

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ИМПУЛЬСНОМ  
РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы по дисциплинам  
«Основы автоматизированного проектирования РЭС» и  
«Основы автоматизированного проектирования приборов и  
систем» для студентов направлений 11.03.03 «Конструирова-  
ния и технология электронных средств» и 12.03.01  
«Приборостроение» всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.396.6  
ББК 38.54

**Составители:**

д-р техн. наук О.Ю. Макаров  
канд. техн. наук И.С. Бобылкин

Моделирование тепловых характеристик интегральных схем в импульсном режиме работы: методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Основы автоматизированного проектирования РЭС» и «Основы автоматизированного проектирования приборов и систем» для студентов направлений 11.03.03 «Конструирования и технология электронных средств» и 12.03.01 «Приборостроение» всех форм обучения / ФБГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. О.Ю. Макаров, И.С. Бобылкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 18 с.

В работе рассматривается задача моделирования тепловых характеристик интегральных схем, работающих в импульсном режиме, с использованием аналитических моделей температурных полей и специализированных программных средств.

Предназначены для лабораторных работ по дисциплине «Основы автоматизированного проектирования РЭС» для студентов 3 курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР-ИТР\_ОАП РЭС.pdf.

Табл. 2. Ил. 7. Библиогр.: 7 назв.

**УДК 621.396.6**  
**ББК 38.54**

**Рецензент** - Э.И. Воробьев, канд. техн. наук, доц.  
кафедры систем автоматизированного  
проектирования и информационных систем

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

**Цель работы:** Ознакомиться с методами моделирования тепловых характеристик импульсных микросхем. Получить температурные зависимости при различных геометрических, физических, электрических и временных параметрах микросхем.

**Характеристика содержания работы:** Подготовка к лабораторной работе предполагает предварительное ознакомление с методом аналитического моделирования и основными математическими моделями, используемыми в данной лабораторной работе. Для этого необходимо проработать первый раздел данного методического указания и литературу /1/. Лабораторное задание включает два основных этапа: расчет с помощью программы тепловых характеристик микросхемы с плоским распределенным импульсным источником и микросхемы с импульсным источником в форме круга. Вводимые параметры выбираются из таблиц 1 и 2 в соответствии с номером варианта.

## 1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. Импульсные источники на поверхности полупространства

**Плоский прямоугольный источник.** При анализе теплового режима отдельных радиоэлементов, работающих при импульсных электрических нагрузках, можно свести задачу к модели полупространства, на поверхности которого расположены области с импульсными тепловыми источниками энергии.

Рассмотрим следующую модель: источник занимает всю поверхность полупространства, которая нагревается в течение некоторого времени  $\tau$  постоянным тепловым потоком с плотностью  $q$ ; тепловой поток распространяется только в глубину полупространства в направлении  $x$ ; начальная температура  $t_0$  одинакова во всех точках полупространства. Требуется найти

распределение температуры в направлении  $x$  в любой момент времени (рис. 1, а).

Так как по условиям задачи температурное поле должно быть одномерным, а источники энергии внутри тела отсутствуют, то процесс описывается дифференциальным уравнением:

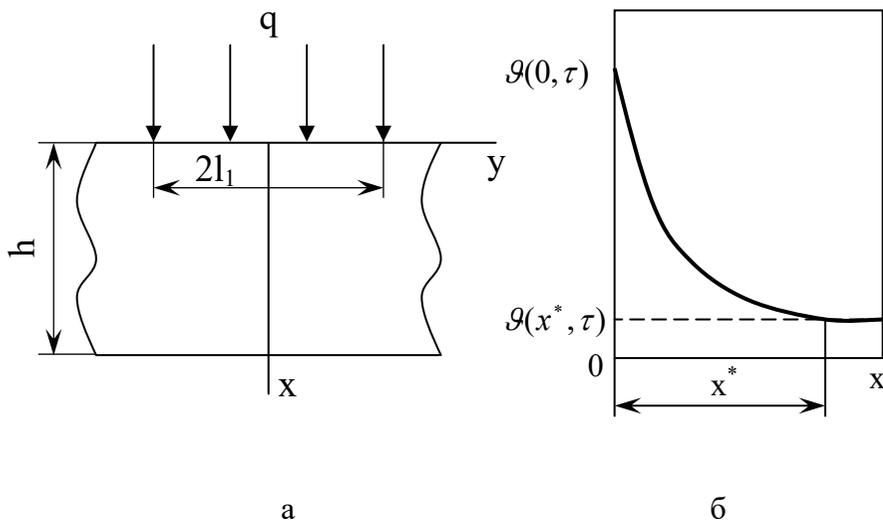


Рис. 1. Импульсный источник энергии: а – на поверхности полупространства; б – характер температурного поля

$$\nabla^2 t + \frac{q_y}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau}, \text{ в котором } \nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 \text{ и } q_y = 0, \text{ т. е.}$$

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \infty. \quad (1)$$

С поверхности полупространства при  $x=0$  по условию задачи тепловой поток целиком уходит вглубь тела, т. е. на границе имеет место условие

$$q = -\lambda \partial t(0, \tau) / \partial x. \quad (2)$$

Вторым условием для полупространства может быть задание либо температуры, либо теплового потока при  $x=\infty$ . В глубине тела ( $x=\infty$ ) температура должна быть равна начальной температуре тела, а поток – нулю, так как никаких тепловых процессов при  $x=\infty$  не происходит

$$t(\infty, \tau) = t_0 \text{ или } \partial t(\infty, \tau) / \partial x = 0. \quad (3)$$

Начальное условие в данном случае имеет вид

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const}. \quad (4)$$

Система уравнений (1) – (4) является математической моделью рассматриваемого процесса. Решение этой системы известно и имеет вид /2/:

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}};$$

$$\operatorname{ierfc} u = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u(1 - \operatorname{erf} u), \quad u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}, \quad (5)$$

где  $\operatorname{erf} u$  – функция ошибок Гаусса

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp[-u^2] du; \quad (6)$$

функции  $\operatorname{erf} u$  и  $\operatorname{ierfc} u$  табулированы /3/.

Из (5) найдем значение температуры на поверхности  $x=0$  и в любой точке полупространства к концу действия импульса  $\tau=\tau_u$ :

$$t(x, \tau_u) - t_0 = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau_u} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau_u}}; \quad (7)$$

$$t(0, \tau_u) - t_0 = \frac{1.13q}{\lambda} \sqrt{a\tau_u}, \quad \text{ierfc}0 = 1/\sqrt{\pi}.$$

Определим теперь, на какой глубине  $x^*$  повысится температура материала к концу действия импульса. Теоретически эта глубина равна бесконечности, но температура быстро уменьшается и на некотором расстоянии  $x=x^*$  можно считать, что практически в этой точке температура не отличается от начальной (рис. 1, б). Рассмотрим отношение  $\Delta = \mathcal{G}(x^*, \tau) / \mathcal{G}(0, \tau)$ ,  $\mathcal{G}(x, \tau) = t(x, \tau) - t_0$  и назовем толщиной прогретого слоя такую толщину  $x^*$ , при которой  $\Delta$  меньше заданного значения, например  $\Delta \leq 0,05 = 5\%$ . Для этого значения  $\Delta$  из (7) получим

$$0,05/\sqrt{\pi} = 0,0283 = \text{ierfc}[x^*/(2\sqrt{a\tau_u})];$$

по таблицам [3] найдем значение аргумента  $\overline{x^*/(2\sqrt{a\tau_u})}$  при  $\text{ierfc} u = 0,0283$  и определим толщину прогретого слоя к концу действия импульса:

$$x^* = 2.36\sqrt{a\tau_u}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет оценить условия, при которых можно использовать понятие полупространства и полученные для рассмотренной модели зависимости (5). Пусть, например, область с источником расположена на поверхности тела конечной толщины  $h$  (рис. 1, а); если выполняется неравенство

$$h/x^* = h/(2.36\sqrt{a\tau_u}) > 1, \quad (9)$$

то данное тело можно считать полупространством.

В практических задачах источник занимает, как правило, ограниченную область и возникает вопрос о правомерности применения формул (5) и (9) для расчета температурного поля. Например, источник расположен в прямоугольнике со сторонами  $2l_1, 2l_2$ , причем  $l_1 \leq l_2$ . Рассмотрим отношение наименьшего размера источника к толщине прогреваемого слоя:

$$N = 2l_1/x^* = 2l_1/(2.36\sqrt{a\tau_u}). \quad (10)$$

Если  $N \gg 1$ , то прогретый слой значительно меньше  $l_1$ , т. е. почти весь поток направлен в глубь полупространства в направлении оси  $x$  и рассмотренная модель правомерна, в противном случае этой моделью пользоваться нельзя.

**Круглый источник.** Перейдем ко второй модели – на адиабатной поверхности полупространства тепловой поток вырабатывается в области  $I$ , имеющей форму круга радиусом  $r$ . Математическая модель представляет собой систему уравнений (1) – (4) с условием

$$-\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = q\{1\} = \begin{cases} q \text{ в области } I, \\ 0 \text{ в остальной области.} \end{cases} \quad (11)$$

на границе  $x=0$ , в котором при описании области  $I$  следует учесть, что последняя имеет форму круга. Решение этой задачи приведено в [2/]; для центра источника ( $x=y=z=0$ ) выражение для температуры имеет вид

$$t(0, 0, 0, \tau) - t_0 = \mathcal{G}(0, 0, 0, \tau) = 2q\sqrt{a\tau}/(\lambda M), \quad (12)$$

где  $M = 1/\sqrt{\pi} - ierfcu$ ,  $u = r/(2\sqrt{a\tau})$ .

## 1.2. Микросхемы с импульсными источниками

**Модель микросхемы.** Пусть элемент 3 расположен на некоторой плате 2 и окружен слоем материала 1 (рисунок 2).

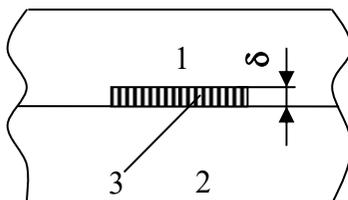


Рис. 2. Модель микросхемы

Вся поверхность элемента является источником теплоты и в течение времени  $\tau_n$  действия импульса рассеивает поток  $\Phi$ .

Будем считать, что скважность импульсов велика и за время между импульсами температура элемента успевает возвращаться к исходному состоянию. Определим среднюю температуру  $t_s$  элемента, полагая, что его температурное поле равномерно.

Рассеиваемый источником поток  $\Phi$  частично переходит в область 1 ( $\Phi_1$ ) и 2 ( $\Phi_2$ ), а частично аккумулируется в элементе 3 ( $\Phi_3$ ) и повышает его температуру, т. е.  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$ ;  $\Phi_3 = c_{p3} \rho_3 V_3 du_3/dt$ , где  $c_{p3}$ ,  $\rho_3$ ,  $V_3$  – удельная теплоемкость, плотность и объем области 3. В первом приближении можно предположить, что температура в области 3 изменяется за время  $\tau_n$  по линейному закону, т. е.  $du_3/dt \approx u_3/\tau_n$ , тогда

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + c_{p3} \rho_3 V_3 u_3 / \tau_n, \quad V_3 = A \delta. \quad (13)$$

Найдем  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  с помощью выражений (6), (11) и (1.123, 1.124, /1/) в зависимости от формы источника, площадь которого обозначим  $A$ , а толщину  $\delta$ .

**Плоский источник.** Из (6) находим

$$\Phi_1 = \mathcal{G}_3(\sqrt{\pi}/A) \cdot \lambda_1 / \sqrt{a_1 \tau_u}, \quad \Phi_2 = \mathcal{G}_3(\sqrt{\pi}/A) \lambda_2 / \sqrt{a_2 \tau_u},$$

где  $\lambda_i, a_i$  – теплопроводность и температуропроводность областей  $i=1, 2$ .

Подставим значения  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в (12) и найдем температуру

$$t_3 = t_0 + \Phi \left[ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left( \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}} \right) \frac{A}{\sqrt{\tau_u}} + \frac{c_{33} \rho_3 A \delta}{\tau_u} \right]^{-1}. \quad (14)$$

Если свойства областей 1 и 2 одинаковы ( $\lambda_i=\lambda, a_i=a$ ), то формула (13) становится проще

$$t_3 = t_0 + \Phi \tau_u \left[ c_{33} \rho_3 A \delta (\sqrt{\pi a \tau_u} / \delta + 1) \right]^{-1}. \quad (15)$$

Первое слагаемое в скобках формулы (14) учитывает потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , а второе –  $\Phi_3$ ; полагая первое слагаемое на порядок больше, чем второе:  $\sqrt{\pi a \tau_u} / \delta \geq 10$ , найдем выражение для длительности импульса  $\tau_u^*$ , при которой можно пренебречь аккумуляцией теплоты в элементе 3

$$\tau_u^* \geq 32 \delta^2 / a. \quad (16)$$

Полученные зависимости (14) и (15) справедливы, если выполняются условия (9) и (10).

**Источник энергии в форме круга радиусом  $r$ .** Аналогично можно найти зависимость для максимальной температуры  $(t_3)_{\max}$ , если источник имеет форму круга; для этого необходимо воспользоваться уравнениями (11) и (12), в последнем пренебрегаем аккумуляцией теплоты ( $c_{p3}=0$ )

$$(t_3)_{\max} = t_0 + \frac{2\Phi\sqrt{\tau_u}}{A} \left/ \left( \frac{\lambda_1}{M_1\sqrt{a_1}} + \frac{\lambda_2}{M_2\sqrt{a_2}} \right) \right.; \quad (17)$$

$$M_i = 1/\sqrt{\pi} - ierfc u_i, \quad u_i = r/(2\sqrt{a_i\tau_u}), \quad i = 1, 2.$$

## 2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

### 2.1. Задание № 1

Для плоского прямоугольного источника получить графики зависимости:

- 1) температуры от длительности действия импульса,  $T(\tau_n)$ ;
- 2) температуры от рассеиваемого потока,  $T(\Phi)$ ;
- 3) толщины прогретого слоя от длительности действия импульса,  $x^*(\tau_n)$ .

Задание выполняется в следующем порядке.

1. Запустить программу путем открытия файла «Микросхемы с импульсными источниками.exe».
2. В появившемся окне меню-заставки выбрать «**Плоский источник**».
3. Для продолжения нажать кнопку «**ОК**», для выхода из программы нажать кнопку «**Выход**».
4. В появившемся окне для ввода данных (рис. 3) согласно варианту необходимо:
  - а) выбрать материалы: подложки, кристалла и корпуса;
  - б) последовательно ввести все остальные параметры.
 Исходные данные выбираются из табл. 1 и 2. Необходимые параметры материалов выбираются в справочной литературе /1,2,4-7/ и др.
5. Нажать кнопку «**График**».
6. В появившемся окне вывода графика выбрать нужную зависимость.
7. Нажать на кнопку «**Построить**».

8. Повторить пункты 6 и 7 для всех подпунктов лабораторного задания.

Кнопка «Очистить» служит для очистки поля вывода графика.

**Данные для плоского источника**

Выберите материал подложки: **Сигалл С-15-12**

Выберите материал кристалла: **Кремний (Si)**

Выберите материал корпуса: **Сополимер стирола СВ**

Параметры материала		$\lambda$ , Вт/(м*К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , Дж/(кг*К)
Подложки		1,26	2535	710
Кристалла		23,3	2330	733
Корпуса		0,1	1080	1340

Температура окружающей среды:  $t_0$   , °C

Рассеиваемый поток:  $\Phi$   , Вт

Длительность импульса:  $\tau_{и}$   , с

Площадь источника:  $A$   , мм<sup>2</sup>

Толщина источника:  $\delta$   , мм

Толщина подложки:  $h$   , мм

Рис. 3. Окно ввода данных для плоского источника

Таблица 1

Варианты лабораторных заданий

№ Варианта	№ набора мат-лов	Параметры						
		$t_0$ , °C	$\Phi$ , Вт	$\tau_{и}$ , мс	$A$ , мм <sup>2</sup>	$\delta$ , мм	$h$ , мм	$r$ , мм
0	1	20	0,8	1,5	3	0,1	1	0,98
1	2	20	0,1	10	0,5	0,2	0,6	0,4
2	3	20	5	5	30	0,4	1,6	3,1

3	4	20	2,5	0,9	25	0,3	1	2,8
4	5	20	0,5	60	1,5	0,2	0,5	0,7
5	6	20	0,01	90	2	0,4	0,7	0,8
6	7	20	1,5	0,5	10	0,25	1,5	1,78
7	8	20	0,05	30	1	0,3	0,4	0,56
8	9	20	0,3	100	5	0,35	0,8	1,26
9	10	20	2	2	20	0,15	1,2	2,5

Таб-

лица 2

### Наборы материалов

Элемент	Материал	№ набора материалов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Подложка	Алюминий			+	+						
	Керамика						+			+	
	Кремний	+									
	Медь							+			+
	Ситалл		+			+			+		
Кристалл	AgGa	+		+		+					
	Ge				+			+		+	
	Si		+				+		+		+
Корпус	Воздух			+							+
	Компаунд	+				+			+	+	
	Стирол		+		+		+	+			

### 2.2 Задание № 2

Для источника энергии в форме круга получить графики зависимости:

- 1) температуры от длительности действия импульса,  $T(\tau_i)$ ;
- 2) температуры от площади источника,  $T(A)$ ;

Задание выполняется в следующем порядке

1. Вернуться в меню-заставку путем нажатия кнопки «Назад».
  2. Выбрать «Источник энергии в форме круга радиусом  $r$ ».
  3. Построит графики зависимостей аналогично пунктам 3 – 8 методических указаний для выполнения задания № 1.
- Примеры графиков зависимостей для двух заданий приведены на рис. 4 – 7.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:  
название и цель работы;  
краткие теоретические сведения;  
исходные данные и полученные графики;  
выводы по каждому заданию и по работе в целом.

### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Тепловая модель полупространства с источником тепла.
2. Уравнение теплопроводности и краевые условия для полупространства.
3. График распределения температурного поля по глубине.
4. Тепловая модель микросхемы.
5. Основные условия применимости рассмотренных математических моделей.
6. Особенности импульсного режима работы микросхем с точки зрения тепловых процессов.
7. Граничные условия для круглого источника

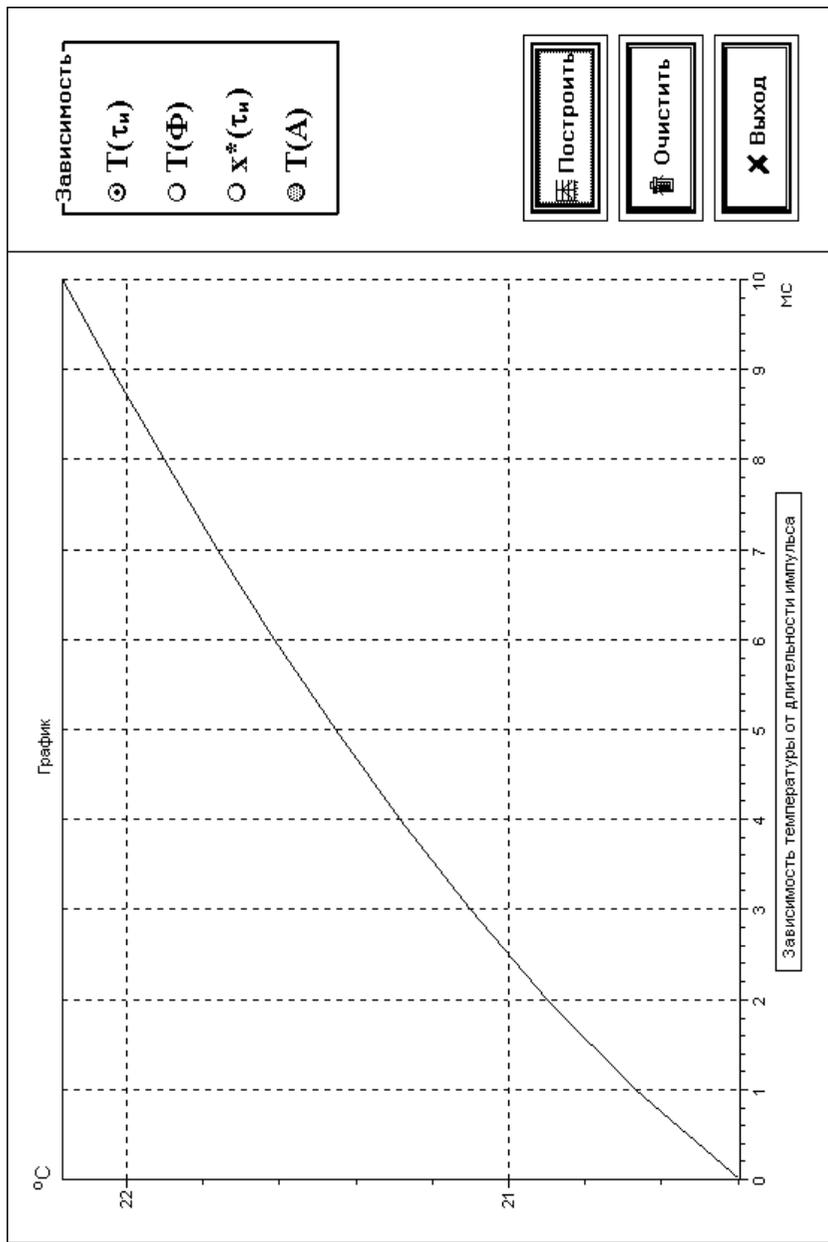


Рис. 4. График зависимости температуры от длительности импульса

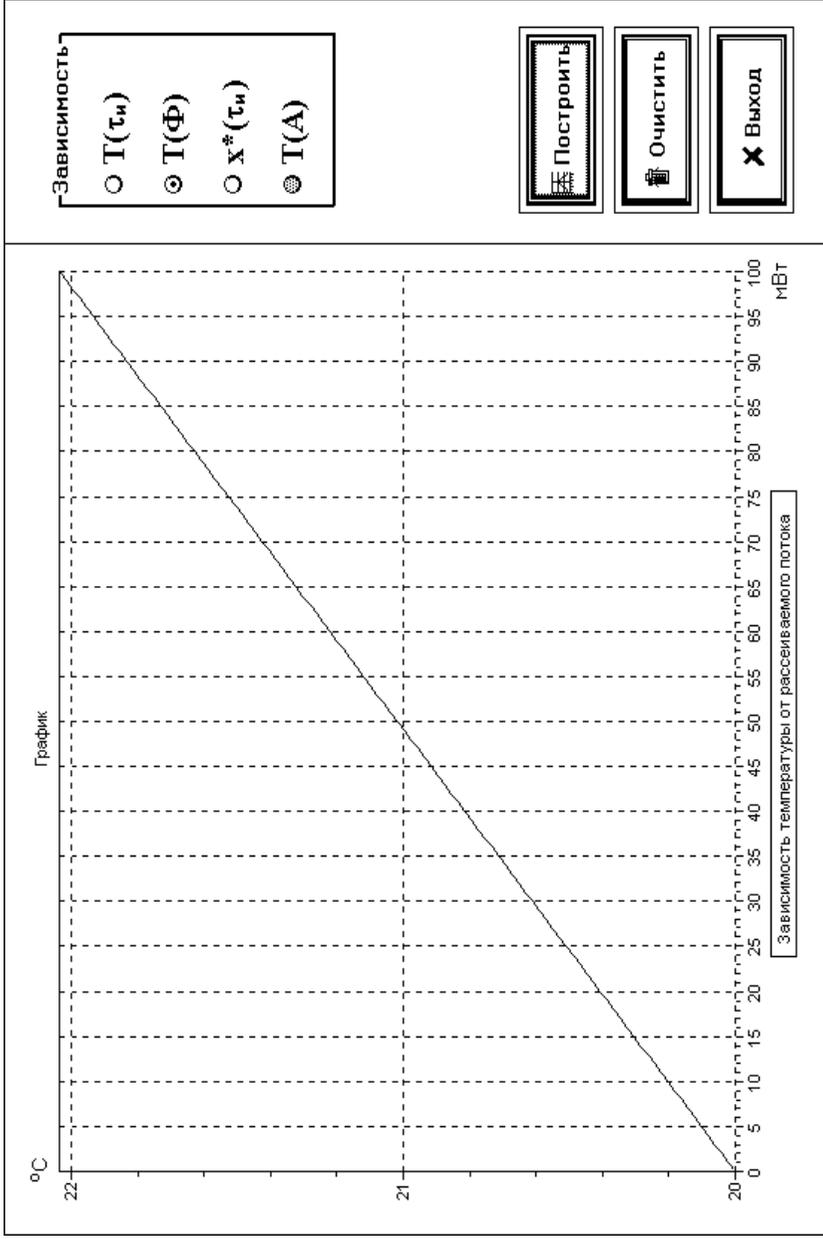


Рис. 5. График зависимости температуры от рассеиваемого потока

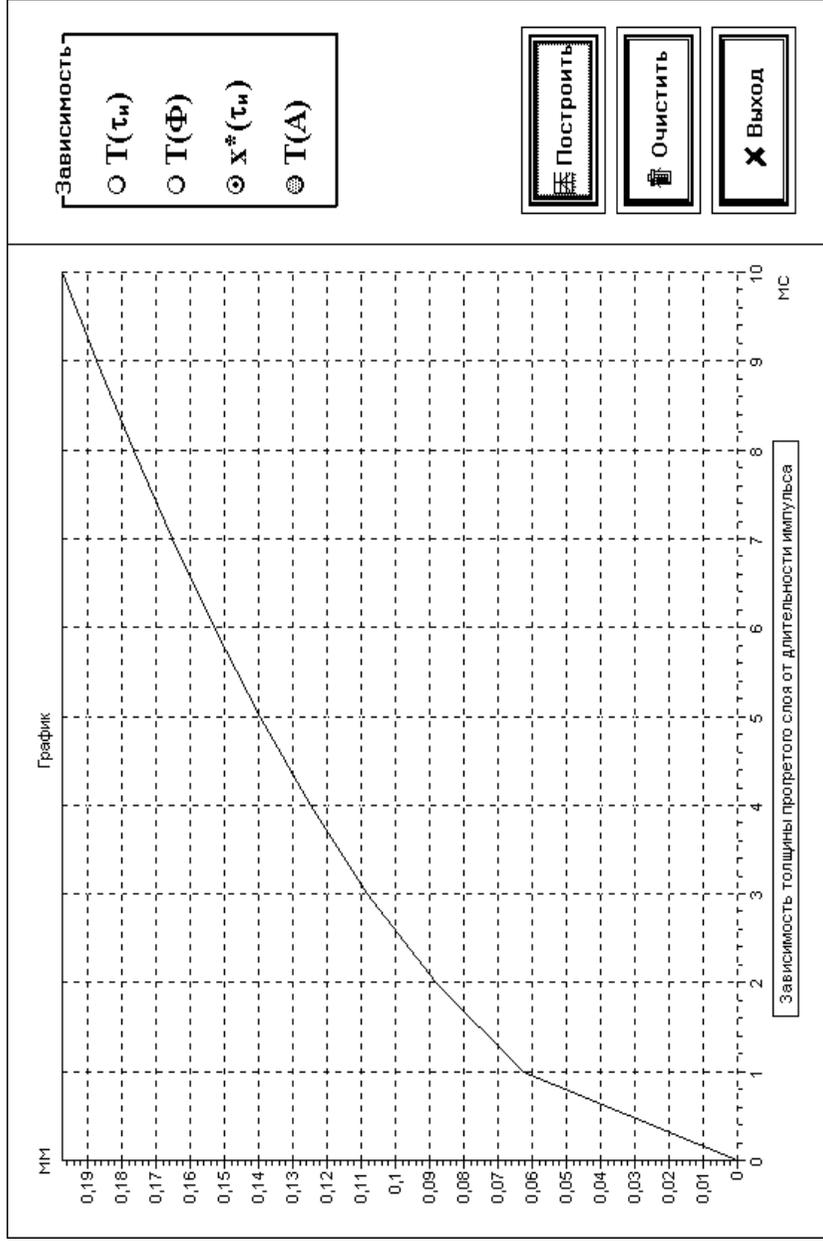


Рис. 6. График зависимости толщины прогретого слоя от длительности импульса

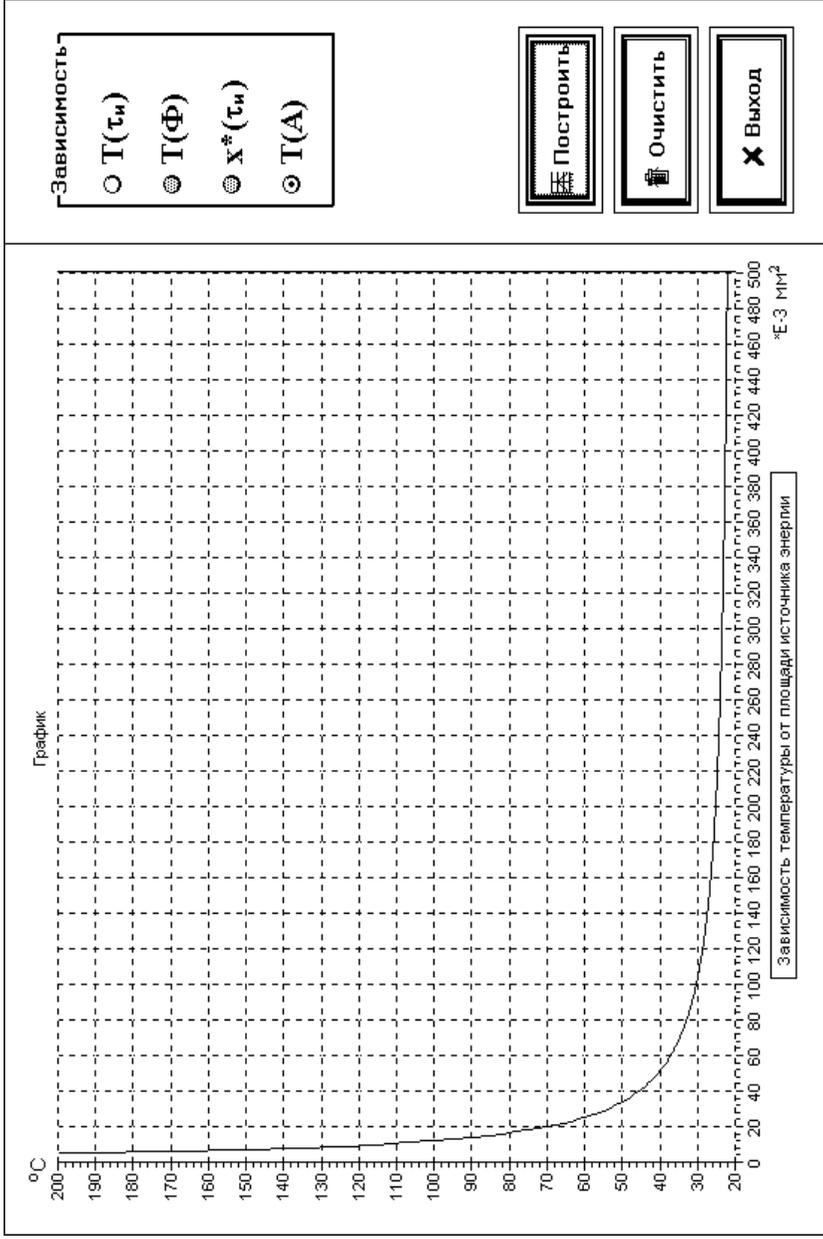


Рис. 7. График зависимости температуры от площади источника энергии

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
2. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1969. 360 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 328 с.
4. Парфенов О.Д. Технология микросхем. М.: Высш. шк., 1986. 320 с.
5. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
6. Закс Д.И. Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем. М.: Радио и связь, 1983. 128 с.
7. Захаров А.Л., Асвадунова Е.А. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1983. 184 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ИМПУЛЬСНОМ  
РЕЖИМЕ РАБОТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплинам  
«Основы автоматизированного проектирования РЭС» и  
«Основы автоматизированного проектирования приборов и  
систем» для студентов направлений 11.03.03 «Конструирова-  
ния и технология электронных средств» и 12.03.01  
«Приборостроение» всех форм обучения

Составители:

Макаров Олег Юрьевич  
Бобылкин Игорь Сергеевич

Компьютерный набор И.С.Бобылкина

Подписано к изданию \_\_\_\_\_.

Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14