

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
(СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ, ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ)**

УДК 658.562

**А. М. ЛИТВИНОВ, Б. М. ЧЕТВЕРУХИН**

(Киев)

**ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ПОТОКА ТРЕБОВАНИЙ НА ОБСЛУЖИВАНИЕ  
ПРИ КОНТРОЛЕ ТЕМПЕРАТУРНОВЛАЖНОСТНЫХ ПОЛЕЙ**

Возросшие требования к комфортному и технологическому кондиционированию выдвинули задачу получения достаточно точной картины распределения температурновлажностных полей в кондиционируемых помещениях. Наличие градиентов температуры и относительной влажности воздуха по пространственным координатам обусловило применение для целей контроля температурновлажностных полей машин централизованного контроля.

В связи с этим возникла задача математического описания картины распределения температурновлажностных полей и организации потока требований на обслуживание кондиционируемого помещения.

Первая задача связана с получением статистических характеристик температурновлажностных полей (математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция поля), поскольку стабильность приемлемого распределения параметров поля во времени и в пространстве зависит от большого количества возмущающих факторов (трансмиссия тепла через стены помещения, перенос тепла излучением, тепловлаговыведения внутри помещения, нестабильность работы регуляторов и т. д.).

Вторая задача связана с вопросами квантования температурновлажностных полей в пространстве, по уровню и во времени — это в конечном итоге вопрос об определении оптимального количества датчиков температуры и влажности и рациональном размещении их в пространстве цехов большого объема, вопрос о формулировании метрологических требований к системе сбора информации, вопрос о минимизации измерительной информации, необходимой для описания поля с наперед заданной точностью.

В настоящей работе рассматривается задача организации поля измерительных рецепторов, по требованию которых должно быть произведено измерение состояния температурновлажностного поля при появлении опасных с точки зрения технологии аномалий этого поля. Формулируются условия квантования поля во времени по максимальному возмущающему воздействию и заданным условиями технологии уровня квантования поля.

Располагая определенным образом рецепторы, автоматически решаем вопрос об оптимальной адаптации системы сбора информации о состоянии параметров поля.

Поле рецепторов может быть создано по одной из двух схем: радиальной или магистральной (рис. 1). Рецепторы должны быть выполнены таким образом, чтобы при аномалии поля в данной точке больше допустимой рецептор давал бы сигнал в машину централизованного контроля (МЦК) о том, что имеется серьезная аномалия, которую необходимо зафиксировать. В противном случае МЦК не производит опроса точек, исключая тем самым избыточную информацию.

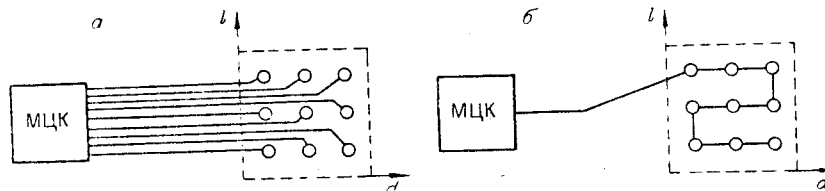


Рис. 1.

Одна из схем рецепторов приведена на рис. 2 [1]. Датчиком температуры в схеме является полупроводниковое термосопротивление (термистор), а датчиком абсолютной влажности — хлористо-литиевый подогревный датчик с термистором в качестве чувствительного элемента [2]. Чувствительный элемент ( $R_x$ ), сопротивление уставки ( $R_{уст}$ ) и двухобмоточное поляризованное реле с нейтральной настройкой контактов ( $P_1$ ) питаются импульсным напряжением определенной амплитуды и длительности, вырабатываемым формирователем ( $\Phi$ ) по команде МЦК.

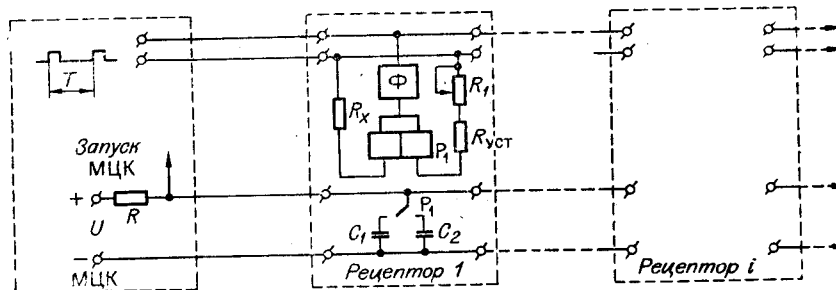


Рис. 2.

При  $|R_x - R_{уст}| \geq \alpha \epsilon$  ( $\epsilon$  — зона нечувствительности рецептора,  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления термистора) контакт реле перебрасывается, осуществляя запуск МЦК. Сопротивление  $R_1$  служит для компенсации разброса сопротивления  $R_x$ .

Условный коэффициент усиления рецептора определяется коэффициентом перегрузки чувствительного элемента в импульсе. Если  $q$  — скважность питающего напряжения, то  $P_{max} = P_{cp} q$ , где  $P_{max}$  — максимальная мощность в импульсе, рассеиваемая на  $R_x$ ,  $P_{cp}$  — среднее значение мощности за период. Очевидно, что с увеличением  $q$  при том же значении  $P_{cp}$  можно увеличивать  $P_{max}$ , т. е. увеличивать условный коэффициент усиления рецептора и его чувствительность. Верхний предел  $P_{max}$  определяется разрушением кристаллической решетки термистора при прохождении по нему большого импульса тока.

Недостатком такого режима работы является нагрев термистора проходящим по нему током. Но вследствие тепловой инерционности термистора всегда можно определить необходимую длительность импульса и его величину, обеспечивающие заданную погрешность измерения. Необходимым при этом является требование достаточной длительности паузы между двумя импульсами для полного исчезновения эффекта самонагрева. В этом случае работу термистора можно рассматривать при воздействии одиночного импульса.

Уравнение теплового баланса термистора запишем в виде

$$Pdt = Cd\theta + H\theta dt,$$

где  $C$  — теплоемкость термистора;  $H$  — коэффициент рассеивания чувствительного элемента;  $\theta$  — превышение температуры термистора над температурой окружающей среды;  $Pdt$  — импульс мощности, подводимый к чувствительному элементу.

Если привести уравнение к стандартной форме записи, получим дифференциальное уравнение зависимости величины перегрева чувствительного элемента во времени:

$$\tau_4 \frac{d\theta}{dt} + \theta = kP, \quad (1)$$

где  $k = \frac{1}{H}$ ;  $\tau_4 = \frac{C}{H}$ . Коэффициент рассеивания  $H$  в пределах до 110—120°С принято считать постоянным [2]. Величина  $\tau_4$  есть постоянная времени самонагрева чувствительного элемента.

Если теплоемкость чувствительного элемента определяется типом термистора, то при определении коэффициента рассеивания датчика температуры и датчика влажности необходимо учитывать их конструктивное выполнение. Поэтому расчет коэффициента рассеивания необходимо проводить по семейству вольт-амперных характеристик датчиков по методике, аналогичной расчету коэффициента рассеивания для термисторов [2].

Решение дифференциального уравнения (1) для случая воздействия импульса напряжения длительностью  $t_n$  на чувствительный элемент датчика влажности можно записать в виде

$$\theta_p = \frac{U^2}{H(R_0 + \alpha T_p)} (1 - e^{-\frac{t_n}{\tau_4}}) \text{ при } (R_0 + \alpha T_p) \gg R_{\text{реле}}, \quad (2)$$

где  $T_p$  — равновесная температура на поверхности хлористо-литиевого подогретого датчика влажности;  $\theta_p$  — величина перегрева чувствительного элемента;  $U$  — амплитуда питающего напряжения.

Так как величина перегрева обычно очень мала, можно ограничиться первыми двумя членами разложения выражения  $e^{-\frac{t_n}{\tau_4}}$  в ряд по степеням  $\frac{t_n}{\tau_4}$ . Тогда

$$\theta_p = \frac{U^2}{H(R_0 + \alpha T_p)} \frac{t_n}{\tau_4}. \quad (3)$$

Аналогичные рассуждения можно провести и для датчика температуры. В этом случае

$$\theta_c = \frac{U^2}{H(R_0 + \alpha T_c)} \frac{t_n}{\tau_4} \text{ при } (R_0 + \alpha T_c) \gg R_{\text{реле}}, \quad (4)$$

где  $T_c$  — температура окружающей среды.

При контроле температурного поля рецепторов при  $t_n \gg t_{\text{ср. реле}}$  амплитуда питающего напряжения будет равна

$$U \leq \sqrt{\frac{\theta_{\text{с max}} (R_0 + a T_{\text{уст}}) \tau_4 H}{t_n}}. \quad (5)$$

С другой стороны, исходя из условия получения заданной чувствительности рецептора,

$$U \geq \frac{I_{\text{ср}} (R_0 + a T_{\text{уст}})^2}{a \varepsilon}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{ср}}$  — ток срабатывания реле;  $\varepsilon$  — зона нечувствительности рецептора.

При контроле влажностного поля рецепторов аналогичные формулы получаются для датчиков влажности.

Как следует из рис. 2, машина с определенной периодичностью производит одновременный опрос всех рецепторов и в случае аномалий температурно-влажностного поля, ранее не зафиксированных МЦК, реле одного или нескольких рецепторов срабатывают и на сопротивлении появится импульс, запускающий МЦК на последовательный обход точек.

Для определения частоты опроса датчиков рецептивного поля воспользуемся классическим приемом расчета отклика датчиков температуры и абсолютной влажности на скачкообразное изменение параметра и сравнение отклика с уставкой.

Поскольку скачкообразное изменение параметра является наименее благоприятным вариантом «поведения» поля, учет именно таких возмущений обеспечивает фиксацию всех аномалий поля, превышающих заданный технологический допуск.

Отклонения значений контролируемого параметра от номинального можно классифицировать с точки зрения технологии производства как находящиеся в допуске ( $\Delta_n$ ) и аварийные ( $\Delta_a$ ), т. е. отклонения параметра, которые приводят к браку продукции, понижению сортности и т. д. и которые необходимо фиксировать.

Пусть МЦК отразила картину распределения температурно-влажностного поля без серьезных аномалий ( $\Delta \leq \Delta_n$ ). При этом  $\Delta_n$  соответствует зоне нечувствительности рецептора ( $\Delta_n = \varepsilon$ ). Если  $\delta$  — среднеквадратичное отклонение контролируемого параметра от уставки, то с вероятностью  $P=0,9973$  можно сказать, что максимальное отклонение параметра от уставки будет равно  $\Delta_{\text{max}} \pm 3\sigma$ . При действии скачкообразного возмущения закон изменения отклонения от уставки запишем в виде

$$\Delta = \Delta_{\text{max}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right), \quad (7)$$

где  $\tau_0$  — постоянная времени контролируемого объекта.

Наихудший вариант поведения поля в любой точке изображен на рис. 3.

Если опрос рецепторов был произведен в момент времени  $t_1$ , то для предотвращения аварийных отклонений необходимо опросить рецепторы через время  $T=t_2-t_1$ . Это время определим из формулы (7) как

$$T = \tau_0 \ln \frac{\Delta_{\text{max}} - \varepsilon}{\Delta_{\text{max}} - \Delta_a}. \quad (8)$$

Как показали результаты экспериментального исследования температурно-влажностных полей в прядильных цехах Черниговского и Кур-

ского комбинатов химического волокна, применение статистических методов квантования во времени с использованием неравенства Чебышева [3], позволяющего осуществить квантование, обеспечивающее фиксацию всех отклонений, дает значение периода опроса температурных рецепторов  $T=12$  мин. При расчете периода опроса по (8)  $T=$

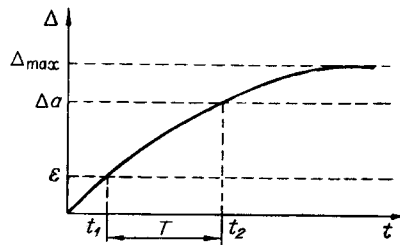


Рис. 3.

$=14$  мин, т. е. использование неравенства Чебышева дает несколько завышенные результаты.

Расчетные величины времени опроса температурных и влажностных рецепторов получаются различными (в вышеуказанном примере для температурных рецепторов  $T=14$  мин, для влажностных  $T=18$  мин). Квантование во времени по более жестко заданному параметру дает некоторое увеличение количества информации. Селективный опрос рецепторов позволяет избежать этого, но при реализации селективного опроса усложняется канал связи рецепторов с МЦК. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо решать вопрос о целесообразности введения селективного опроса рецепторов.

Так как датчик за время  $T$  должен успеть вновь принять температуру окружающей среды, то при выборе чувствительных элементов рецепторов необходимо учитывать требования их допустимой инерционности

$$\tau_d \leq \frac{T - t_n}{3 \div 5}.$$

Поле рецепторов должно как можно полнее отражать истинную картину поля, но вследствие дискретности измерения поля в пространстве возникает погрешность квантования поля по пространственным координатам. Поэтому необходимо определить оптимальный шаг квантования рецептивного поля в пространстве, исходя из заданной точности воспроизведения температурновлажностного поля.

Воспользуемся методом оптимальной (статистической) интерполяции, дающим более точное выражение аппроксимирующего полинома, чем другие методы интерполяции (например, ступенчатая и параболическая) [3]. Максимальную погрешность, вызванную дискретизацией поля рецепторов, можно записать в виде

$$\sigma_i^2 = K_x(0) - \sum_{m=1}^n \sum_{k=1}^n p_m p_k K_x[|m-k|l_0], \quad (9)$$

где  $p_m, p_k$  — коэффициенты статистической интерполяции, определяемые из системы уравнений

$$\sum_{m=1}^n p_m K_x(l_i - l_m) = \sum_{k=1}^n p_k K_x[|i-k|L] \quad \text{при } i=1, 2, 3, \dots, n, \quad (10)$$

где  $n$  — количество датчиков, расположенных по данной пространственной координате  $(l, d)$ ;  $K_x(l)$  — корреляционная функция по данной пространственной координате для одного из параметров;  $L$  — расстояние между точками контроля;  $l_0$  — искомый интервал между соседними рецепторами, определяемый из условия заданной погрешности дискретизации.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев один и тот же чувствительный элемент используется как в схеме контро-ля МЦК, так и в схеме рецептора, т. е.  $l_0=L$ . Аналогично получают-ся расчетные формулы для другой пространственной координаты.

Для унификации расчетов и упрощения использования формул (9) и (10) предлагается следующий алгоритм вычисления корреляционной функции поля по пространственной координате.

1. Определение текущего среднего для любого момента времени  $(t_k)$  во всех точках поля:

$$M X(t_k; l_i; d_j) = \frac{1}{T_0} \sum_{i=-n/2}^{+n/2} X(t_k + i \Delta t), \quad (11)$$

где  $n \Delta t = T_0 = 24$  ч, а время  $t_k$  отсчитывается в каждой реализации по-ля от начала реализации.

2. Центрирование температурновлажностного поля во всех точках контро-ля:

$$\Pi(t_k; l_i; d_j) = X(t_k; l_i; d_j) - M X(t_k; l_i; d_j). \quad (12)$$

3. Вычисление корреляционной функции по каждой пространствен-ной координате:

$$R_{\Pi}(l_i; l_j) = \frac{\sum_{m=1}^N \Pi_m(t_k; l_j) \Pi_m(t_k; l_i)}{N-1} \quad \text{при } d = \text{const}, \quad (13)$$

где  $N$  — количество реализаций поля;  $l$  и  $d$  — координаты пространства;  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $j=1, 2, 3, \dots, n$  — количество точек контро-ля по данной про-странственной координате.

4. Нормирование корреляционных функций:

$$R_{\Pi\Pi}(l_j; l_i) = \frac{R_{\Pi}(l_j; l_i)}{\sigma_{\Pi}^2} \quad \text{при } d = \text{const}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{\Pi}^2 = R_{\Pi}(l_j; l_i)$  при  $i = j$ .

Предлагаемая методика расчета корреляционных функций с приме-нением скользящего центрирования и последующим нормированием кор-реляционной функции позволяет резко сократить объем вычислений, так как многочисленные расчеты характеристик температурновлажностных полей показали, что получаемые данные для различных участков поме-щения не отличаются между собой более чем на 5%. Следовательно, расчет корреляционных характеристик температурновлажностного поля может быть осуществлен по одному из участков кондиционируемого по-мещения.

Так как при расчете шага квантования поля рецепторами использу-ется лишь начальный участок корреляционной функции, то практически для расчета корреляционной функции поля необходим участок помеще-ния длиной не более 15—20 м при установке точек контро-ля с шагом в 1—2 м.

Изложенная методика определения корреляционных функций тем-пературновлажностных полей была применена авторами для простран-ственного квантования температурновлажностных полей в производст-венных цехах Черниговского и Курского комбинатов химических волокон. Совмещение датчиков температуры и абсолютной влажности приводит к увеличению количества информации о состоянии влажностного поля на

15% вследствие осуществления квантования пространства по более жестко заданному параметру — температуре воздуха. Поэтому совмещение датчиков следует производить лишь в том случае, когда контролируемая относительная влажность воздуха в каждой точке, являющаяся функцией как абсолютной влажности, так и температуры воздуха. В этом случае совмещение датчиков и, как следствие, некоторое увеличение избыточности информации является вынужденным. Состояние поля относительной влажности при этом контролируется косвенно, рецептивными полями температуры и абсолютной влажности воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Литвинов. Импульсные регуляторы температуры.— Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1959.
2. Г. К. Нечаев. Полупроводниковые термосопротивления в автоматике. Киев, ГИТЛ УССР, 1962.
3. Э. Л. Ицкович. Статистические методы при автоматизации производства. М., «Энергия», 1964.

*Поступила в редакцию  
11 сентября 1968 г.,  
окончательный вариант —  
24 января 1969 г.*