

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

№ 3

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

1988

где σ_s — предел прочности; σ_b — временное сопротивление разрыву; δ_{10} — относительное удлинение; $HВ$ — твердость по Бринеллю; ∇H_r — показания прибора КИМ-1 в А/м².

Таблица 2

Влияние магнитной предыстории стали 30ХГСА на результаты контроля качества термической обработки прибором КИМ-1

Температура отпуса, °С	$\nabla H_r \cdot 10^{-2}$, А/м ²									
200	-261	-470	-615	-701	-836	410	287	611	697	860
	863	865	862	863	863	863	862	861	864	865
300	-239	-452	-474	-515	-681	142	404	466	512	699
	700	700	699	701	701	699	699	700	701	702
400	-293	-310	-400	-444	-590	140	356	393	444	609
	607	610	609	609	608	609	609	611	609	610
500	-166	-224	-260	-304	-358	117	223	240	266	367
	367	368	369	368	369	366	368	367	369	370
600	-141	-169	-201	-240	-266	112	169	199	243	270
	269	271	269	270	272	270	269	272	270	272

Примечание. В числителе ∇H_r предварительно намагниченного изделия, в знаменателе — измеренный прибором КИМ-1.

Среднеквадратичные погрешности при этом составили: $S_{\sigma_s} = 2,22$ ед., $S_{\sigma_b} = 2,38$ ед., $S_{\delta_{10}} = 2,23$ ед., $S_{HВ} = 5,99$ ед.; коэффициенты корреляции: $r_{\sigma_s} = 0,83$, $r_{\sigma_b} = 0,56$, $r_{\delta_{10}} = -0,53$, $r_{HВ} = 0,6$, что вполне допустимо на практике.

ВЫВОДЫ

1. Прибор КИМ-1 может быть использован для контроля механических свойств сталей с однозначной связью между магнитными и механическими характеристиками.

2. Влиянием магнитной предыстории при контроле механических свойств сталей можно пренебречь, так как погрешность, вызванная ею, меньше основной погрешности прибора.

Институт прикладной физики
АН БССР

Поступила в редакцию
10 декабря 1986 г.;
в окончательном варианте —
4 июня 1987 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельгуй М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск, Наука и техника, 1980. — 184 с.
2. Мельгуй М. А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-2А. — В кн.: Не разрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности. — Минск: Наука и техника, 1973, с. 81—90.
3. Мельгуй М. А., Мальцев В. Л., Пиунов В. Д., Цысецкий И. А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4. — Дефектоскопия, 1979, № 3, с. 29—32.
4. Мельгуй М. А., Кратиров В. Б. Способ контроля механических свойств изделий из ферромагнитных материалов. Авт. свид. № 708795. — Бюл. изобр., 1982, № 34.
5. Мельгуй М. А., Кратиров В. Б. Аномальный гистерезис поля остаточной намагниченности и его градиента при намагничивании ферромагнетика импульсным магнитным полем. — Дефектоскопия, 1986, № 12, с. 64—70.
6. Мельгуй М. А., Пиунов В. Д., Цукерман В. Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4А. — Дефектоскопия, 1986, № 11, с. 63—67.
7. Мельгуй М. А., Пиунов В. Д. Влияние режима намагничивания и размеров контролируемого объекта на величину градиента остаточного магнитного поля. — Дефектоскопия, 1980, № 7, с. 17—22.

УДК 620.179.14

ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ТОЛЩИНОМЕР В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

В. Г. Брандорф, В. А. Сясько

Описаны схема, конструкция и алгоритм работы высокостабильного интегрирующего электромагнитного толщиномера в составе автоматизированной системы неразрушающего контроля качества крупногабаритных ферромагнитных изделий, приведены основные технические характеристики.

Автоматизированным неразрушающим испытаниям крупногабаритных изделий свойственны непрерывность и длительность при функционировании большого числа сложных узлов и систем (сканирующие и другие исполнительные механизмы, блоки аналоговой и цифровой обработки, регистрации и индикации информации). Причем в процессе сканирования первичные измерительные преобразователи средств контроля часто оказываются в недоступных оператору зонах. Эти особенности обуславливают специфические требования к используемым средствам контроля и, прежде всего, к их долговременной стабильности.

Если при ручном контроле можно в какой-то мере мириться с затратами времени на начальный прогрев аппаратуры и периодическое выполнение весьма трудоемких операций калибровки (часто осуществляемой методом итераций с помощью наборов стандартных образцов измеряемого параметра и специальных приспособлений), то при автоматизированном контроле эти затраты недопустимы, тем более, что потери времени на калибровку могут значительно возрастать в сравнении с ручным контролем вследствие необходимости демонтажа (с последующим обратным монтажом) первичных измерительных преобразователей с измерительных позиций.

Эти соображения были определяющими при разработке интегрирующих электромагнитных толщиномеров типа ТЭМИ [1], предназначенных для автоматизированных систем неразрушающего контроля (АСНК) [2]. Первичный измерительный преобразователь толщины T таких цифровых приборов состоит из источника аксиального магнитного поля и индукционного преобразователя этого поля, накладываемых соосно на разные поверхности стенки объекта контроля в исследуемой зоне. Первичный измеряемый параметр — величина вольтсекундной площади $S(T)$ эдс $e_x(t, T)$ преобразователя при питании источника поля от источника постоянного напряжения через периодически коммутируемый ключ. Время интегрирования $\tau_{\text{и}}$ эдс $e_x(t, T)$ выбирается из двух условий: оно должно быть больше времени становления стационарных значений поля в объеме преобразователя и кратно периоду питающей сети τ_c , что обеспечивает независимость результата измерения от электропроводности σ ферромагнитных тел в ближнем поле источника (конструктивные и технологические включения в стенке объекта контроля, элементы конструкции сканирующих устройств и др.) и высокую помехозащищенность соответственно.

С помощью различных модификаций толщиномеров ТЭМИ перекрыт широкий интервал измеряемых толщин (от 0 до 600 мм) при основной погрешности измерений 0,2—0,5% в зависимости от диапазона измерений $[T_m, T_M]$. Достоинствами толщиномеров является также их электромагнитная совместимость с другими средствами контроля (например, у.з. дефектоскопами) и исполнительными механизмами, что особенно важно при комплексных автоматизированных испытаниях.

Линейное преобразование

$$e_x(t, T) \rightarrow S(T) = M_x(T) i_0 \rightarrow N(T), \quad (1)$$

где $M_x(T)$ — коэффициент взаимной индукции катушек источника и преобразователя поля; i_0 — стационарное значение тока источника; $N(T)$ — количество импульсов, выполняется аналого-цифровым преобразователем на основе двухтактного интегратора [3]. Использование режима хранения аналоговой информации, обратной связи по току i_0 и других технических решений в основном исчерпало конструктивные методы уменьшения времени самопрогрева и увеличения долговременной стабильности толщиномеров ТЭМИ, но не позволило полностью исключить операции ручной калибровки.

Наличие микроЭВМ в составе АСНК [2] дает возможность выделить часть ее ресурсов для реализации структурных методов уменьшения коррелированной составляющей $\bar{\Delta}$ погрешности измерений $\Delta = \bar{\Delta} + \dot{\Delta}$ ($\dot{\Delta}$ — некоррелированная составляющая). Нами использован метод образцовых мер с временным разделением каналов [4]. Многолетний опыт эксплуатации более двадцати толщиномеров ТЭМИ свидетельствует о том, что основными причинами, порождающими указанную составляющую, являются зависимости аддитивного a_0 и мультипликативного a_1 коэффициентов градуировочной характеристики преобразования (1) от времени

$$N(T) = a_0(t) + a_1(t) M_x(T), \quad (2)$$

что приводит к сдвигу показаний и изменению чувствительности.

В соответствии с (2) достаточно выполнить последовательно три цикла преобразований (1):

$$e_x(t, T) \rightarrow M_x(T) i_0 \rightarrow N(T), \quad (3a)$$

$$e_m(t) \rightarrow M_m i_0 \rightarrow N_m, \quad (3b)$$

$$e_M(t) \rightarrow M_M i_0 \rightarrow N_M, \quad (3в)$$

где $e_m(t)$ и $e_M(t)$ — эдс, действующие на отводах вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого является источником поля; M_m и M_M — соответствующие коэффициенты взаимной индукции обмоток (образцовые меры), после чего с помощью микроЭВМ вычислить отношение

$$n(T) = \frac{N_M - N(T)}{N_M - N_m}. \quad (4)$$

В зависимости от размеров, формы, ориентации в поле источника и σ электропроводящих тел величина $\tau_{\text{и}}$ выбирается из условия $\tau_{\text{и}} = 2^q \tau_c$. В большинстве случаев достаточно принять $q = 2-4$ [1, 2]. Тогда длительность трех циклов преобразований (3) $3\tau_{\text{и}}$ не превысит 1-2 с. В таком временном интервале параметры и режимы толщиномера не успевают практически измениться и на основании (4) с учетом (3) получим

$$n(T) = \frac{M_M - M_x(T)}{M_M - M_m}. \quad (5)$$

Благодаря выполнению в (4) операций вычитания и последующего деления исключается зависимость $n(T)$ от коэффициентов a_0 и a_1 . Таким образом, $n(T)$ есть функция лишь геометрических параметров системы трансформатор — индукционный преобразователь поля. Для повышения стабильности параметров этой системы приняты специальные конструктивные и технологические меры (каркасы изготовлены из анодированного алюминия, улучшен теплоотвод от источника поля, для уменьшения его массы первичная обмотка выполнена алюминиевым

проводом, все катушки подвергнуты вакуумной пропитке и др.). Основные параметры системы для $T_m=0$, $T_m=100$ мм приведены в таблице.

Конструкция источника и преобразователя поля предусматривает возможность размещения в их внутренних объемах как накладных, так

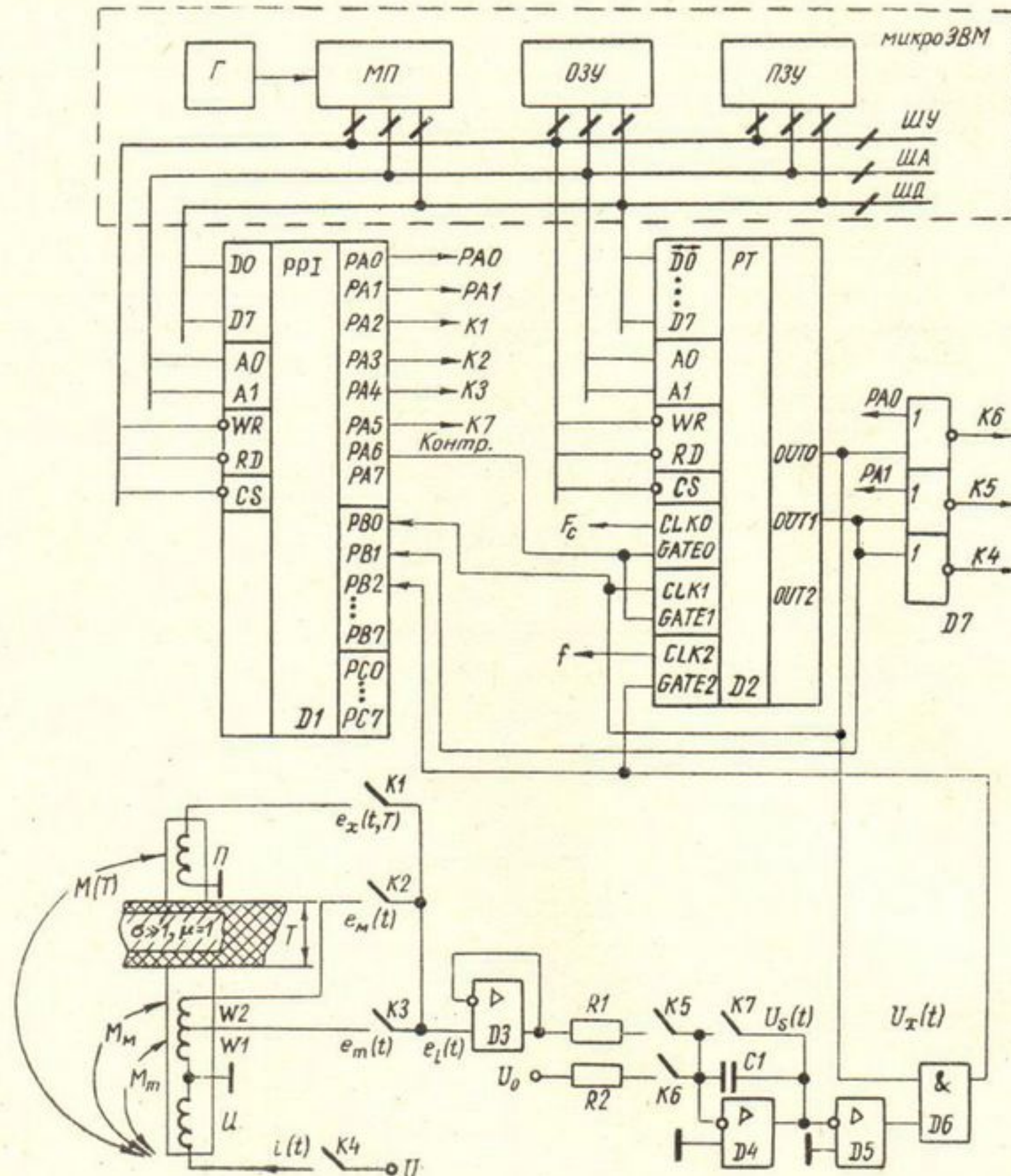


Рис. 1. Функциональная схема электромагнитного толщиномера в составе АСНК:

Г — генератор (КР580ГФ24); МП — микропроцессор (КР580ИК80); запоминающие устройства: ОЗУ — оперативное (8×К565РУ3), ПЗУ — постоянное (6×К573РФ5); D1 — программируемый интерфейс (КР580ИК55); D2 — программируемый таймер (КР580ИК53); D3, D4 — операционные усилители (К140УД14); D5 — компаратор (К521СА3); логические элементы: D6 — 2И (К155ЛИ1), D7 — 3×2ИЛИ-НЕ (К155ЛЕ1); ключи: K1—K3, K5—K7 — аналоговые (2×284КН1), K4 — силовой (КТ819); трансформатор: Н — источник поля — первичная обмотка, W1, W2 — вторичная обмотка; П — индукционный преобразователь; шины: ШУ — управления (4 разряда), ША — адреса (16 разрядов), ШД — данных (8 разрядов); источники постоянного напряжения: U — питания источника поля, U₀ — опорный.

и бесконтактных первичных измерительных преобразователей средств контроля, работающих на иных физических принципах. Перемещение источника и преобразователя поля по заданной траектории и совмещение их осей в точках контроля по сигналам индукционных преобразователей системы ориентации осуществляется двумя идентичными накладными двухкоординатными приводами, управляемыми микроЭВМ. В процессе контроля с помощью микроЭВМ собирается, обрабатывается и упорядочивается информация, записывается на магнитную ленту для последующей обработки результатов по всему объекту контроля и принятия решения о его соответствии заданным параметрам качества.

Основные параметры первичного измерительного преобразователя

Параметр	Трансформатор		Индукционный преобразователь поля
	Первичная обмотка (источник поля)	Вторичная обмотка	
Диаметры обмоток, мм:		Однослойная (поверх первичной обмотки)	
внешний	75		75
внутренний	40		40
Длина обмотки, мм	50	50	6
Тип провода	ПЭВАТ-2-0,45	ПЭВ-2-0,19	ПЭВ-2-0,315
Количество витков	3600	12+210	865
Активное сопротивление, Ом	128	30	36

Анализ выполненных ранее разработок [2] позволил путем исключения функциональных узлов и связей, не влияющих на кратковре-

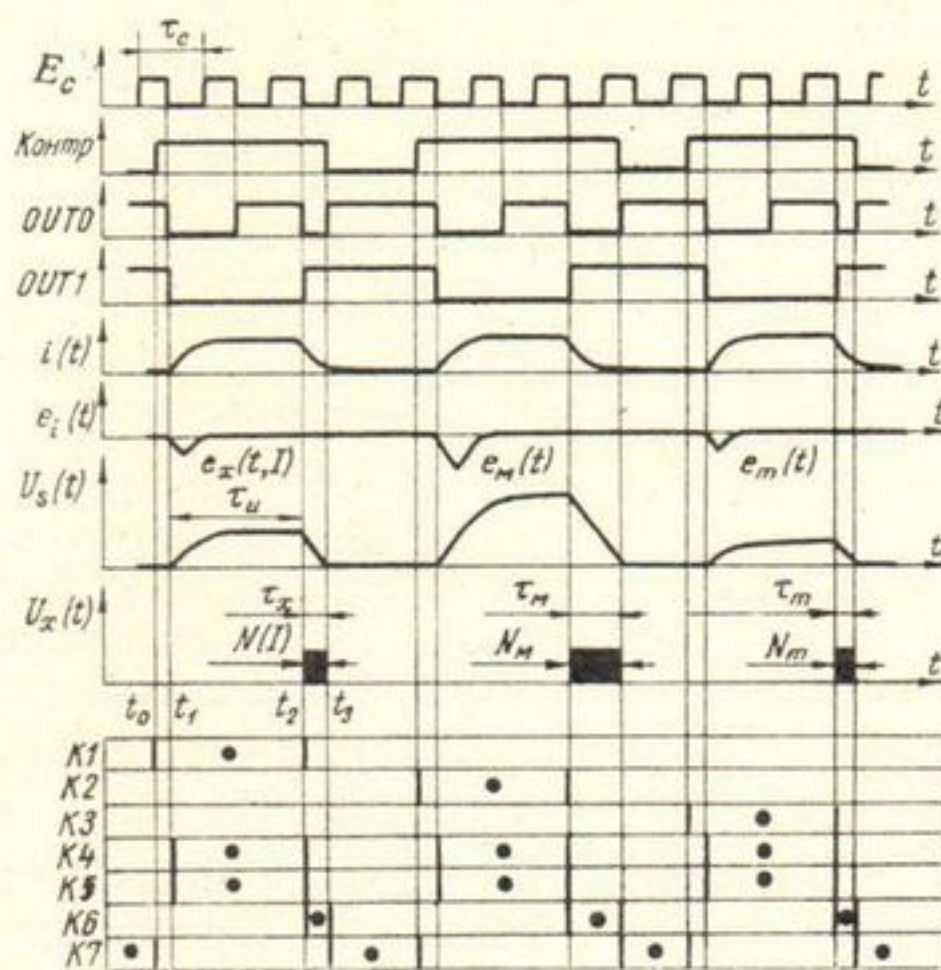


Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу толщиномера, при $2^a \tau_c = 2\tau_c$ и таблица состояния ключей (● — замкнутое состояние ключа).

менную стабильность, упростить конструкцию и алгоритм работы аналоговой части толщиномера, функциональная схема которого в составе АСНК и временные диаграммы представлены на рис. 1 и 2.

Синхронизация работы аналоговой части осуществляется с помощью таймера $D2$, на вход $CLK0$ которого поступают импульсы F_c с периодом следования τ_c . При этом на выходах $OUT0$ и $OUT1$ формируются импульсы, определяющие величину $\tau_{и}$. В регистры управляющих слов интерфейса $D1$ и таймера $D2$ загружаются команды, определяющие режим их работы, и через порт A подается команда на замыкание ключа $K7$. После завершения операции ориентирования в момент t_0 ключ $K7$ размыкается, ключ $K1$ замыкается, на входы $GATE0$ и $GATE1$ подается команда *Контроль*. Во временном интервале $t_2 - t_1 = 2^a \tau_c$ ключи $K4$ и $K5$ замкнуты, ток $i(t)$ возрастает от нуля до стационарного значения $i(t_2) = i_0$ и осуществляется интегрирование отрицательного импульса эдс $e_x(t, T)$.

В момент t_2 ключи $K1$, $K4$, $K5$ размыкаются, замыкается ключ $K6$ и на вход интегратора $D4$ подается положительное опорное напряжение U_0 , что вызывает линейное уменьшение его выходного напряжения

$U_s(t)$. В момент t_3 , когда $U_s(t_3) = 0$, срабатывает компаратор $D5$ и схема устанавливается в исходное состояние. Выходной интервал времени $\tau_x = t_3 - t_2$ заполняется импульсами с частотой следования f , их количество $N(T) = \tau_x f$ подсчитывается таймером $D2$ и вводится в $O3Y$. Аналогично в конце второго и третьего циклов в $O3Y$ вводятся значения N_m и N_M . Затем микроЭВМ вычисляет значение $n(T)$.

Возможное увеличение некоррелированной составляющей Δ погрешности измерений наряду с возрастанием общего времени измерения является основным недостатком метода образцовых мер с временным разделением каналов, что с очевидностью следует из свойств выражения (4), содержащего разности. Основные причины, порождающие Δ , — погрешности квантования Δ_N в процессе преобразований (3) и погрешности вычислений по (4), определяемые разрядностью микроЭВМ. Для уменьшения относительной погрешности числителя в (4) значения M_m и M_M выбраны из условий:

$$M_m = M(T_m); \quad M_M = M(T_m) + P, \quad (6)$$

где учтено обстоятельство улучшения отношения сигнал/помеха с увеличением M . В этом случае наиболее неблагоприятные условия измерений возникают при $T = T_m$, когда числитель (4) минимален, и, согласно (5), (6),

$$n(T_m) = P/(M_M - M_m).$$

Поэтому величина P выбрана максимально допустимой с учетом оптимального использования линейного диапазона интегратора $D4$. С той же целью величина f выбрана достаточно большой (около 1 МГц). Разработанная микроЭВМ позволяет выполнять вычисления с шестью десятичными разрядами. Принятые меры позволяют удержать максимальное значение Δ на уровне той же составляющей погрешности толщиномеров ТЭМИ (единица младшего разряда отсчета).

Величину Δ можно уменьшить, выполняя многократные измерения в заданной точке контроля, что предусмотрено программой *Усреднение*. Оператор с клавиатуры может задать количество Q повторных измерений, что приводит к уменьшению Δ в \sqrt{Q} раз.

С помощью микроЭВМ выполняется и линеаризация сквозной градуировочной характеристики толщиномера методом кусочной аппроксимации степенной функцией $y = ax^b$, что в сравнении с [1, 2] уменьшает необходимое количество узлов и погрешность от нелинейности. При настройке толщиномера по стандартным образцам толщины ординаты узлов аппроксимации определяются в режиме усреднения ($Q = 25-100$) в нормальных условиях.

Толщиномер настраивали и испытывали с помощью приспособления, обеспечивавшего задание величины T с погрешностью 0,01 мм при максимальных погрешностях несоосности: угловой $0,2^\circ$, линейной 0,2 мм. На дисплей и при желании на печать выводили значения $N(T)$, N_m , N_M , $n(T)$, T_x — результат измерения T , абсолютные и относительные приращения этих значений, другую информацию в реальном масштабе времени.

Особое внимание было уделено исследованиям изменения указанных параметров во времени при варьировании температуры Θ . В качестве примера на рис. 3 показаны некоторые зависимости, полученные при следующих условиях: подключенная на жгуте в схему плата аналого-цифрового преобразователя была вынесена из термокамеры после перегрева на $\Delta\Theta = 20^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{и}} = 40$ мс, $T = 69,75$ мм, $Q = 1$. Таким образом имитировалось ступенчатое воздействие $\Theta(t)$ на все элементы аналого-

вой части толщиномера, характеризуемые малой тепловой инерционностью. Как видно из рис. 3а, постоянная времени теплового переходного процесса $\tau_{\theta} \approx 2,2$ мин. Это значение является оценкой снизу, ибо при эксплуатации плата находится в закрытой аппаратной стойке и τ_{θ} в этом случае существенно больше 2 мин. В реальных условиях отсутствуют ступенчатые изменения $\Theta(t)$, поэтому скорость изменения исследованных параметров существенно меньше полученной. Описанный эксперимент позволил выделить влияние $\Theta(t)$ на фоне других мешающих параметров и факторов.

Непосредственно из рис. 3 следует, что температурные коэффициенты оказались равными: $TKN(T) \approx 7,5 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ (такого же порядка и значения TKN_m и TKN_M) (см. рис. 3а), $TKT_1 \approx -1 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, где T_1 — показания толщиномера в случае одноциклового режима работы [1] (рис. 3б), $TKT_x \approx -3,5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (рис. 3в). Таким образом, влияние изменений Θ в сравнении с толщиномером ТЭМИ уменьшилось в 28 раз. Полученное значение TKT_x оказалось одного порядка с коэффициентами теплового линейного расширения материалов, использованных в конструкциях источника и преобразователя поля, что, возможно, вносит существенный вклад в наблюдаемые медленные изменения усредненных показаний толщиномера на 0,02—0,04% при изменениях температуры в рабочих условиях. Коэффициенты влияния $K_i = (\Delta T_x / T_x) / (\Delta r_i / r_i)$ основных элементов и режимов r_i аналоговой части толщиномера оказались в интервале значений $(0,5-3) \cdot 10^{-2}$, что позволило исключить операции ручной калибровки и затраты времени на самопрогрев толщиномера.

Базовое программное обеспечение (БЕЙСИК-транслятор объемом 6,5 Кбайт) позволяет наращивать функциональные возможности АСНК и легко изменять алгоритмы работы толщиномера и других периферийных устройств. Например, для увеличения производительности в i -й точке контроля можно определять лишь $N(T_i)$, тогда как определять N_m , N_M и вычислять $n(T_i)$ и T_{xi} можно за время движения τ_d источника и преобразователя поля к следующей $(i+1)$ -й точке. Как правило, $\tau_d \gg \tau_{\theta}$, что позволяет в процессе движения определять N_m и N_M в режиме усреднения.

Если $\tau_d \approx \tau_{\theta}$, то имеется другая возможность увеличения производительности контроля, реализуемая с помощью программы *Обновление*. Как показали исследования (в частности, анализ значений τ_{θ} в реальных условиях), неизменные значения N_m и N_M могут использоваться для вычислений $n(T)$ во временных интервалах от секунд (сразу после включения аппаратуры) до минут. Поэтому преобразования (3б и 3в) могут выполняться не во всех точках контроля, но только в каждой k -й ($k=10-100$).

Программно могут быть исключены и явные выбросы ΔT_{xi} в ряду последовательно получаемых значений T_{xi} . Допуск ΔT_x задается с кла-

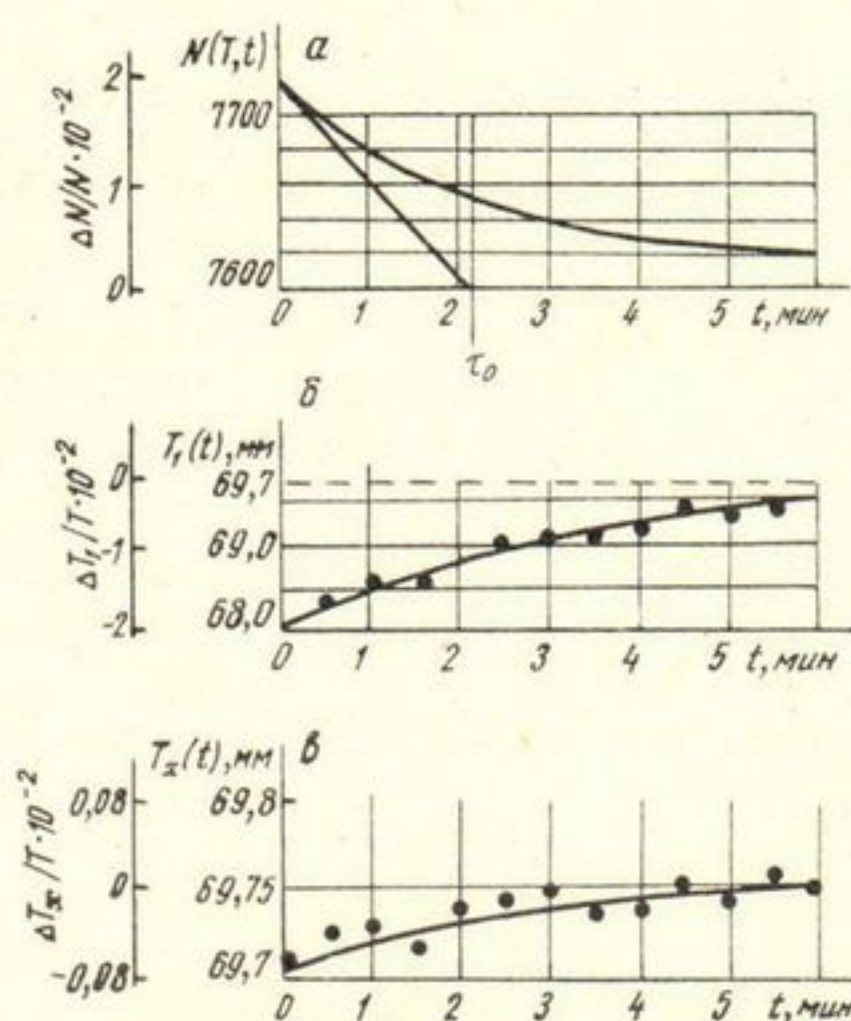


Рис. 3. Зависимости $N(T, t)$, $T_1(t)$ и $T_x(t)$ при ступенчатом изменении температуры.

виатуры, как и режим возврата в точку контроля, характеризуемую значением $\Delta T_{xi} \geq \Delta T_x$ и повторного измерения T в этой точке.

**Техническая характеристика толщиномера в составе АСНК
в режиме без усреднения**

Диапазон измеряемых толщин, мм	0—100
Основная погрешность измерений, мм	не более 0,1
Дискретность регистрации, мм	0,01
Время измерения в точке контроля, с	не более 0,1
Допустимая толщина неферромагнитного электропроводящего включения в виде пластины, мм	не более 6
Время самопрогрева, мин	не более 1

Программу работы толщиномера в составе АСНК многократно изменяли с целью ее оптимизации. В принятом варианте ее объем, обслуживающий толщиномер, занимает в ОЗУ не более 0,7 Кбайт.

Львовский лесотехнический институт

Поступила в редакцию
5 июня 1986 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандорф В. Г. Интегрирующий электромагнитный толщиномер. — Дефектоскопия, 1981, № 12, с. 67—77.
2. Брандорф В. Г., Сясько В. А. Разработка и исследование автоматической сканирующей системы ориентации. — Дефектоскопия, 1984, № 8, с. 66—72.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. — М.: Мир, 1983, с. 462—464.
4. Бромберг Э. М., Куликовский К. Л. Тестовые методы повышения точности измерений. — М.: Энергия, 1978, с. 20—22.