) = A(e)R + A_0, \quad (3.3)$$

где $A(e)$ – вектор-строка коэффициентов полинома;

A_0 – свободный член;

$R = (x, y, z)$ – вектор координат в рассматриваемой точке.

Основная задача этого этапа заключается в определении неизвестного вектора $A(e)$ и свободного члена A_0 . Для этого на основе использования условия непрерывности функции в узлах коэффициенты полинома выражают через вектор $\Phi(e)$ узловых значений функции и координаты узлов. После эквивалентного преобразования получаем

$$\varphi(e) = N(e)\Phi(e), \quad (3.4)$$

где $N(e)$ – матрица-строка, элементы которой называют функциями формы конечного элемента.

Функции формы конечного элемента можно вычислить в каждой точке элемента через координаты самой точки и координаты узлов элемента.

3. Объединение конечных элементов в ансамбль. На этом этапе уравнения $\varphi(e) = N(e)\Phi(e)$, относящиеся к отдельным элементам, объединяются в ансамбль, т. е. в систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \Phi_i &= a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i; \\ \Phi_j &= a_1 + a_2 X_j + a_3 Y_j; \\ \Phi_k &= a_1 + a_2 X_k + a_3 Y_k. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Полученная система уравнений является моделью искомой непрерывной функции.

4. Определение вектора узловых значений функции. Вектор Φ в системе уравнений $\varphi = N\Phi$ неизвестен. Его определение является наиболее сложной процедурой при использовании метода конечных элементов. Разработано несколько алгоритмов вычисления вектора Φ . Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками, имеет под собой математическое и (или) физическое обоснование. Найденные значения вектора Φ подставляются в функции формы элемента (функции, которыми производится аппроксимация в границах конечного элемента, вид которых определен и зависит от формы элемента), после чего значение функции φ вычисляется в любой точке заданной области.

Наиболее важными достоинствами МКЭ являются следующие:

1. Метод позволяет построить удобную схему формирования системы алгебраических уравнений относительно узловых значений искомой функции. Приближенная аппроксимация решения при помощи простых полиномиальных функций и все необходимые операции выполняются на отдельном типовом элементе. Затем производится объединение элементов, что приводит к требуемой системе алгебраических уравнений. Такой алгоритм перехода от отдельного элемента к их полному набору особенно удобен для геометрически и физически сложных систем.

2. Каждое отдельное алгебраическое уравнение, полученное на основе метода, содержит незначительную часть узловых неизвестных от общего их числа. Другими словами, если многие коэффициенты в уравнениях алгебраической системы равны нулю, то это значительно облегчает ее решение.

3. Задачи, решение которых описывается функциями, удовлетворяющими функциональным уравнениям, носят название континуальных. В отличие от них решение так называемых дискретных задач точно определяется конечным числом параметров, удовлетворяющих соответствующей системе алгебраических уравнений. МКЭ, так же как и другие численные методы, по существу приближенно заменяет континуальную задачу на дискретную. Процедура такой замены имеет простой физический смысл, что позволяет более полно представить себе весь процесс решения задачи, избежать многих возможных ошибок и правильно оценить получаемые результаты.

4. Помимо континуальных задач схема метода применяется для анализа различных форм механического соединения элементов и деталей и формирования алгебраических уравнений при решении непосредственно дискретных задач, что расширяет сферу применения метода.

Методика моделирования ультразвуковой системы пайки

Анализ свободных механических колебаний (модальный анализ) проводится с целью определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Расчет свободных колебаний проводится без учета динамических нагрузок, но является первым и обязательным шагом при решении более сложных динамических задач. В анализе свободных колебаний предполагается упругое поведение конструкции, поэтому ожидаемый отклик является гармоническим. При расчетах свободных колебаний принимается линейное упругое поведение материалов, не учитываются коэффициенты демпфирования и раскрепление конструкции не является обязательным условием расчета.

Современное программное обеспечение, реализующее CAD/CAE-технологии проектирования, позволяет в настоящее время применить метод конечных элементов для поиска и анализа значений собственных частот и их форм волн ультразвукового преобразователя. В качестве CAE-системы выбран пакет ANSYS. Общая методика анализа свободных колебаний в данном приложении включает создание геометрической модели, задание свойств материала, задание граничных условий, настройку опций расчета, закрепление конструкции, настройку сетки, просмотр и анализ результатов.

Для моделирования в пакете ANSYS построены две геометрические модели УЗ-систем (рис. 3.1), которые включают следующие составные части:

1. Преобразователь магнитострикционный из пермендюра K49Ф2.
2. Концентратор УЗ-колебаний, который служит для передачи энергии.

Материал концентратора должен иметь низкое значение температурного расширения. Для этого применяют такие материалы, как титан, сталь и алюминий. Особая форма в виде конуса используется для усиления амплитуды УЗ-колебаний.

3. Волновод предназначен для передачи энергии к излучателю.
4. Излучатель служит для ввода УЗ-колебаний в расплав.

Вторая модель имеет двухсторонний излучатель, который позволяет сконцентрировать максимальную энергию в строго определенном промежутке между излучающими поверхностями излучателей 4 и 5. Дополнительный излучатель изготовлен из стали, так же как и все крепежные элементы (винт, гайка, стойка и шайба).

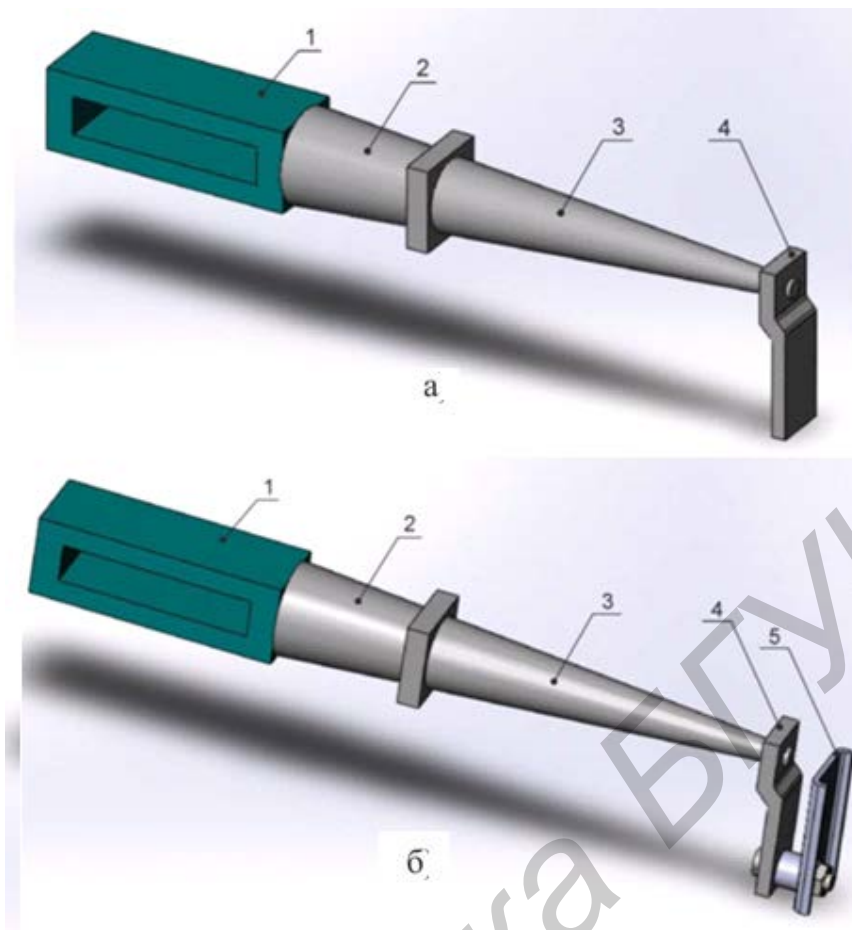


Рис. 3.1. УЗ колебательная система локальной пайки:
 а – с односторонним излучателем; б – с двухсторонним излучателем:
 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – концентратор; 3 – волновод;
 4 – излучатель; 5 – дополнительный излучатель

Для проведения модального анализа в комплексе ANSYS для каждого материала задают плотность и значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Данные параметры приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры материалов модели

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
Сталь 45	210000	0,3	7800
Пермендюр К49Ф2	218000	0,33	8100

Для моделирования частоты и формы колебаний УЗ-системы использовалась конечно-элементная модель, позволяющая выяснить режимы вибрации, которые могут быть возбуждены в заданном диапазоне частот.

Для моделирования учитываем плотность припоя в расплавленном состоянии (800 кг/м^3) с соответствующим коэффициентом Пуассона (0,49) и модулем Юнга (3300 МПа). Все сопрягаемые части УЗ-системы жестко соединены между собой. Излучатели и расплав припоя, а также расплав припоя и стенки ванночки сопряжены с незначительным коэффициентом трения, чтобы отобразить влияние колебаний излучающих поверхностей.

В результате моделирования получены значения собственных частот как всей сборки в целом, так и ее составных частей. Полученные значения резонансных частот УЗ-систем с односторонним и двухсторонним излучателями и максимумы амплитуды колебаний расплава припоя приведены в табл. 3.2 и 3.3. При расчете собственных частот граничные условия накладывались на места фиксации детали в сборке. УЗ-система фиксировалась по двум параллельным плоскостям на преобразователе и по всем внешним плоскостям ванны. Полученные конечно-элементные модели представлены на рис. 3.2 и 3.3, зависимости амплитуды колебаний расплава от частоты – на рис. 3.4 и 3.5.

Таблица 3.2

Резонансные частоты УЗ-системы с односторонним излучателем

f , Гц	U_{max} , ед.
19153	5,3
21377	4,1
21526	6,0
21899	7,0
21999	6,1

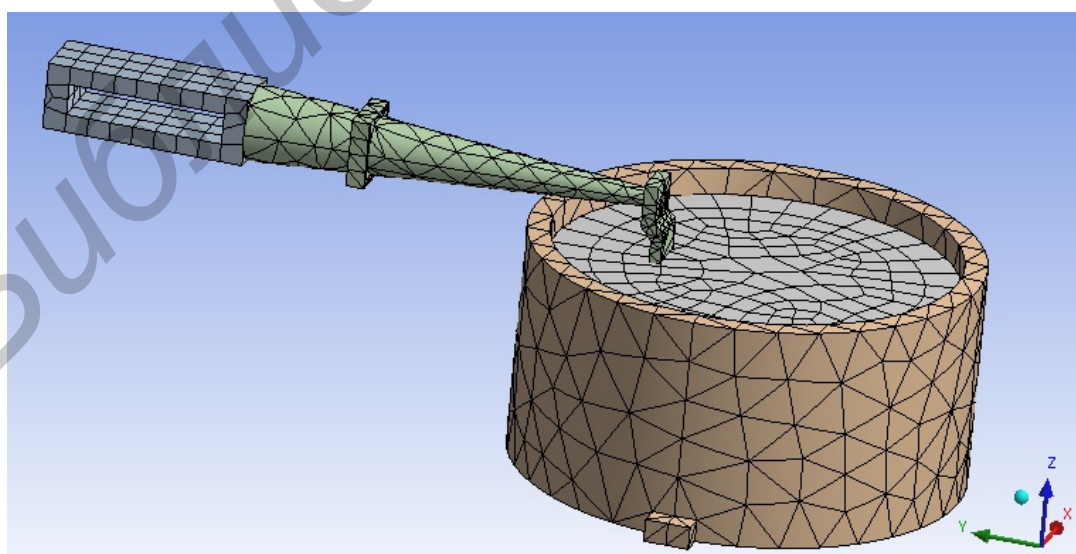


Рис. 3.2. Конечно-элементная модель УЗ-системы с односторонним излучателем

Таблица 3.3

Резонансные частоты УЗ-системы с двухсторонним излучателем

f , Гц	U_{\max} , ед.
20707	9
20864	5,6
21001	5,6
21361	8,3
21374	8,4

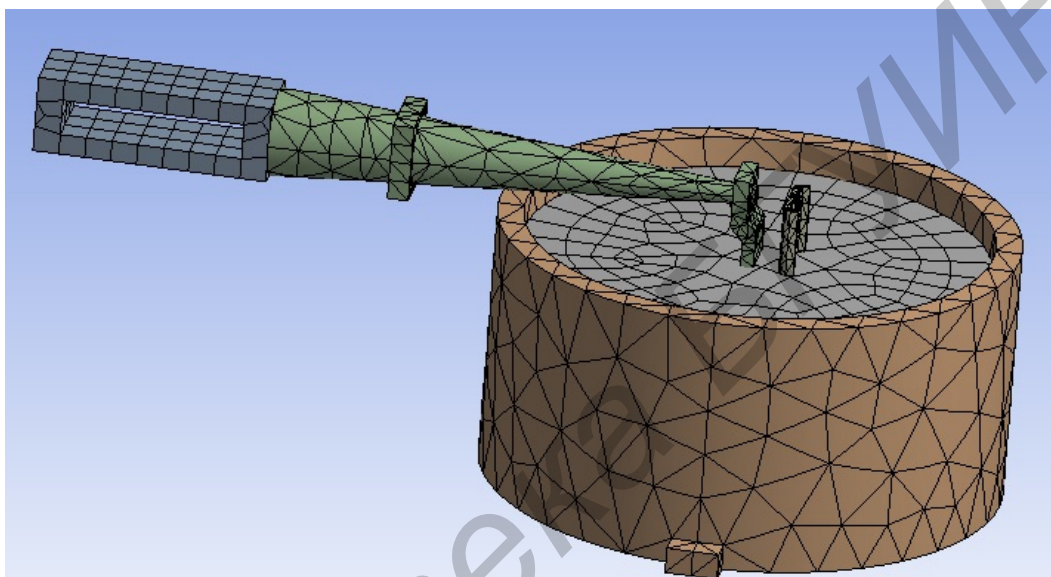


Рис. 3.3. Конечно-элементная модель УЗ-системы с двухсторонним излучателем

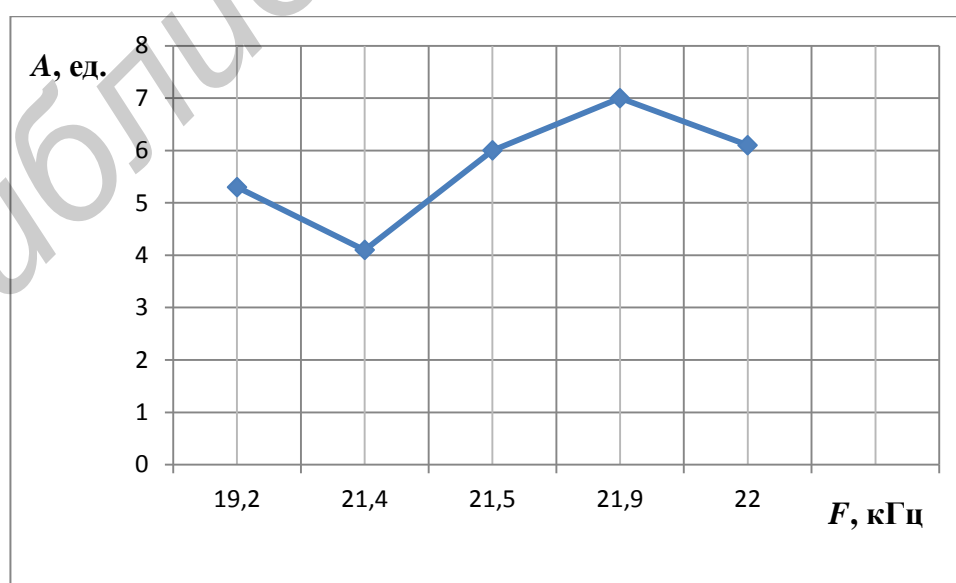


Рис. 3.4. Зависимость амплитуды колебаний расплава от частоты для УЗ-системы с односторонним излучателем

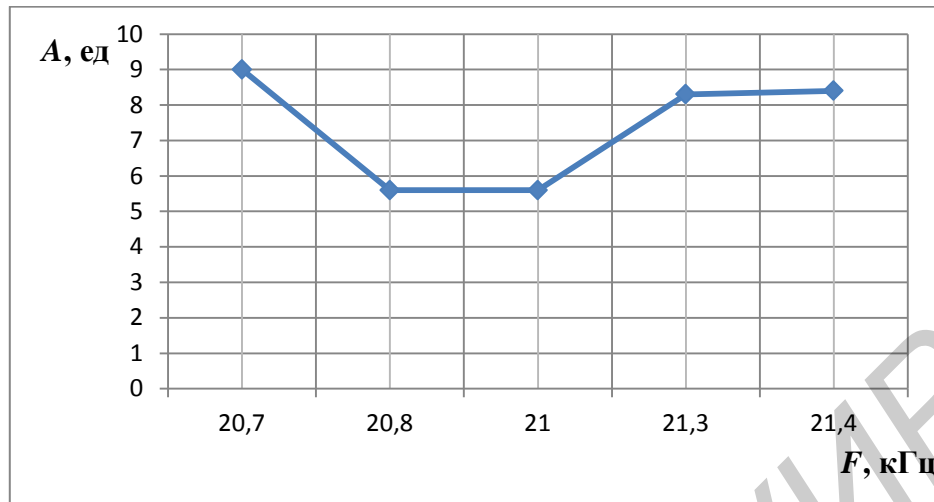


Рис. 3.5. Зависимость амплитуды колебаний расплава от частоты для УЗ-системы с двухсторонним излучателем

Как с односторонним излучателем, так и с двухсторонним получено 5 резонансных частот с начальными условиями поиска резонанса в диапазоне 19–24 кГц. Из результатов моделирования исключены резонансные частоты с поперечными типами волн, так как их распространение перпендикулярно плоскости, в которой распространяется основная УЗ-волна.

В случае с односторонним излучателем оптимальной частотой является частота 21 999 Гц с максимальной амплитудой 6,1 ед. (рис. 3.6).

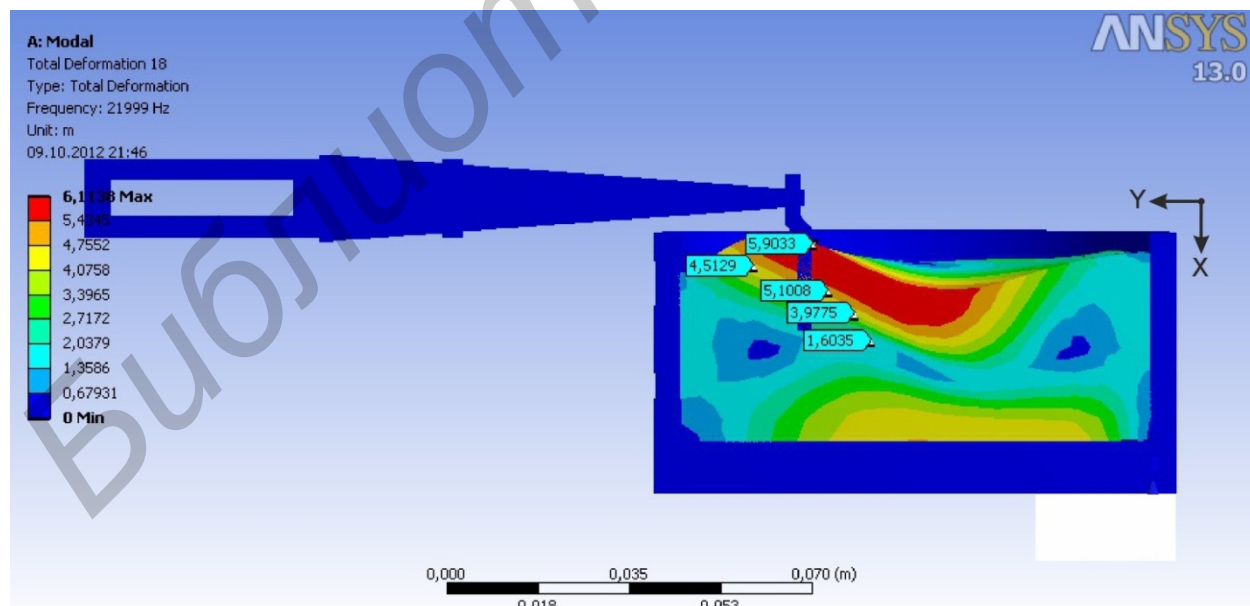


Рис. 3.6. Распределение амплитуд колебаний в УЗ-системе на частоте 22 кГц

Данная резонансная частота оптимальна, т. к. поведение припоя является симметричным с максимумом амплитуды вблизи излучателя и предсказуемым

(с постоянными чередованиями максимумов и минимумов). Несмотря на то что в полученных данных есть меньшая резонансная частота с большей амплитудой колебаний расплава припоя, она носит асимметричный характер и скорее представляет погрешность (максимум смещен относительно излучателя). Оптимальная частота для системы с двухсторонним излучателем составляет 20 707 Гц, а амплитуда колебаний расплава припоя составляет 9 ед. (рис. 3.7).

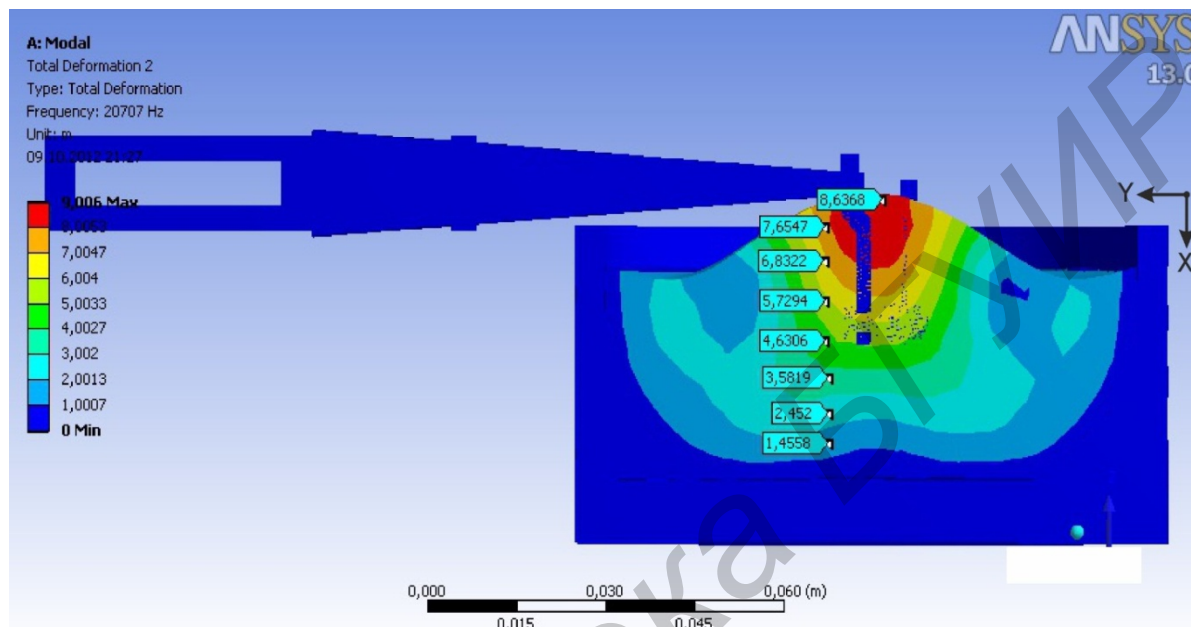


Рис. 3.7. Распределение амплитуд колебаний в УЗ-системе на частоте 20,7 кГц

По полученным данным построены зависимости распределения амплитуды колебаний расплава от поверхности до дна ванны вдоль оси излучателя (рис. 3.8). Для УЗ-системы с односторонним излучателем амплитуда падает с приближением ко дну ванны. Зафиксировано незначительное отклонение амплитуды колебаний расплава (2 ед.) на дне ванны. Максимальное значение амплитуды (5 ед.) наблюдается непосредственно вблизи излучателя на поверхности расплава припоя. Отклонение амплитуды колебаний на дне ванны связано с большой рабочей зоной и высокими амплитудами на поверхности расплава. Так как размер этой зоны достаточно велик и фактически охватывает всю поверхность расплава, то его колебания передаются расплаву и отражаются от дна ванны, возмущая нижние слои расплава.

Для УЗ-системы с двухсторонним излучателем амплитуда колебаний расплава припоя падает равномерно. На дне ванны амплитуда равняется нулю и с приближением к излучателю линейно возрастает. Максимальное значение амплитуды (9 ед.) находится между излучающими поверхностями.

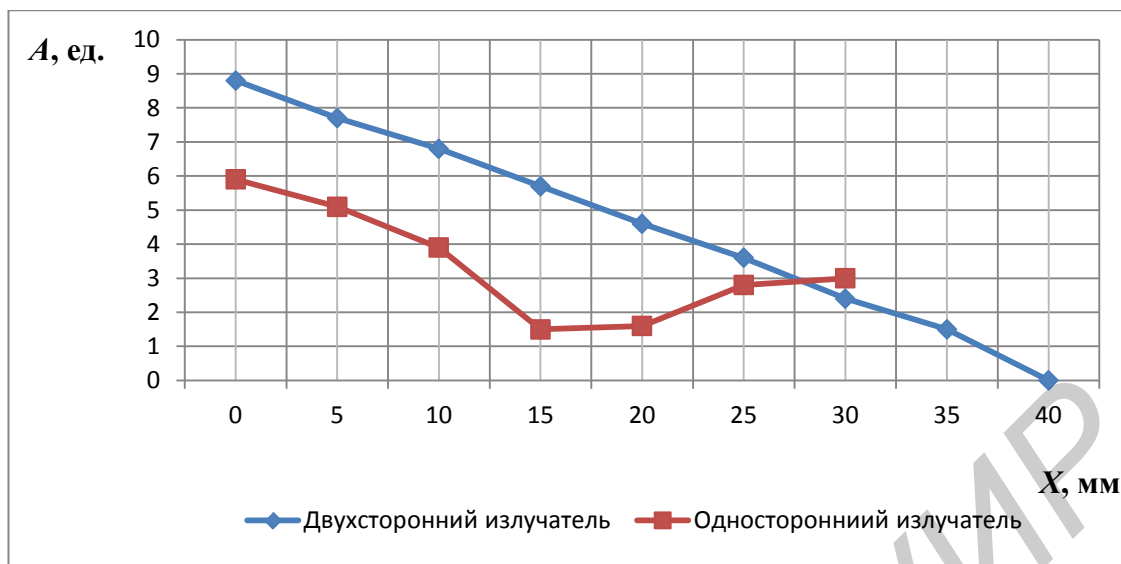


Рис. 3.8. Распределение амплитуд колебаний расплава по объему припоя

На рис. 3.9 отображено распределение амплитуд колебаний по поверхности расплава. Рассматривается направление, перпендикулярное плоскости излучателя. Как для УЗ-системы с односторонним излучателем, так и для УЗ-системы с двухсторонним излучателем амплитуда колебаний по поверхности расплава возрастает с приближением к излучателю в перпендикулярном плоскости излучателя направлении.

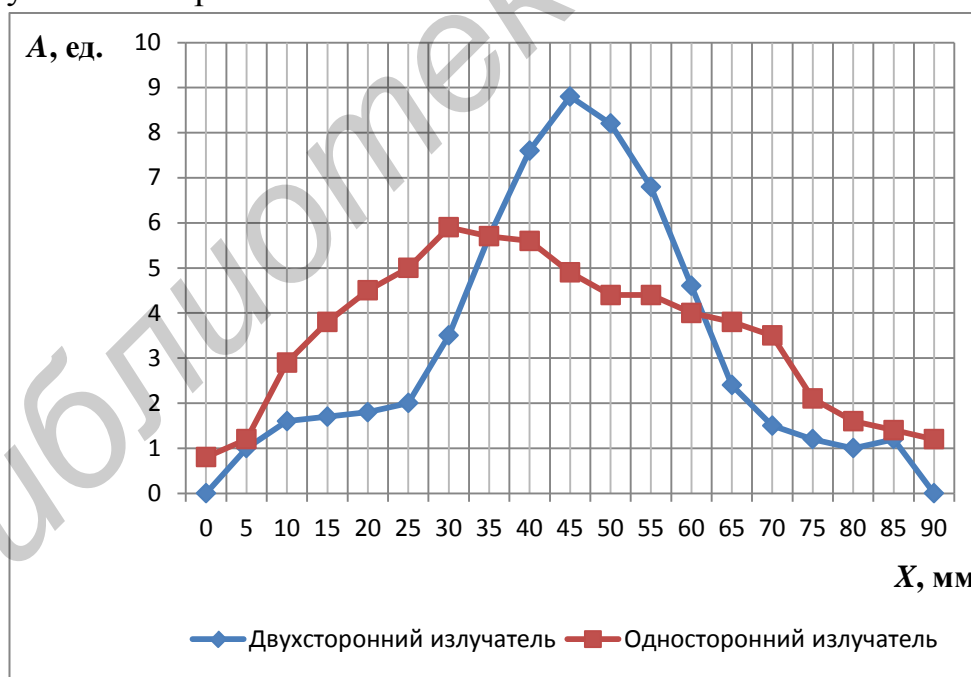


Рис. 3.9. Распределение амплитуд колебаний по поверхности расплава припоя

В УЗ-системе с односторонним излучателем амплитуда колебаний расплава достигает своего максимального значения (5,9 ед.) вблизи излучателя

(25–35 мм). Затем плавно уменьшается, но остается на относительно большом уровне фактически по всей поверхности расплава. Такое распределение амплитуды говорит о передаче УЗ-энергии на расстояние, значительно превышающее рабочее, что также ведет к повышению окисления припоя в ванне.

Применяя УЗ-систему с двухсторонним излучателем, можно сконцентрировать энергию в определенном промежутке. Наибольшее значение амплитуды колебаний находится в промежутке между излучающими поверхностями (9 ед.) и наблюдается ее резкий спад до и после излучателей.

Анализ данных показывает технологическое превосходство УЗ-системы с двухсторонним излучателем, т. к. ее резонансная частота меньше, а амплитуда колебаний расплава припоя больше (в 1,5 раза) и сконцентрирована строго между излучающими поверхностями, вследствие чего уменьшается площадь окисления припоя. Увеличение амплитуды происходит по причине передачи энергии от одного излучателя к другому посредством жесткой акустической связи, т. к. приходящая ко второму излучателю частота колебаний находится в противофазе к частоте на первом излучателе.

Порядок выполнения задания

Получить индивидуальное задание для моделирования технологической системы или прибора.

Вариант 1. Эффект подъема припоя по излучающей поверхности волновода использован в УЗ технологической системе пайки стеклокерамических конденсаторов без их погружения в расплав припоя. Устройство (рис. 3.10) содержит две УЗ колебательные системы, состоящие из магнестрикционных преобразователей 1, акустических трансформаторов упругих колебаний 2, волноводов 3, рабочие концы которых имеют Г-образную форму и опущены в ванну 4 с расплавленным припоем 5. Колебательные системы установлены на основаниях, имеющих возможность точного горизонтального перемещения. Для расплавления припоя и поддержания необходимой температуры пайки использован резистивный нагреватель 6. Г-образные концы волноводов колеблются в полуволновом резонансе, что приводит к появлению двух пучностей и узла колебаний.

При возникновении силы смачивания в УЗ-поле расплав припоя поднимается на высоту H по колеблющейся поверхности волновода. Таким образом, зона верхней пучности, расположенная выше уровня припоя в ванне, является рабочей, что обеспечивает возможность автоматизации пайки конденсаторов 7.

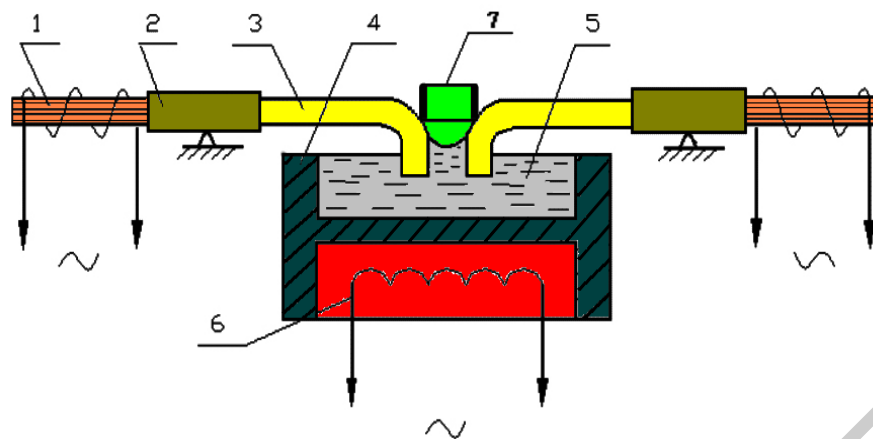


Рис. 3.10. Схема УЗ-лужения стеклокерамических конденсаторов

Заготовки стеклокерамических конденсаторов с электродами из алюминиевой фольги подаются в зону лужения с помощью ротора с зажимами со скоростью 5–100 мм/с. Источниками УЗ-колебаний являются 2 генератора типа УЗГЗ–0,4. В акустических системах устройства применены магнитострикционные преобразователи с резонансной частотой 44 ± 1 кГц. Лужение осуществляется припоем П300К Sn–15 %, Zn–65 %, Cd–20 % при температуре припоя 430–470 °С, напряжении на выходе генератора 20–30 В, скорости 40–60 мм/с.

Вариант 2. Бесфлюсовую пайку изделий из алюминия и его сплавов осуществляют с использованием УЗ-колебаний в режиме бегущей волны при постоянной амплитуде и переменной частоте. С целью повышения производительности процесса и улучшения качества лужения частоту изменяют в пределах от $f_{\min} = 4c / \lambda n$ до $f_{\max} = 4c / \lambda$, где c – скорость распространения УЗ-волны в материале; λ – длина волны; n – целое нечетное число. При создании режима бегущей волны не возникает узлов и пучностей амплитуд смещений вдоль паяемой поверхности, что улучшает равномерность смачивания поверхности изделия по всей ее площади. В схеме УЗ бесфлюсовой пайки плат к основанию корпуса микросборки (рис. 3.11) корпус 3 устанавливается между двумя УЗ-системами, расположенными соосно друг против друга. Для надежной передачи энергии ультразвука корпусу волновода 2 обеих систем прижаты к нему с усилием 100–150 Н. Напряжение с генератора УЗГЗ–0,4 поступает на обмотки магнитострикционных преобразователей 1, соединенных последовательно.

Преобразователи настраивают на резонансную частоту 21,3 кГц за счет применения параллельной схемы компенсации их реактивного сопротивления. Корпус нагревается инфракрасным излучением от двух кварцевых галогенных ламп КИ–220–1000 5, закрепленных в диффузных отражателях. В процессе пайки к плате 4 прикладывается внешне статическое давление величиной 1–5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в четырех точках платы.

Степень смачиваемости как отношение площади платы, покрытой припоем, $S_{\text{ПР}}$ к исходной S_0 , зависит от факторов УЗ-воздействия (амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия ультразвука) и технологических (температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки дозированного припоя). Хорошее смачивание для всех типов покрытий и припоев достигается при амплитуде УЗ-вибраций, равной 10–15 мкм, что соответствует выходному напряжению генератора 50–55 В и току подмагничивания 2 А. При амплитуде более 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат.

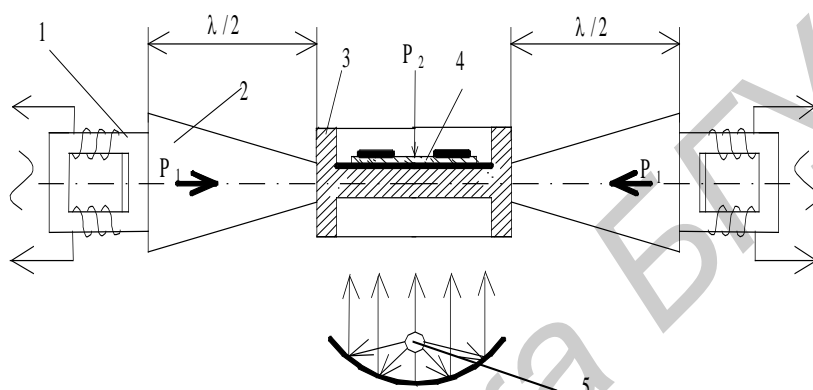
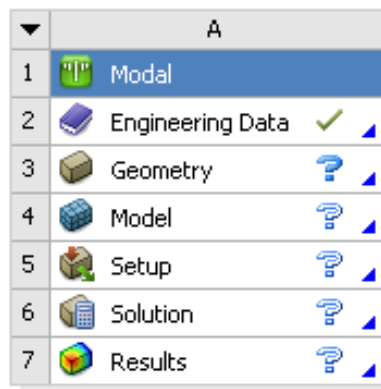


Рис. 3.11. Схема УЗ бесфлюсовой пайки подложек ГИС

Для моделирования составить модели УЗ-систем в пакете SolidWorks, которые затем вставить в пакет ANSYS и варьируя геометрические размеры элементов УЗ-систем, характер их жесткого соединения и частоту процесса, построить графические зависимости распределения амплитуд в системе и найти условия достижения максимума амплитуды в рабочей зоне.

Последовательность анализа свободных механических колебаний в ANSYS включает следующие шаги: загрузку геометрической модели, задание свойств материалов, задание контактных условий и выбор опций расчета, выбор варианта закрепления конструкции, задание параметров сетки и создание сеточной модели, расчет и анализ результатов.

1. После запуска Workbench 14.5 в окне Toolbox необходимо выбрать тип анализа (Analysis System). Выбираем Modal – Модальный анализ. В окне Project Schematic откроется дерево проекта (рис. 3.12).



Modal

Рис. 3.12. Дерево проекта

2. В первом разделе Engineering Data нужно настроить свойства материалов (выбрать из библиотеки ANSYS или создать самим). Для расчета требуются Young's Modulus – Модуль Юнга, Poisson's Ratio – коэффициент Пуассона, Mass Density – плотность.

3. Следующий раздел – Geometry. Нажатием правой кнопки вызывают список действий для раздела. В разделе Geometry задают необходимые материалы каждой детали (для этого предварительно нужно их добавить в разделе Engineering Data (рис. 3.13)).

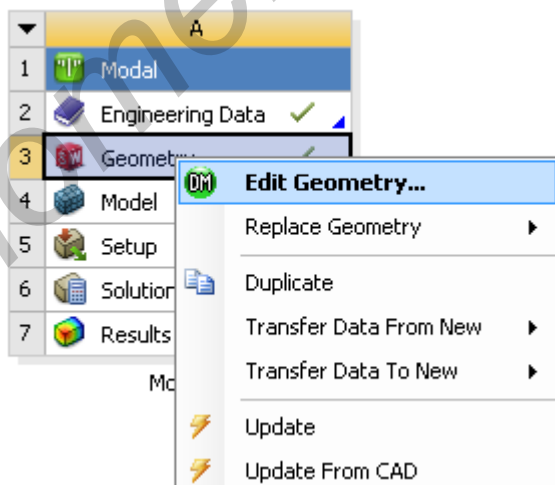


Рис. 3.13. Редактирование данных в разделе Geometry

4. Дерево проекта в разделе Modal. Аналогичным способом вызывается список действий для раздела Model (рис. 3.14).

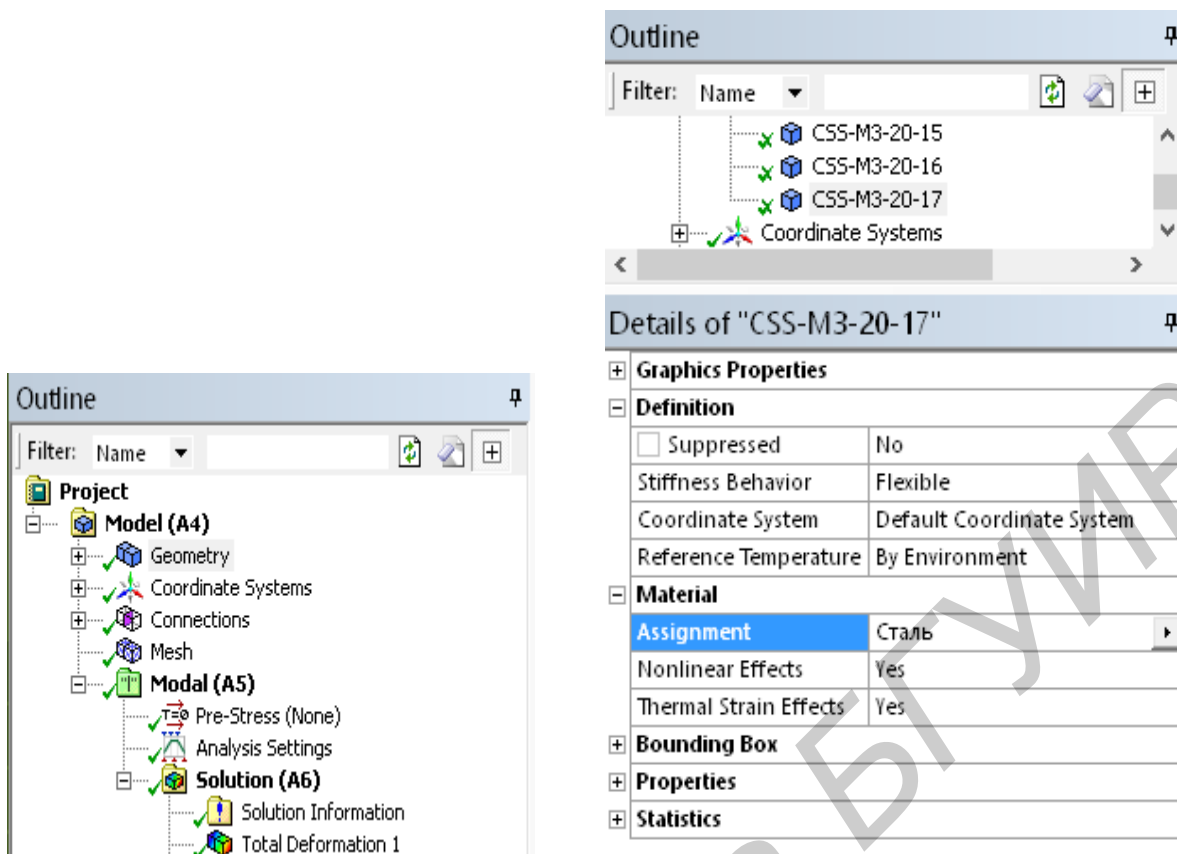


Рис. 3.14. Редактирование данных в разделе Model

5. В разделе Connections необходимо задать контактные опции. В разделе Mesh – настроить параметры сетки. В разделе Analysis Settings – задать необходимые параметры для расчета: число вычисляемых мод (от 6 до 200), интервал поиска собственных частот (рис. 3.15).

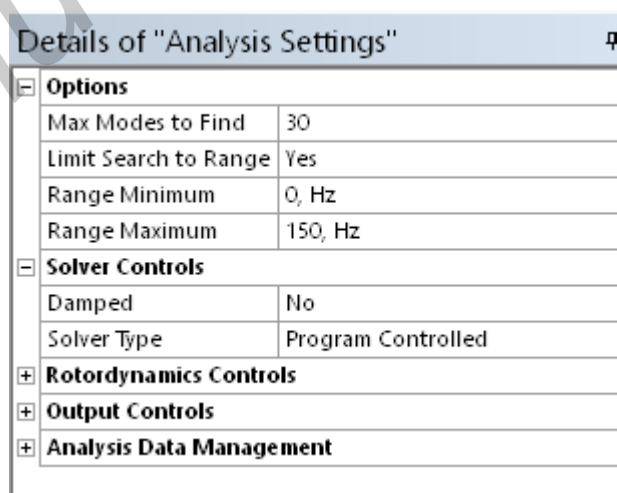


Рис. 3.15. Задание параметров расчета

6. Далее необходимо задать закрепление конструкции (рис. 3.16). Тип закрепления выбирается исходя из условий моделирования. После задания всех необходимых параметров можно запустить расчет.

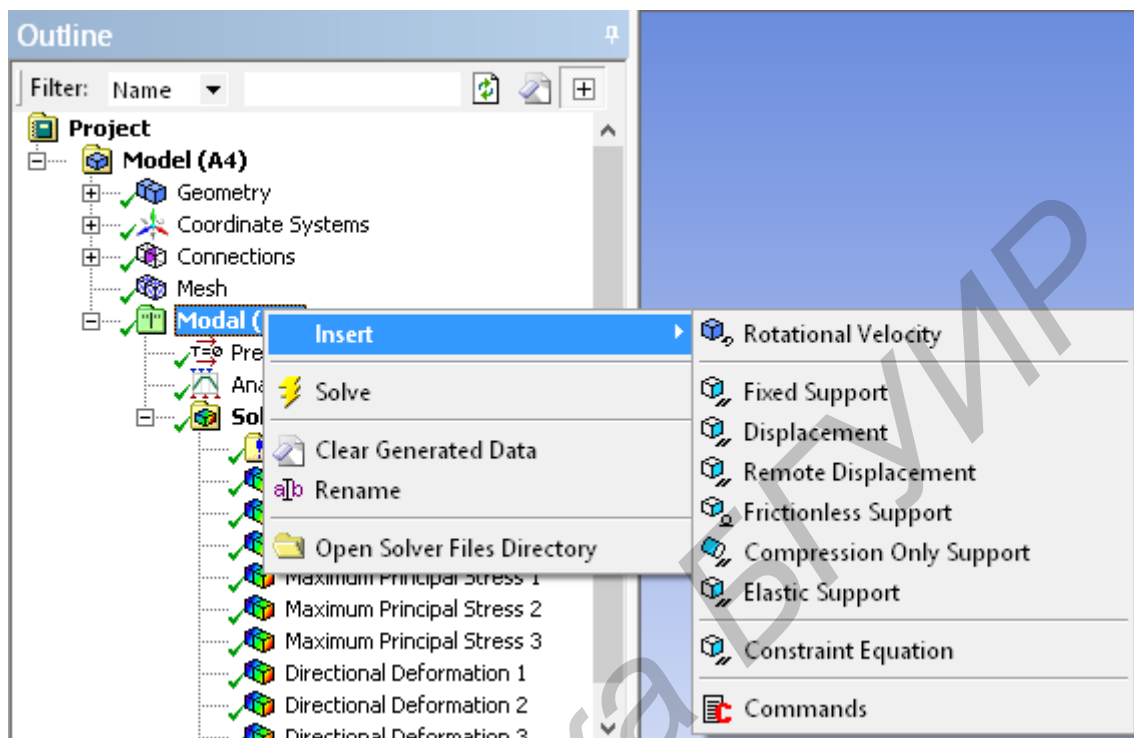


Рис. 3.16. Выбор варианта закрепления конструкции

По окончании расчета во вкладке решений появится диаграмма и таблица с вычисленными значениями собственных частот (рис. 3.17).

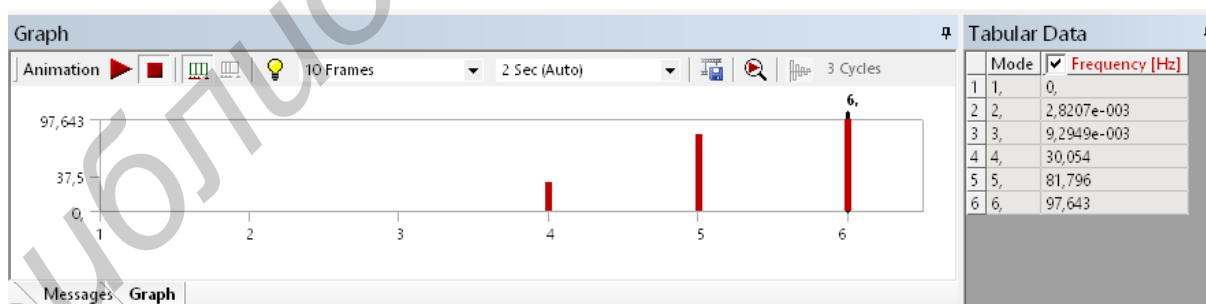


Рис. 3.17. Диаграмма и таблица частот

Для каждой вычисленной частоты можно запросить просмотр соответствующей формы колебаний, после чего произвести анализ. При необходимости внести корректировки в исходные данные и смоделировать заново. В содержание отчета включить схему УЗ-систем, начальные условия моделирования, конечно-элементные модели, графические зависимости и анализ результатов.

Практическое занятие №4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ SMD-КОМПОНЕНТОВ НА ПЛАТЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЯХ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МОНТАЖОМ

Теоретические сведения

Технология поверхностного монтажа (SMT) получила широкое применение к концу 1980-х годов. Элементы были спроектированы таким образом, чтобы уменьшить контактные площадки или выводы, которые паялись бы непосредственно на поверхность печатной платы. В сравнении с традиционными платы для поверхностного монтажа имеют повышенную плотность размещения электронных элементов, обладают меньшими расстояниями между проводниковыми элементами и контактными площадками. Часто припоя достаточно для установки компонента на плату, однако элементы на нижней стороне платы необходимо приклеивать. Компоненты поверхностного монтажа (SMD) имеют небольшой вес и размер (рис. 4.1). Технология поверхностного монтажа обладает следующими преимуществами:

1. Снижение массы и размеров печатных узлов за счет отсутствия выводов у компонентов или их меньшей длины, а также увеличения плотности компоновки и трассировки, уменьшения размеров самой элементной базы и уменьшения шага выводов. Плотность компоновки и выводов в данной технологии удается увеличить, в частности, за счет отсутствия необходимости в поисках контактных площадок вокруг отверстий.

2. Значительное улучшение качества передачи слабых и высокочастотных сигналов, снижение паразитной емкости и индуктивности за счет уменьшения длины выводов и более плотной компоновки.

3. Лучшая ремонтпригодность, поскольку упрощается очистка контактных поверхностей от припоя и отсутствует необходимость в прогреве припоя внутри металлизированного отверстия. Однако ремонт поверхностного монтажа требует специализированного инструмента и предполагает правильное применение технологических режимов.

4. Возможность размещения деталей на обеих сторонах печатной платы.

5. Меньшее число отверстий, которое необходимо выполнить в плате.

6. Повышение технологичности в сравнении с монтажом в отверстия, процесс легче поддается автоматизации.

7. Существенное снижение себестоимости серийных изделий.

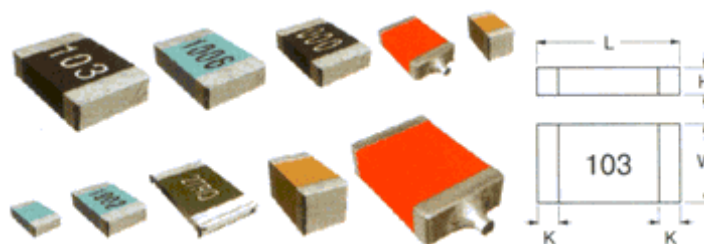


Рис. 4.1. Корпуса SMD-элементов

Кроме положительных моментов есть недостатки, суть которых заключается в следующем:

1. Повышенные требования к точности температуры и времени пайки, поскольку при групповой пайке нагреву подвергается весь компонент.
2. Высокие начальные затраты, связанные с установкой и настройкой оборудования, а также с более сложным созданием опытных образцов.
3. Необходимость специального оборудования даже при единичном и опытном производстве.
4. Высокие требования к качеству и условиям хранения технологических материалов.

Ввиду малых размеров корпусов (табл. 4.1) к оборудованию технологии поверхностного монтажа предъявляются высокие требования по точности. В частности, лучшие представители автоматов-установщиков позволяют обеспечить точность установки порядка 10–15 мкм. Базовым значением допуска на центрирование и сдвиг корпусов является значение 25 мкм.

Таблица 4.1

Размеры SMD-компонентов

Тип корпуса	L , мм	W , мм	H^{**} , мм	k , мм	Примечание
0402 (1005)	1,0	0,5	0,35...0,55	0,2	ГОСТ Р1-12-0,062
0603 (1608)	1,6	0,8	0,45...0,95	0,3	ГОСТ Р1-12-0,125; Р1 -16
0805 (2012)	2,0	1,25	0,4...1,6	0,5	
1206 (3216)	3,2	1,6	0,4...1,75	0,5	
1210 (3225)	3,2	2,0	0,55...1,9	0,5	
1218 (3245)	3,2	4,5	0,55...1,9	0,5	
1806 (4516)	4,0	1,6	1,6	0,5	
1808 (4520)	4,0	2,0	2,0	0,5	
1812 (4532)	4,0	3,2	0,6...2,3	0,5	
2010 (5025)	5,0	2,5	0,55	0,5	
2220 (5750)	5,7	5,0	1,7	0,5	
2225 (5763)	0,5	6,3	2,0	0,5	

Допуски на размер компонентов, точность изготовления печатной платы и нанесения пасты вносят определенный вклад в суммарную точность установки компонента (табл. 4.2), что может приводить к значительному смещению вывода относительно контактных площадок вплоть до отсутствия электрического контакта.

Таблица 4.2

Точность позиционирования SMD

Шаг выводов, мм	0,65	0,5	0,4	0,3
Машинная точность, мкм	120	90	60	25
Точность компонентов	70	50	40	25
Точность платы	50	40	30	25
Точность нанесения пасты	70	60	50	25
Суммарная точность, f	162	125	100	50

Значения суммарной точности установки f_x SMD определяют, используя ряд допущений и три критерия. Суть методики заключается в следующем: требуемую точность позиционирования можно рассчитать исходя из геометрических размеров контактных площадок, выводов компонентов и возможных отклонений. В схеме (рис. 4.2) учитывается позиционирование припойной пасты с соответствующими индексами. На схеме площадка припойной пасты смещена влево, а вывод – вправо. При расположении их по центру контактной площадки эти погрешности будут равны 0, $f_x=h=0$.

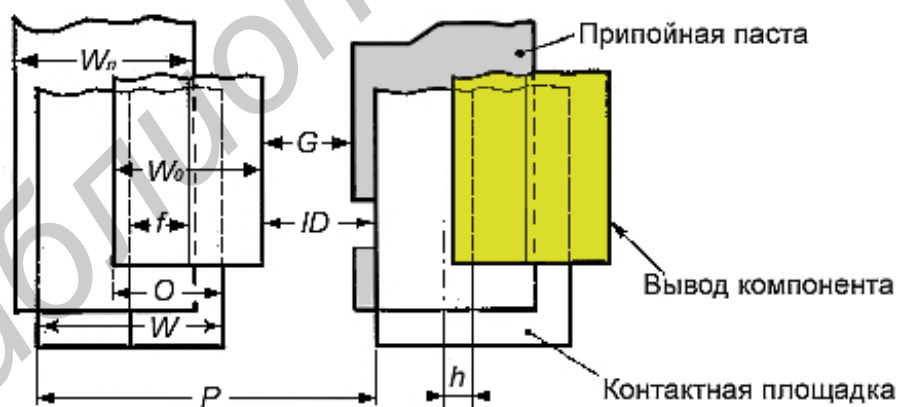


Рис. 4.2. Схема к расчету точности позиционирования компонентов:

P – шаг выводов; W – ширина контактной площадки; $W_{в}$ – ширина вывода;
 ID – гарантированный зазор по изоляционной прочности; O – ширина перекрытия выводом контактной площадки; f – погрешность позиционирования (в направлении X); $W_{п}$ – ширина площадки, занимаемая пастой; G – расстояние от вывода до следующей площадки пасты;
 h – погрешность позиционирования пасты

Для оценки точности позиционирования используют три критерия:

1. Минимальное расстояние по прочности изоляции:

$$f_x \leq P - \frac{1}{2}W_{\theta} - \frac{1}{2}W - ID . \quad (4.1)$$

2. Минимальную ширину зоны перекрытия:

$$f_x \leq \frac{1}{2}W_{\theta} + \frac{1}{2}W - O . \quad (4.2)$$

3. Точность нанесения припойной пасты:

$$f_x \leq P - \frac{1}{2}W_n - \frac{1}{2}W_{\theta} - h - G . \quad (4.3)$$

Неравенство (4.3) имеет смысл, когда припойная паста выступает за пределы контактной площадки, что характеризуется выполнением неравенств $h > \frac{1}{2}(W - W_n), W > W_n$. При этом смещения вывода компонента и припойной пасты происходят в разных направлениях.

Каждый из приведенных выше критериев вносит различный вклад в обеспечение требуемой точности позиционирования. На практике параметры моделей в значительной степени зависят от применяемых компонентов печатных плат, поэтому требуемая суммарная точность позиционирования будет различной для каждого типа компонентов.

Для применения в практических целях делают ряд упрощений, которые делают оценку точности позиционирования несколько грубой, но вполне достаточной для использования в инженерных расчетах.

В частности, принимают следующие упрощения: $W = W_{\theta} = W_n = 0,5P$; $O \geq 0,5W_n$; $h \leq 0,05$ мм; $G \geq 0,1$ мм; $ID \geq 0,1$ мм.

С учетом принятых упрощений приведенные выше неравенства (4.1), (4.2), (4.3) соответствующих критериев можно записать в следующем виде:

1. Минимальное расстояние по прочности изоляции:

$$f_x \leq 0,5P - 0,1 . \quad (4.4)$$

2. Минимальная ширина зоны перекрытия:

$$fx \leq 0,25P . \quad (4.5)$$

3. Точность нанесения припойной пасты:

$$f_x \leq 0,5P - 0,15 . \quad (4.6)$$

Однако расчеты по (4.4), (4.5), (4.6), используя упрощения, теряют точность в оценке и необъективно учитывают изменения таких параметров базовой

модели, как ID , h , G_s . Значения при оценке по трем критериям совпадают, что не может соответствовать истине. Предлагается использовать доработанные модели оценки, которые учитывают точность изготовления SMD-компонентов и платы, влияющую на суммарную точность.

1. Минимальное расстояние по прочности изоляции:

$$f_{x1} = P - 1/2 ((W_B + \delta_k) - (W + \delta_{пп})) - l, \quad (4.7)$$

где δ_k – точность компонента SMD;

$\delta_{пп}$ – точность изготовления платы.

2. Минимальная ширина зоны перекрытия:

$$f_{x2} = 1/2 (((W_B + \delta_k) + (W + \delta_{пп}))) - G. \quad (4.8)$$

3. Точность нанесения припойной пасты:

$$f_{x3} = P - 1/2 ((W_B + \delta_k) - (W + \delta_{пп})) - l - h, \quad (4.9)$$

где $h = 0,01$ мм.

Порядок выполнения работы

Для выполнения практической работы предлагаются следующие варианты заданий:

Таблица 4.3

Варианты практических заданий

Критерий оценки	Шаг выводов	Метод установки	Метод нанесения пасты
1	1,25	Ручной	Ручной
2	0,8	Автомат	Полуавтомат
3	0,3	Автомат	Автомат
1	0,4	Полуавтомат	Полуавтомат
2	0,625	Полуавтомат	Ручной
3	0,5	Полуавтомат	Автомат

1. Запустить файл *Tochnost.exe* и выбрать критерий оценки согласно номеру задания (рис. 4.3). В случае расчета по критерию 1 выбрать величину зазора ID в зависимости от напряжения между контактными площадками, шаг выводов согласно заданию и метод установки компонентов.

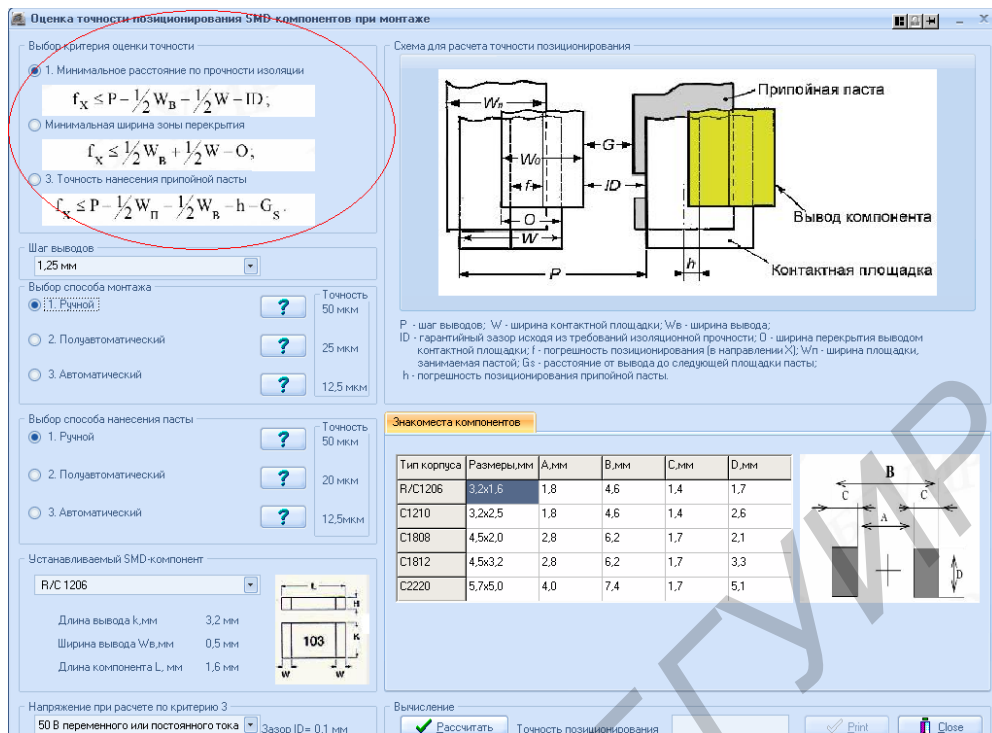



Рис. 4.3. Выбор критерия оценки точности

С оборудованием, соответствующим какому-либо методу, можно ознакомиться, нажав кнопку .

2. Выбрать метод нанесения пасты и монтируемый на плату компонент (рис. 4.4).

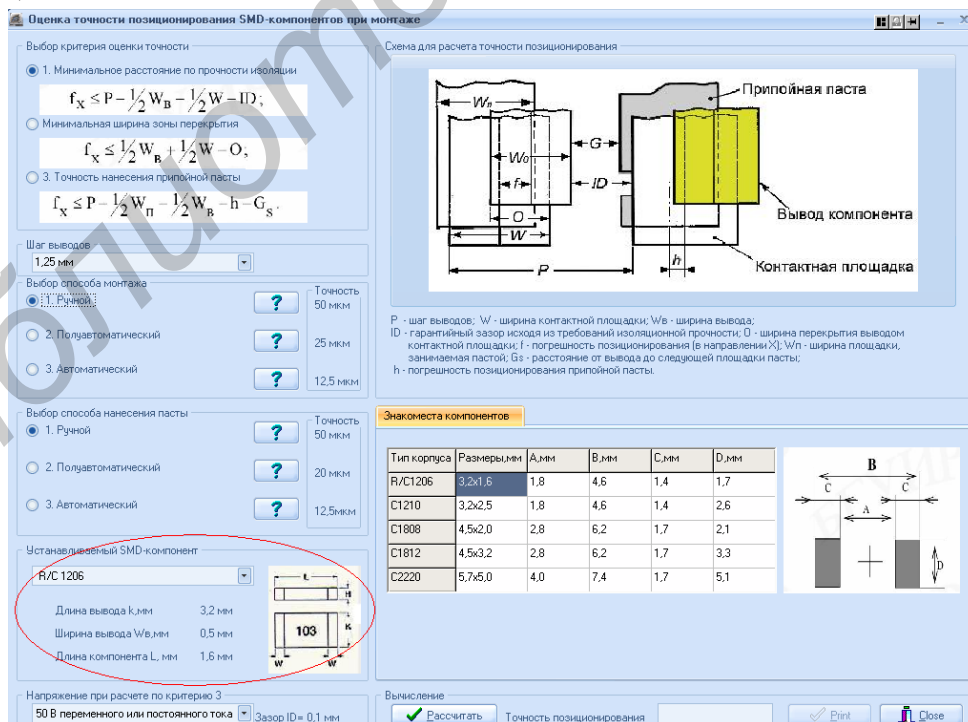


Рис. 4.4. Выбор типа компонента

3. После того как выбраны все необходимые параметры, нажать кнопку «Рассчитать», после чего появляются дополнительные вкладки «Таблица» и «График результатов» (рис. 4.5).

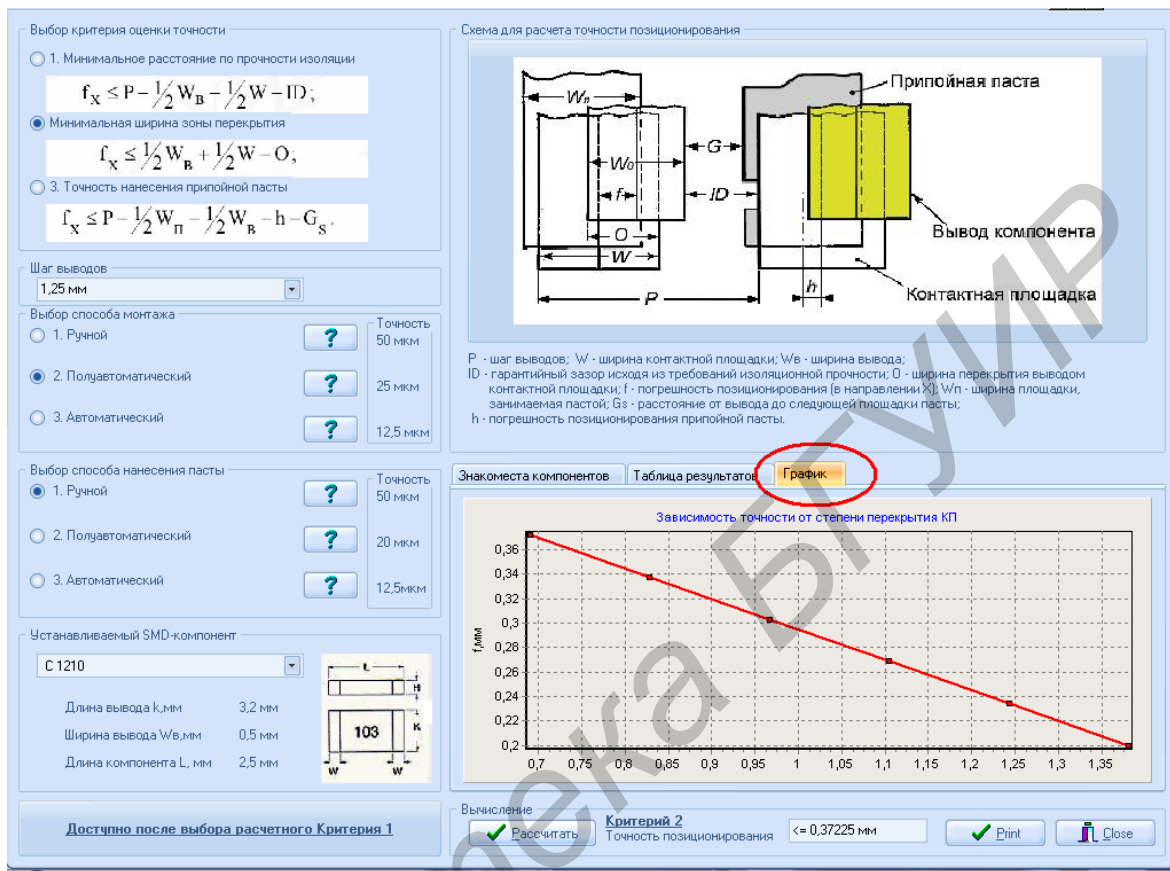



Рис. 4.5. Активация вкладки «График»

Если выбрать переключатель «Рассчитать все», указанный стрелкой, то будет рассчитана точность установки SMD-компонентов на плату и построены графики для шагов от 1,25 до 0,3 включительно (рис. 4.6).

4. После ознакомления с результатами можно их вывести на печать, нажав кнопку «Print», и при отсутствии необходимости новых расчетов нажать кнопку «Close» или  для выхода из программы. В процессе работы при изменении расчетных параметров до вывода на печать кнопка «Print» становится неактивной. Необходимо заново произвести расчет, нажав «Рассчитать», тогда кнопка «Print» снова становится активной.

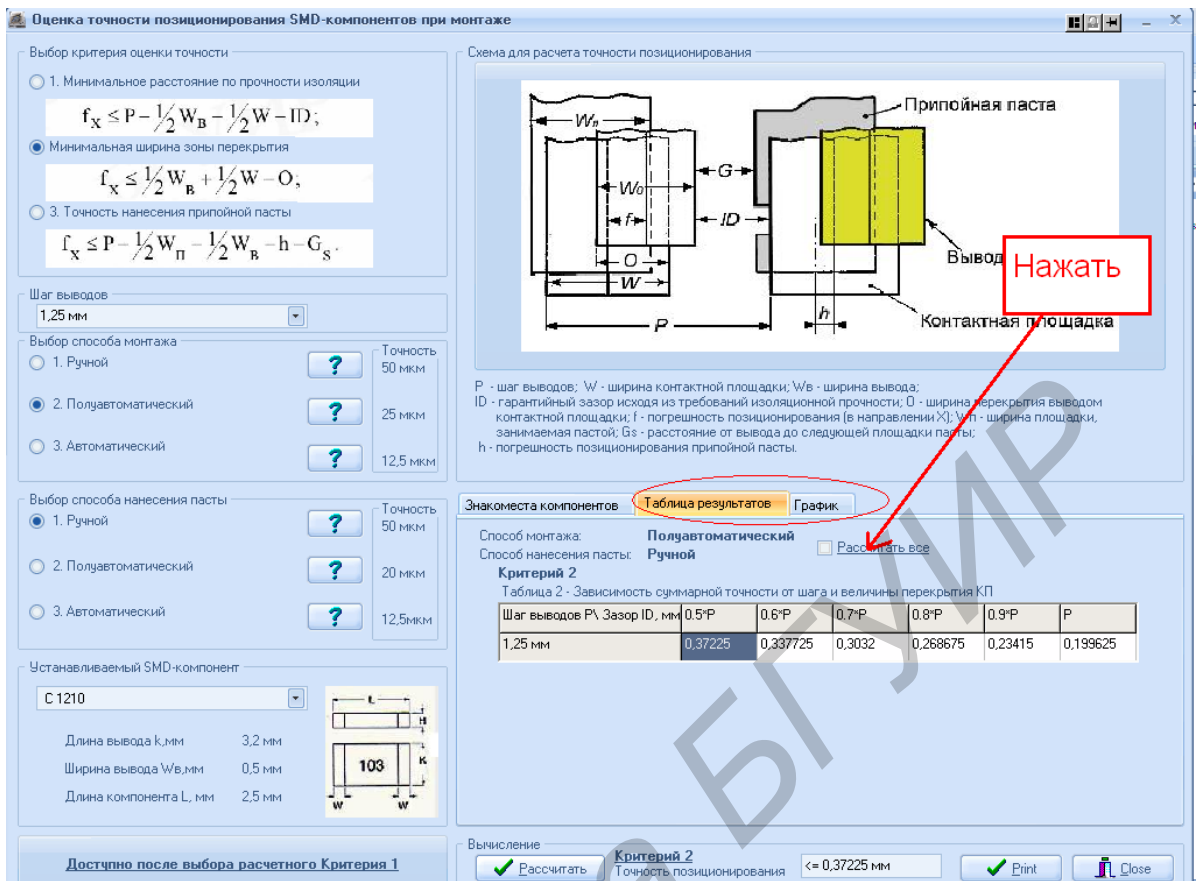


Рис. 4.6. Построение графиков для нескольких шагов

В содержание отчета включить схему оценки точности установки SMD, математические выражения для критериев точности, графики и результаты расчета, выводы.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ПОВЕРХНОСТНО-МОНТИРУЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ
С КОНТАКТНЫМИ ПЛОЩАДКАМИ ПЛАТЫ**

Теоретические сведения

Формирование паяных соединений при поверхностном монтаже предусматривает нанесение паяльной пасты на контактные площадки платы и ее оплавление при нагреве. В табл. 5.1 представлены типоразмеры корпусов поверхностно-монтируемых компонентов (SMD), их габаритные размеры и параметры контактных площадок (рис. 5.1).

Таблица 5.1

Параметры поверхностно-монтируемых компонентов

Типоразмер корпуса	Габаритные размеры	A, мм	B, мм	C, мм	D, мм
C0805	2,0x1,25	0,8	3,4	1,3	1,4
C1206	3,2x1,66	1,8	4,6	1,4	1,7
C1210	3,2x2,5	1,8	4,6	1,4	2,6
C1808	4,5x2,0	2,8	6,2	1,7	2,1
C1812	4,5x3,2	2,8	6,2	1,7	3,3
C2220	5,7x5,0	4	7,4	1,7	5,1

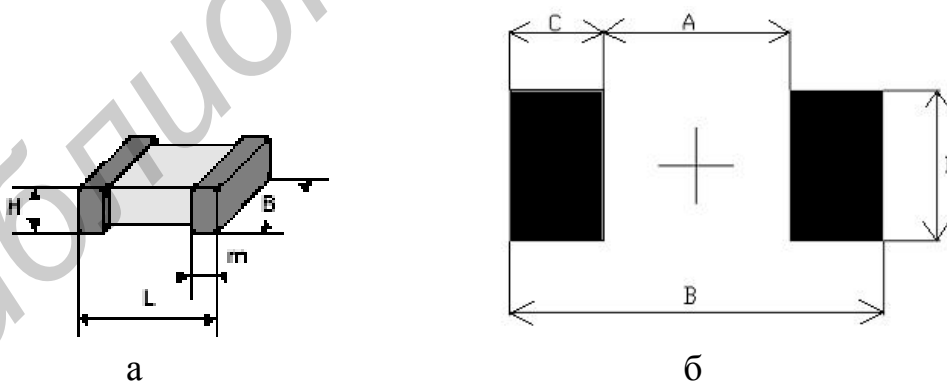


Рис. 5.1. Поверхностно-монтируемый компонент (а) и знакоместо его монтажа на плате (б)

Моделирование включает определение высоты паяного соединения для расчета силы на отрыв, построение графиков зависимости силы на отрыв паяного соединения от параметров соединения и различных паяльных паст и нахождение оптимального типоразмера компонента для надежного соединения.

Параметры паяного соединения, полученного плавлением паяльной пасты, приведены на рис. 5.2, а, б. В первом случае паяное соединение представляет собой трапецевидную модель поперечного сечения высотой H_H , а во втором – пирамидальный паяный контакт высотой H_F .

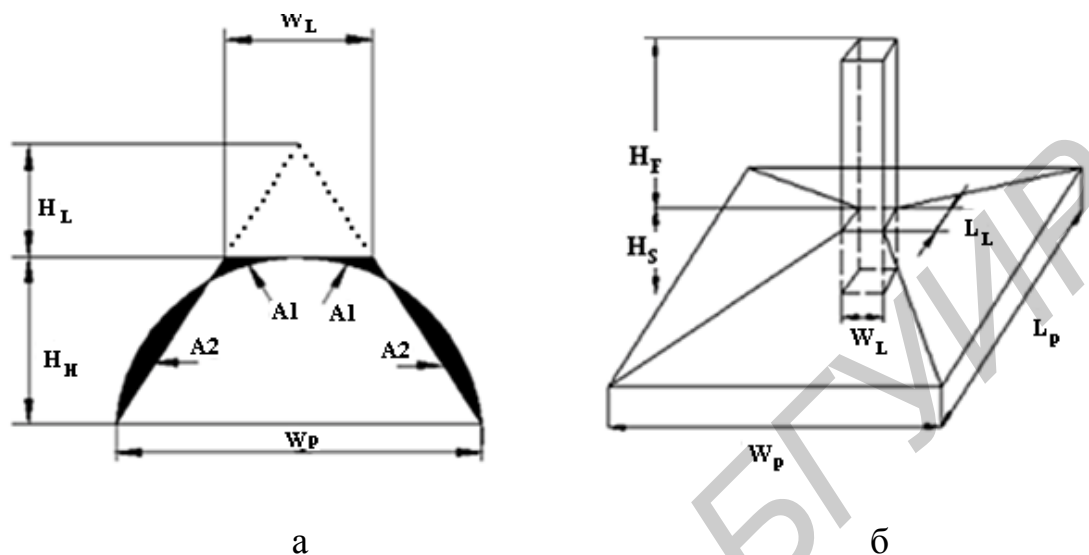


Рис. 5.2. Поперечное сечение паяного соединения (а) и графическое изображение элементов связности в модели (б)

Обозначения на рис. 5.2 следующие: H_F – толщина паяного соединения; H_W – толщина пасты; H_H – уровень нагрева; H_S – среднее значение высоты компонента над контактной площадкой в пасте; M – отклонения параметров электронных компонентов, %; W_P , L_P – ширина и длина контактной площадки; W_L , L_L – ширина и длина компонента.

Паяльная паста на основе олова с его содержанием до 90 % имеет плотность пасты $4,42 \text{ г/см}^3$, а плотность оплавленного припоя – $8,12 \text{ г/см}^3$ соответственно. Поэтому объем оплавленной паяльной пасты может быть выражен как

$$V_W = (4,42 \cdot 0,90) / (8,12) \cdot (H_W \cdot S_K \cdot R), \quad (5.1)$$

где H_W – толщина пасты;

S_K – площадь контакта для пайки;

R – отношение между размерами ячейки трафарета и платы.

Для расчетов R примем равным 1. Таким образом, (5.1) примет вид

$$V_W = 0,49 H_W \cdot (W_P L_P). \quad (5.2)$$

Простые геометрические вычисления дают значение объема припоя для формирования менисков:

$$V_h = 0,51H_h \cdot (W_p L_p). \quad (5.3)$$

Суммарный объем припоя, необходимого для формирования паяного контакта, выражается как

$$V = (0,49H_w + 0,51H_h) \cdot (W_p L_p). \quad (5.4)$$

Общий объем пасты может быть выражен как

$$V = 1/3W_p L_p (H_t + H_f + H_s) - 1/3W_l L_l H_t - W_l L_l H_f. \quad (5.5)$$

Приравнявая (5.4) и (5.5), получим толщину паяного соединения:

$$H_f = \left[3(C_w H_w + C_h H_h) - H_s \right] / (1 + r^{1/2} + 2r), \quad (5.6)$$

где $C_w = 0,49$ – параметр нагрева пасты для плавления;

$C_h = 0,51$ – параметр нагрева;

$r = (W_l L_l) / (W_p L_p)$ – характеристический показатель пайки.

$$H_f = \left[3(C_w H_w + C_h H_h) - H_s \right] / \left[1 + (1 - M)^{1/2} \cdot r^{1/2} + 2(1 - M) \cdot r \right]. \quad (5.7)$$

Математическая модель прочности на отрыв паяного соединения представлена в виде

$$F_p = (1 - M)(W_L L_L) \sigma_N + \left[2(1 - M)W_L + L_L \right] H_f \tau_N, \quad (5.8)$$

где F_p – критическое значение силы разрыва спаянных элементов;

σ_N – предел прочности напряжения растяжения;

τ_N – предел прочности напряжения на срез.

Порядок выполнения задания

1. Загрузить программу расчета, окно которой изображено на рис. 5.3. Нажав интерактивную кнопку «Расчет высоты паяного соединения», открывают окно (рис. 5.4), где выбирают параметры паяного соединения. После ввода всех параметров с клавиатуры нажать кнопку «Расчитать» и в окно снизу будет выведен результат. Высоту паяного соединения можно вводить с клавиатуры.

2. Моделирование по заданному типоразмеру электронного компонента. В верхнем левом углу в меню «Выбор паяльной пасты» выбрать тип пасты. В верхнем правом углу находится меню «Выбор типоразмера для конденсатора», где необходимо выбрать типоразмер.

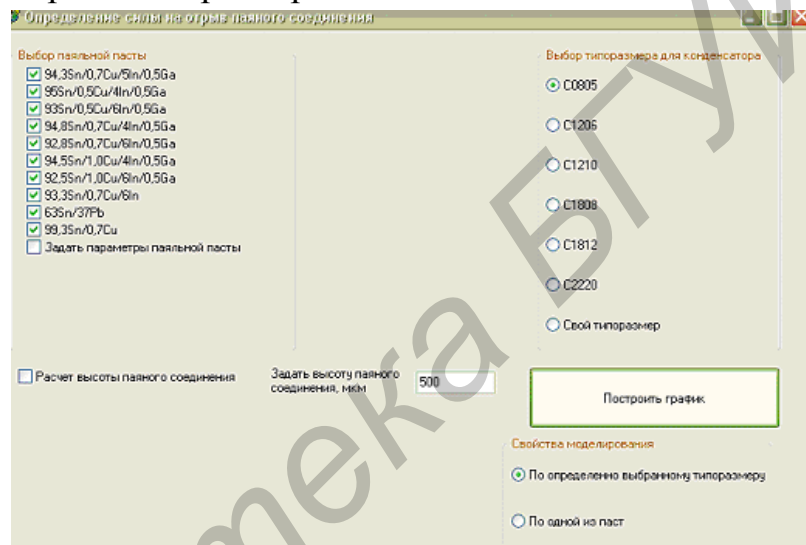


Рис. 5.3. Окно программы расчета

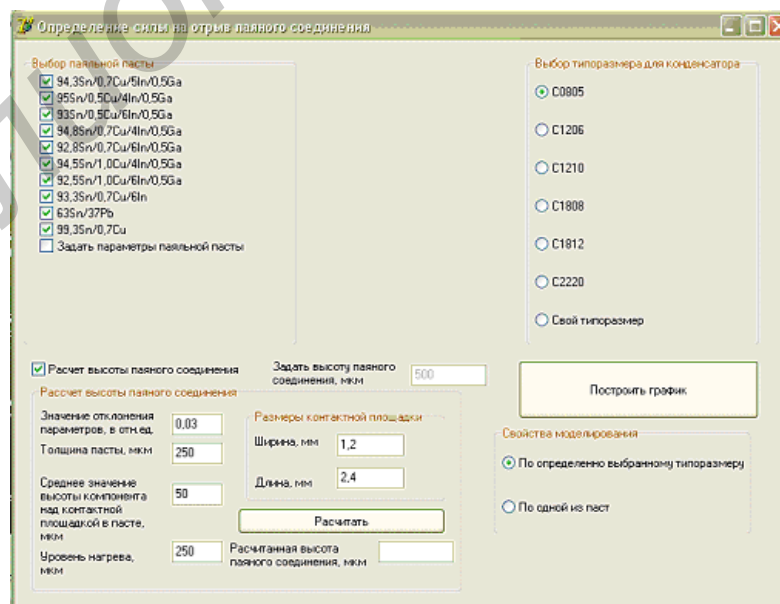


Рис. 5.4. Окно к расчету высоты паяного соединения

В данном случае будет получен график для определенного типоразмера корпуса SMD, но для разных паст, которые будут отмечены в меню «Выбор паяльной пасты» (рис. 5.5).

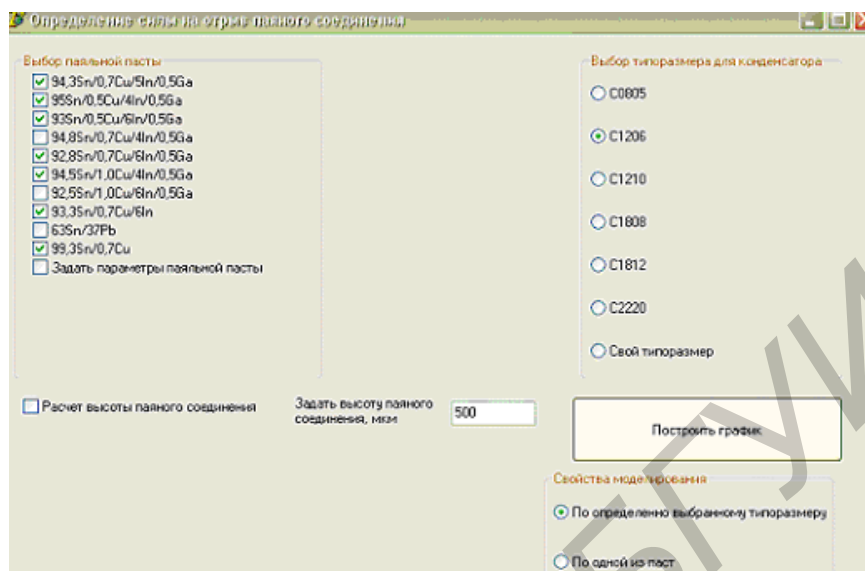


Рис. 5.5. Окно выбора пасты и типоразмера корпуса SMD

3. Моделирование по заданной паяльной пасте. В этом случае необходимо выбрать определенные типы корпусов SMD при образовании соединения одной из паст, которая будет выбрана в меню «Выбор паяльной пасты». Зависимости будут построены нажатием кнопки «Построить график» для выбранных паст и для всех корпусов, которые отмечены в меню «Выбор типоразмера конденсатора». В окне «Результаты моделирования» необходимо в меню «Параметры графика» задать следующие величины: количество точек на графике (20–30 точек), начальное и конечное значение параметра по оси X . В окне «Выбор изменяемого параметра по оси X » выбрать любые доступные виды зависимостей, например, высоту паяного соединения или отклонения параметров.

Для построения нажимается кнопка «Расчет» и в меню «Зависимость» строится графическая зависимость. Справа в меню «Зависимость» находится легенда графика, на которой отображены все зависимости (рис. 5.6). Их можно увеличить выделением левой кнопкой мыши или сохранить с расширением .bmp, для чего нажать кнопку «Сохранить график моделирования».

4. При помощи программы можно сравнить паяльные пасты и типоразмеры SMD по прочности на отрыв паяного соединения. Так, из рис. 5.7 следует, что припой 93Sn-0,5Cu-6In-0,5Ga имеет более высокие прочностные свойства по сравнению с припоем 99,3Sn-0,7Cu.

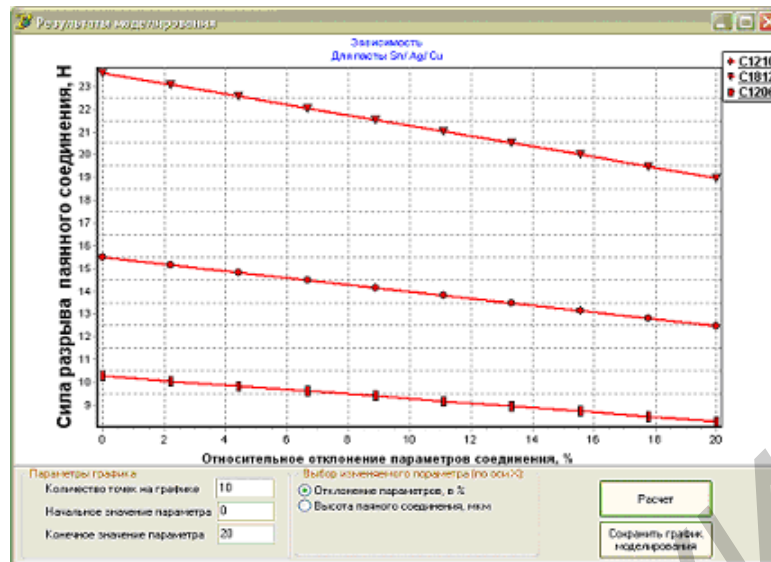


Рис. 5.6. Вывод графических зависимостей

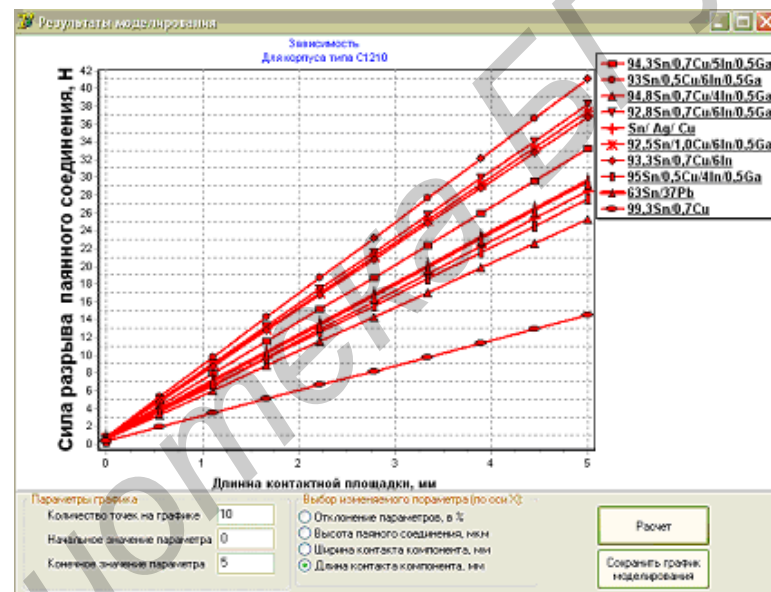


Рис. 5.7. Сравнение силы на отрыв для разных паст

5. В программе в меню «Выбор паяльной пасты» имеется пункт «Задать параметры паяльной пасты», при нажатии которого открывается меню «Параметры паяльной пасты». Аналогично для меню «Выбор типоразмера корпуса конденсатора» появляется меню «Параметры соединения». Таким образом, можно решать перечисленные задачи для любых паяльных паст, анализируя соединения для разных типоразмеров корпусов.

6. В отчет включить: эскиз размещения SMD на знакоместе платы, графические зависимости прочности паяных соединений для выбранных типов пасты и типоразмеров корпусов SMD.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА SOLID WORKS

Теоретические сведения

В связи с прогрессирующей миниатюризацией электронных компонентов и модулей все большее значение приобретает качество монтажа компонентов на печатных платах. Несмотря на то, что технологии пайки постоянно совершенствуются, требования к качеству электромонтажных соединений растут еще быстрее. Большие трудности возникают при пайке электронных модулей с плотным размещением поверхностно-монтируемых компонентов SMD (Surface Mounted Devices) на печатной плате, что заставляет искать новые технологии, способные повысить качество пайки, увеличить ее скорость и снизить стоимость. Необходимо учитывать теплоемкость и теплопроводность электронных компонентов. Это особенно важно для корпусов BGA и печатных плат, которые нагреваются первыми, а затем тепло передается контактными площадками и сферическим BGA-выводами для формирования паяных соединений (рис. 6.1). Таким образом, во избежание теплового удара демонтируемые компоненты не должны перегреваться, а контактные площадки и плавкие выводы BGA должны быть нагреты до температуры, достаточной для разрушения паяного соединения.

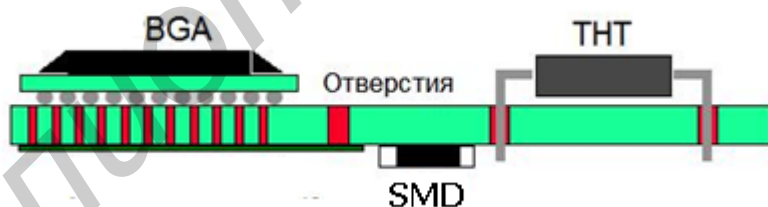


Рис. 6.1. Монтаж компонентов BGA, SMD и THT на плате

В настоящее время одной из совершенных технологий пайки является локальная инфракрасная (ИК), когда нагрев производится сфокусированным пучком ИК-излучения только в местах пайки. Установки локальной ИК-пайки состоят из двух нагревателей: нижнего, который подогревает плату снизу до сравнительно невысокой температуры, и верхнего, осуществляющего в нужный момент быстрый локальный нагрев требуемой области платы до температуры плавления припоя. Фокусируемая пайка более всего пригодна для ремонтных работ электронных модулей с использованием микросхем в корпусах BGA, а также для монтажа и демонтажа компонентов в труднодоступных местах. При-

менение ИК-пайки является перспективным направлением в технологии поверхностного монтажа, которое обеспечивает уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования при одновременном повышении качества паяных соединений.

Из спектра ИК-излучения с длинами волн в диапазоне 0,72–1000 мкм для пайки используется только малая часть этого диапазона: близкое излучение 0,7–1,5 мкм, среднее излучение 1,5–5,6 мкм и дальнее – 5,6–10,0 мкм. Длина волны ИК-излучения зависит от температуры источника излучения (при высоких температурах нагрева излучение имеет меньшую длину волны). Температура нагрева тела будет в общем случае зависеть от длины волны излучения, степени черноты или его отражающей способности, длительности облучения и от массы тела. Чем короче длина волны излучения, тем глубже оно проникает в тело, поэтому близкое ИК-излучение будет обеспечивать более глубокое его проникновение по сравнению со средним и дальним.

Различают четыре условия передачи ИК-энергии телу: отражение, непрозрачность, прозрачность и полупрозрачность. В первом случае вся ИК-энергия отражается от поверхности тела, которое не нагревается, во втором – тормозится на его поверхности, которая в основном и нагревается. В прозрачном материале ИК-энергия проходит через него, не вызывая нагрева, в полупрозрачном – проникает на определенную глубину, вызывая на этой глубине нагрев тела. При практическом применении ИК-излучения возникли определенные проблемы в технологии пайки:

- неравномерность нагрева различных компонентов на поверхности платы из-за разной степени поглощения энергии;
- невоспроизводимость режимов нагрева вследствие рассогласования спектра излучения источника и спектров поглощения компонентов и платы;
- наличие затененных участков платы, где нет прямого ИК-излучения;
- необходимость защиты ИК-излучателей от испаряющихся флюсов.

Первые разработки в области применения ИК-нагрева для пайки основывались на использовании в качестве излучателей ИК-ламп с температурой излучающего тела, превышающей 800–1100 °С. Так как температура пайки обычно находится в диапазоне 210–215 °С, то режимы нагрева значительно отличались от равновесных, что приводило к возникновению перегрева участков на поверхности платы, связанных с различной степенью черноты, массой компонентов и другими причинами. Атмосфера в зоне ИК-пайки также оказывает влияние на ее качество. Чаще всего ИК-установки работают в условиях воздушной атмосферы, однако присутствие кислорода в зоне пайки не всегда желательно, т. к. может происходить окисление припоя и разрушение органиче-

ских материалов. Поэтому при пайке в воздушной атмосфере ограничивается длительность цикла нагрева, которая не должна превышать 100–150 с. Перспективно применение при ИК-пайке азота с малым содержанием кислорода и водородно-азотной смеси. При этом улучшается качество пайки за счет исключения окисления припоя, повышения активности флюса, возрастает также крайевой угол смачиваемости флюса (что уменьшает его количество), затекающего под корпуса элементов, и остаточные ионные загрязнения на платах, упрощается очистка печатных плат.

Моделирование параметров ИК-устройств

Экспериментальная проверка работоспособности ИК-устройств на реальных объектах довольно дорога, а зачастую невозможна не только по экономическим, но и по конструктивным соображениям. В таких случаях моделируют теплообмен в системе ИК-нагрева с помощью прикладных пакетов. В модуле Flow Simulation, интегрированного в систему SolidWorks, моделируют геометрию ИК-нагревателей и выполняют тепловые расчеты и анализы «в одном окне». Это снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта геометрии через промежуточный формат данных (SAT, IGES и т. д.).

ИК-излучатели обычно имеют ограниченную площадь, при этом зона наибольшего нагрева находится непосредственно под нагревателем. Теплопередача излучением является эффективным механизмом передачи тепла:

$$T(K)E = bT^4, \quad (6.1)$$

где E – тепловая энергия излучения, пропорциональная четвертой степени абсолютной температуры;

b – постоянная Стефана – Больцмана;

T – температура источника излучения.

Длину волны ИК-излучения источника нагрева обычно выбирают среднюю из диапазона, для которой рассчитывают интенсивность излучения:

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1}, \quad (6.2)$$

где C_1, C_2 – постоянные Планка: $C_1=3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт, $C_2=1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К;

λ – длина волны излучения;

T – абсолютная температура.

Методика анализа ИК-нагрева в SolidWorks включает: создание геометрической модели, задание свойств материалов и граничных условий, настройку опций расчета, настройку сетки и просмотр результатов. Для решения поставленной задачи в программном пакете SolidWorks используют метод конечных объемов:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \nabla(\rho U \varphi) - \nabla(D_{\varphi} \varphi) = S_{\varphi}, \quad (6.3)$$

где $\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t}$ – изменение физической величины φ ;

$\nabla(\rho U \varphi)$ – конвективное слагаемое в законе сохранения величины φ ;

$\nabla(D_{\varphi} \varphi)$ – диффузное слагаемое в законе сохранения величины φ ;

S_{φ} – источниковое слагаемое в законе сохранения величины φ .

Первым этапом алгоритма моделирования нагрева является создание трехмерной модели устройства ИК-пайки и печатной платы с установленными на ней электронными компонентами (рис. 6.2, а). Для моделирования выбраны ламповые излучатели и керамические ИК-панели (рис. 6.2, б), которые обладают возможностью отдавать высокую мощность при хорошей равномерности нагрева.

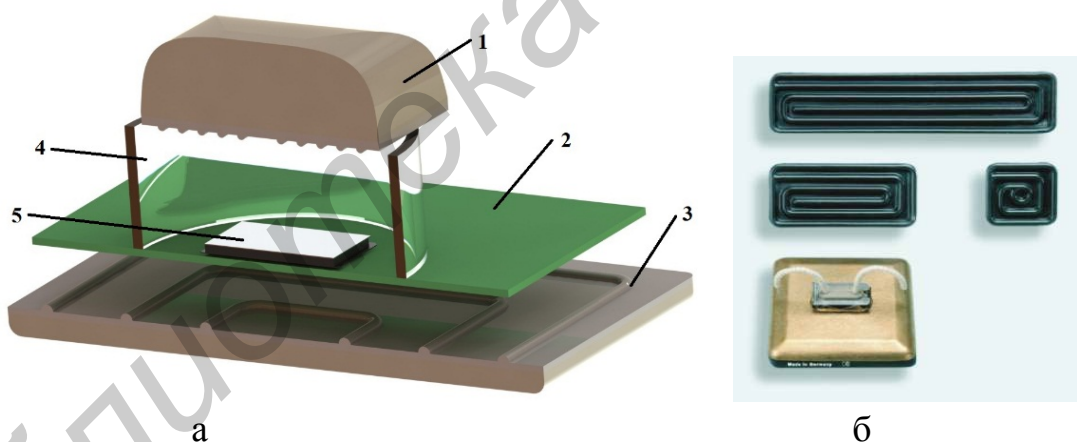


Рис. 6.2. ИК-нагреватели:

а – геометрическая модель: 1 – верхний нагреватель; 2 – печатная плата;

3 – нижний нагреватель, 4 – кварцевый концентратор энергии;

5 – паяемый компонент; б – керамические ИК-нагреватели

Для формирования шариков инфракрасным нагревом используем ИК паяльную станцию (рис. 6.3), которая предназначена для оплавления припойных паст при сборке электронных модулей с поверхностно-монтируемыми изделиями электронной техники. Установка осуществляет пайку как с одной стороны, так и одновременно с двух сторон платы. В качестве источника ИК-излучения применены галогенные лампы мощностью 300 Вт для верхнего блока нагревателя и 1000–2000 Вт для нижнего блока подогрева. Для ГЛН КИ 220-1000 при

питающем напряжении 220 В максимальная спектральная интенсивность излучения ($I_{\lambda_{\max}}$) достигает 52 Вт/ср·мкм на длине волны 1,1 мкм, а для КГМ 30-300 $I_{\lambda_{\max}}=18$ Вт/ср·мкм на длине волны 1,3 мкм.

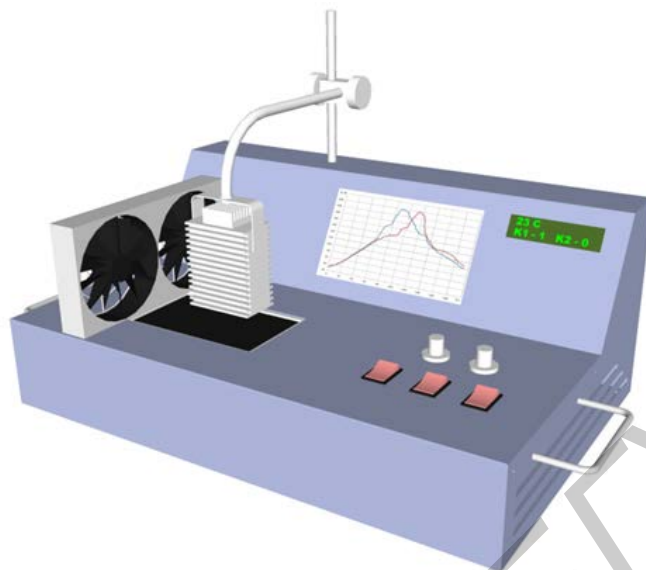


Рис. 6.3. ИК паяльная станция

Поскольку процессы, происходящие при пайке ИК-излучением, главным образом касаются печатной платы с электронными компонентами и ИК-нагревателя, то для оптимизации работы расчетного модуля Flow Simulation пакета SolidWorks Premiumx64 Edition необходимо построить геометрическую модель, состоящую из печатной платы, паяемого компонента, верхнего и нижнего ИК-нагревателей.

На этапе подготовки моделирования процесса ИК-пайки устанавливают параметры расчетного домена (Computational Domain), указывают область, заполненная воздухом (Fluid Subdomain), выбирают материалы каждой детали сборки с необходимыми для инженерного расчета параметрами. Источниками тепла (Heat Sources) являются нижний и верхний нагреватели, для которых выбирают значения мощности из диапазона ее варьирования. Далее указываются поверхности, получающие ИК-излучение от нагревателей (Radiative Surfaces), типы источников излучения (Radiative Sources), интенсивность их излучения и мощность. В месте пайки электронного компонента на плату указывается контактное тепловое сопротивление (Contact Resistances) для адекватности анализа. Для ускорения моделирования можно установить начальную температуру печатной платы, равную температуре предварительного нагрева (Initial Conditions).

Целевыми функциями оптимизации параметров ИК-нагревателей мощностью 500, 750 и 1000 Вт и расстоянием от нагревателя до печатной платы 20 и 30 мм являются более эффективное использование ИК-излучения и минимизация нагрева электронных компонентов для снижения теплового удара. Поскольку пайка происходит при температурах 235–500 °С, а пики распределения температуры печатной платы приходятся на места пайки компонентов к плате, то примем в качестве температуры нагрева платы среднее значение распределения температуры. Для электронного компонента принимаем в качестве средней температуры ее среднее значение на всей его длине.

Порядок выполнения работы

1. Для активации модуля Flow Simulation его необходимо выбрать в меню Options → Add-In. Далее необходимо выбрать начальные параметры с помощью мастера настроек Wizard (рис. 6.4): систему единиц измерения, тип анализа (рис. 6.5), окружающей среды (рис. 6.6), материала (по умолчанию), настройки теплообмена (рис. 6.7), задаются также значения начальных и окружающих условий и точность моделирования (рис. 6.8).

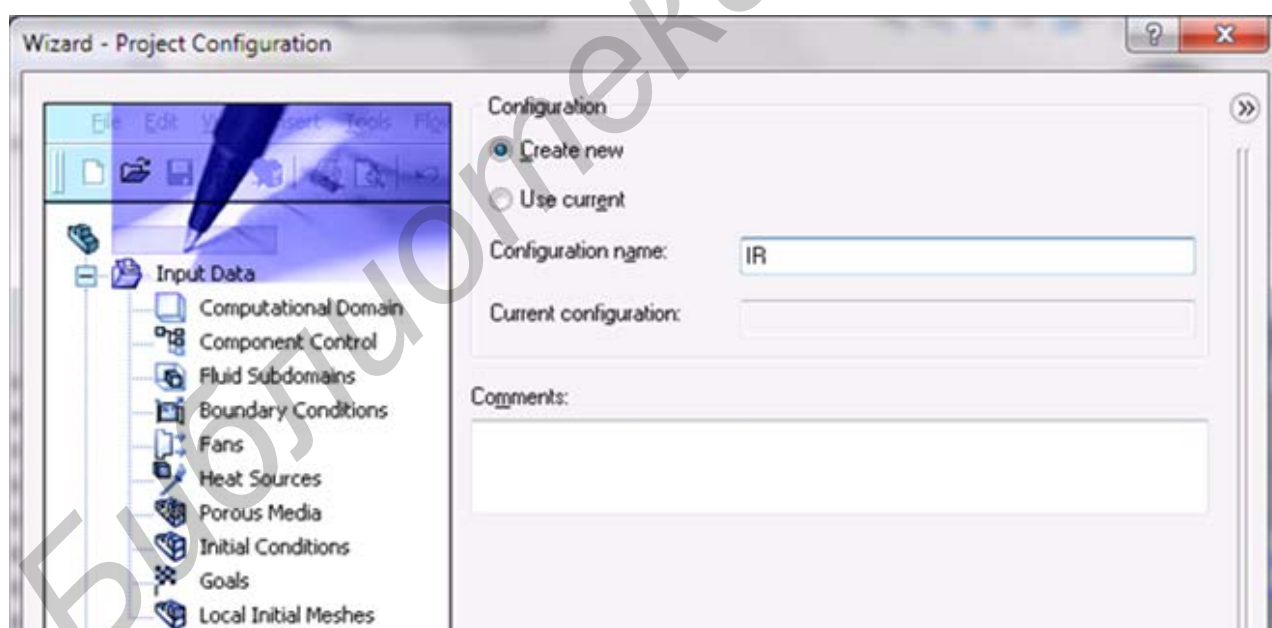


Рис. 6.4. Окно Flow Simulation. Wizard

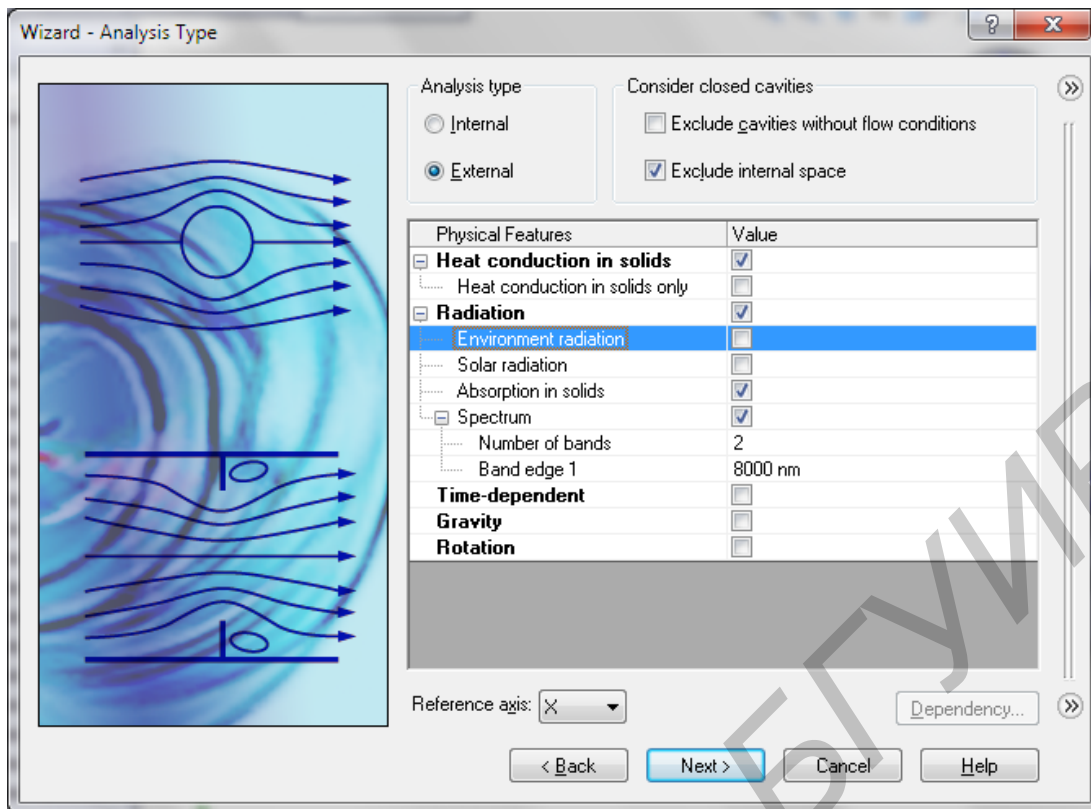


Рис. 6.5. Окно Flow Simulation. Wizard. Выбор типа анализа

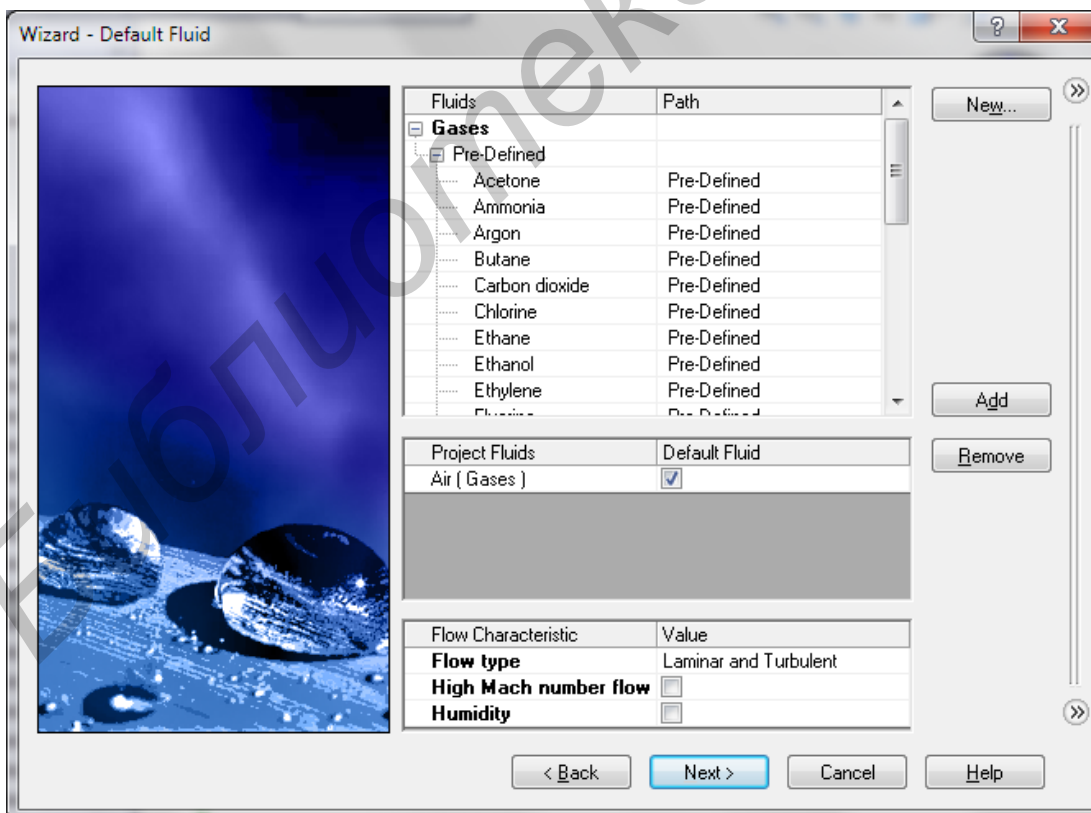


Рис. 6.6. Окно Flow Simulation. Wizard. Выбор окружающей среды

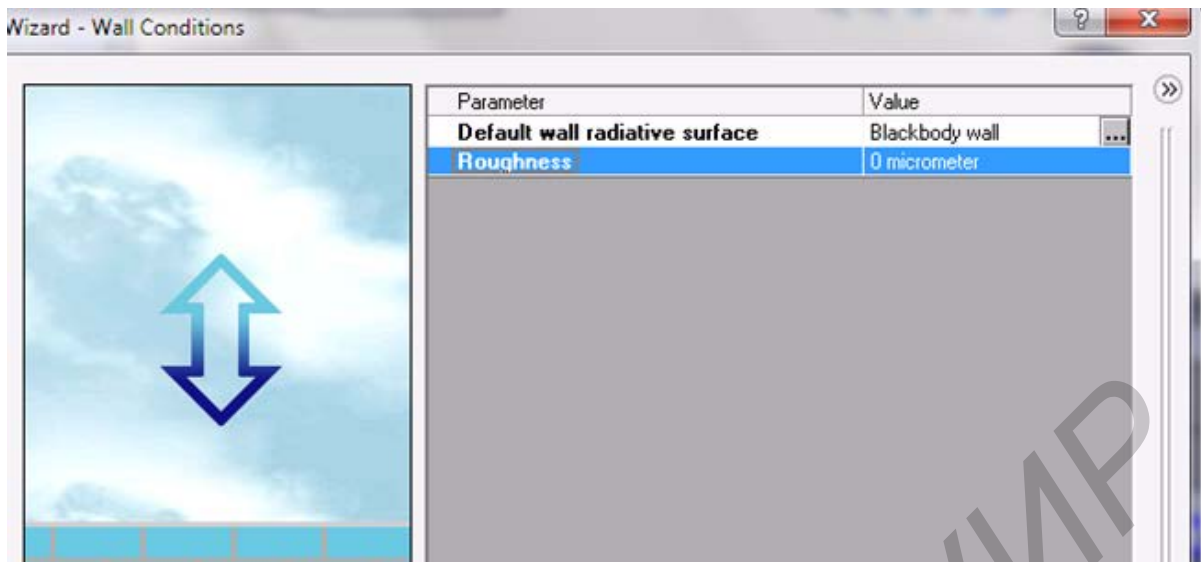


Рис. 6.7. Окно Flow Simulation. Wizard. Настройка теплообмена

Произведенные настройки можно изменить впоследствии с помощью настроек необходимых параметров (например, Computational Domain для задания пространства симуляции).

2. Для моделирования теплообмена керамического ИК-нагревателя Elstein SHTS/4 используем следующие параметры:

- радиационные поверхности (Radiative surfaces) (рис. 6.9);
- источники излучения (Radiative sources);
- источники тепла (Surface source);
- источники тепла (Volume source).

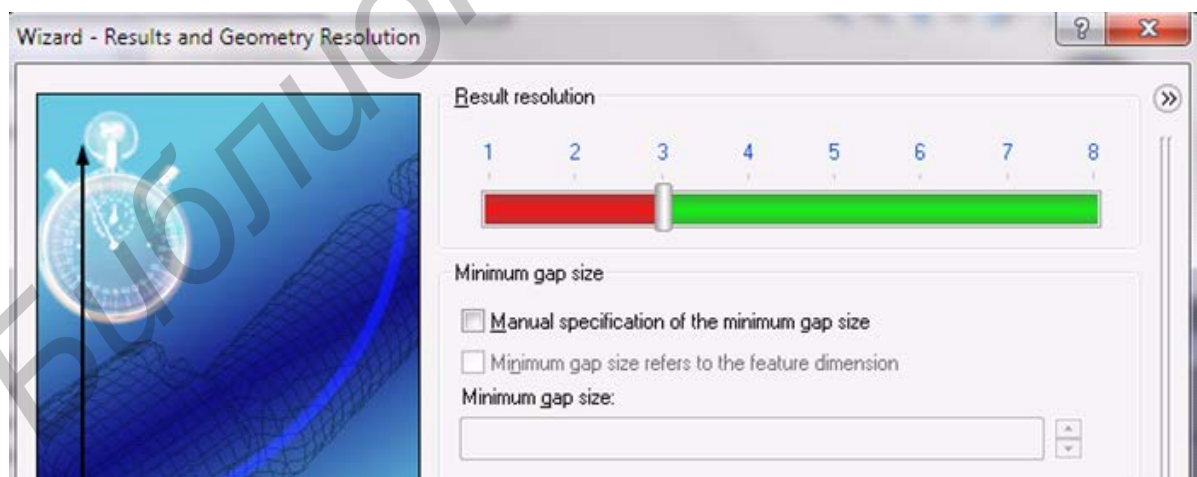


Рис. 6.8. Окно Flow Simulation. Wizard. Настройка точности

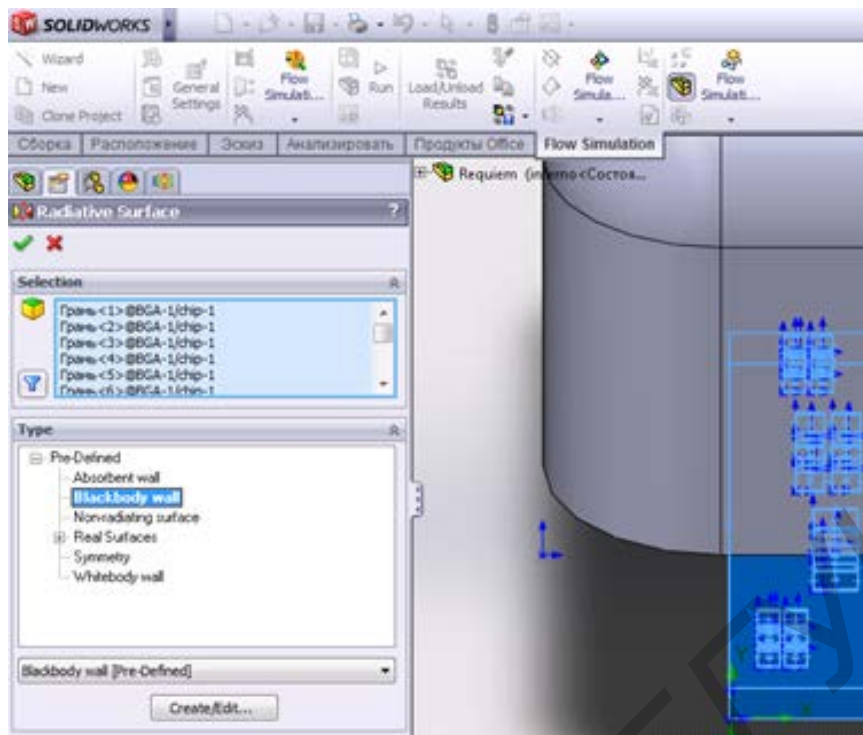


Рис. 6.9. Настройка Radiative surfaces

3. После задания необходимых параметров расчета приступаем к обработке данных (Flow Simulation → Run). В появившемся окне задаем параметры производительности вычисления. Получив подтверждение, начинаем расчет. Для получения и переноса полученных в ходе расчета данных необходимо выбрать интересующий тип исследуемой информации и указать исследуемые объекты (рис. 6.10).

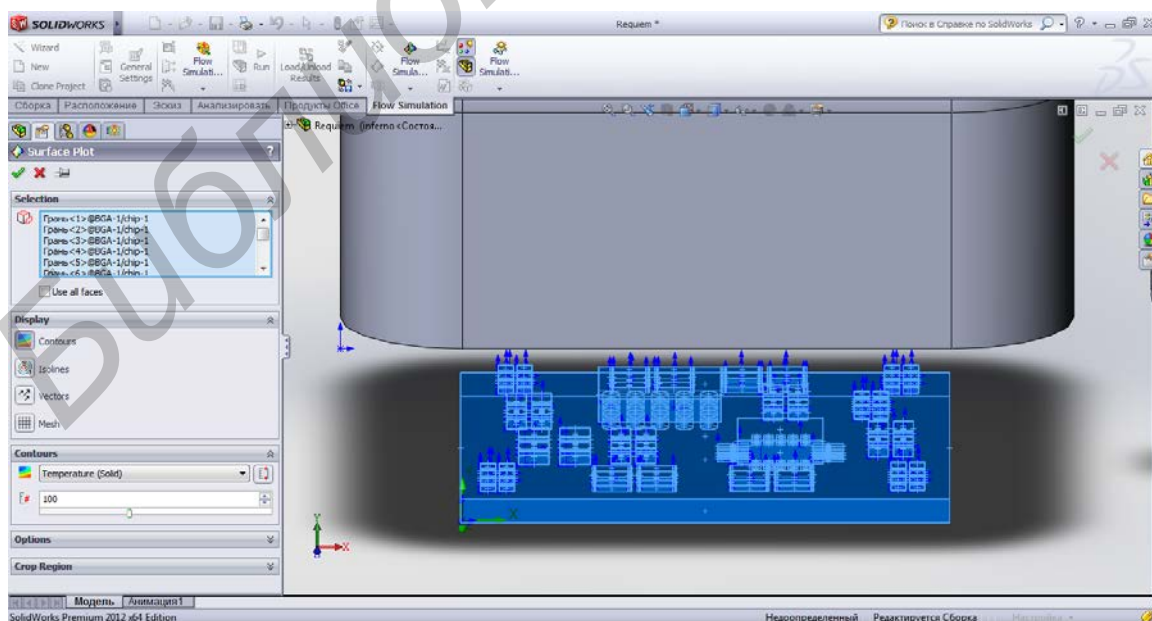


Рис. 6.10. Окно Surface plot

4. После произведенных расчетов можно изменить начальные параметры и выполнить расчет заново и посмотреть, как изменятся те или иные характеристики теплообмена.

В качестве модели используют 4-слойную печатную плату с установленными на ней компонентами в корпусах BGA, QFP и SMD – 0805, 1206, 1210. Результатом расчета являются модели распределения тепловых полей на поверхности платы и установленных компонентов при нагреве керамическим ИК-нагревателем Elstein SHTS/4 (рис. 6.11, а) и галогенной ИК-лампой накаливания КГЛ 30/300 (рис. 6.11, б).

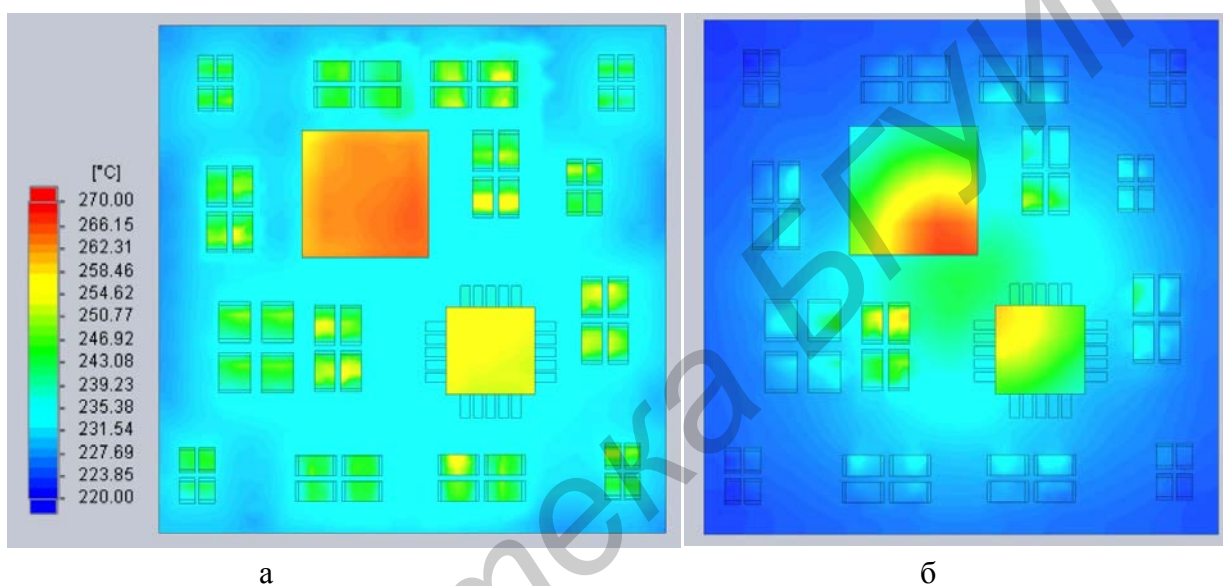


Рис. 6.11. Модели распределения температуры на поверхности платы:
а – для керамического ИК-нагревателя Elstein SHTS/4; б – для галогенной ИК-лампы накаливания КГЛ 30/300

В содержание отчета включить геометрическую модель ИК-нагревателя, граничные условия и модели тепловых полей на плате электронного модуля.

Литература

1. Алямовский, А. А. SolidWorks 2007-2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, Е. В. Одинцов, А. А. Собачкин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
2. Ашихмин, В. Н. Введение в математическое моделирование / В. Н. Ашихмин; под ред. П. В. Трусова. – М.: Логос, 2005. – 440 с.
3. Ланин, В. Л. Электромонтажные соединения в электронике. Технология, оборудование, контроль качества / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 406 с.
4. Сирота, А. А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем / А. А. Сирота. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
5. Технология поверхностного монтажа: учеб. пособие / С. П. Кундас [и др.]. – Минск : Армита – Маркетинг, Менеджмент, 2000. – 350 с.
6. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: учебник / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2002. – 415 с.
7. ANSYS Workbench – модальный анализ. ANSYS Workbench версий 10 и 11, Tutorial [Электронный ресурс]. – 2009 г. – Режим доступа : <http://cae.ustu.ru/cont/soft/ansys.htm>.

Учебное издание

Ланин Владимир Леонидович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 19.06.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс». Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 50 экз. Заказ 55.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6