осуществляется с помощью печатающего устройства «Консул-260.1».

Для обеспечения «открытости» системы для расширения и модернизации в качестве программной среды выбран интерпретатор диалогового языка высокого уровня Бейсик. Это позволит путем добавления новых программных блоков настраивать систему на выполнение новых функций. Данные с датчиков передаются в программы на Бейсике с помощью подпрограмм в машинных кодах ЭВМ ДЗ-28. Последние в значительной степени не зависят от используемых приборов, что повышает гибкость САЭ.

Дальнейшее совершенствование системы в отношении повышения быстродействия и настройки на выполнение более сложных функций возможно за счет усложнения программного обеспечения без изменений в аппаратной части.

1. *Египко В. М.* Организация и проектирование системы автоматизации научно-технических экспериментов. К.: Наук. думка, 1978. 280 с. 2. *Хазанов Б. Н.* Интерфейсы измерительных систем. М.: Энергия, 1979. 200 с.

Поступила в редколлегию 15.09.86

УДК 536.21

Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, д-р техн. наук, Е. А. НЕЛИН, канд. техн. наук

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА

Высокие уровни микроминиатюризации и быстродействия современной РЭА делают необходимым учет нестационарности тепловых процессов аппаратуры. Аналитическое решение задач нестационарной теплопроводности со сложными граничными условиями и температурозависимыми физическими свойствами радиоматериалов часто встречает непреодолимые трудности. Поэтому, а также в связи с тем, что исходные данные имеют погрешность порядка десятков процентов, целесообразно развивать приближенные инженерные методы анализа нестационарных температурных полей, в частности на основе метода конечных разностей Шмидта [1, 2].

Метод Шмидта дает простую и наглядную схему расчета, однако применим он лишь в частных случаях одномерного и двумерного температурных полей при температуронезависимых физических свойствах тела. Распространим его на трехмерный случай с температурозависимыми параметрами и внутренними источниками тепла при небольших перепадах температуры, свойственных элементам РЭА.

Разделим тело произвольной формы тремя системами взаимно перпендикулярных плоскостей на элементарные объемы с ребрами, равными Δx. Принимая, что температурные зависимости коэффициента теплопроводности $\lambda(t)$, удельной теплоемкости $c(t)$, удельной мощности источников тепла n-го элемента $P_n(t)$ являются медленно меняющимися функциями температуры, воспользуемся аппроксимацией $\lambda(t)$, $c(t)$ и $P_n(t)$ постоянными, определяемыми для усредненной по объему температуры T.

В силу теплового баланса алгебраическая сумма тепла, подведенного за время $\Delta\tau$ через все грани в n-й элемент, плюс тепло внутренних источников равна количеству тепла, затраченного на изменение его теплосодержания. Отнеся соответствующее количество теплоты к единице площади сечения, перпендикулярного направлению распространения теплоты, имеем

$$\sum_{1}^{6} \frac{\lambda(T)(t_{i,\tau} - t_{n,\tau})\Delta\tau}{\Delta x} + P_n(T)\Delta\tau\Delta x = c(T)\gamma(t_{n,\tau+1} - t_{n,\tau})\Delta x,$$

где $t_{i,\tau}$, $i=\overline{1,6}$ — температуры элементов, смежных по граням с n-м элементом; $t_{n,\tau}$ и $t_{n,\tau+1}$ — температуры n-го элемента в моменты времени соответственно τ и $\tau+\Delta\tau$; γ — плотность материала. Из этого уравнения получим выражения для температур n-го элемента в конце интервала времени $\Delta\tau$

$$t_{n,\tau+1} = \frac{\sum_{1} t_{i,\tau} + [b(T) - 6]\, t_{n,\tau} + t_{n+1,\tau} + \Delta t(T)}{b(T)}, \qquad (1)$$

где $b(t) = \Delta x^2/a(t)\Delta\tau$, $a(t) = \lambda(t)/c(t)\gamma$ — коэффициент температуропроводности; $\Delta t(t) = P_n(t)\Delta x^2/\lambda(t)$. Выбрав $\Delta\tau$ из условия $b(T) = 6$, имеем

$$t_{n,\tau+1} = \frac{\sum_{1}^{5} t_{i,\tau}}{6} + \frac{\Delta t(T)}{6}. \qquad (2)$$

При таком выборе временного интервала $\Delta\tau$ температура элемента в конце его равна сумме среднеарифметической температуры шести смежных элементов плюс уменьшенная в шесть раз разность температур противоположных граней элемента при передаче от одной из них к другой теплового потока плотностью $P_n(T)\Delta x$. В одномерном и двумерном случаях $b(T)=2$ и $b(T)=4$. При этом первое слагаемое в (2) равно соответственно среднеарифметической температуре двух элементов (слоев), смежных с n-м, и среднеарифметической температуре четырех смежных элементов. Расчет нестационарного теплового поля в соответствии с (2) достаточно прост и может быть выполнен графически.

В отличие от метода Шмидта, когда $\Delta\tau = \mathrm{const}$, в данном случае временной интервал $\Delta\tau$ зависит от температуры по закону, определяемому соотношением $\Delta\tau(T) = \gamma\Delta x^2 c(T)/6\lambda(T)$.

Во многих случаях функции $\lambda(T)$ и $c(T)$ хорошо аппроксимируются линейными зависимостями: $\lambda(T) = \lambda_0[1 + A(T - T_0)]$, $c(T) = c_0[1 + B(T - T_0)]$, где λ_0 и c_0 — коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость при начальной температуре T_0; A и $Б$ постоянные. С учетом малости $A(T-T_0)$ и $B(T-T_0)$ зависимость $\Delta\tau(T)$ также линейна

$$\Delta\tau = \Delta\tau_0 [1 + (B - A)(T - T_0)], \tag{3}$$

где $\Delta\tau_0 = \Delta x^2/6a_0$, $a_0 = \lambda_0/c_0\gamma$ — коэффициент температуропроводности при температуре T_0.

Отметим, что в (2) температурные поля, обусловленные подведенным к элементу теплом и внутренним тепловыделением (соответственно первое и второе слагаемое), разделены. Температурное поле без внутренних источников тепла оказывается таким же, как и при температуронезависимых физических свойствах. Соответствующие температурные распределения лишь сдвинуты во времени в зависимости от закона $\Delta\tau(T)$. В частности, для линейной аппроксимации $\lambda(T)$ и $c(T)$ при $B-A>0$ происходит запаздывание, а при $B-A<0$ — опережение в формировании соответствующих температурных распределений по сравнению со случаем температуронезависимых физических свойств.

Предлагаемый подход может быть распространен и на анализ нестационарного конвективного теплообмена между телом и окружающей средой.

Соотношения (2) и (3) позволяют достаточно просто (во многих случаях графически) определить нестационарное температурное поле элементов РЭА.

1. *Краус А. Д.* Охлаждение электронного оборудования. Л.: Энергия, 1971. 248 с. 2. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

Поступила в редколлегию 15.09.86

УДК 621.397

А. В. КОВАЛЬ, канд. техн. наук, В. В. ОВСЯННИКОВ, мл. науч. сотр.

УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ МИКРО-ЭВМ

Задача генерации сигналов произвольной формы в настоящее время является весьма актуальной. Наиболее успешно она решается при применении мини- и микро-ЭВМ [2]. Однако современные ЭВМ этого плана не обладают высокой производительностью, что часто не позволяет генерировать сигналы в реальном масштабе времени путем их прямого поточечного расчета. Этот недостаток может быть преодолен путем предварительного расчета сигналов на ЭВМ с обычной производительностью и дальнейшей записью дискретных отсчетов во внешнее