

УДК 620.179.14

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СТенок ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ФАЗОВОГО МЕТОДА

В.А. Сясько, Д.Н. Чертов, А.Е. Ивкин

Рассмотрены принципы построения преобразователей для измерения толщины стенок изделий из углеродистых композиционных материалов, вопросы расчета и оптимизации их характеристик, а также подавления мешающих параметров. Приведены конструкция и основные метрологические характеристики разработанных преобразователей.

Ключевые слова: углеродистые композиционные материалы, толщина, вихретоковый метод, электропроводность, измерительный преобразователь.

Углеродные композиционные материалы (УКМ) широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в авиакосмическом комплексе. Изделия из них могут быть как малоразмерными, так и крупногабаритными, площадью до десятков квадратных метров, в том числе с шероховатой поверхностью. Диапазон толщин стенок несущих конструкций из УКМ в большинстве случаев составляет от 2 до 10 мм [1, 2]. Обеспечение заданной толщины стенки в процессе формования изделия является одной из гарантий требуемых прочностных характеристик изделий.

Чаще всего при контроле затруднен двусторонний доступ к стенке изделия, что серьезно ограничивает применение механических средств измерения толщины, а использование акустического эхометода измерения не обеспечивает достоверности измерений из-за многократных отражений звуковых волн в слоистой структуре, значительного разброса скорости ультразвука по объему и площади изделия, а также шероховатости поверхности. В связи с этим представляет интерес использование вихретокового вида неразрушающего контроля. При этом объект контроля следует рассматривать как многослойную электропроводящую неферромагнитную пластину толщиной T и электропроводностью σ_i каждого слоя. Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности σ_n объекта контроля в объеме распространения вихревых токов. Для большинства изделий из УКМ σ_n лежит в диапазоне $\sim 5\text{--}40$ кСм/м и может сильно варьироваться (до $\pm 10\text{--}15\%$) в одном изделии.

Вихретоковый фазовый метод измерения толщины электропроводящих материалов основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, зависящих от T , σ_n и геометрических характеристик материала (диаметра d , шероховатости R_z и других), а также величины зазора h между изделием и контактной поверхностью преобразователя.

Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1.

Владимир Александрович Сясько, доцент кафедры приборов контроля и систем экологической безопасности Северо-Западного государственного заочного технического университета, генеральный директор ЗАО "Константа". Тел. (812) 3722904, 9334343. E-mail: 9334343@rambler.ru, office@constanta.ru

Дмитрий Николаевич Чертов, аспирант кафедры приборов контроля и систем экологической безопасности Северо-Западного государственного заочного технического университета. Тел. (921) 7745121. E-mail: d.n.chertov@mail.ru

Антон Евгеньевич Ивкин, аспирант кафедры приборов контроля и систем экологической безопасности Северо-Западного государственного заочного технического университета. Тел. (812) 3722904. E-mail: soman_86@mail.ru

Обмотка W_B запитывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ частоты f . Усиленное разностное (вносимое) напряжение $\Delta u(t, T)$ поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для фазового детектора служит напряжение $u_k(t)$ с выхода компенсационной обмотки W_K . Постоянное напряжение $U_{\Delta\phi}$ на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз $\Delta\phi$ между напряжением $u_k(t)$ и разностным (вносимым) напряжением $\Delta u(t, T)$. Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

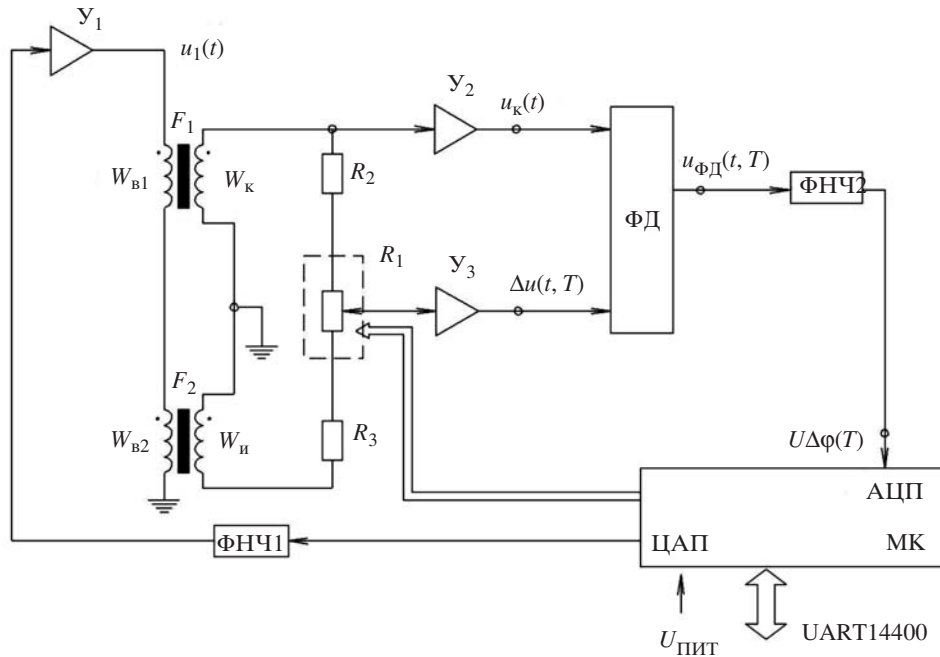


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя:
 Y_1 — Y_3 — усилители; ФД — фазовый детектор; ФНЧ1, ФНЧ2 — фильтры низкой частоты; W_{B1} , W_{B2} — обмотки возбуждения; W_K и W_I — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки; МК — микроконтроллер; R_1 — управляемый цифровой балансировочный потенциометр; F_1 , F_2 — ферритовые броневые сердечники.

Для анализа характеристик измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma_{\text{и}}\mu_0}, \quad (1)$$

где R — эквивалентный радиус обмотки возбуждения; f — частота тока возбуждения; $\sigma_{\text{и}}$ — интегральная электропроводность материала; μ_0 — магнитная постоянная.

При выборе соответствующего значения f вариация T будет приводить к изменению $\Delta\phi$. Однако девиация электропроводности материала изделия также будет приводить к изменению $\Delta\phi$ и вызывать дополнительную погрешность $\Delta T(\sigma)$, для подавления которой следует определять истинное значение $\sigma_{\text{и}}$ в точке изменения.

Для обеспечения приемлемой чувствительности при измерении T величину β_T следует выбирать на уровне порядка 0,5—2, а при измерении σ величину β_{σ} следует выбирать на уровне порядка 5—20 [3].

В общем случае глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную измеряемую толщину T_{max} и мини-

мальную допустимую толщину при измерении электропроводности T_{\min} , равна [4]

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \sigma_{\text{и}} \mu_0} \quad (2)$$

Проведенные исследования показали, что слои углеродных композиционных материалов могут отличаться по электропроводности, следовательно, глубина проникновения вихревых токов должна обеспечивать интегральную оценку их свойств при измерении $\sigma_{\text{и}}$. В соответствии с [3] допустимыми для рассматриваемой задачи являются $T_{\max} \approx 0,7\delta$, а $T_{\min} \approx 1,7\delta$.

Из указанных выше соотношений и (2) следует, что оптимальные значения частоты преобразователей для измерения толщины и электропроводности равны:

$$f_{T_{\text{опт}}} \approx 0,49/(\pi \mu_0 \sigma T_{\max}^2); \quad (3)$$

$$f_{\sigma_{\text{опт}}} \approx 2,89/(\pi \mu_0 \sigma T_{\min}^2) \quad (4)$$

соответственно.

Для обеспечения указанных выше значений β_T и β_{σ} эквивалентный радиус R обмотки W_1 для вихретоковых фазовых преобразователей необходимо выбирать из условия

$$R = \beta/\sqrt{2\pi f \sigma_{\text{и}} \mu_0}. \quad (5)$$

При анализе характеристик преобразователей следует учесть влияние мешающих параметров:

- величины и вариации $\sigma_{\text{и}}$ изделия;
- зазора h между преобразователем и изделием;
- диаметра d изделия в зоне измерения и его вариации;
- шероховатости R_z изделия.

Измерение электропроводности изделий из УКМ проводили на образцах продукции в соответствии с методикой, изложенной в [5]. Проведенные исследования изделий с отличающимися схемами армирования и различными соотношениями армирующего материала и связующего показали, что применительно к задачам измерения толщины стенки можно говорить о следующем диапазоне интегральной электропроводности $\sigma_{\text{и}} \approx 7\text{—}35$ кСм/м, при этом граничные значения $T \approx 2\text{—}10$ мм.

Для изделий с интегральной электропроводностью $\sigma_{\text{и}} = 35$ кСм/м оптимальные частоты для граничных значений T составят $f_{T_{\text{опт}}}(T = 10) \approx 35$ кГц и $f_{T_{\text{опт}}}(T = 2) \approx 875$ кГц. Соответственно оптимальные частоты для измерения электропроводности $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T = 10) \approx 200$ кГц и $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T = 2) \approx 5$ МГц; для изделий с интегральной электропроводностью $\sigma_{\text{и}} = 7$ кСм/м $f_{T_{\text{опт}}}(T = 10) = 176$ кГц и $f_{T_{\text{опт}}}(T = 2) = 4,4$ МГц, $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T = 10) \approx 1$ МГц и $f_{\sigma_{\text{опт}}}(T = 2) \approx 25$ МГц. Для сердечников броневое типа с радиусом экрана $R = 6\text{—}15$ мм при рассчитанных значениях частот $\beta_T \approx 0,6$, $\beta_{\sigma} \approx 7$ что удовлетворяет условиям обеспечения оптимальной чувствительности. Однако приведенная на рис. 1 схема обеспечивает верхний диапазон рабочих частот на уровне порядка 5 МГц, что соответствует $T_{\min} \approx 5$ мм при $\sigma_{\text{и}} = 7$ кСм/м, то есть измерение электропроводности во всем диапазоне контролируемых T и $\sigma_{\text{и}}$ не будет обеспечено. В этом случае при $T < 5$ мм для измерения $\sigma_{\text{и}}$ возможно применение вихретокового частотного метода [6] с учетом того, что он не обеспечивает отстройки от h и R_z .

Напряжение на измерительной обмотке $W_{\text{и}}$ равно сумме напряжения U_0 , возникающего в отсутствие контролируемого изделия, и вносимого

(разностного) напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}$, возникающего вследствие влияния изделия с покрытием: $U = U_0 + U_{\text{вн}}$.

Комплексное относительное вносимое напряжение $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ в соответствии с [3] равно:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \frac{\dot{U}_{\text{вн}}}{|\dot{U}_0|} = \frac{j\pi\mu_0 R_{\text{в}} R_{\text{и}}}{M} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_{\text{в}}) J_1(\lambda R_{\text{и}}) e^{-\lambda|z_{\text{в}} + z_{\text{и}}|} \chi_0 d\lambda;$$

$$\chi_0 = \frac{(\lambda - q_1)(q_1 + q_2) e^{Tq_1} - (\lambda + q_1)(q_2 - q_1) e^{-Tq_1}}{(\lambda + q_1)(q_1 + q_2) e^{Tq_1} - (\lambda - q_1)(q_2 - q_1) e^{-Tq_1}};$$

$$q_i = \sqrt{\lambda^2 + j\mu_0 \sigma_i \omega}, \quad (6)$$

где T — толщина материала; $R_{\text{в}}$ — радиус обмотки возбуждения; $R_{\text{и}}$ — радиус измерительной обмотки; $z_{\text{и}}$, $z_{\text{в}}$ — расстояние от измерительной обмотки и обмотки возбуждения до поверхности изделия соответственно; $J_i(\lambda R_i)$ — функция Бесселя первого порядка; λ — параметр преобразования; σ_i — электропроводность материала; M — коэффициент начальной взаимной индукции между обмотками; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота тока возбуждения.

При расчетах можно принять радиусы обмоток равными радиусу ферритового бронированного сердечника [4].

Разность фаз $\Delta\varphi$ определяется выражением

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}[\dot{U}_{\text{вн}}^*]}{\text{Re}[\dot{U}_{\text{вн}}^*]}. \quad (7)$$

На рис. 2 представлена рассчитанная в соответствии с (6) зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от толщины изделия для $\sigma_{\text{и}} = 35$ кСм/м при $f = 35$ кГц и $R \approx 15$ мм (кривая 1). Во всем диапазоне изменения T от 2 до 10 мм обеспечивается приемлемая чувствительность, позволяющая с учетом погрешности измерения разности фаз схемы $\Delta\varphi$ обеспечить абсолютную погрешность измерения на уровне $\pm 0,01T$ в нормальных условиях. Однако изменение указанных выше мешающих параметров будет вызывать дополнительную погрешность измерения.

Линия отвода 3 иллюстрирует влияние h в точке измерения B . Изменение зазора до 0,3 мм вызовет дополнительную погрешность измерения порядка 0,1 T . Для подавления влияния зазора (а также эквивалентных зазору R_z и d) необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра $R1$ сместить точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину $U_{\text{см}}^*$, соответствующую диапазону измерения T .

Влияние вариации электропроводности изделия иллюстрируют линии $B'VB''$ и $C'CC''$, соответствующие изменению $\sigma_{\text{и}}$ от 32 до 38 кСм/м ($\pm 10\%$ от номинального значения) и показывающие, что дополнительная погрешность измерения может достигать величины порядка $\pm(0,1—0,15)T$ в зависимости от диапазона измерения. Контроль $\sigma_{\text{и}}$ может позволить подавить влияние девиации $\sigma_{\text{и}}$ на результат измерения T .

Для других значений σ_{ii} годографы $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T)$ носят аналогичный характер (например, при $\sigma_{ii} = 7$ кСм/м для получения аналогичных зависимостей измерения необходимо проводить при $f \approx 176$ кГц и $R \approx 15$ мм).

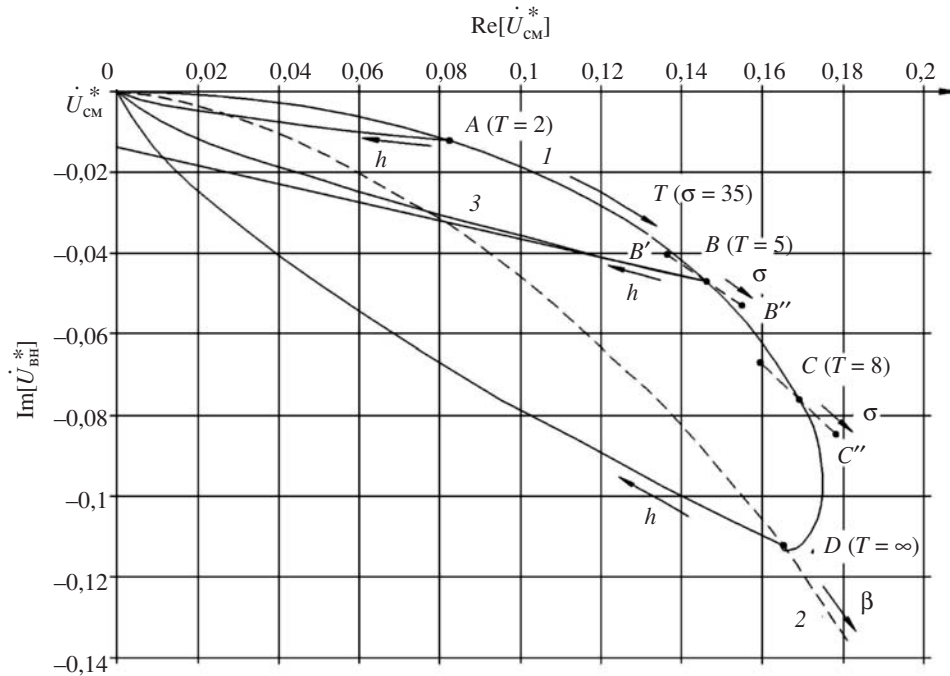


Рис. 2. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от контролируемого и влияющих параметров при измерениях толщины изделия.

Зависимость $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ для задачи определения электропроводности применительно к преобразователю с $R = 6$ мм и $f \approx 5$ МГц представлена на рис. 3 (кривая 1).

Точка A соответствует $\sigma_{ii} = 7$ кСм/м ($\beta_{\sigma} \approx 3$), точка B соответствует $\sigma_{ii} = 35$ кСм/м ($\beta_{\sigma} \approx 7$). Линии отвода 2 и 3 иллюстрируют влияние h в точках измерения A и B . Для подавления влияния зазора необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра $R1$ сместить точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину $U_{\text{см}}^*$.

Рассматриваемый преобразователь не позволяет плавно изменять частоту возбуждающего тока, поэтому необходимо оптимальным образом подобрать частоты нескольких преобразователей для перекрытия диапазонов измерения T и σ .

На рис. 4 представлены зависимости $T_{\text{min}}(\sigma)$ для трех значений f и R . Соответствующие годографы комплексного относительного вносимого напряжения $U_{\text{вн}}^*$ представлены на рис. 3. Измерение электропроводности в зоне A оптимально проводить преобразователем, у которого $f = 0,8$ МГц, $R = 15$ мм; в зоне B — преобразователем, у которого $f = 1,8$ МГц, $R = 10$ мм; в зоне B — преобразователем, у которого $f = 5$ МГц, $R = 6$ мм. Измерение электропроводности в зоне Γ можно проводить вихретоковым частотным преобразователем, у которого $f \approx 12$ МГц, $R = 3$ мм, учитывая, что при его использовании не достигается подавление влияния h .

Следуя аналогичным рассуждениям, для измерения толщины изделия можно использовать три преобразователя. На рис. 5 представлены зависимости $T_{\max}(\sigma)$ для преобразователей, у которых годографы относитель-

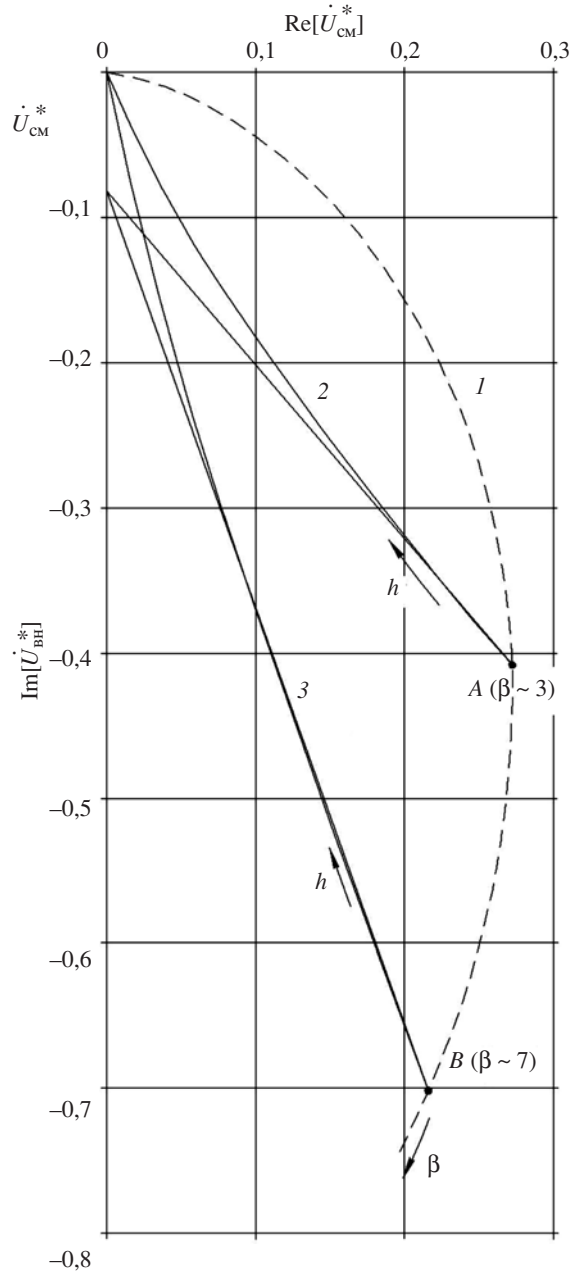


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения $U_{\text{вн}}^*$ от контролируемого и влияющих параметров при измерении электропроводности.

ного вносимого напряжения $U_{\text{вн}}^*$ соответствуют представленным на рис. 2. Параметры преобразователей и зоны измерения следующие:
 1) $f = 35$ кГц, $R = 15$ мм (зона А);

- 2) $f = 176$ кГц, $R = 10$ мм (зона Б);
 3) $f = 875$ кГц, $R = 6$ мм (зона В).

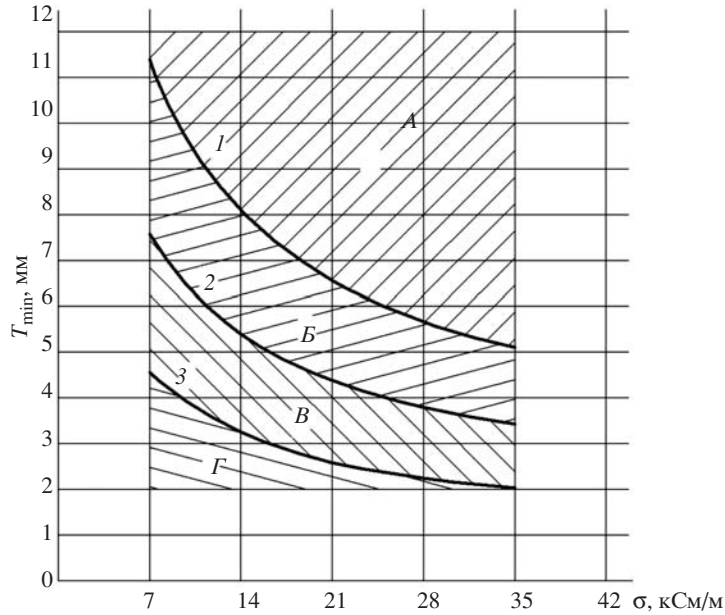


Рис. 4. Зависимость минимальной допустимой толщины изделий T_{\min} от измеряемой электропроводности (1 — $f = 0,8$ МГц, $R = 15$ мм; 2 — $f = 1,8$ МГц, $R = 10$ мм; 3 — $f = 5,0$ МГц, $R = 6$ мм).

Градуировка преобразователей производится на эталонных образцах толщины и электропроводности, изготавливаемых по технологии произ-

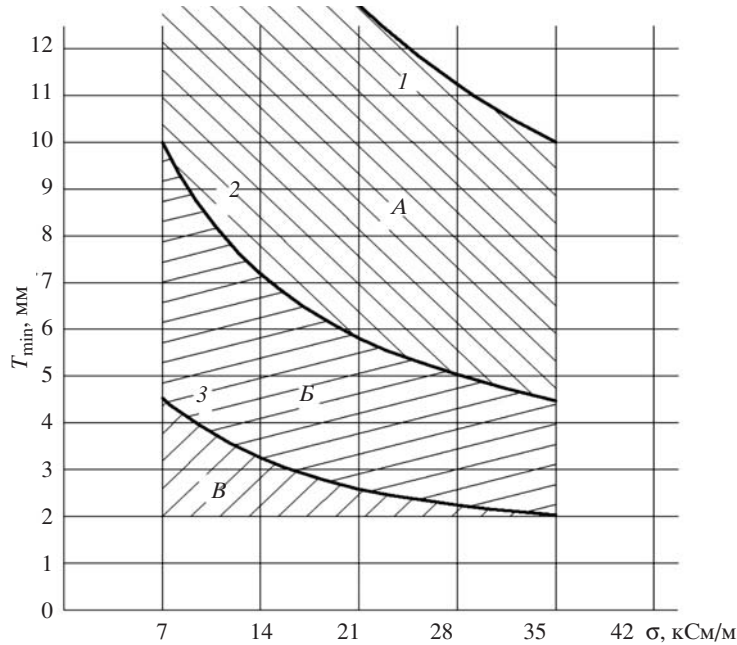


Рис. 5. Зависимость максимальной контролируемой толщины изделия T_{\max} от электропроводности основания (1 — $f = 35$ кГц, $R = 15$ мм; 2 — $f = 176$ кГц, $R = 10$ мм; 3 — $f = 875$ кГц, $R = 6$ мм).

водителя изделий. Семейство характеристик записывается в память микроконтроллеров измерительных преобразователей. Элементы электри-

ческой схемы, представленной на рис. 1, располагаются на печатной плате внутри преобразователей, что позволяет существенно уменьшить уровень наводок и собственных шумов и обеспечить требуемую чувствительность при измерениях. Связь с блоком обработки и представления информации осуществляется по каналу связи UART.

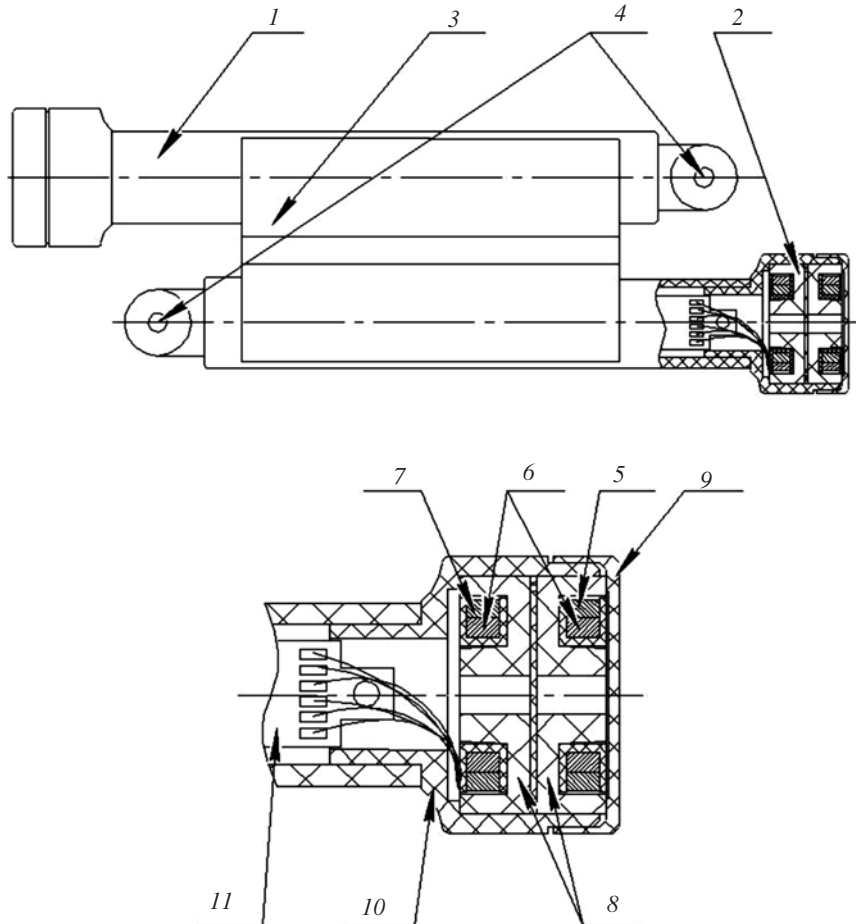


Рис. 6. Сборка преобразователей при проведении измерений:
1, 2 — измерительные преобразователи; 3 — соединительная втулка; 4 — места вывода кабелей; 5 — измерительная обмотка; 6 — возбуждающие обмотки; 7 — компенсационная обмотка; 8 — броневые ферритовые сердечники; 9 — защитный колпачок; 10 — корпус; 11 — печатная плата.

При измерениях требуемые преобразователи соединяются в единый блок с использованием соединительной втулки (рис. 6) и подключаются к блоку обработки и представления информации “Константа К6”.

Перед началом измерений оператор задает границы диапазона T , затем с использованием одного из преобразователей оценивается величина электропроводности изделия, производится сборка необходимых для измерения преобразователей и их подключение к прибору. Прибор не требует проведения калибровки на образцах продукции перед началом контроля. Измерения могут осуществляться двумя способами:

1) оператор производит измерение среднего значения электропроводности изделия по зоне контроля $\sigma_{иср}$ и далее производит измерение толщины изделия по заданной зоне, корректируя их с учетом $\sigma_{иср}$;

2) оператор производит измерение электропроводности $\sigma_{ш}$ в каждой точке измерения и корректирует полученное в этой точке значение толщины с учетом $\sigma_{ш}$.

Диапазон измеряемых толщин стенок изделий из УКМ составляет от 2 до 10—12 мм при электропроводности от 7 до 35—42 кСм/м. Влияние зазора подавляется в диапазоне до 0,3 мм, а шероховатости до величины $R_z \approx 150$ мкм. Абсолютная погрешность измерения T при указанных величинах мешающих параметров составляет не более $\pm(0,02—0,03)T$.

Северо-Западный государственный
заочный технический университет
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
4 апреля 2011 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобович Б.Б. Полимерные композиционные материалы. URL: <http://www.ics2.ru/articles/>
2. Перепелкин К.Е. Полимерные композиты на основе химических волокон, их основные виды, свойства и применение. URL: <http://www.unctm.ru/>
3. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2, кн. 2. Вихретоковый контроль. Изд. 2, испр.— М.: Машиностроение, 2006.— 688 с.
4. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия.— М.: “Энергия”, 1978.— 184 с.
5. L.J. van der Pauw. A method of measuring the resistivity and hall coefficient on lamellae of arbitrary shape.— Philips Technical Review, v. 20, N 8, 1958/59, p. 220—224.
6. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое, справочное пособие.— СПб.: Гуманистика, 2009.— 904 с.