

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В.А.Виттих, В.А.Цибатов, В.П.Якимаха

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

В в е д е н и е

При испытании объектов новой техники зачастую требуется измерять и регистрировать статические температурные поля. Измерения обычно проводятся термомпарами, сканирующими поле с помощью электромеханических устройств по заданной дискретной траектории. каждой позиции в силу своей инерционности термомпары выдерживаются некоторое время, которое может достигать десятки секунд. число позиций может составлять несколько сотен, поэтому один цикл сканирования поля обычно занимает десятки минут. Такая продолжительность смены сбора информации в ряде случаев оказывается неприемлемой (например, при испытании авиационных двигателей это приводит к оправданным расходам горючего). Использование ЭВМ для управления экспериментом позволяет уменьшить только время обработки информации. Однако в связи с тем, что время обработки много меньше времени сбора информации, продолжительность эксперимента остается значительной. Иными словами, высокое быстродействие ЭВМ вступает в противоречие с низкой скоростью сбора данных, в результате чего процессор ЭВМ простаивает [1].

Возникает задача оптимизации процесса сбора и обработки информации с целью сокращения полного времени эксперимента. Решение

ее возможно путем увеличения скорости сбора информации, что, однако, приводит к появлению дополнительных динамических погрешностей измерения, обусловленных инерционностью термопар. Если возложить на ЭВМ коррекцию этих искажений, увеличив тем самым загрузку процессора, можно надеяться на ускорение эксперимента при сохранении заданной точности измерений. Исследованию возможностей получения такого эффекта и посвящена данная статья.

1. Постановка задачи

Для полного времени эксперимента по измерению температурного поля с обработкой информации в реальном времени можно записать:

$$T_{\Sigma} = M (\tau_n + \tau_u + \tau_{обр}), \quad (1.1)$$

где M - количество позиций, в которых производится измерение температуры;

τ_n - время переключения термопары из одной позиции в другую

τ_u - время измерения, равное времени выдержки термопары в данной позиции для установления переходного процесса на ней до уровня, определяемого заданной точностью измерения;

$\tau_{обр}$ - время обработки информации.

Величину

$$\nu = \frac{1}{\tau_n + \tau_u + \tau_{обр}} \quad (1.2)$$

будем называть быстродействием системы автоматизации эксперимента (САЭ), и формула (1.1) примет вид

$$T_{\Sigma} = \frac{M}{\nu}. \quad (1.3)$$

Пусть $\tau_u^* < \tau_u$ - начальная часть переходного процесса на термопаре, а N - число отсчетов этого процесса, взятых через время Δt . Тогда, зная характер переходного процесса, имеется возможность алгоритмическим путем (например, методом наименьших квадратов) оценить его установившееся значение [2], [3]. В связи с тем, что отсчеты переходного процесса будут искажены в канале связи, такая экстраполяция даст некоторую погрешность, которая тем меньше, чем значительнее выборка N . Количество отсчетов N на

интервале τ_u^* ограничено сверху частотой опроса САЭ:

$$1 \leq \tau_u^* \frac{f_{max}}{K_T} + 1 = \frac{\tau_u^*}{\tau_{min}} + 1, \quad (I.4)$$

где f_{max} - максимальная частота опроса;

K_T - количество термопар, участвующих в измерении;

$$\tau_{min} = K_T / f_{max}$$

В этом случае время полного эксперимента определится величиной

$$\tau_{\Sigma}^* = M \left[\tau_n + (N-1) \frac{K_T}{f_{max}} + \tau_{одр}^*(N) \right], \quad (I.5)$$

где $\tau_{одр}^*(N) > \tau_{одр}$ - время обработки информации, включая экстраполяцию.

Благодаря высокому быстродействию ЭВМ, при дополнительной нагрузке процессора имеется возможность сократить время эксперимента на величину

$$T = T_{\Sigma} - T_{\Sigma}^* = M \left[(\tau_u - \tau_u^*) - (\tau_{одр}^*(N) - \tau_{одр}) \right] > 0, \quad (I.6)$$

сохранив точность измерения на прежнем уровне.

Появляется необходимость установления оптимального соотношения между временами τ_u^* и $\tau_{одр}^*(N)$, позволяющего для требуемой точности измерений получить минимальное время эксперимента. Кроме того, практический интерес представляет вопрос выбора оптимального, в смысле времени и точности измерения, режима работы процессора ЭВМ. В случае (I.5) процессор используется в реальном времени, ибо информация по каждому измерению обрабатывается непосредственно после получения. Если характеристики термопар неизвестны или требуют уточнения, то из соображений точности процесс измерения целесообразно разделить на 2 этапа: на I этапе ЭВМ только регистрирует поступающую при сканировании поля информацию, а на втором - обрабатывает данные по каждому конкретному положению сканирующего устройства с использованием всей накопленной информации. Благодаря увеличению объема рассматриваемой выборки достигается большая точность экстраполяции, чем при обработке результатов в реальном времени. Время эксперимента будет складываться из двух частей:

$$T_3^* = M(\tau_n + \tau_u^*(N)) + T_{обp}^*(N) - T_{сб}^*(N) + T_{обp}^*(N), \quad (I.7)$$

где $T_{сб}^*(N)$ — полное время сбора информации;

$T_{обp}^*(N)$ — полное время обработки информации.

Качество результатов эксперимента и время его проведения для обоих режимов использования ЭВМ определяется применяемыми алгоритмами экстраполяции и внутренними характеристиками САЭ, каковыми являются быстродействие ЭВМ, параметры термодпар, шумы в каналах связи и характеристики блоков тракта передачи информации. Требование уменьшения T_3^* и увеличения точности измерения противоречиво; границы разумного компромисса обуславливаются всеми вышеперечисленными факторами. Их установление явилось задачей исследования.

2. Объект, цель и метод исследования

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана типовая промышленная САЭ, построенная на базе ЭВМ М6000 (рис. I). Описываемая система исследует радиальные поля температур с помощью сканирующего устройства с распределенными по нему термопарами. Устройство сканирует поле таким образом, что установленные на нем термопары описывают вложенные в друг друга окружности. Количество позиций, в которых проводится измерение температуры, равно 140, количество термодпар — 6, время переключения сканирующего устройства $\tau_n = 0,5$ с, частота опроса $f_{max} = 50$ Гц.

Целью проведенного исследования являлось следующее:

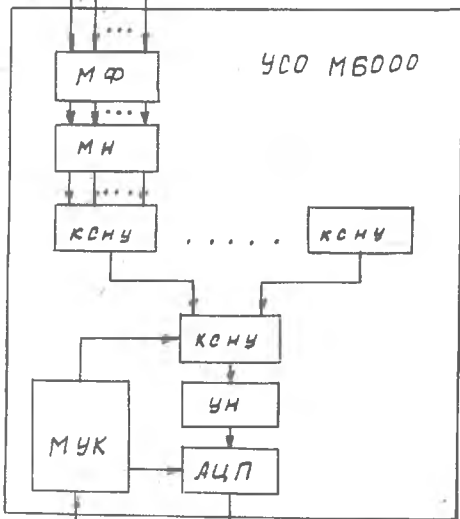
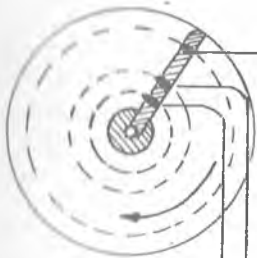
выбор алгоритма экстраполяции переходного процесса по его отсчетам;

построение зависимости максимальной погрешности экстраполяции от времени проведения эксперимента для заданной достоверности и внутренних характеристик САЭ,

$$\varepsilon_{max} = f(T_3);$$

анализ загрузки оборудования для различных режимов проведения эксперимента.

Знание перечисленных характеристик позволит выбрать тот или иной режим эксперимента, удовлетворяющий поставленным условиям.

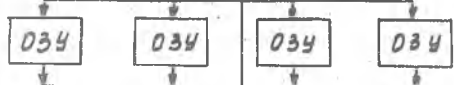


Устройство
выбора
и фиксации

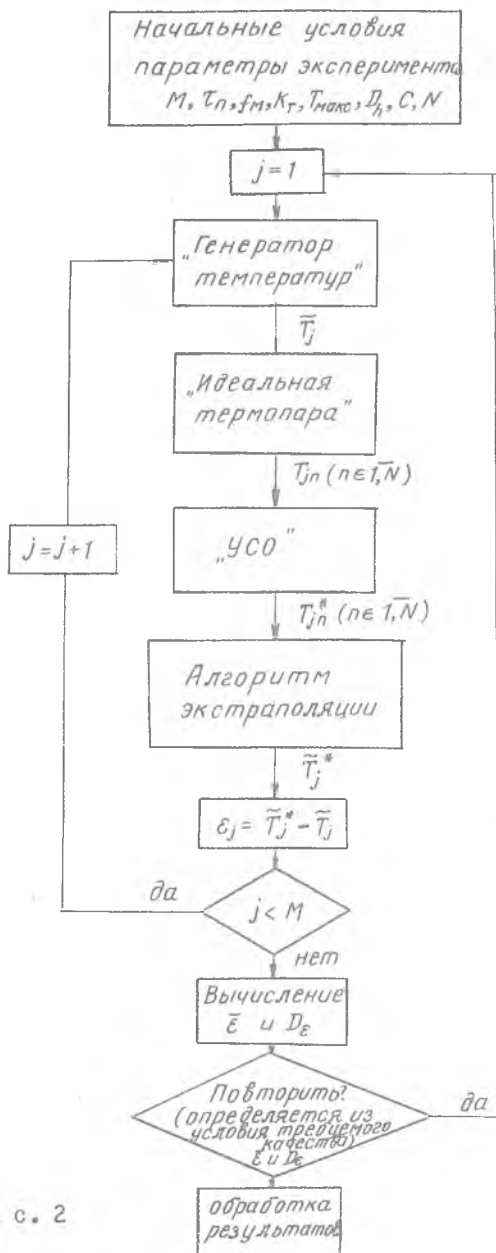
Сопряжение 2к

Процессор М6000

УНП



Р и с. 1.



Р и с . 2

Однако аналитическое выявление зависимостей выбранных показателей качества САЭ от ее внутренних характеристик не представлялось возможным из-за трудностей построения математической модели САЭ и случайности некоторых параметров, например, шума в тракте передачи. Поэтому в качестве метода исследования использовался метод имитационного моделирования САЭ на ЭВМ.

3. И м и т а ц и о н н а я м о д е л ь С А Э

Имитационная модель исследуемой САЭ приведена на рис. 2. Модель представляет собой набор следующих процедур, имитирующих работу конкретных устройств системы (см. рис. 1) и алгоритма экстраполяции.

Процедура "Генератор температур". Осуществляет имитацию стационарного поля температур. Моделируемый ею закон распределения температуры по исследуемому сечению испытуемого изделия был выявлен ранее на этапе изучения объекта моделирования. При каждом обращении к процедуре выдается конкретное значение температуры, принадлежащее заданному закону распределения.

Процедура "Идеальная термопара". Работа термопары весьма точно описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \alpha [\tilde{T}(t) - T(t)] \quad (3.1)$$

где $T(t)$ - изменение температуры на термопаре;

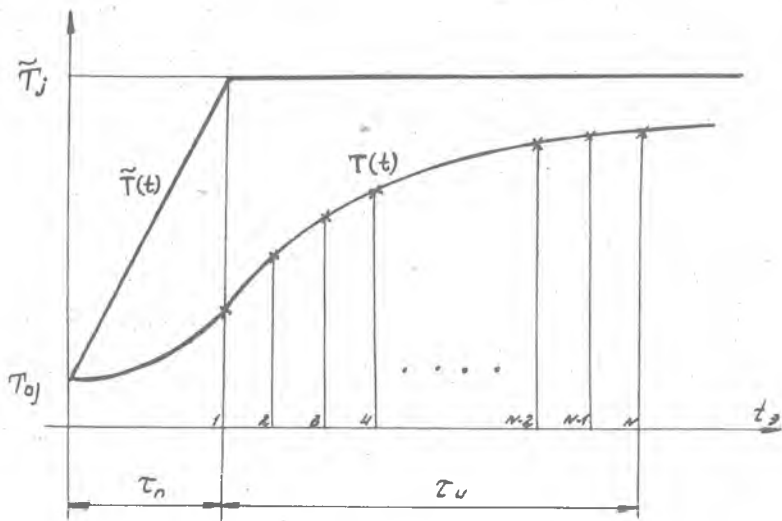
α - величина, обратная постоянной времени;

$\tilde{T}(t)$ - закон изменения окружающей среды (внешнее воздействие на термопару).

Пусть t_{oj} - время, прошедшее с начала эксперимента до начала переключения сканирующего механизма из позиции $j - 1$ в позицию j ; T_{oj} - температура на термопаре в этот момент; \tilde{T}_j - температура среды в позиции j

Описываемая процедура имитирует реакцию термопары на сложное воздействие вида (рис. 3)

$$\tilde{T}(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{T}_j - T_{oj}}{\tau_n} t + \tilde{T}_j, & t \in (t_{oj}, t_{oj} + \tau_n); \\ \tilde{T}_j, & t \in (t_{oj} + \tau_n, t_{o,j+1}), j \in \overline{1, M}; \end{cases}$$



Р и с. 3.

которая определяется решением уравнения (3.1):

$$T(t) = \begin{cases} T_{0j} + \frac{\tilde{T}_j - T_{0j}}{\tau_n} t + \frac{\tilde{T}_j - T_{0j}}{\alpha \tau_n} [e^{-\alpha(t-t_{0j})} - 1], & t \in (t_{0j}, t_{0j} + \tau_n); \\ \tilde{T}_j - [\tilde{T}_j - T(t_{0j} + \tau_n)] e^{-\alpha(t-t_{0j}-\tau_n)}, & t \in (t_{0j} + \tau_n, t_{0j+1}); \end{cases} j \in \overline{1, M}.$$

Величины α и τ_n являются внутренними параметрами процедуры.

Процедура "УСО". Процедура осуществляет имитацию прохождения сигнала по каналу связи термомпара-УСО М-6000 и работу собственно УСО М-6000.

Пусть S - чувствительность термомпары $\frac{mB}{град}$; T - закон измерения температуры на термомпаре, t ; ξ - реализация шума в канале связи mB .

Тогда величина сигнала на входе УСО М-6000 без учета инструментальной погрешности термомпары - суть

$$U_{bx}(t) = ST(t) + \xi(t). \quad (3.2)$$

Разделив обе части на S , получим:

$$T_{bx}(t) = T(t) + h(t), \quad (3.3)$$

где $T_{bx}(t)$ - сигнал с термомпары на входе УСО М-6000 (в градусах);

$h(t) = \frac{\xi(t)}{S}$ - реализация шума в канале связи, приведенная к чувствительности термомпары.

В УСО М-6000 сигнал с термомпары подвергается фильтрации, нормализации на милливольтэвом уровне, усилению и аналого-цифровому преобразованию. Шумы, вносимые модулями УСО МФ, МН, КСНУ пренебрежимо малы по сравнению с шумом в линии связи, как и динамические искажения усилителя УН из-за незначительной скорости изменения входного сигнала. Поэтому целесообразно было ограничиться шумом АЦП, который в основном представляет собой шум квантования. Если T_{max} - максимальное значение $T_{\delta x}(t)$, то работа АЦП описывается выражением

$$T^*(t) = FLOOR \left[\frac{T(t)2^K}{T_{max}} \right] \frac{T_{max}}{2^K}, \quad (3.4)$$

где $T^*(t)$ - сигнал на выходе АЦП в градусах;
 K - количество разрядов АЦП (в УСО М6000 $K=10$);

$FLOOR(A)$ - целая часть A .

$h_{кв}(t) = T^*(t) - T_{\delta x}(t)$ - шум квантования АЦП.

При моделировании шума в канале связи считалось, что величина $h(t)$ подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним и дисперсией D_h

Величины D_h , T_{max} , K - внутренние характеристики процедуры. Задавая их в качестве начальных условий можно получить требуемое соотношение сигнал - шум.

Алгоритм экстраполяции. В каждом конкретном положении термомпары наблюдению доступно N отсчетов процесса, взятых через τ_{min} : $T_i^* = T(t_i) + h_i$, ($i \in \overline{1, N}$)

Характер переходного процесса известен:

$$T(t) = \tilde{T} - (\tilde{T} - T_0) e^{-\alpha t}, \quad (3.5)$$

требуется определить его установившееся значение, т.е. температуру среды \tilde{T} .

Выбор алгоритма экстраполяции во многом обуславливается характером помех, действующих в тракте передачи информации. Наиболее распространенным критерием оптимальности при нахождении неиз-

вестных величин является минимум суммы квадратов отклонений [2],

$$[3]: \sum_{l \in I, N} [T_l^* - T(t_l)]^2 = \min$$

Если отклонения подчиняются нормальному закону, то при этом удовлетворяется критерий максимума правдоподобия [5]. Этот аргумент явился основным при выборе метода наименьших квадратов в качестве алгоритма экстраполяции.

Идея метода заключается в минимизации функционала:

$$F = \sum_{l \in I, N} [T_l^* - T(t_l)]^2 \quad (3.6)$$

Если в выражении (3.5) неизвестны параметры \tilde{T} и T_0 , то решая систему

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tilde{T}} \left\{ \sum_{l \in I, N} [T_l^* - T(t_l, \tilde{T}, T_0)]^2 \right\} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial T_0} \left\{ \sum_{l \in I, N} [T_l^* - T(t_l, \tilde{T}, T_0)]^2 \right\} = 0, \end{cases}$$

получим значения \tilde{T} и T_0 , обращающие выражение (3.6) в минимум:

$$T_0^* = \frac{\sum_{l \in I, N} T_l^* - n \tilde{T}^*}{\sum_{l \in I, N} e^{-\alpha t_l}} + \tilde{T}^* = f_1(\alpha), \quad (3.7)$$

$$\tilde{T}^* = \frac{\sum_{l \in I, N} \left[T_l^* e^{-\alpha t_l} - \frac{\sum_{j \in I, N} T_j^*}{\sum_{j \in I, N} e^{-\alpha t_j}} e^{-2\alpha t_l} \right]}{\sum_{l \in I, N} \left[e^{-\alpha t_l} - N \frac{e^{-2\alpha t_l}}{\sum_{j \in I, N} e^{-\alpha t_j}} \right]} = f_2(\alpha), \quad (3.8)$$

где $t_l = t_{\min}(l-1)$

которые, разумеется, являются оценками их истинного значения.

Если показатель экспоненты α тоже неизвестен, то алгоритм экстраполяции будет выглядеть следующим образом:

$$\min_{\alpha} F_{\alpha} = \min_{\alpha} \sum_{l \in I, N} [y_l - T(t_l, \alpha, \tilde{T}, T_0)]^2, \quad (3.9)$$

где $\tilde{T} = f_2(\alpha)$, $T_0 = f_1(\alpha)$.

Функция F_{α} определена на отрезке $[0, \infty]$ и является на нем выпуклой. Поиск ее минимума будем осуществлять методом золотого сечения [6], обладающим хорошей сходимостью. Метод обеспечивает сокращение интервала неопределенности, содержащего минимальную точку, до размеров

$$l_k = \Delta \tau^{K-1},$$

где Δ - величина начального интервала неопределенности;

$$\tau = (\sqrt{5} - 1)/2;$$

K - количество испытаний.

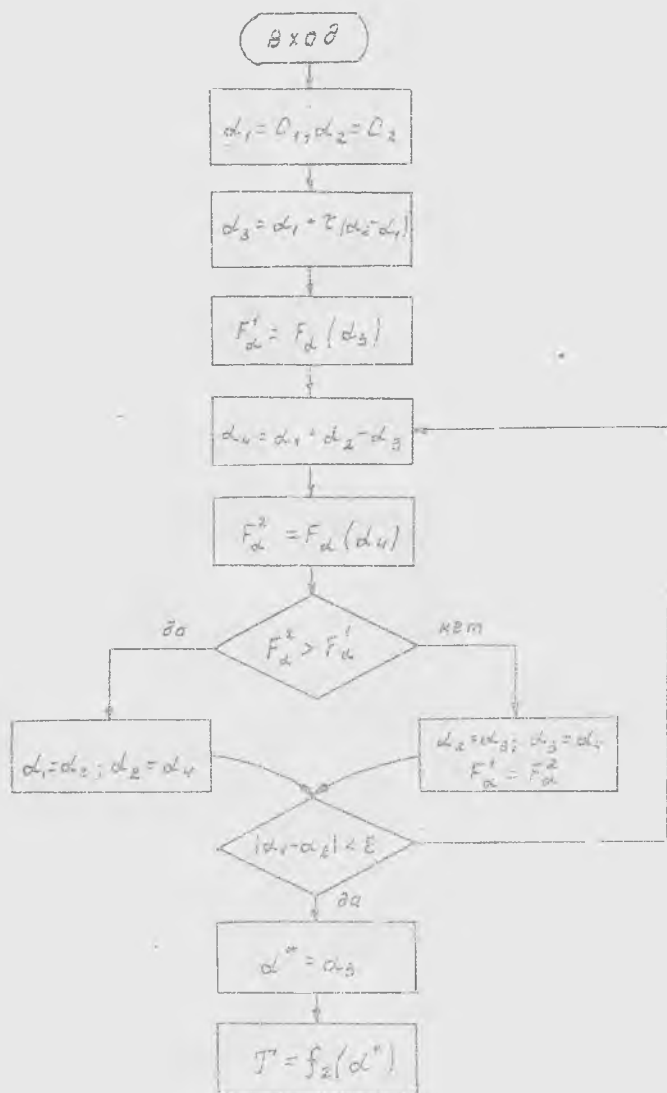
Блок-схема алгоритма экстраполяции приведена на рис. 4, где α_1 и α_2 - граничные точки начального интервала неопределенности. При моделировании процесса функционирования САЭ использовался принцип последовательной проводки заявок [4].

Анализ быстродействия процессора М-6000 и времени экстраполяции по формуле (3.8) показал, что для $N < 40$ $\tau_{\text{exp}}(N) < 0,5$ с, т.е. обработке информации в реальном времени можно совместить с временем переключения сканирующего устройства τ_n . Поэтому при моделировании полное время эксперимента подсчитывалось по формуле

$$T_j = M \left[\tau_n + (N-1) \frac{f_{\text{max}}}{K_T} \right]. \quad (3.10)$$

Рассмотрим работу модели, имитирующей эксперимент, проводимый в реальном времени. Без потери общности можно предположить, что на сканирующем устройстве находится одна термопара.

Пусть t_j - текущее время эксперимента и в начальный момент переключения сканирующего устройства из позиции $j-1$ в позицию j есть $t_j = t_{0j}$, а температура на термопаре равна T_{0j} . Переключение сканирующего устройства моделируется увеличением времени эксперимента на величину τ_n ($t_j = t_j + \tau_n$), после чего начинается работа процедура "Генератор температур", которая имитирует температуру в j -позиции поля: \tilde{T}_j . Значение \tilde{T}_j в качестве возмущающего воздействия передается в процедуру "Идеальная термопара", результатом функционирования которой являются N отсчетов T_{jn} ($n \in \overline{1, N}$), взятых через время $\tau_{\text{min}} = K_T / f_{\text{max}} = 0,12$, имитирующих переходный процесс на термопаре. По окончании работы "идеальной термопары" время эксперимента увеличивается на величину $(N-1) \tau_{\text{min}}$ и управление передается процедуре "УСО". В этой процедуре к отсчетам T_{jn} добавляются моделируемые шумы в линии связи и шумы квантования.



Р и с. 4

Зашумленные отсчеты переходного процесса T_{jn}^* ($n \in \overline{1, N}$) являются исходными данными алгоритма экстраполяции (п.3), конечным результатом работы которого будет оценка \bar{T}_j^* температуры \bar{T}_j в позиции j . После этого вычисляется ошибка экстраполяции:

$$E_j = \bar{T}_j^* - \bar{T}_j,$$

которая и является продуктом одного прогона модели.

Описанный процесс повторяется M раз для выбранных параметров САЭ, после чего вычисляются среднее ошибки эксперимента и ее дисперсия:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{j \in \overline{1, M}} (\bar{T}_j^* - \bar{T}_j), \quad D_E = \sum_{j \in \overline{1, M}} \frac{(E_j - \bar{E})^2}{M},$$

и \bar{E} выдаются на печать вместе с полным временем эксперимента

$$T_{j0}^*$$

4. Анализ результатов моделирования

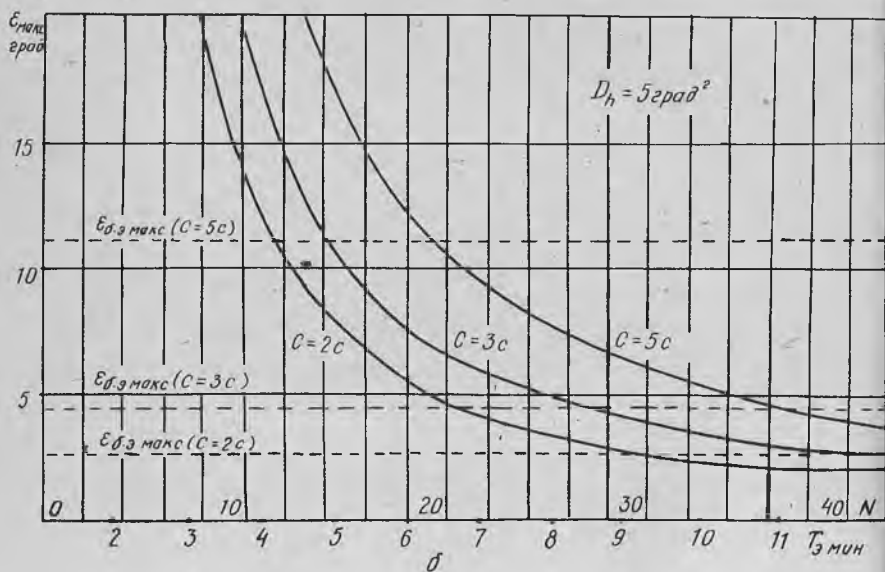
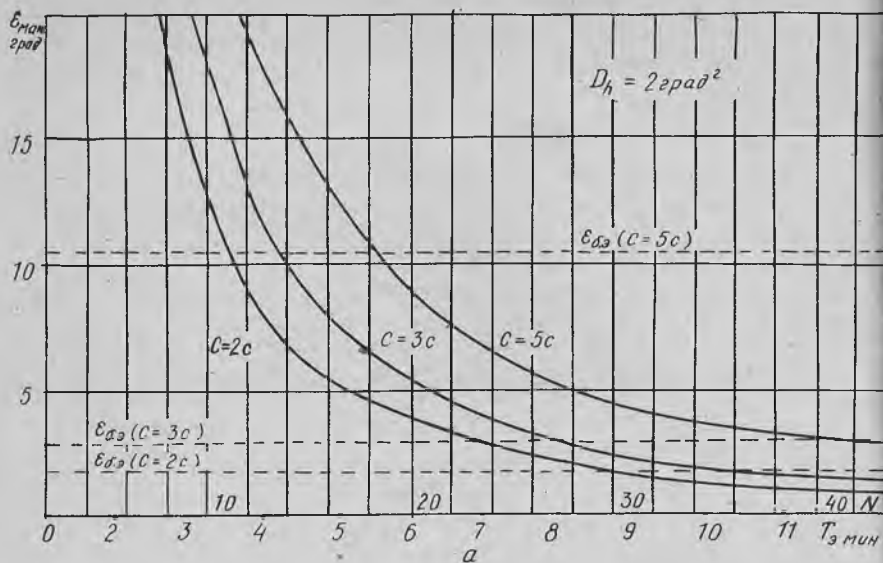
Имитационная модель САЭ (см. рис. 2) многократно прогонялась на различных параметрах системы. Первые прогоны модели показали, что среднее ошибки экстраполяции \bar{E} смещено: $\bar{E} \approx -0,50$ град. Такое смещение объясняется шумом квантования АЦП. Действительно, ошибка $\Delta_{k\tau}$ (τ), вносимая АЦП, имеет среднее, равное половине кванта:

$$\Delta \approx \frac{1}{2} \frac{T_{max}}{2^k} = \frac{1}{2} \frac{1000}{2^{10}} \approx -0,49 \text{ град.}$$

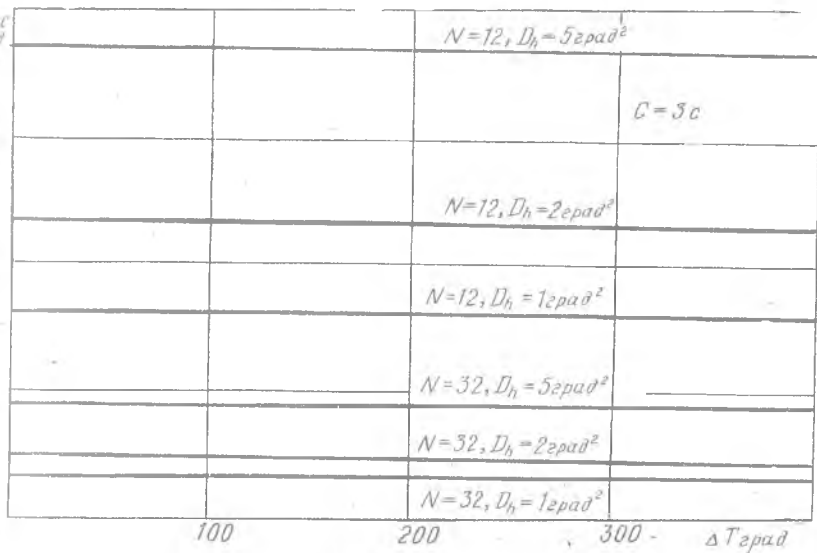
Поэтому в дальнейшем к оценке \bar{T}_j^* ($j \in \overline{1, M}$), получаемой алгоритмом экстраполяции, добавлялось смещение $\Delta = 0,49$ град.

В качестве оценки максимальной ошибки экстраполяции E_{max} было выбрано отклонение параметра E от своего среднего значения величину $3\sqrt{D_E}$. Известно, что вероятность превышения такого отклонения для отдельной реализации нормально распределенной величины равна $P_{3\sigma} = 0,0027$ [7]. За весь эксперимент, состоящий из $M = 140$ измерений, вероятность такого события составит

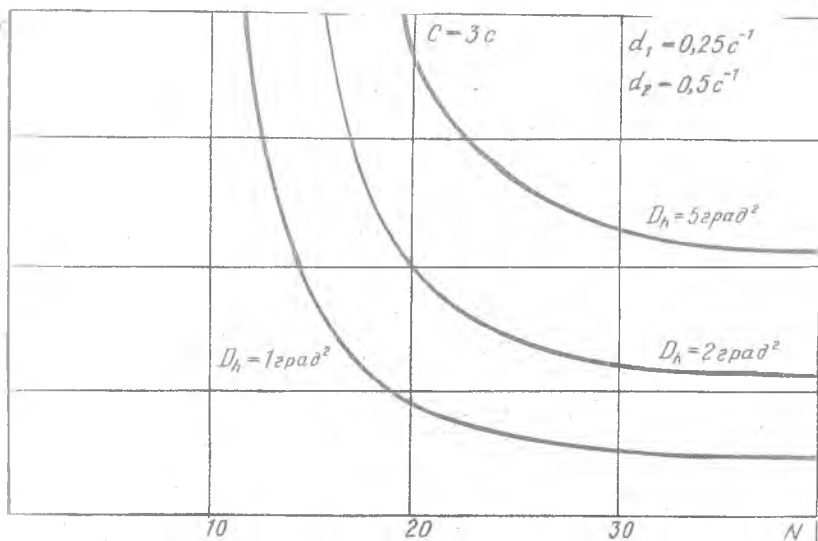
$$P_{3\sigma}^{max} = 1 - P_{3\sigma}^{отсут} \{E=0\} = 1 - e^{-MP_{3\sigma}} = 1 - e^{-140 \cdot 0,0027} = 0,5,$$



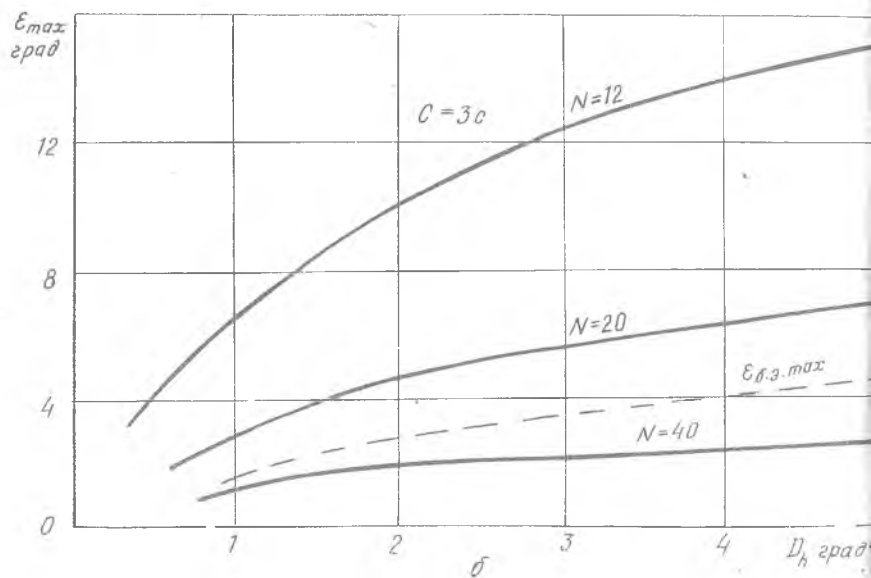
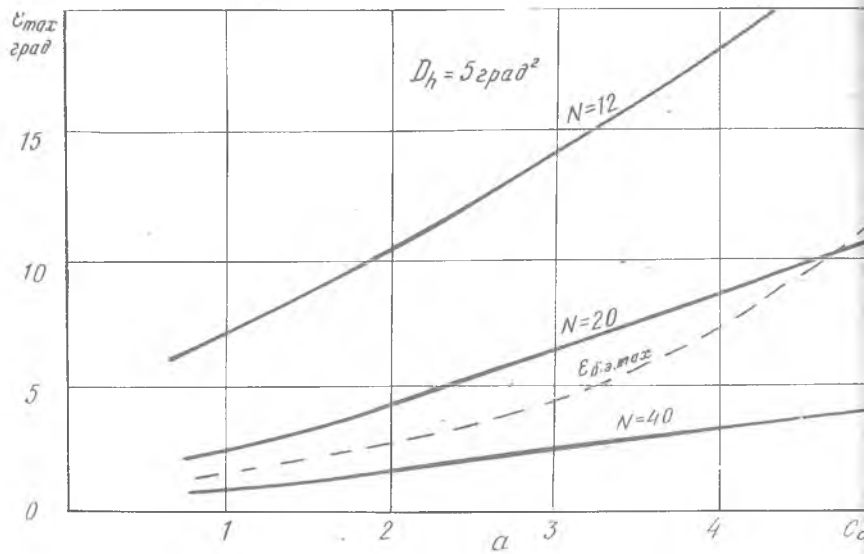
Р и с. 5.



Р и с. 6.



Р и с. 7.



Р и с. 8.

ε_{max} с достоверностью $\sigma = 1 - 0,3 = 0,7$ можно считать максимальной ошибкой эксперимента.

На рис. 5-8 приведены полученные моделированием графики значений ε_{max} для различных параметров САЭ.

Особый интерес представляет собой зависимость ошибки экстраполяции по формуле (3.8) (α априори известно) от скачка температуры, поданного на терморпару: $\varepsilon_{max} = f(\Delta T)$ (рис. 6). Анализ позволяет сделать вывод, что ε_{max} не зависит от рельефа температурного поля. Это нетрудно доказать. Действительно, если T_{jn} — отсчеты гладкого переходного процесса, а $T_{jn}^* = T_{jn} + h_{jn}$ — отсчеты шумленного, то в силу выражения (3.8) для ошибки получим:

$$\bar{T}_j^* - \tilde{T}_j = \frac{\sum_{i \in \bar{1}, N} \left[e^{-2\alpha t_i} \left(\frac{\sum_{n \in \bar{1}, N} h_{jn}}{\sum_{n \in \bar{1}, N} e^{-\alpha t_n}} \right) - h_{ji} \right]}{\sum_{i \in \bar{1}, N} \left[e^{-\alpha t_i} - \frac{N e^{-2\alpha t_i}}{\sum_{n \in \bar{1}, N} e^{-\alpha t_n}} \right]} \quad (4.1)$$

Отсутствие в формуле (4.1) отсчетов переходного процесса делает ошибку ε_j независимой от характера температурного поля.

Если значение α априори неизвестно или требует уточнения, режим эксперимента усложняется см. выражение (1.7). Требование минимальности T_g^* делает обработку информации в реальном времени невозможной. Во время активного эксперимента осуществляется только накопление информации, которая в последствии обрабатывается по алгоритму с блок-схемой, приведенной на рис. 4. Причем для большей точности оценка α определяется как среднее:

$$\alpha = \frac{1}{M} \sum_{j \in \bar{1}, N} \hat{\alpha}_j,$$

где $\hat{\alpha}_j$ — значение α , оцененное по выборке T_{jn}^* ($n \in \bar{1}, N$), и экстраполяция по формуле (3.8) проводится с учетом $\hat{\alpha}_j$. Полученная ε_{max} при прочих равных условиях будет больше, чем при экстраполяции с известной α (рис. 7). Продолжительность эксперимента также увеличится из-за усложнения алгоритма обработки информации и вынужденного простаивания процессора при переключении сканирующего устройства.

Для выявления эффективности предлагаемых в статье методов измерения стационарных температурных полей на модели (рис. 2) был выбран существующий режим использования рассматриваемой САЭ, кото-

рый заключается в следующем.

Сканирующее устройство после переключения из позиции $j-1$ позицию j выдерживается в течение $\tau_u = 20$ с с целью установления переходных процессов на термопарах. Затем каждая термопара, установленная на нем, опрашивается 6 раз. Полученная информация вводится в память машины, которая проводит усреднение результатов по каждой термопаре.

Результаты, полученные моделированием, позволяют сделать следующие выводы:

1. Время реально проводимого эксперимента (будем называть его экспериментом без экстраполяции) в основном (на 95%) определяется выдерживанием термопар в точках измерения и составляет

$$T_{э.э.} = M(\tau_n + \tau_u + \tau_{обр}) = 140(0,5 + 20 + 0,2) = 2898 \text{ с} \approx 48 \text{ мин},$$

что при прочих равных условиях в 6-10 раз больше времени эксперимента с экстраполяцией (рис. 5 а, б).

2. Погрешность эксперимента без экстраполяции $\varepsilon_{э.э. \max}$ существенно зависит от постоянной времени термопары. Действительно, чем инерционнее термопара, тем значительнее "недоотягивает" переходный процесс на ней до уровня возмущающего воздействия (рис. 8).

3. Чем инерционнее термопары, тем эффективнее использование алгоритмов экстраполяции, так как с увеличением C значение N , при котором достигается равенство

$$\varepsilon_{э.э. \max}(C) = \varepsilon_{\max}(C, N), \quad (4.2)$$

уменьшается (рис. 5, б).

Например, при $D_{11} = 5 \text{ град}^2$ равенство (4.2) выполняется:

при $C = 2 \text{ с}$ для $N = 31$ ($T_3^* \approx 9,5 \text{ мин}$);

при $C = 3 \text{ с}$ для $N = 28$ ($T_3^* \approx 8,8 \text{ мин}$);

при $C = 5 \text{ с}$ для $N = 20$ ($T_3^* \approx 6,5 \text{ мин}$),

т.е. чем инерционнее имеющиеся в наличие термопары, тем меньше требуется отсчетов переходного процесса N при его экстраполяции для достижения той же точности, что и $\varepsilon_{э.э. \max}(C)$.

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что за счет дополнительной загрузки ЭВМ удается ускорить процесс измерения стационарных температурных полей. Рассматриваемые методы измерения температуры позволяют в несколько раз сократить время задержки термопар в точках измерения, что, в конечном счете, приводит к резкому увеличению быстродействия (I.2) САЭ.

Эффективность предлагаемых методов подтверждается результатами имитационного моделирования: время эксперимента сокращается в 6-10 раз по сравнению с методом измерения, применяющимся на рассматриваемой САЭ (см. рис. I).

Дальнейшее увеличение быстродействия САЭ видится в усовершенствовании ее структуры и улучшения алгоритмов обработки информации, что может составлять предмет дальнейших исследований.

Л и т е р а т у р а

1. Д р а м м о н д Д. Методы оценки и измерения дискретных вычислительных систем. М., "Мир", 1977.
2. Б е р е з и н И.С., Ж и д к о в Н.П., Методы вычислений. М., Госфизматиздат, 1968, т. I.
3. Д е м и д о в и ч Б.И., М а р о н И.А., Ш у в а л о в а Э.В. Численные методы анализа. М., "Физматгиз", 1963.
4. Б у с л е н к о Н.П. Моделирование сложных систем. М., "Наука", 1968.
5. К у з и н Л.Т. Основы кибернетики. М., "Энергия", 1973, т. I.
6. Б а т и щ е в Д.Н. Поискные методы оптимального проектирования. М., "Советское радио", 1975.
7. Г н е д е н к о Б.В. Курс теории вероятностей. М., "Наука", 1969.