

УДК 620.18:537.531

Рентгеновская толщинометрия в прокатном производстве цветных металлов

В.В. Ключев^{1,2}, Б.В. Артемьев¹, И.Б. Артемьев², З.В. Ключев²¹ Ассоциация «СПЕКТР-ГРУПП», 119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1² ЗАО НИИИИ МНПО «СПЕКТР», 119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1

X-ray Thickness Gauging in Non-Ferrous Metal Rolling

V.V. Klyuev^{1,2}, B.V. Artemiev¹, I.B. Artemiev², Z.V. Klyuyev²¹ Association «Spektr-Group», 119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1² Closed joint-stock company «Research Institute of Introscopy of MSIA «Spectrum» (JSC «Spectrum-RII»), 119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1

e-mail: boris@artemiev.su, i@artemiev.su



Рентгеновская толщинометрия — метод измерения, позволяющий определять толщину металлического проката с высокой точностью при изменении температуры металла от нуля до температуры, близкой к точке плавления и высоких скоростях перемещения изделия. Погрешность измерения не зависит от изменения температуры. Однако изменение химического состава проката вносит существенную погрешность в результаты измерения, так как передаточная функция измерительного тракта толщиномеров нелинейно зависит от энергии зондирующего излучения, толщины и химического состава изделия. Новые цифровые рентгеновские толщиномеры серии РИТ10 свободны от этого недостатка, что позволяет измерять с их помощью толщину проката на прокатных станах в процессе производства для широкой номенклатуры цветных металлов и сплавов на их основе.

Ключевые слова: рентгеновский контроль, толщинометрия, рентгеновская толщинометрия.



X-ray thickness measurement is a method of determining the thickness of rolled metals with high accuracy when the metal temperature changes from zero to a temperature close to the melting point, and the product moves at high speed. The measurement accuracy does not depend on the temperature change. However, changing the chemical composition of the metal products leads to significant errors in the measurement results as the transfer function of the thickness gauge measuring path depends nonlinearly on the energy of the probing radiation, thickness, and chemical composition of the product. The new digital X-ray thickness gauges series RIT10 do not have this shortcoming, and allow you to measure thickness of rolled metals in rolling mills during the production process for a wide range of non-ferrous metals and their alloys.

Keywords: X-ray inspection, thickness measurement, X-ray thickness measurement.

Методы толщинометрии в машиностроении используются повсеместно. Прямые механические измерения — самый простой в использовании и распространенный метод, но порой существуют ограничения, не позволяющие его применять: высокая температура или скорость перемещения объекта, односторонний доступ к

объекту контроля, сложная форма поверхности и внутренней структуры [1]. Для преодоления этих проблем возможно использование иных, косвенных методов измерения: акустического, магнитного, вихретокового, радиоволнового или радиометрического, разновидности которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Методы измерения толщины

Метод	Разновидность
Акустический	Эхо
	Резонансный
Магнитный	Магнитостатические
	Индукционный
Вихретоковый	Частотный
	Амплитудный
	Фазовый
	Комбинированный
Радиоволновый	Амплитудный
	Поляризационный
	Частотно-фазовый
	Амплитудно-фазовый
	Геометрический
Радиометрический	Абсолютный
	Компенсационный

Акустические методы позволяют измерять толщины металлов и пластиков в диапазонах: 0,15...2 мм — резонансный метод, 0,5...60 мм — эхо-метод. Основными мешающими факторами являются изменение температуры окружающей среды и шероховатость поверхности изделия. При изменении температуры на 55 °С скорость звука в стали уменьшается на 1 %, что вносит в результаты измерения дополнительную погрешность. На сегодняшний день максимальная частота акустических преобразователей выросла до 2 ГГц, что позволяет акустической микроскопии достигать микронных разрешений.

Магнитный метод измерения предназначен для измерения толщины немагнитных покрытий в диапазоне 0...120 мкм и никелевых — 0...100 мкм на деталях различных форм и размеров, в том числе и на деталях сложной конфигурации. Подавляющая часть толщиномеров с электромагнитами предназначена для лабораторных измерений толщин в диапазоне 0...200 мкм. По сравнению с приборами, снабженными постоянными магнитами, они обеспечивают несколько большую точность измерений и возможность контроля покрытий на деталях с меньшими размерами и большей кривизной поверхности, однако уступают по диапазону измеряемых толщин, простоте конструкции и удобству эксплуатации.

Широкое распространение получили индукционные толщиномеры. Это приборы, у которых практически все недостатки толщиномеров

пондеромоторного действия отсутствуют. Принцип их действия основан на измерении изменений магнитного сопротивления цепи, состоящей из ферромагнитной основы изделия, измерительного преобразователя и немагнитного зазора между ними, соответствующего толщине покрытия.

Для измерения толщины стенки ферромагнитных труб в поточном производстве созданы магнитные микрометры. Измерения производят методом магнитного моста, два плеча которого составляют стандартная и контролируемая трубы, два других — сердечник электромагнита. В перемышке моста в качестве измерительного элемента применен феррозонд. Прибор предназначен для измерения труб диаметром 30...102 мм с толщиной стенок 1,5...8 мм. Погрешность измерений составляет 3...4 % при скорости контроля до 2,5 м/с.

Вихретоковые методы — частотный, амплитудный, фазовый — позволяют измерять толщину диэлектрических покрытий на проводящем покрытии с микронной точностью до толщин, несколько меньших величины половины скин-слоя, размер которого зависит от частоты излучения. Вихретоковые толщиномеры применяют для контроля толщины электропроводящих листов, пленок, пластин, покрытий на них, стенок труб, цилиндрических и сферических баллонов. Для большинства толщиномеров изоляционного покрытия на проводящем основании диапазон измеряемых толщин составляет 5 мкм...2 мм, в специальных приборах — до 50 и даже до 400 мм, а для толщиномеров электропроводящего слоя — 0,005...2 мм и для толщиномеров проводящих покрытий на проводящем основании — 0,005 мкм...0,3 мм. Погрешность измерения составляет около 1...3 %.

Толщины скин-слоя для различных частот, используемых при вихретоковом контроле, приведены ниже:

Частота, МГц.....	0,1	1	10
Толщина скин-слоя, мкм.....	210	66	21

Относительная погрешность измерений толщины для достаточно однородных диэлектриков составляет 1...3 %. Переходя к абсолютным величинам, это составит 50...100 мкм на длине волны 3 см и 20...30 мкм в восьмимиллиметровом диапазоне для контроля теплозащитных покрытий толщиной 2...16 мм на металлических корпусах. Для контроля толщины стеклянных полотен при производстве технического стекла с погрешностью $\pm 0,1$ мм использу-

ются частоты в районе 9,3 ГГц. Разновидностью амплитудно-фазового метода является СВЧ-импедансный метод контроля толщины и удельного сопротивления полупроводниковых, эпитаксиальных и диффузионных слоев. Например, полупроводниковых пластин толщиной 300...2 000 мкм и диаметром 30...40 мм, германиевых пластин с эпитаксиальными слоями 0...300 мкм, кремниевых пластин с диффузионными слоями 25...50 мкм и др. Амплитудно-фазовый метод пригоден для активного контроля толщины диэлектрических изделий и покрытий. Применение рупорно-линзовых антенн позволяет получить высокие значения КСВ = 120 и обеспечить точность до 1 % в диапазоне длин волн 3,2...10 см при поперечных перемещениях листа до $\lambda_0/6$.

В последнее время проходной микроволновый метод стали применять для контроля толщины тонких металлических покрытий, используя значительную крутизну затухания СВЧ-радиоволн в металле. Практически амплитудно-фазовый метод становится чисто амплитудным. Толщину сверхтонких металлических слоев и покрытий до 500 нм можно контролировать проходным микроволновым излучением с высокими точностью и чувствительностью. Например, для измерения толщины покрытий из серебра на зеркальных стеклах, покрытий из алюминия на конденсаторной ленте и компакт-дисках. Диапазон измеряемых толщин современных приборов составляет 5...250 нм с погрешностью ± 3 %. Для расширения диапазона измеряемых толщин необходимо увеличивать рабочую длину волны, но точность при этом будет снижаться.

Принципиальное отличие рентгеновского метода от всех прочих методов измерения толщины, в том числе от контактных методов измерения, состоит в измерении не реальных размеров, изменяющихся при переменах температуры или давления, а количества атомных слоев, сквозь которые проходит пучок зондирующего излучения [2] (обычно направляемый по нормали к плоскости контролируемого объекта) (рис. 1).

Существуют два подхода измерения толщины [3]: измерение ослабления прошедшего сквозь объект излучения (рис. 1, а) и измерение интенсивности отраженного от объекта излучения (рис. 1, б). Первый требует двустороннего доступа к объекту контроля и применяется для измерения толщин металла 20...100 000 мкм, а второй работает при одностороннем доступе к объекту и применяется для измерения толщин тонких (до 25 мкм) пленок.

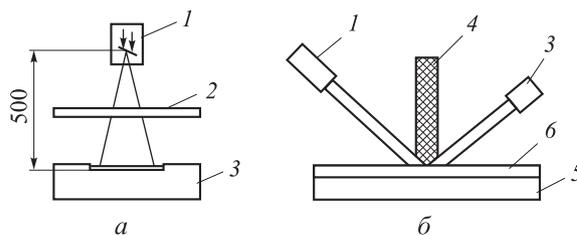


Рис. 1. Схемы измерения толщины:
а — двусторонний доступ к объекту; б — односторонний доступ к объекту; 1 — источник излучения;
2 — контролируемая толщина; 3 — детектор;
4 — свинцовый экран; 5 — подложка; 6 — напыленная пленка

Развитие металлургической отрасли потребовало создания и внедрения автоматизированных контрольно-измерительных комплексов, обеспечивающих в процессе работы прокатных станков и агрегатов резки и сортировки металла непрерывный контроль толщины изделий, преимущественно трубных и листовых. В конце прошлого века были разработаны и поставлены на серийное производство аналоговые бесконтактные рентгеновские толщиномеры (РТ) холодного (РТХ) и горячего (РТГ) проката, основанные по компенсационной схеме измерения. Такие толщиномеры могли работать только с черным металлом (нелегированные стали). Для линеаризации передаточной функции в приборах использовались аналоговые логарифматоры и нелинейные участки вольт-амперных характеристик фотоэлектронных умножителей. Суммарная погрешность измерения толщины в этих приборах составляла 2–3 % от измеряемого номинала. Они требовали калибровки перед каждым измерением. В 1987 г. начались работы по созданию первого в СССР цифрового рентгеновского толщиномера на выпускаемых в СССР процессорах 1810 серии, буквально за год до этого запущенных в серийное производство электронной промышленностью. Первый в СССР цифровой прибор был внедрен на Магнитогорском металлургическом комбинате в 1988 г. [4].

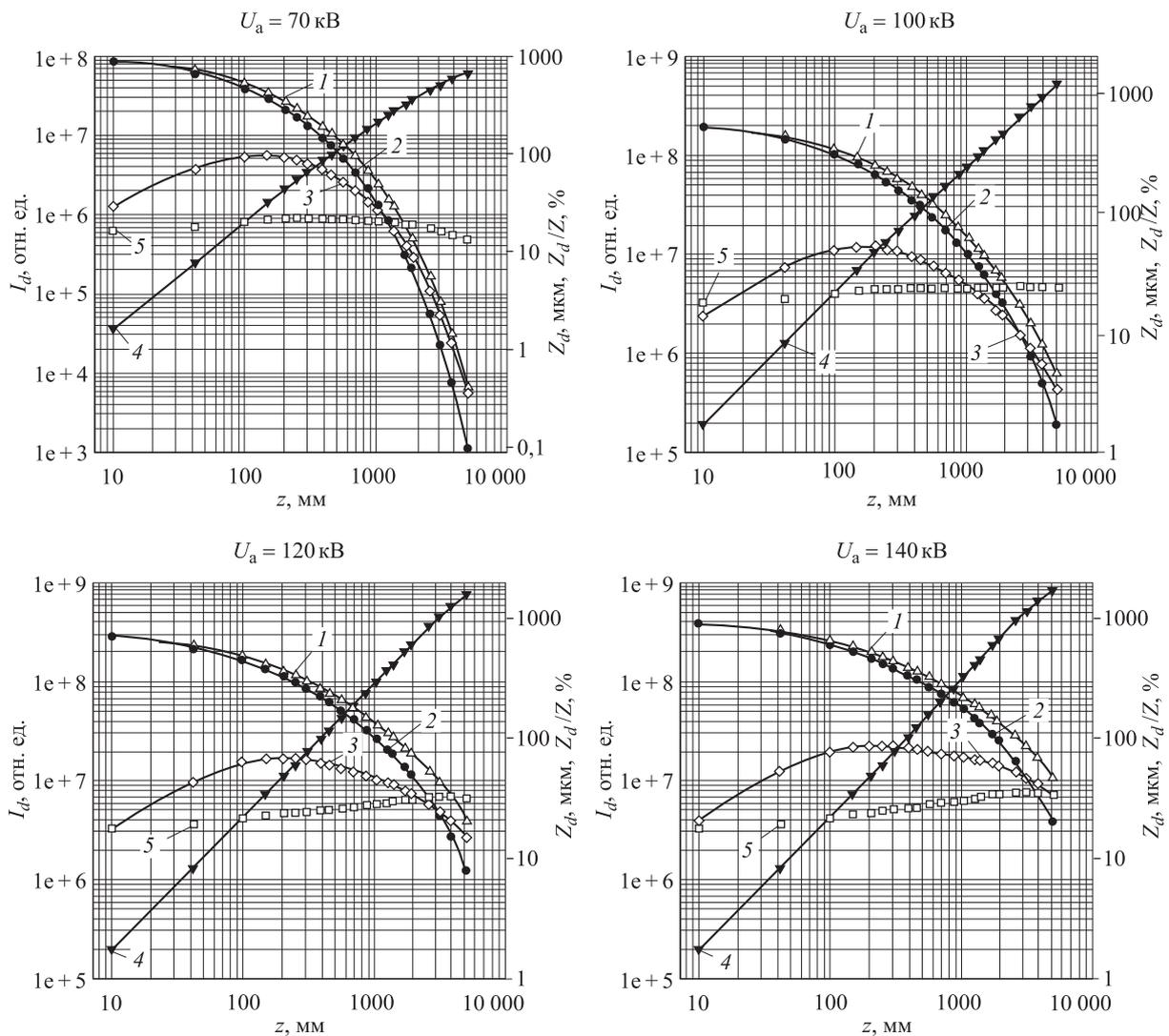
За последние годы был создан и внедрен на Кировском заводе по обработке цветных металлов ряд цифровых рентгеновских толщиномеров типа РИТ10, построенных на базе новых патентованных высокостабильных источников и приемников рентгеновского излучения [5–9], вычислительных устройств и современных электронных компонентов. Данный подход обеспечил автоматизацию и высокую достоверность контроля, чувствительность и быстродействие рентгеновских толщиномеров, их эксплуатационную надеж-

ность и минимальные погрешности измерения для широкой номенклатуры черных и цветных металлов и сплавов.

При создании рентгеновских толщиномеров возникает несколько проблем: линеаризация передаточной функции, стабилизация потока зондирующего излучения как по спектру, так и по интенсивности, работа с различными сплавами. Вместе с тем важно сузить спектральное распределение энергии потока, в идеале это монолиния изотопного источника, так как при прохождении излучения через контролируемый объект за счет фильтрации изменяется его спектральное распределение, что приводит к необходимости изменять корреляционные коэффициенты поправок на хи-

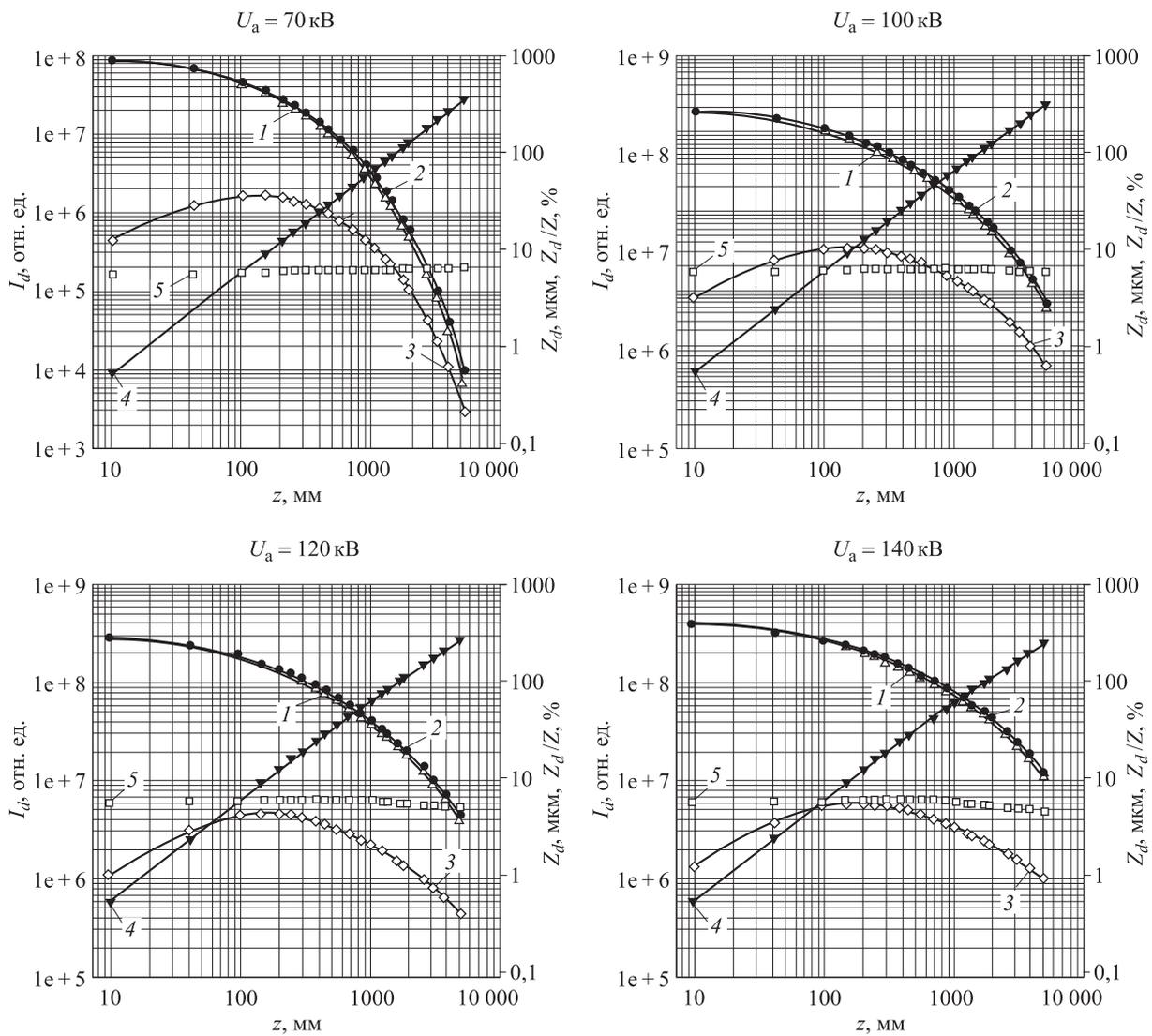
мический состав материала. Зависимость поправочного коэффициента Z_d/Z % на химический состав контролируемого материала для различных напряжений на аноде рентгеновской трубки (70, 100, 120, 140) и материалов (сплав НМЦ, бронза) по сравнению с медью (сплав М1) показана на рис. 2. На графиках хорошо видно, что они зависят от анодного напряжения, толщины и химического состава контролируемого материала. Очевидно, что линеаризация передаточной функции с приемлемой погрешностью $< 0,2$ % возможна только с использованием цифровой обработки измерительных данных.

Погрешность измерения рентгеновского толщиномера, как радиометрического прибора,



a

Рис. 2 (начало). Зависимости величины поправок на химический состав контролируемого материала от толщины измеряемого материала для анодных напряжений 70 кВ, 100 кВ, 120 кВ, 140 кВ:
a — бронза; 1 — I_d -медь (сплав М1); 2 — I_d -бронза; 3 — ΔI_d ; 4 — толщина дополнительного слоя бронзы; 5 — Z_d/Z , %



б

Рис. 2 (окончание). Зависимости величины поправок на химический состав контролируемого материала от толщины измеряемого материала для анодных напряжений 70 кВ, 100 кВ, 120 кВ, 140 кВ: б — сплав НМЦ; 1 — I_d -медь (сплав М₁); 2 — I_d -НМЦ; 3 — ΔI_d ; 4 — толщина дополнительного слоя НМЦ; 5 — Z_d/Z , %

во многом определяется величиной отношения сигнал—шум. Необходимое быстродействие зависит от требуемой скорости изменения продольной и поперечной разнотолщинности изделий. Разнотолщинность образуется на различных технологических участках прокатного стана, в том числе из-за нарушения планшетности, увеличения скорости движения прокатного изделия сверх допустимой, износа оборудования клетки стана, несимметричности усилий нажимных агрегатов и других факторов. Поэтому при создании новых РТ предъявляются высокие требования по чувствительности и быстродействию, выполнение которых позволит обеспечить 100%-ный контроль проката

при максимальной производительности производственного оборудования.

На основе научных и экспериментальных исследований разработаны и внедрены на предприятиях металлургической и трубопрокатной отраслей промышленности рентгеновские толщинометры (РТ): РИТ-10.1, РИТ-10.2, РИТ-10.3, РИТ-10.4, РИТ-10.5, РИТ-10.6, характеристики которых приведены в табл. 2. Они позволяют контролировать толщину стального и цветного листового и трубного проката с переменной толщиной стенки и изменяющейся геометрией с погрешностью измерения не более 0,2 % от измеряемого значения с номенклатурой толщин 0,002...25 мм, на многоклетевых

Таблица 2

Основные параметры рентгеновских толщиномеров

Характеристика	Толщиномеры холодного проката			
	РИТ-10.6	РИТ-10.5	РИТ-10.4	РИТ-10.2
Контролируемый материал	Медь			
Диапазон, по меди, мм	1–18	0,1–3,5	0,2–4,5	0,02–1,0
Систематическая составляющая погрешности, %	±0,2	±0,05	±0,2	±0,1
Среднеквадратическое отклонение случайной сост. погрешности, %	0,1	0,1	0,1	0,1
Быстродействие, с	0,1	0,1	0,1	0,1
Нелинейность выходного сигнала (отклонение от номинала), %	±0,025	±0,025	±0,025	±0,025

и реверсивных станах горячего и холодного проката различного типа. При контроле толщины алюминиевого проката верхнее значение диапазона толщин проката увеличивается, а при контроле продукции из меди и сплавов на ее основе и золота — уменьшается примерно на 10...20 %.

Характерная особенность РТ последнего поколения — наличие двусторонней связи по входу и выходу с автоматизированной системой управления технологическим процессом стана. Это сделано в целях сведения к минимуму систематической составляющей погрешности, повышения надежности, а также стабильности и достоверности информации об измеряемой толщине и скорости движения контролируемого объекта.

Перечисленные выше РТ серии РИТ-10 работают по прямому методу измерения. Ко всем РТ предъявляются высокие требования, как по точности измерения толщины, так и по линейности выходного сигнала отклонения толщины контролируемого проката от номинальной толщины. Считается обязательным наличие устройств или методов компенсации изменения химического состава сплава и дефектности контролируемого изделия.

На рис. 3 показана обобщенная структурная схема рентгеновского толщиномера, на рис. 4 представлена схема устройства подачи калибровочных образцов, а на рис. 5 представлен алгоритм работы.

РТ (см. рис. 3) состоит из следующих узлов и блоков: источник рентгеновского излучения с блоком питания, управляемым от компьютера через общий приборный интерфейс RS485, гальванически изолирующий модуль обработки и визуализации от преобразователей, установленных непосредственно на стане. ЭВМ, используя канал ввода-вывода, задает значение анодного напряжения (ЦАП1) и тока (ЦАП2) рентгеновской трубки источника излучения и

управляет заслонкой биозащиты. В выключенном состоянии заслонка всегда закрыта, что предотвращает облучение персонала в момент включения прибора и в процессе эксплуатации. Сгенерированное рентгеновской трубкой излучение формируется коллиматором, установленным непосредственно на аноде трубки, после чего проходит сквозь двухсекционную рентгенопрозрачную реперную камеру 1. Устройство подачи образцов служит для проведения калибровки РТ по встроенному набору стандартных образцов при включении (см. рис. 4). Для привязки текущего положения образцов к началу отсчета служит датчик начального положения. Пучок рентгеновского излучения, пройдя сквозь контролируемый объект, попадает на камеру 2. Выходные сигналы (токи) камер считываются и преобразуются в цифровой код интегрирующими 20-разрядными АЦП1 и АЦП2 с временем преобразования 1...100 мс и возможностью масштабирования входного сигнала. Для согласования величины измеренных сигналов с чувствительностью преобразователя АЦП масштабируется по командам ЭВМ, что позволяет полнее использовать динамический диапазон ионизационных камер. Все ионизационные камеры питаются от единого стабилизированного источника питания и работают в режиме насыщения, что позволяет получить линейную зависимость выходного тока от интенсивности потока излучения. После оцифровки значений входного тока управляющая программа рассчитывает значение текущей толщины контролируемого объекта, используя для этого калибровочные данные в реперных точках, характеристику изменения величины поправки на химический состав материала (см. рис. 2), начальное значение поправки на химический состав материала и аппроксимирующую функцию. Измеренное значение толщины сравнивается с номиналом и вычисляется отклонение толщины от номинала. В графическом и цифровом виде информация

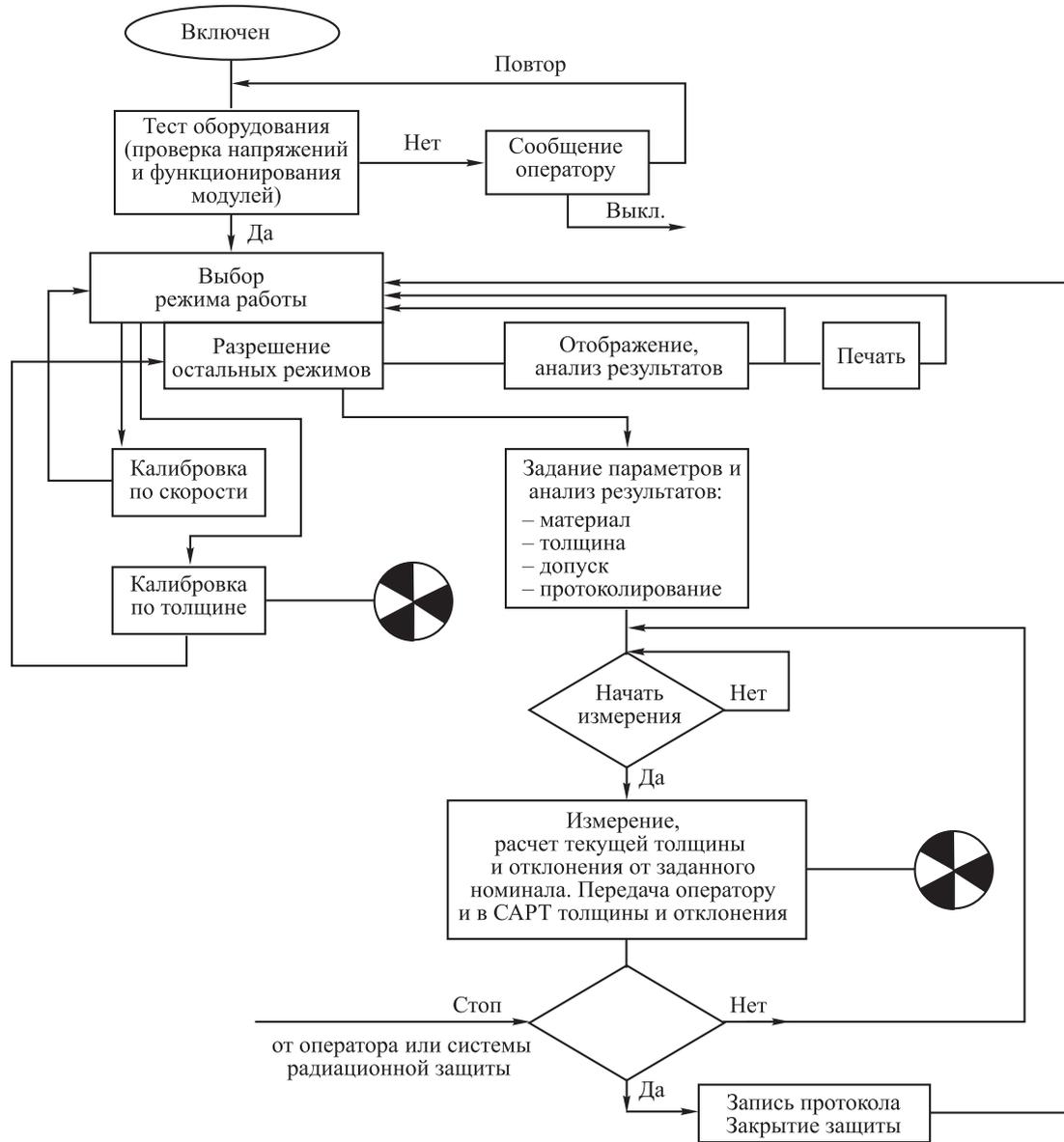


Рис. 5. Алгоритм работы толщиномера

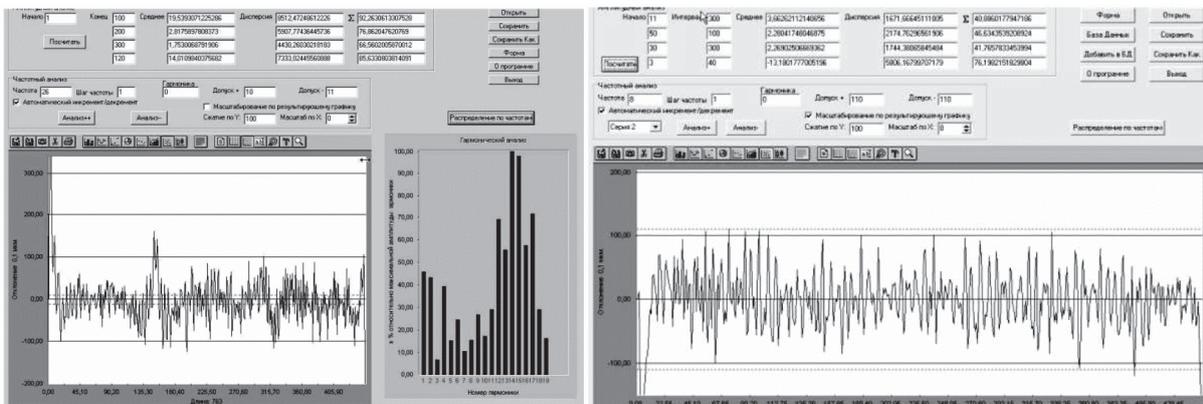


Рис. 6. Примеры входной и выходной разнотолщинности проката вдоль рулона

заслонкой, что необходимо для уменьшения времени выхода измерителя на режим измерения. При установке РТ на прокатные станы, оборудованные цифровой системой автоматического регулирования толщины, на нее подаются сигналы толщины проката, поправка на химический состав и марка металла. В РТ предусмотрено три режима работы: калибровка; измерение; анализ результатов и выдача отчетов.

Режим «калибровка» служит для получения необходимых метрологических характеристик прибора во всем диапазоне измеряемых толщин. Калибровка проводится перед началом работы и должна повторяться каждые 8 ч, что необходимо для обеспечения заданной погрешности измерений (рис. 7).

Калибровка РТ по толщине происходит следующим образом. По команде «калибровка по толщине» управляющая программа проверяет наличие связи всех узлов и центрального процессора, после чего начинает проводить измерения потока рентгеновского излучения, попадающего на детектор. В зависимости от конкретной модели РТ число замеров (количество эталонных толщин) различно: от 8 у РИТ-10.2 до 362 у РИТ-10.6. По каждому образцу проводится 16 измерений и вычисление среднего значения потока, дисперсии и среднеквадратичного отклонения для снижения погрешности измерения и влияния на процесс калибровки случайных флуктуаций сигнала. Полученные данные запоминаются и отображаются на

экране для последующего анализа. Данная информация необходима для вычисления толщины контролируемого объекта. Пример окна «результаты калибровки» для толщиномера РИТ-10.5 представлен на рис. 7.

В первом столбце отображены значения толщины эталонных образцов в масштабе 0,1 мкм, во втором столбце приведены значения измеренного сигнала, в третьем столбце отображен вес единицы младшего разряда кода в точке измерения, выраженный в толщине приращения объекта (максимальная дефектоскопическая чувствительность системы в точке), в четвертом столбце дано значение среднеквадратичного отклонения сигнала за время калибровки по каждой эталонной толщине. Из анализа данных хорошо видно, как с увеличением толщины контролируемого объекта уменьшается предел дефектоскопической чувствительности. В зависимости от требуемого диапазона рабочих толщин контролируемого изделия задается оптимальное значение напряжения и тока источника излучения.

После завершения калибровки толщиномер переходит в режим «измерение». Оператор задает номинальное значение толщины проката и поправку на химический состав, открывает радиационную защиту. В рабочий поток измерителя вводится контролируемая полоса. Сигнал на выходе усилителя обратно пропорционален толщине. Получив сигналы с детекторов и преобразовав их в цифровой код, программа вычисляет значение толщины контролируемого

Результаты калибровки			
Толщина образца	Измеренное значение	Отсчет/МКМ	Среднеквад. отклонение
1	32767	3,05185094759972E-6	0
2050	32228,5	0,00636082970042044	3,66450142860413
2510	30306,25	0,00828212002474737	5,03558778762817
3070	28211,25	0,0108821835260756	4,3996753692627
3410	23682,125	0,0143990456937458	2,94897079467773
3930	21260,625	0,0184848752094541	3,73927044868469
4570	17874,875	0,0255666123539325	5,46253490447998
5635	13898,125	0,0405450375500292	4,22365808486938
7050	11458,5	0,0615263777981411	1,92724823951721
8775	9515,125	0,0922215945665454	2,74837613105774
10475	7329,625	0,142913177686444	2,66926956176758
12670	6258,75	0,202436588775714	1,90862703323364
13905	4713,75	0,294988066825776	1,03509831428528
17225	3533,75	0,487442518570923	1,66904592514038
19165	2950,875	0,649468378023468	0,83452296257019
26280	1620,75	1,62147154095326	1,03509831428528
31490	937,25	3,35982928781008	1,03509831428528
38325	491,5	7,79755849440488	1,30930733680725
50190	258	19,453488372093	0,925820112228394
999990	7,625	13114,6229508197	1,1877349615097

Рис. 7. Окно «Результаты калибровки»

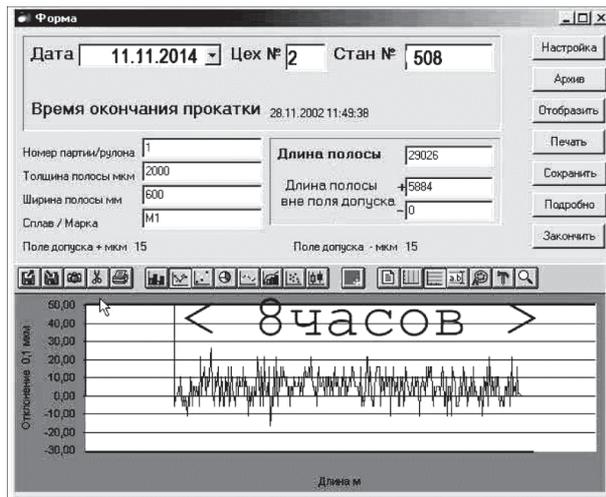


Рис. 8. Паспорт рулона

материала, отклонение от номинала и выдает сигнал в САРТ. Измерения записываются в память компьютера. По окончании измерений массив данных закрывается и записывается в виде бинарного файла на диск для хранения, дальнейшего анализа и формирования паспорта рулона. В процессе измерения на стрелочный индикатор, установленный на пульте управления станом, выдается сигнал отклонения толщины от номинала. Масштаб представления задается оператором в зависимости от толщины проката. Шкала прибора может изменяться от ± 10 мкм до ± 100 мкм. Если конкретный стан оборудован САРТ, то при каждой смене номинала по цифровому интерфейсу стандарта RS485 (Ethernet_10BaseT, Ethernet_100BaseT, Wi-Fi и др. в зависимости от требований заказчика) в САРТ передается новое значение номинала проката, тип сплава, величина поправки

на химический состав. По окончании проката каждого рулона формируется паспорт рулона (рис. 8).

В цикле измерения в САРТ передается отклонение толщины от номинала в виде аналогового сигнала для САРТ аналогового типа или в аналоговом и цифровом формате для САРТ цифрового типа. Причем крутизна нарастания сигнала регулируется независимо для каждого канала, что позволяет создать комфортные условия для восприятия информации оператору стана и одновременно с этим уменьшить временные задержки и увеличить крутизну нарастания сигнала, поступающего в САРТ.

В зависимости от способа продаж прокатной продукции меняется алгоритм обработки профиля полосы. На рис. 6 показаны профили первого и последнего прохода полосы в прокатном стане. Продажа металла (сортового проката) идет по погонным метрам, а не по весу. Это видно по тому, как толщина проката уходит в минусовую область, практически на границу допуска согласно ТУ. Использование подобного приема позволяет экономить металл и показывает технологический запас точности при изготовлении продукции. Экспериментальные исследования доказали, что степень влияния нестабильности напряжения и тока источника, зондирующего излучения на результаты измерения толщины проката цветных металлов с использованием рентгеновского толщиномера, при применении гетерогенных камер [10] в качестве детекторов, уменьшилась более чем в 10 раз и стала неразличима на фоне квантовых флуктуаций в детекторах.

Для повышения надежности работы и предотвращения выпуска бракованной про-

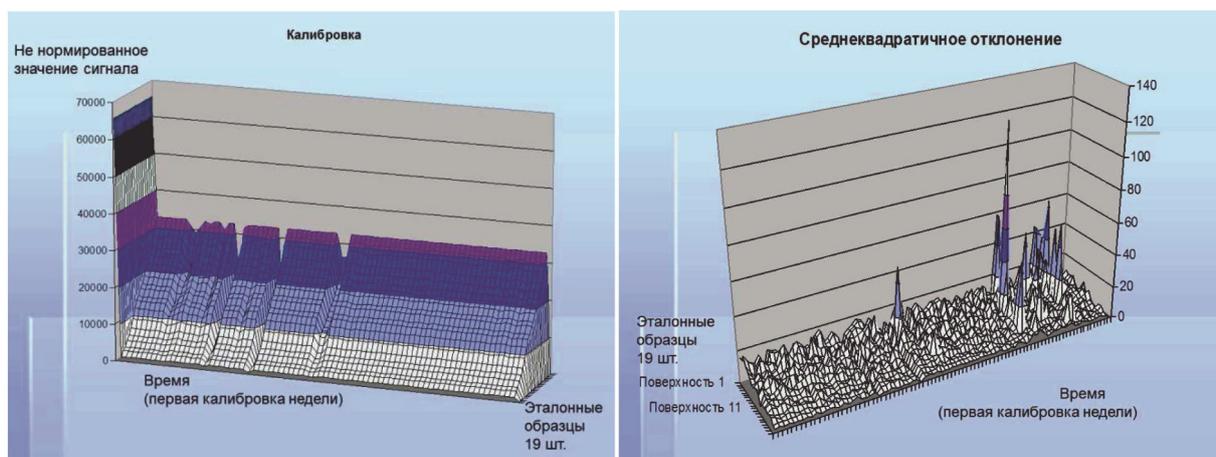


Рис. 9. Протокол калибровок толщиномера в течение года:

а — значение измеренного сигнала; б — среднеквадратичное отклонение сигнала

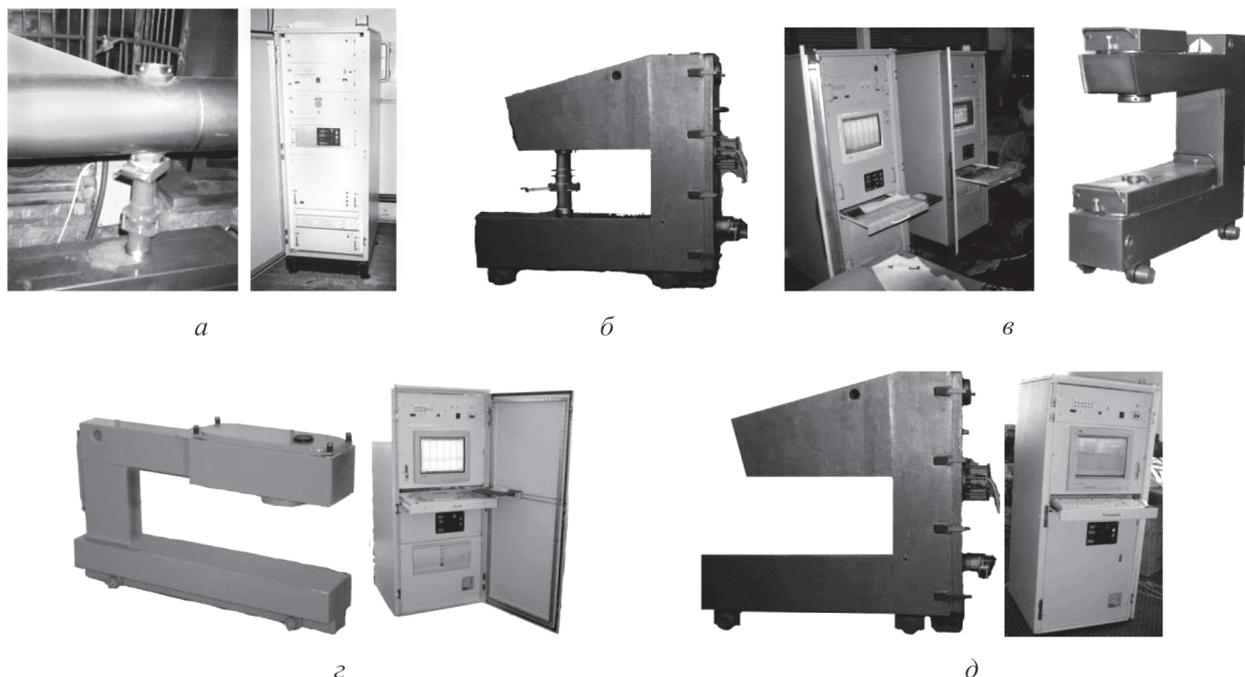


Рис. 10. Толщинометры серии РИТ-10:
 а — РИТ-1.1; б — РИТ-10.2; в — РИТ-10.4; г — РИТ-10.5; д — РИТ-10.6

дукции в РТ встроена система автоматической диагностики. При обнаружении неисправностей на экран выдается сообщение оператору и звуковой сигнал. При выявлении некритичных ошибок, например разового сбоя, система не останавливается, но при повторении ошибок система блокирует работу и выдает протокол ошибок на консоль оператора (рис. 9).

Внешний вид толщиномеров представлен на рис. 10.

Для обеспечения метрологических параметров измерителей толщины были разработаны, сертифицированы и созданы комплекты эталонных образцов. В комплект поставки каждого толщиномера входит набор контрольных образцов, позволяющий проводить поверку прибора.

Литература

- [1] *Magnetic Testing. X-ray Testing*. Ed. Kluyev V.V. Moscow, Publishing house Spektr, 2010, vol. 1, 1006 p.
- [2] Артемьев Б.В. *Рентгеновская толщинометрия металлов*. Москва, Машиностроение, 2002. 125 с.
- [3] Артемьев Б.В., Буклей А.А., Клюев В.В. *Радиационный контроль*. Москва, СПЕКТР, 2011. 192 с.
- [4] Артемьев Б.В. Рентгеновские толщинометры. *Контроль. Диагностика*, 2009, № 4, с. 22–25.
- [5] Артемьев Б.В., Егоров И.В., Запускалов В.Г., Маслов А.И., Ролик В.А. *Рентгеновский толщиномер*. Пат. 2172930 РФ, 2001, бюл. № 24.
- [6] Маслов А.И., Запускалов В.Г., Егоров И.В., Трояновский Я.И., Артемьев Б.В., Ролик В.А., Волчков Ю.Е. *Рентгеновский измеритель толщины*. Пат. 2179706 РФ, 2002, бюл. № 5.
- [7] Маслов А.И., Запускалов В.Г., Егоров И.В., Артемьев Б.В., Ролик В.А., Федоров В.А. *Рентгеновский толщиномер*. Пат. 2189008 РФ, 2002, бюл. № 25.
- [8] Маслов А.И., Запускалов В.Г., Артемьев Б.В., Гусев В.Е., Волчков Ю.Е., Босамыкин В.А., Бояринцев Д.С., Ведерников М.Б., Поталов В.Н. *Рентгеновский измеритель параметров проката*. Пат. 2221220 РФ, 2004, бюл. № 1.
- [9] Маслов А.И., Запускалов В.Г., Владимиров Л.В., Гусев В.Е., Артемьев Б.В., Волчков Ю.Е., Бояринцев Д.С., Ведерников М.Б. *Рентгеновский способ измерения толщины листовых изделий*. Пат. 2234677 РФ, 2004, бюл. № 23.
- [10] Артемьев Б.В., Маслов А.И. Возможности многоэлектродных гетерогенных ионизационных камер для рентгеновской толщинометрии. *Дефектоскопия*, 2006, № 5, с. 80–86.

References

- [1] *Magnetic Testing. X-ray Testing*. Ed. Kluyev V.V. Moscow, Publishing house Spektr, 2010, vol. 1, 1006 p.
- [2] Artem'ev B.V. *Rentgenovskaia tolshchinometriia metallov* [X-ray thickness measurement of metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 125 p.
- [3] Artem'ev B.V., Buklei A.A., Kliuev V.V. *Radiatsionnyi kontrol'* [Radiation monitoring]. Moscow, SPEKTR publ., 2011. 192 p.
- [4] Artem'ev B.V. *Rentgenovskie tolshchinomery* [X-ray Thickness Meter]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2009, no. 4, pp. 22–25.
- [5] Artem'ev B.V., Egorov I.V., Zapuskalov V.G., Maslov A.I., Rolik V.A. *Rentgenovskii tolshchinomer* [X-ray thickness gauge]. Patent RF, no. 2172930, 2001.
- [6] Maslov A.I., Zapuskalov V.G., Egorov I.V., Troianovskii Ia.I., Artem'ev B.V., Rolik V.A., Volchkov Iu.E. *Rentgenovskii izmeritel' tolshchiny* [X-ray thickness indicator]. Patent RF, no. 2179706, 2002.
- [7] Maslov A.I., Zapuskalov V.G., Egorov I.V., Artem'ev B.V., Rolik V.A., Fedorov V.A. *Rentgenovskii tolshchinomer* [X-ray thickness gauge]. Patent RF, no. 2189008, 2002.
- [8] Maslov A.I., Zapuskalov V.G., Artem'ev B.V., Gusev V.E., Volchkov Iu.E., Bosamykin V.A., Boiarintsev D.S., Vedernikov M.B., Potapov V.N. *Rentgenovskii izmeritel' parametrov prokata* [X-ray meter of parameters of rolled product]. Patent RF, no. 2221220, 2004.
- [9] Maslov A.I., Zapuskalov V.G., Vladimirov L.V., Gusev V.E., Artem'ev B.V., Volchkov Iu.E., Boiarintsev D.S., Vedernikov M.B. *Rentgenovskii sposob izmereniia tolshchiny listovykh izdelii* [Sheet articles thickness x-ray measurement method]. Patent RF, no. 2234677, 2004.
- [10] Artem'ev B.V., Maslov A.I. The capabilities of multielectrode heterogeneous ionization chambers for X-ray thickness measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 5, pp. 345–349.

Статья поступила в редакцию 21.05.2015

Информация об авторах

КЛЮЕВ Владимир Владимирович (Москва) — доктор технических наук, профессор, академик РАН. Президент ассоциации «СПЕКТР-ГРУПП». директор ЗАО НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1).

АРТЕМЬЕВ Борис Викторович (Москва) — доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ. Исполнительный директор ассоциации «СПЕКТР-ГРУПП» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1, e-mail: boris@artemiev.su).

АРТЕМЬЕВ Игорь Борисович (Москва) — инженер ЗАО НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1, e-mail: i@artemiev.su).

КЛЮЕВ Захар Владимирович (Москва) — кандидат технических наук ЗАО НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1).

Information about the authors

KLYUEV Vladimir Vladimirovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences. President of the Association «Spektr-Group». Director of the Closed joint-stock company «Research Institute of Introscopy of MSIA «Spectrum» (JSC «Spectrum-RII»), (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1).

ARTEMIEV Boris Viktorovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Academician of the «Academy of Electrotechnical sciences of the Russian Federation». Chief Executive Officer of the «Spektr-Group», (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1, e-mail: boris@artemiev.su).

ARTEMYEV Igor Borisovich (Moscow) — Engineer, Closed joint-stock company «Research Institute of Introscopy of MSIA «Spectrum» (JSC «Spectrum-RII»), (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1, e-mail: i@artemiev.su).

KLYUEV Zakhar Vladimirovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Closed joint-stock company «Research Institute of Introscopy of MSIA «Spectrum» (JSC «Spectrum-RII»), (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1).