

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Статья посвящена проектированию электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) для ультразвукового неразрушающего контроля металлических изделий. Выполнены теоретические расчеты ряда параметров преобразователей и магнитной системы, а также измерены диаграммы направленности излучения прямых и наклонных ЭМАП для разных типов волн на нескольких частотах. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных. Результаты могут быть использованы для оптимизации параметров ЭМАП при их проектировании.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (ЭМАП), УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА, SV - И SH -ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ВОЛНЫ, ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ.

Введение

Неразрушающий контроль с применением ультразвука находит все большее применение в современном машиностроении. И это вполне закономерно, поскольку детали современных машин и оборудования становятся все более сложными и дорогостоящими, а последствия их непредсказуемых разрушений катастрофическими. Наша страна является родиной ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК): С.Я. Соколов, работавший в Ленинграде, запатентовал его в 1928 году; и поэтому Россия традиционно занимает по УЗК ведущие позиции в мире. Особенно это относится к теоретическим разработкам.

Вместе с тем традиционная ультразвуковая методика с применением пьезопреобразователей (ПЭП), наряду с множеством преимуществ по сравнению с другими неразрушающими методами контроля (радиационным, магнитным, оптическим, вихретоковым и др.) обладает своими специфическими недостатками. Среди них

самым существенным следует считать необходимость поддерживать хороший акустический контакт излучающей поверхности ПЭП с поверхностью контролируемых изделий.

В связи с этим одним из самых перспективных считается разработанный в СССР метод ультразвукового неразрушающего контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП). Измерения с помощью этого прибора позволяют осуществлять контроль бесконтактно, без использования согласующих сред, с высокими скоростями и даже при наличии грубых, шероховатых поверхностей изделий. При этом диапазон волн, используемых при таком контроле, оказывается шире, чем таковой с использованием пьезопреобразователей, и это открывает дополнительные возможности для УЗК. Так, с применением ЭМАП соответствующей конструкции можно:

возбуждать и принимать волны, способные проходить вдоль изделий вне зависимости от состояния их границ;

использовать волны, в которых частицы среды колеблются как в нормальной к поверхности контроля плоскости (SV -поляризованные волны), так и поперек нее (SH -поляризованные волны);

применять волны радиальной поляризации;

производить измерения сквозь защитные покрытия, слои ржавчины, краски, в условиях высоких и низких температур, радиации и вакуума.

Тем не менее, в настоящее время УЗК с применением ЭМАП используется все же достаточно редко. И на это есть объективные причины. Прежде всего, конструкция ЭМАП оказывается значительно сложнее, чем у ПЭП. В самом деле, если работа ПЭП определяется пятью-семью конструктивными параметрами, то ЭМАП зависит уже от тридцати и более параметров. В связи с этим создание наилучших конструктивных решений ЭМАП вызывает существенные трудности. А если принять во внимание, что достаточно полной теории, с помощью которой можно было бы оптимизировать все их характеристики, не существует до настоящего времени даже для ПЭП, то это тем более относится к теоретическому аппарату ЭМАП. С другой стороны, и экспериментальное исследование ЭМАП не дает всей полноты необходимых для этого сведений. В самом деле, опытное изучение какого-либо явления эффективно только тогда, когда изменяется один из его параметров, а все остальные при этом остаются прежними. Для ЭМАП такое состояние достигается с большим трудом. А поэтому ныне существующие и зачастую неплохо работающие ЭМАП обязаны своим возникновением в большей мере таланту и опыту разрабатывающих их исследователей, чем теории или накопленным опытным данным.

В целом можно констатировать, что типовые ЭМА-преобразователи представляют собой конструкцию из магнитов большой индукции, экранов и катушек токопроводов, расположенных по отношению друг к другу различным образом. При этом чаще всего применяются устройства, в которых магнит, экран и катушка располагаются последовательно над поверхностью контро-

ля. Магнит служит для создания мощного магнитного поля, которое проникает в поверхность контроля по нормали и по касательной к ней. Катушка применяется для создания вихревого электрического поля заданной поляризации, которое возбуждает в токопроводящей среде токи Фуко. Последние, вступая во взаимодействие с постоянным магнитным полем, генерируют силы Ампера, служащие источником механических напряжений. Именно таким является основной механизм возбуждения ультразвуковых сигналов с помощью ЭМАП в токопроводящих объектах. Экран служит для отражения вихревого электромагнитного поля, создаваемого катушкой, с целью увеличения его полезной составляющей, понижения уровня акустических шумов, идущих от магнитопровода, и управления направленностью излучаемого звука.

Другим механизмом возбуждения ультразвуковых сигналов в объектах контроля служит эффект магнитоstriction, т. е. изменение размеров и формы локальных объемов ферромагнитных материалов в переменном магнитном поле. Однако последний механизм реализуется сравнительно редко, поскольку он эффективен только на сравнительно низких частотах и зачастую сопровождается значительными акустическими шумами.

Обратный эффект, т. е. прием акустических сигналов с помощью ЭМАП, осуществляется благодаря возникновению ЭДС в токопроводах катушки, которые находятся в постоянном магнитном поле и подвергаются электромагнитным излучениям свободных электронов объекта контроля под действием акустических волн. При этом, в соответствии с теоремой взаимности, акустические характеристики преобразователей при излучении и приеме оказываются идентичными. Так, избирательность волн и диаграммы направленности излучения преобразователей соответствуют таковым при их работе в качестве приемников.

В большинстве ЭМАП применяются постоянные магниты. Они дешевле, проще в эксплуатации, надежны и не требуют специальной электрической системы подмагничивания. Однако указанные маг-

ниты настолько сильно притягиваются к ферромагнитным объектам контроля, что их перемещение вдоль поверхности требует значительных усилий или использования специальных механических устройств. И данное обстоятельство в определенной мере усложняет эксплуатацию ЭМАП, особенно при контроле быстродвижущихся объектов. Поэтому в последнее время все чаще используют электромагниты, которые свободны от указанного недостатка.

Характеристики излучения и приема ЭМАП

При конструировании магнитной системы ЭМАП встречаются определенные трудности. Так, при использовании однополюсных плоских магнитов не всегда удается получить большие индукции, что в значительной мере понижает амплитуды излучаемых и принимаемых ими акустических сигналов. В то же время с помощью двухполюсных магнитов индукция постоянного магнитного поля может быть существенно повышена, однако однородность этого поля оказывается невысокой. И данное обстоятельство ухудшает направленные характеристики излучения и приема ЭМАП. Разумеется, есть способы, с помощью которых указанные факторы можно несколько скорректировать, однако исключить их полностью нельзя. Для демонстрации этого утверждения на рис. 1 – 3 приведены соответствующие расчетные (но проверенные экспериментально для поверхности образцов) характеристики вертикальной составляющей индукции указанных полей. На рис. 1 и 2 представлены данные для однополюсных магнитов, а на рис. 3 – для двухполюсных.

Глубина наблюдения во всех выполненных расчетах составляла 10 мкм и выбрана потому, что именно на ней осуществляется наиболее полное преобразование электромагнитного поля токопровода в силы Ампера. Очевидно, что экспериментально получить такие зависимости невозможно.

Как уже отмечалось, к одним из существенных достоинств ЭМАП относится их способность работать с большими зазорами относительно поверхности контроля. При этом величина зазора ограничивается как

уменьшением амплитуды постоянного магнитного поля с расстоянием (см. рис. 2), так и понижением амплитуды электромагнитных волн, возбуждаемых в твердых телах токопроводами катушки. Данные зависимости также можно получить лишь расчетным путем, поэтому далее мы приводим соответствующие теоретические результаты.

Постановка задачи

Рассмотрим типовую конструкцию (рис. 4), состоящую из прямых токопроводов 1, расположенных в воздушной среде 2, объекта контроля 3, экрана 4 и однополюсного магнита 5.

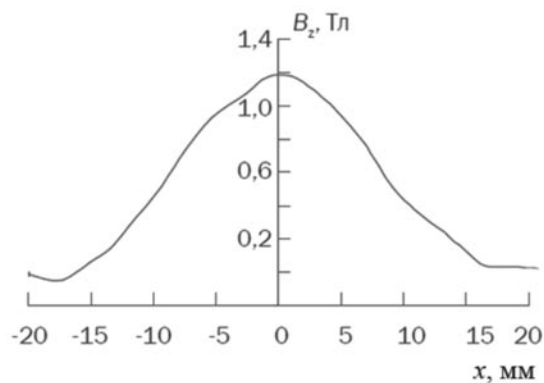


Рис. 1. Характеристика вертикальной составляющей магнитного поля от одного полюса магнита сечением 26×26 мм на глубине 10 мкм при нулевом зазоре относительно поверхности контроля

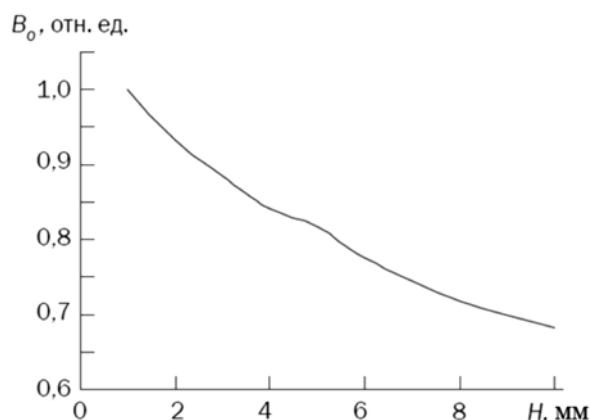


Рис. 2. Нормированное ослабление индукции магнитного поля однополюсного магнита в зависимости от расстояния между ним и поверхностью контроля

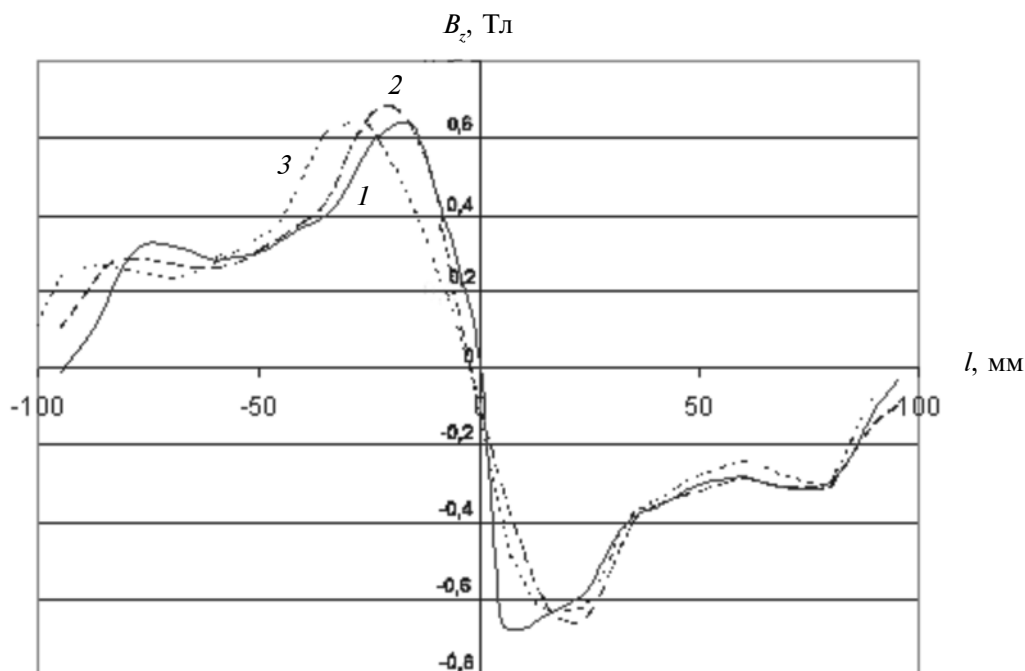


Рис. 3. Распределение вертикальной составляющей магнитного поля двухполюсного магнита размером $90 \times 26 \times 10$ мм с зазором между магнитом и поверхностью контроля 7 мм при разных расстояниях между краями полюсов, мм: 2 (1), 10 (2), 20 (3)

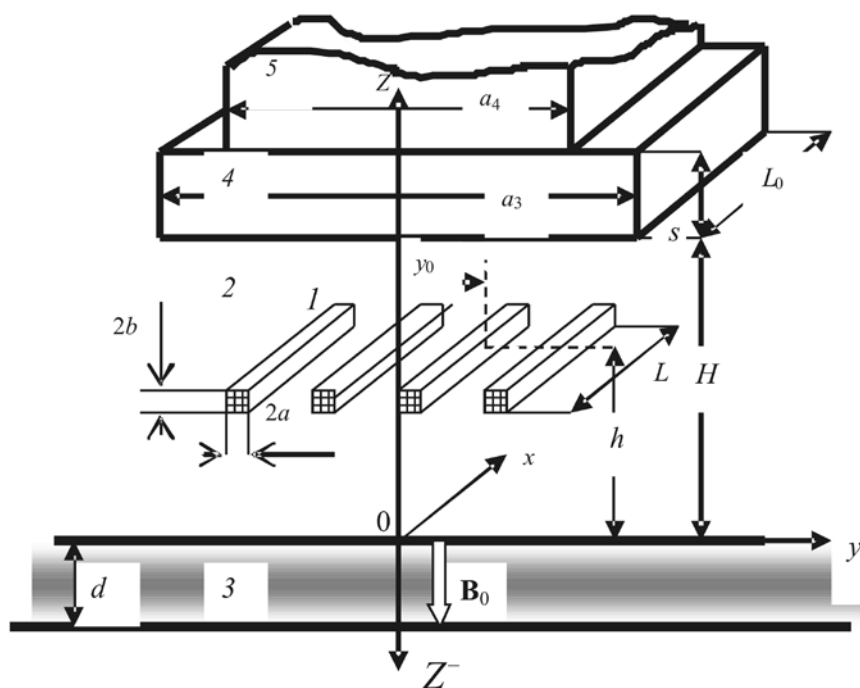


Рис. 4. Схема к постановке задачи: 1 – токопроводы (сечение $2a \times 2b$, L – длина рабочей части); 2 – воздушная среда; 3 – объект контроля (d – глубина контрольного слоя), 4 – экран ($a_3 \times L_0 \times s$); 5 – однополюсный магнит с поперечным сечением a_4 ; \mathbf{B}_0 – вектор индукции магнитного поля

Размер экрана 4, отражающего электромагнитные волны в направлении оси y , равен a_3 , а в направлении $x - L_0$. В продольном направлении x длина работающей части токопровода равна L . Введем обозначения: I_0 — сила тока, протекающего в одном токопроводе; y_0 — координата рассматриваемого токопровода в направлении y . Буквами μ_j обозначим магнитные проницаемости каждой из указанных сред i , символом σ_j — их проводимости, а ε_j — магнитные проницаемости.

Решения поставленной задачи

Соответствующие решения были получены нами для горизонтальной (B_y) и вертикальной (B_z) составляющих вихревого магнитного поля, возбуждаемого вблизи поверхности плоских токопроводящих изделий. Они выглядят следующим образом:

$$B_y = -\frac{2\pi D_1 m_2 z}{k_0 R^2} q_2^2 \Psi_2(\alpha_0, \beta_0) \text{Sinc}(\alpha_0 L/2) \times \text{Sinc}(\beta_0 a) \exp(ik_0 m_2 R); \quad (1)$$

$$B_z = -i \frac{2\pi D_1 m_2 z}{k_0 R^2} \beta_0 \Psi_2(\alpha_0, \beta_0) \text{Sinc}(\alpha_0 L/2) \times \text{Sinc}(\beta_0 a) \exp(ik_0 m_2 R).$$

В решении (1) использованы следующие обозначения:

$$D_1 = \frac{\mu_0 I_0 L}{2(2\pi)^2}; \quad \alpha_0 = m_2 x/R; \quad \beta_0 = m_2 y/R;$$

$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ — расстояние от центральной части рассматриваемого токопровода до точки наблюдения; $k_0 = 2\pi/\lambda$ (λ — длина электромагнитной волны в вакууме);

$$m_j = \sqrt{\frac{\mu_j}{\omega} \left(\omega \varepsilon_j - \frac{i\sigma_j}{\varepsilon_0} \right)}$$

— отношение скорости электромагнитной волны в среде с номером j к ее скорости в вакууме;

$$\Psi_2(\alpha_0, \beta_0) = \{Q_3[Q_3 \text{sh}(q_3 s) + Q_4 \text{ch}(q_3 s)] \times [\exp(q_1(H-h)) - S_0(\alpha_0, \beta_0) \times \exp(-q_1(H-h))] + Q_1[Q_3 \text{ch}(q_3 s) + Q_4 \text{sh}(q_3 s)] [\exp(q_1(H-h)) + S_0(\alpha_0, \beta_0) \times \exp(-q_1(H-h))]\} \cdot \{Q_1 \text{ch}(q_1 H) [Q_3 \text{ch}(q_3 s) \times$$

$$\times (Q_2 + Q_4) + \text{sh}(q_3 s)(Q_3^2 + Q_2 Q_4)] + \text{sh}(q_1 H)[Q_3 \text{ch}(q_3 s)(Q_2 Q_4 + Q_1^2) + \text{sh}(q_3 s)(Q_2 Q_3^2 + Q_1^2 Q_4)]\}^{-1}.$$

Эта функция учитывает влияние всех описанных выше параметров ЭМАП на индукцию вихревого электромагнитного поля, возбуждаемого одним токопроводом ниже поверхности контроля; в функции $\Psi_2(\alpha_0, \beta_0)$ использованы следующие обозначения:

$$q_j = \sqrt{\alpha_0^2 + \beta_0^2 - m_j^2}; \quad Q_j = q_j/\mu_j;$$

$$S_0(\alpha_0, \beta_0) = \text{Sinc}(\beta_0 a_3/2) \text{Sinc}(\alpha_0 L_0/2) \times \exp(-i(\alpha_0 x_0 + \beta_0 y_0))$$

— функция, описывающая отражающую способность экрана и магнита.

$$\text{Sinc}(X) = \sin(X)/X; \quad \alpha_0 = m_2 x/R; \quad \beta_0 = m_2 y/R.$$

Анализ факторов, влияющих на работу ЭМАП

Горизонтальная составляющая индукции магнитного поля. Поскольку для работы ЭМАП наиболее важна горизонтальная составляющая индукции вихревого магнитного поля, рассмотрим только ее поведение. Расчеты проводились для глубины $d = 10$ мкм от поверхности контроля.

Из расчетов следует, что ослабление амплитуды волны с расстоянием от токопровода до объекта контроля носит экспоненциальный характер (рис. 5) с показателями экспоненты, равными примерно $0,324 \text{ мм}^{-1}$ на частоте 100 кГц и $0,348 \text{ мм}^{-1}$ на частоте 1 МГц . При этом амплитуда данной волны в первом случае примерно в 2,5 раза меньше, чем во втором, т. е. повышение частоты способствует росту токов Фуко, а вместе с ними и амплитуды возбуждаемых акустических волн.

Представленный расчет относился к случаю свободного токопровода, расположенного над объектом контроля. Однако при работе ЭМАП токопроводы катушки располагаются, как правило, под магнитопроводами, которые служат экраном, либо

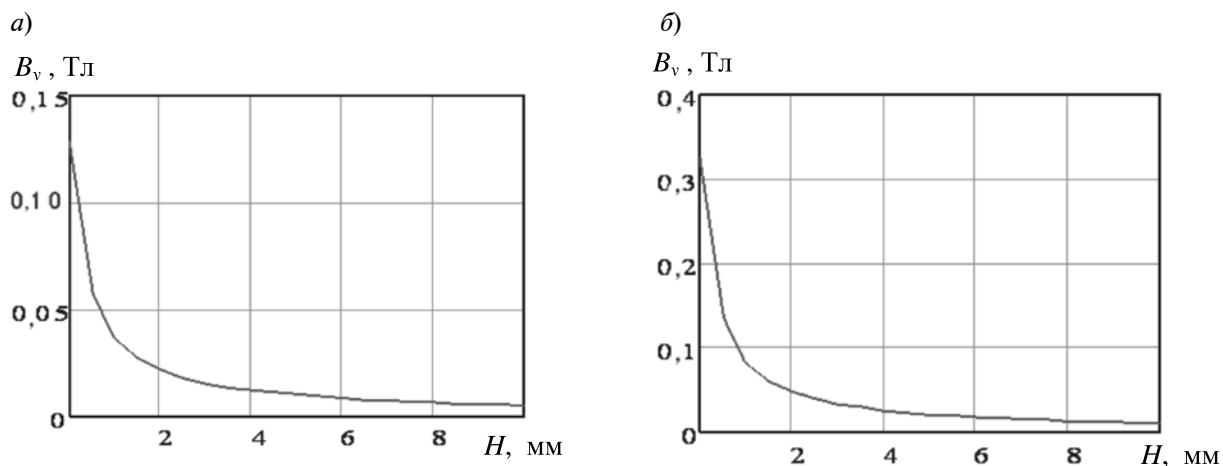


Рис. 5. Зависимости горизонтальной составляющей индукции электромагнитной волны токопровода от расстояния до объекта контроля. Частота, кГц: 100 (а), 1000 (б)

под специальными экранами. В связи с этим представляет интерес выяснить, как эти экраны влияют на магнитное поле, создаваемое токопроводами.

Влияние экранирования. Из результатов расчета следует, что чем меньше расстояние от экрана до токопровода, тем больше оказывается амплитуда излучаемой им электромагнитной волны и тем выше, чем ниже частота (рис. 6). Следует отметить, что имеющиеся теоретические и экспериментальные результаты свидетельствуют, что использование экрана, как правило, понижает амплитуду возбуждаемых электромагнитных волн, и тем сильнее, чем выше

их электропроводность и меньше угол наблюдения относительно нормали к поверхности контроля. Объясняется это тем, что отраженная от экранов электромагнитная волна токопроводов приходит к поверхности в противофазе с прямой падающей волной, ослабляя таким образом их суммарное воздействие на возбуждаемый звук.

С другой стороны, если конструкция постоянных магнитов ЭМАП, магнитопроводов и их взаимное расположение активно влияют на величину возбуждаемых и принимаемых акустических сигналов, то на поляризацию указанных волн, на диаграммы направленности и на особенности

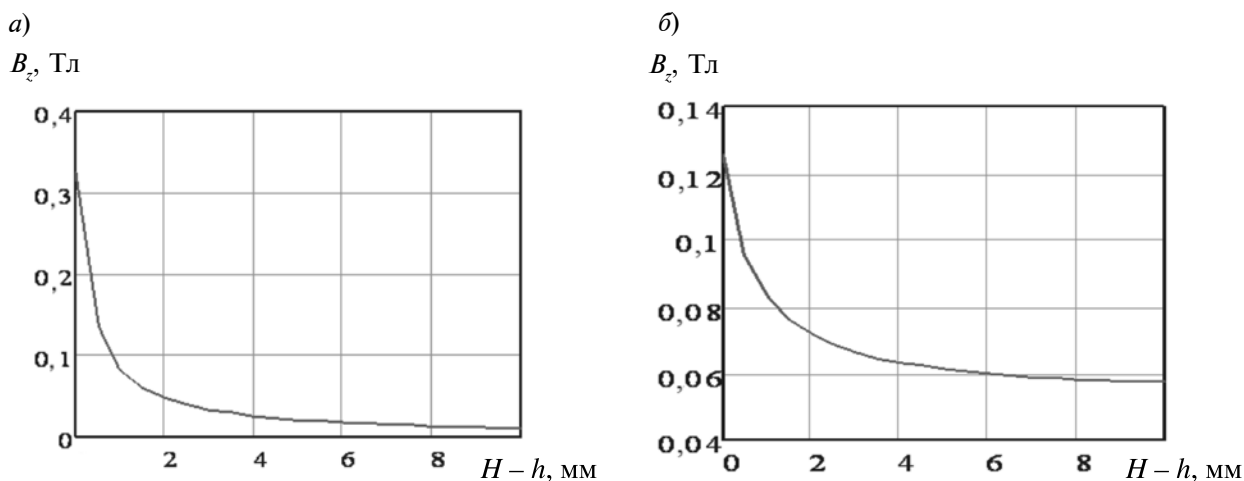


Рис. 6. Зависимости вертикальной составляющей индукции электромагнитной волны, излучаемой токопроводом, от его расстояния до экрана при зазоре между токопроводом и поверхностью контроля 1 мм. Частота, кГц: 100 (а), 1000 (б)

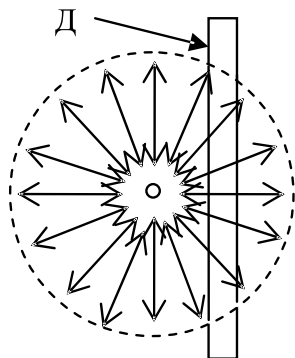


Рис. 7. Направления смещения частиц среды в волне радиальной поляризации; Д – дефект

работы преобразователей с ограниченными телами (пластины, стержни, трубопроводы и проч.) наибольшее воздействие оказывает конструкция катушек. Более того, именно конструкцией регулируется большинство характеристик ЭМАП, поэтому ее исследованию мы уделяли особое внимание.

Влияние конструкции катушек. Большинство катушек состоит либо из круговых витков типа «улитка», либо из токопроводов, соединенных различным образом (прямых или сфокусированных). Рассмотрим особенности их работы.

При использовании катушек в виде круговых витков ЭМАП излучает и принимает поперечные, радиально поляризованные акустические волны. Его преимуществами являются сравнительно высокая чувстви-

тельность, широкополосность, надежность и неплохая направленность. К недостаткам можно отнести способность работать только по нормали к поверхности контроля, невысокая чувствительность к дефектам, в результате чего такие преобразователи нашли применение в толщинометрии, но не нашли его в дефектоскопии.

В самом деле, смещение частиц среды под действием такой волны выглядит так, как показано на рис. 7. Эти частицы колеблются параллельно поверхности контроля, расходясь от центра диаграммы направленности преобразователя (пунктирная окружность на рисунке) и сходясь к нему. Если же такие волны падают на дефект, расположенный под центром диаграммы, то тогда сигналы, отражаемые различными его частями, оказываются в противофазе друг с другом, а это ведет к снижению амплитуды принимаемого сигнала. И если дефект оказывается смещенным относительно центральной части диаграммы, то это не только меняет амплитуду падающей волны, но и приводит к увеличению синфазных составляющих сигналов, отражаемых различными частями дефекта. И тогда амплитуда волны, принимаемой от дефекта, оказывается несколько большей. В случае же толщинометрии указанный эффект не сказывается, поскольку отражателем сигналов здесь служит противоположная плоскость изделия, которая не нарушает распределения поля-

Таблица 1

Расчетные параметры амплитуды излучения катушки круговой намотки

Параметр	Значение
Диаметр катушки, мм внутренний	1,6
наружный	14,2
Диаметр провода, мм	0,18
Число витков	30
Индуктивность, мкГн	11,2
Рабочая частота, МГц	1,25
Диаметр отражателя, мм	4,0
Расстояние от отражателя до поверхности, мм	50

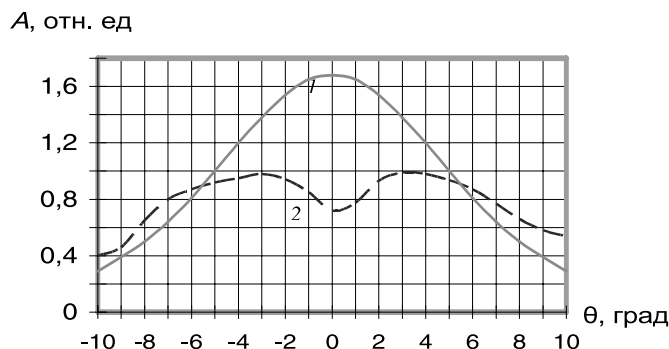


Рис. 8. Нормированные расчетные (1) и экспериментальные (с применением цилиндрических отражателей) (2) характеристики направленности излучения (приема) катушки круговой намотки (см. табл. 1).

ризации отраженной волны.

Для демонстрации данного обстоятельства приведем результаты расчета и измерения амплитуды излучения катушки, которая представляет собой соосно намотанную конструкцию в виде однослойной плотной спирали из медного изолированного провода диаметром 0,18 мм. Ее индуктивность и рабочая частота приведены ниже, отражателем служило цилиндрическое отверстие диаметром 4 мм, расположенное на расстоянии 50 мм от поверхности, по которой при измерении перемещался ЭМАП. Исходные параметры для расчета представлены в табл. 1.

Результаты измерений и расчета представлены графически на рис. 8. Видно, что вместо максимума излучения, соответствующего нормальному углу излучения ЭМАП, на экспериментальной кривой в указанной области наблюдается ослабление сигнала, причина которого объяснялась выше. Данное обстоятельство существенно затрудняет измерение реальной характеристики излучения и приема круговых ЭМАП.

Анализ акустических полей

Пользуясь полученными решениями, исследуем акустические поля, поляризованные различным образом и излучаемые в твердые токопроводящие изделия электромагнитно-акустическими преобразователями с прямыми токопроводами. Поскольку математический аппарат, используемый в расчетах, достаточно сложен,

приведем только его конечные результаты:

$$\begin{aligned} \sigma_{R\theta}(\theta, \varphi, t) &\approx iD^*W_\varphi^*(\theta, \varphi) \times \\ &\times \text{Sinc}(k_r L \sin \theta \cos \varphi / 2) \times \\ &\times \text{Sinc}(k_r a \sin \theta \sin \varphi) \times \\ &\times \Psi^*(\theta, \varphi) \cos \theta : [RZ^*(\theta)] \cdot f(t); \\ \sigma_{R\varphi}(\theta, \varphi, t) &\approx -iD^*W_\theta^*(\theta, \varphi) \times \\ &\times \text{Sinc}(k_r L \sin \theta \cos \varphi / 2) \times \\ &\times \text{Sinc}(k_r a \sin \theta \sin \varphi) \times \\ &\times \Psi^*(\theta, \varphi) \cos \theta : [RZ^*(\theta)] \cdot f(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $\sigma_{R\theta}(\theta, \varphi, t)$ — напряженность поперечных SV -поляризованных волн, зависящих от угла наблюдения θ в вертикальной плоскости и от угла наблюдения φ в горизонтальной плоскости сферической системы координат; $\sigma_{R\varphi}(\theta, \varphi, t)$ — то же для SH -поляризованных волн; R — расстояние от центра токопровода до точки наблюдения; t — текущее время от момента прихода импульсного сигнала к наблюдателю;

$$D^* = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \mu_0 B_0 \sigma_2 c_r I_0 L$$

(B_0 — индукция вертикальной составляющей постоянного магнитного поля с учетом его пространственной неоднородности; c_r — скорость поперечных волн в материале контроля);

$$W_\theta^* = [M^*(\sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_2^* + F_3^*) +$$

$$+ 2F_1^* q^* \sin^2 \theta] \cos \theta \cos \varphi - \frac{\cos \varphi \sin^2 \theta}{q_i^*} \times \\ \times \{M^* [F_3^* - F_2^* (q_i^{*2} + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)] + \\ + 2q^* q_i^* (2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi F_2^* - 2F_3^* - q_i^* F_1^*)\};$$

$$W_\varphi^* = -[M^* (\sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_2^* + F_3^*) + \\ + 2F_1^* q^* \sin^2 \theta] \sin \varphi;$$

$$Z^*(\theta) = M^{*2} - 4q^0 q_i^0 \sin^2 \theta;$$

$$\Psi^*(\theta, \varphi) = 2\{Q_3^* (Q_3^* \text{sh}(k_i q_3^* s) + Q_4^* \text{ch}(k_i q_3^* s)) \times \\ \times [e^{k_i q_1^* (H-h)} - S_3^*(\theta, \varphi) e^{-k_i q_1^* (H-h)}] + \\ + Q_1^* (Q_3^* \text{ch}(k_i q_3^* s) + Q_4^* \text{sh}(k_i q_3^* s)) \times \\ \times [e^{k_i q_1^* (H-h)} + S_3^*(\theta, \varphi) e^{-k_i q_1^* (H-h)}]\} \times \\ \times \{Q_1^* \text{ch}(k_i q_1^* H) [Q_3^* \text{ch}(k_i q_3^* s) (Q_2^* + Q_4^*) + \\ + \text{sh}(k_i q_3^* s) (Q_3^{*2} + Q_2^* Q_4^*)] + \text{sh}(k_i q_1^* H) \times \\ \times [Q_3^* \text{ch}(k_i q_3^* s) (Q_2^* Q_4^* + Q_1^{*2}) + \text{sh}(k_i q_3^* s) \times \\ \times [Q_2^* Q_3^{*2} + Q_1^{*2} Q_4^*]]\}^{-1},$$

причем

$$S_3^* = \frac{\sin(k_i a_3 \sin \theta \sin \varphi / 2)}{k_i a_3 \sin \theta \sin \varphi / 2} \times \\ \times \frac{\sin(k_i L_0 \sin \theta \cos \varphi / 2)}{k_i L_0 \sin \theta \cos \varphi / 2} \times$$

$$\times \exp(-ik_i \sin \theta (x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi));$$

$$k_j^2 = \frac{\omega \mu_j}{c_0^2} \left(\omega \varepsilon_j - \frac{i \sigma_j}{\varepsilon_0} \right)$$

— волновое число для электромагнитных волн указанных областей ЭМАП; ω — круговая частота работы преобразователя;

$$q_j^* = \sqrt{\sin^2 \theta - k_j^2 / k_i^2}; \quad q^* = -i \sqrt{p^{-2} - \sin^2 \theta};$$

$$q_i^* = -i \cos \theta; \quad q_2^* = -i \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta};$$

$$p = k_i / k = c / c_i; \quad m = k_2 / k_i; \quad M^* = -\cos(2\theta);$$

$$q_j^* = \sqrt{\sin^2 \theta - k_j^2 / k_i^2}; \quad Q_j^* = q_j^* / \mu_j;$$

$$M^* = -\cos(2\theta);$$

$$Z^*(\theta) = \cos^2(2\theta) +$$

$$+ 2 \sin \theta \sin(2\theta) \sqrt{p^{-2} - \sin^2 \theta};$$

x_0, y_0 — смещение центральной части рассматриваемого токопровода относительно

центра преобразователя;

$$F_1^* = \frac{M^*}{2q^*(q_2^* - q^*)} + \frac{2 \sin^2 \theta - p^2 m^2}{m^2 - p^{-2}} + \\ + \frac{q_2^*}{q_2^* - q_i^*} + \frac{2(q_2^*)^2}{m^2 - 1};$$

$$F_2^* = \frac{1}{q_2^* - q^*} + \frac{2q_2^*}{m^2 - p^{-2}} + \\ + \frac{q_2^* + q_i^*}{2q_i^*(q_2^* - q_i^*)} + \frac{2q_2^*}{m^2 - 1};$$

$$F_3^* = \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi}{q_2^* - q^*} + \frac{2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi q_2^*}{m^2 - p^{-2}} + \\ + \frac{q_2^*(q_i^{*2} + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi q_i^*}{2q_i^*(q_2^* - q_i^*)} + \\ + \frac{q_2^*(2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi - m^2)}{m^2 - 1}.$$

Функция $f(t)$ описывает временную форму применяемого импульсного сигнала и определяется генератором дефектоскопа, возбуждающего ЭМАП. Его наиболее целесообразная форма описывается функцией

$$f(t) = \left(e \frac{\eta}{\gamma} \right)^\gamma \tau^\gamma \exp(-\eta t) \cos(\omega_0 t),$$

в которой $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 — рабочая частота; параметры γ и η характеризуют быстроту изменения нарастающей и убывающей частей импульсного сигнала. Их величины для импульсов, в наибольшей степени соответствующих реальным сигналам, равны $\gamma = 2$ и $\eta = 0, 2\omega_0$.

Временная и спектральная характеристики указанных импульсов приведены на рис. 9.

Именно при такой временной форме импульсных сигналов генераторов достигается наивысшая чувствительность контроля с помощью ЭМАП при минимальной мертвой зоне и сравнительно невысоком уровне паразитных шумов. Вместе с тем на практике часто применяют импульсные сигналы, представляющие собой экспоненциально затухающую синусоиду (рис. 10).

С одной стороны, ширина спектральной плотности таких сигналов оказывается существенно меньшей, однако это

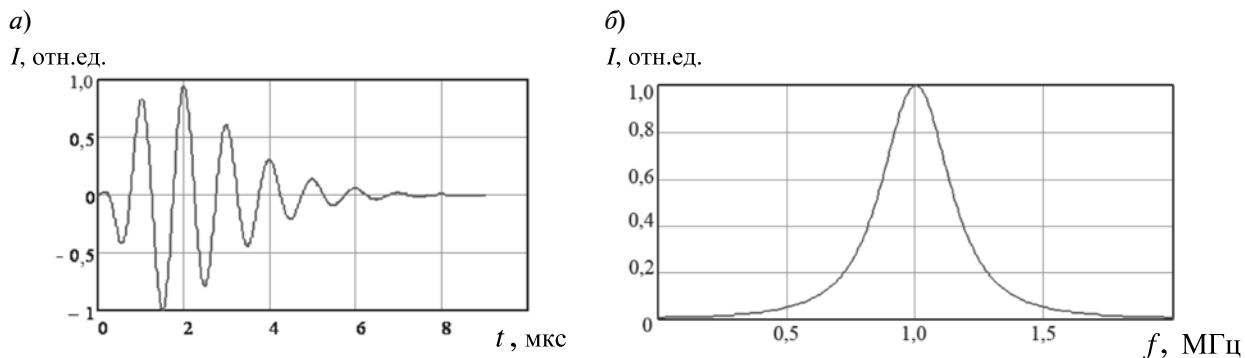


Рис. 9. Временная (а) и спектральная (б) характеристики сигналов, рекомендуемых для работы ЭМАП при $f_0 = 1$ МГц

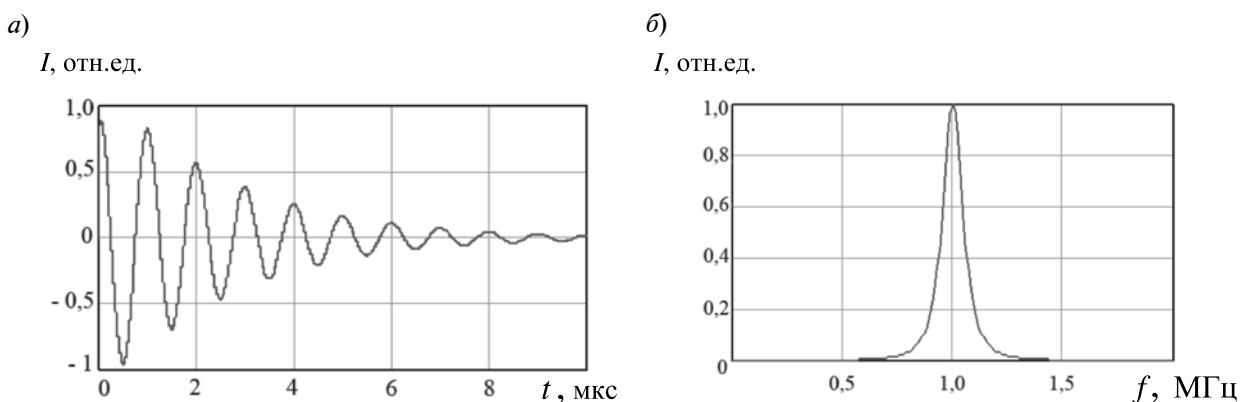


Рис. 10. Временная (а) и спектральная (б) характеристики сигналов, нередко применяемых при работе ЭМАП

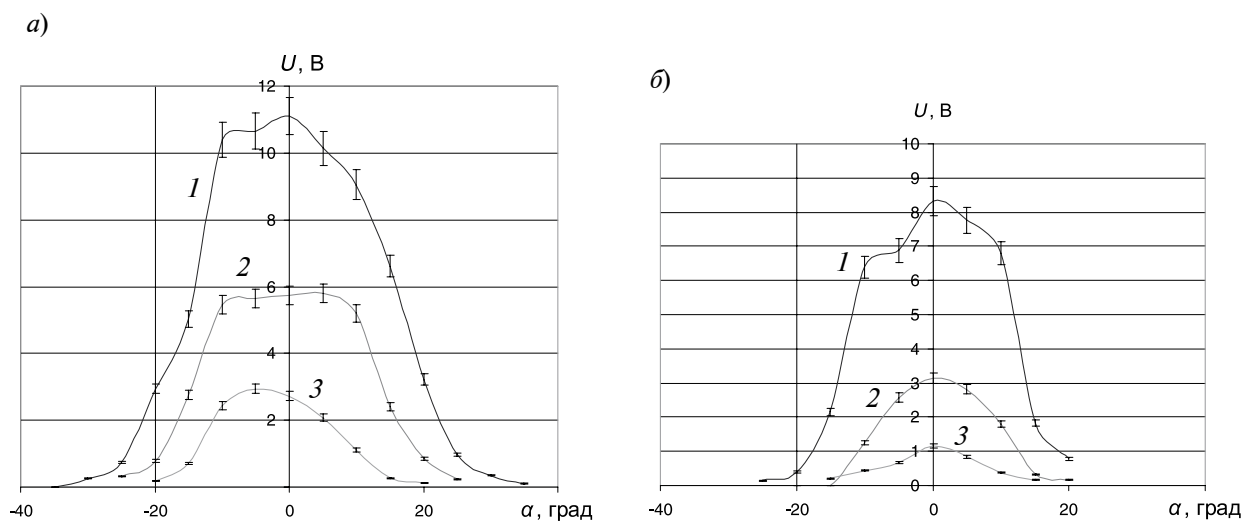


Рис. 11. Диаграммы излучения SV -поляризованных волн одним токопроводом (длина – 30 мм) в направлении, перпендикулярном ему, на частотах 1 МГц (а) и 2 МГц (б) при различных значениях величины зазора, мм: 0 (1), 1 (2), 2 (3). Показаны доверительные интервалы, соответствующие 90 %-м вероятностям обработки результатов

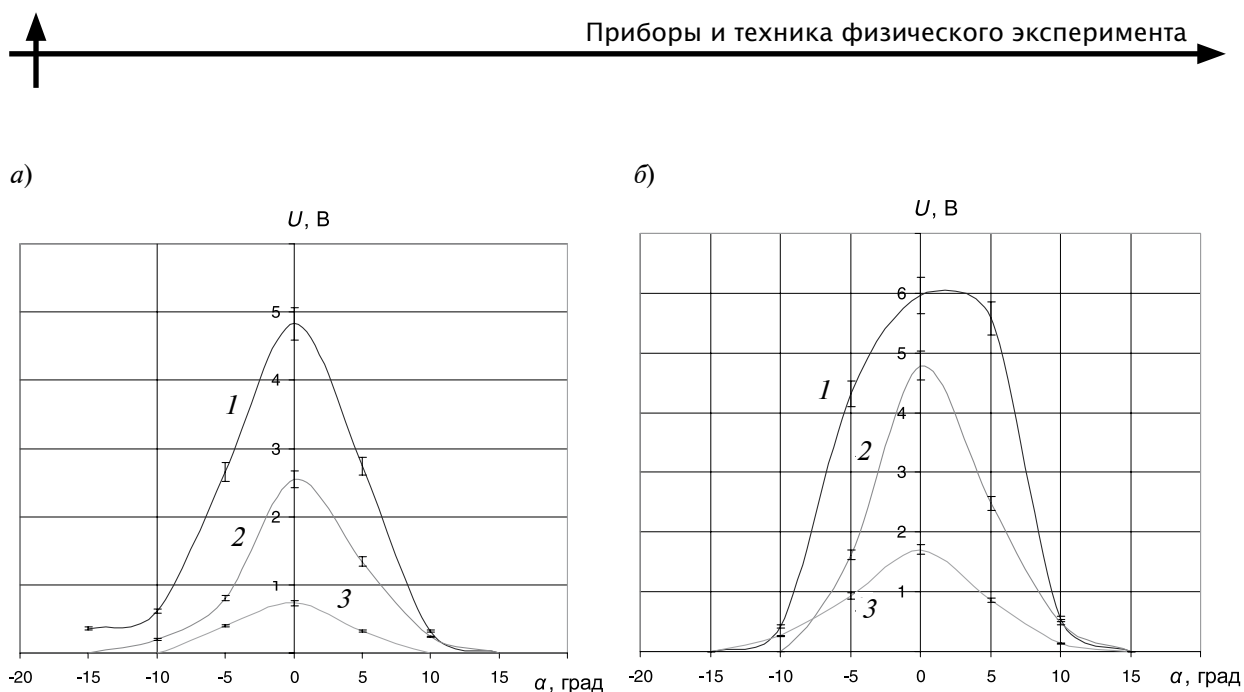


Рис. 12. Диаграммы излучения *SH*-поляризованных волн одним токопроводом (30 мм) в направлении, соответствующем его длине, на частотах 1 МГц (*а*) и 2 МГц (*б*) при различных значениях величины зазора (те же, что на рис. 11)

достигается за счет увеличения мертвой зоны контроля и понижения его разрешающей способности. В то же время сокращение спектральной плотности сигналов при работе ЭМАП не приводит к улучшению ситуации.

Диаграммы направленности излучения токопровода

Данные измерений диаграмм направленности излучения одного токопровода представлены в качестве примера на рис. 11 и 12 с указанием доверительных интервалов.

Для сравнения расчет тех же полей при зазоре, равном нулю, был выполнен с применением формул (2) и использованием параметров, приведенных в табл. 2. Результаты расчета представлены на рис. 13.

Разумеется, что в данном случае трудно было ожидать полного соответствия расчетных и экспериментальных кривых, поскольку отсутствуют достоверные значения таких параметров ЭМАП, как электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость магнитопровода, экрана и самого объекта контроля, а также величины всех зазоров. Тем не менее, если учитывать

Таблица 2

Параметры, использованные для расчета акустических полей по формуле (2)

Параметр	Значение	
Размер экрана, мм	$30 \times 20 \times 0,5$	
Расстояние между экраном и токопроводом, мм	0,5	
Магнитная проницаемость	экрана	50
	объекта контроля	20
Электропроводность, Ом·м	экрана	0
	объекта контроля	$6 \cdot 10^5$

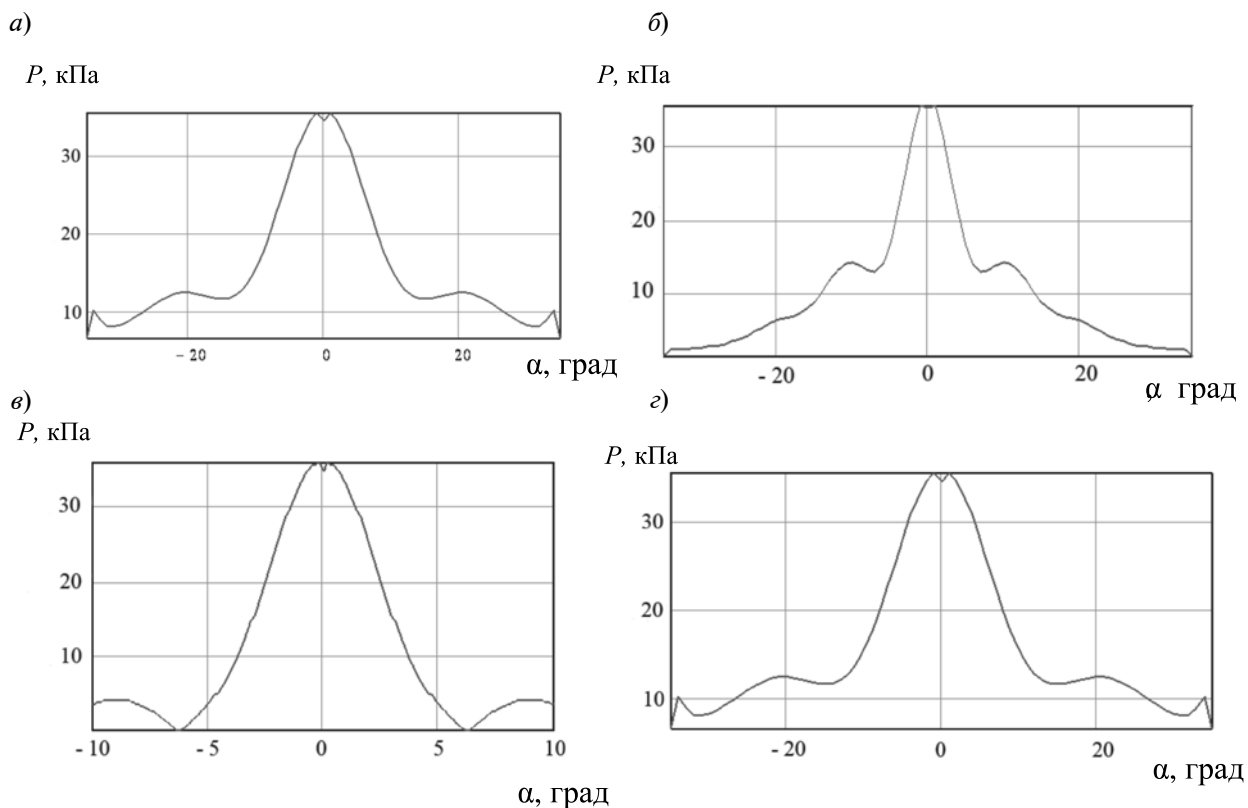


Рис. 13. Расчетные излучения SV -(а,б) и SH -(в,г)-поляризованных волн, создаваемые тем же токопроводом ЭМАП (см. рис. 11 и 12) на частотах 1 МГц (а, в) и 2 МГц (б, г)

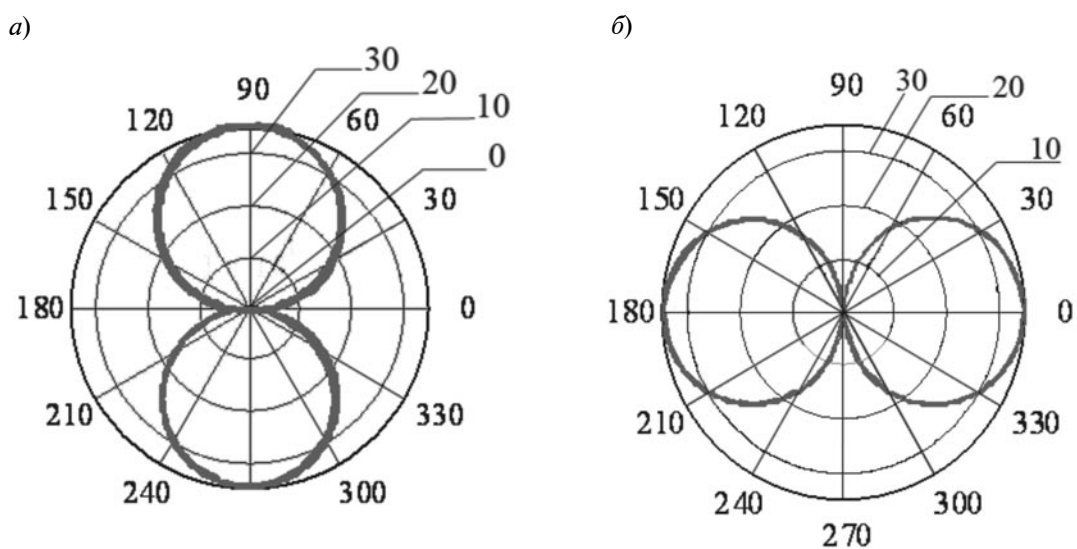


Рис. 14. Диаграммы направленности излучения SV -(а) и SH -(б) поляризованных волн, излучаемых токопроводом длиной 30 мм на частоте 1 МГц в двух плоскостях: по направлению токопровода (а) и по нормали к поверхности объекта контроля (б)

Таблица 3

Расчетные типовые характеристики прямого ЭМАП

Параметр	Значение
Количество параллельных токопроводов	36
Диаметр токопровода, мм	0,2
Длина токопровода, мм	15
Толщина медного экрана, мм	0,2
Размеры поперечного сечения экрана, мм	11,2 × 15,0

Примечание: Токопроводы питаются током генератора синфазно

сложность задачи, то качественное совпадение теоретических и экспериментальных закономерностей здесь налицо. На рис. 14 приведены расчетные характеристики указанного токопровода в двух плоскостях: первая совпадает с поверхностью образца контроля и расположена по направлению токопровода, вторая перпендикулярна этой поверхности и расположена внутри образца.

Таким образом, если максимум излучения *SV*-поляризованных волн соответствует нормали к длине токопроводов, то максимум *SH*-поляризованных – направлению токопроводов. При этом направленность излучения определяется не только частотой, но и длиной токопроводов, параметрами материалов, размерами экранов и магнитопроводов.

Кроме описанных объемных волн поперечной поляризации, указанный токо-

провод излучает также волны продольные, рэлеевские, головные, конусные и подповерхностные. Их анализ выходит за пределы данной статьи. В случае работы ЭМА-преобразователя с объектами ограниченных размеров, таких как пластины, трубопроводы, рельсы и др., параметры указанных изделий оказывают решающее влияние на все характеристики излучаемых и принимаемых преобразователем волн. В связи с указанными сложностями подобный анализ представляет собой отдельную серьезную задачу.

В целом можно констатировать, что именно из токопроводов, обладающих описанными характеристиками, формируется подавляющая часть современных ЭМАП. И от того, каким образом они располагаются на поверхности контролируемых изделий, зависят все параметры приборов, использующих ЭМАП.

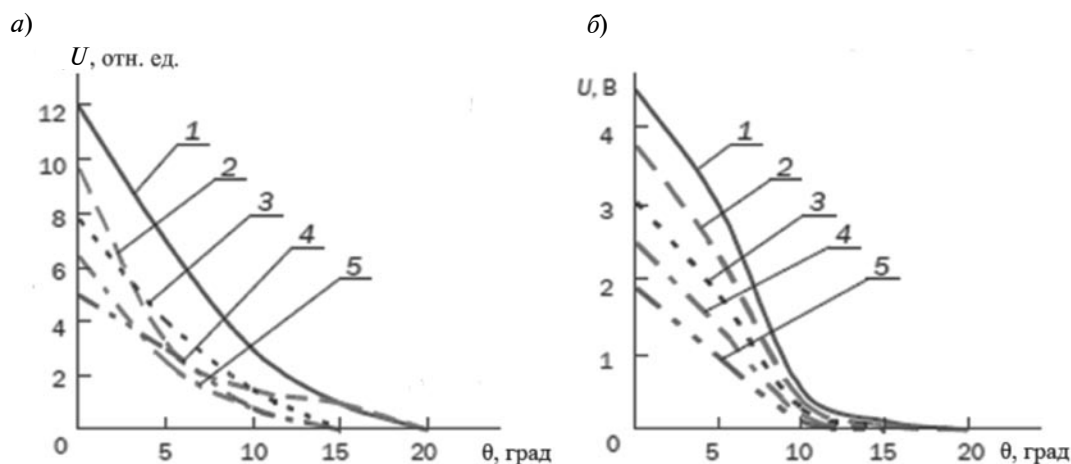


Рис. 15. Расчетная (а) и экспериментальная (б) диаграммы направленности прямого ЭМАП, работающего на частоте 1 МГц, для различных значений величины зазора, мм: 0,65 (1), 1,65 (2), 2,65 (3), 3,65 (4), 4,85 (5); *U* – напряжение на выходе усилительного тракта

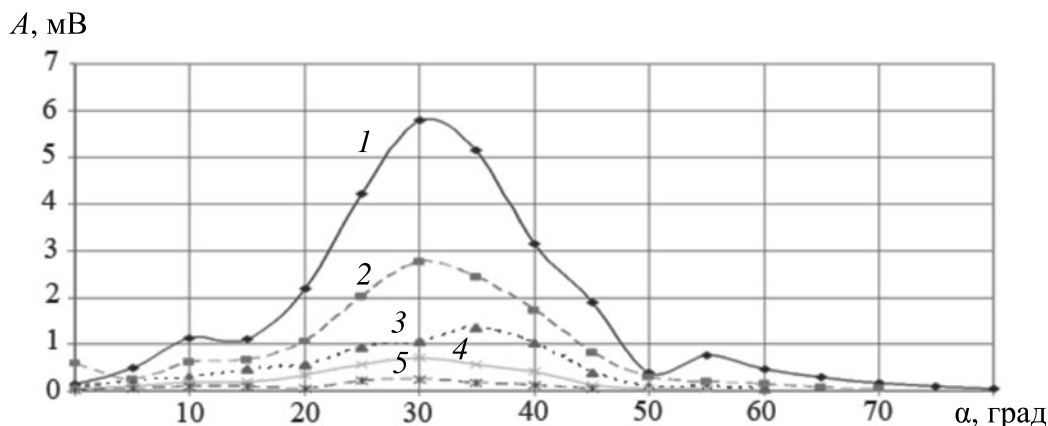


Рис. 16. Экспериментальные диаграммы направленности наклонного ЭМАП, состоящего из трех меандров (расстояние между их токопроводами – 5,4 мм) на частоте 0,6 МГц при различных значениях величины зазора, мм: 0 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5)

Так, если токопроводы питаются током генератора синфазно, то они излучают (и принимают) ультразвуковые сигналы по нормали к поверхности контроля. Типовые характеристики излучения таких преобразователей приведены в табл. 3 и на рис. 15.

В поперечном направлении направленность преобразователей определяется известной формулой

$$L = \lambda / \sin \theta_0,$$

где λ – длина поперечной акустической волны; θ_0 – угол первого минимума излучения.

Аналогичные токопроводы применяются и для конструирования наклонных ЭМАП, но к генератору тока они подключаются в противофазе друг к другу. При этом максимум диаграммы направленности θ определяется расстоянием d между соседними токопроводами и устанавливается с помощью формулы $\sin \theta = \lambda/2d$. Для большей чувствительности этот угол стараются приблизить к значению угла

$$\theta = \arcsin(c_r/c),$$

где c_r, c – скорости поперечных и продольных волн (соответственно) в материале контроля.

Ширина указанных максимумов определяется многими конструктивными особенностями преобразователей. Типичные

диаграммы направленности таких ЭМАП представлены на рис. 16. Под «меандром» в данном случае подразумеваются два токопровода, подключенных противофазно. Из результатов эксперимента следует, что с увеличением зазора между преобразователем и объектом контроля амплитуда сигналов существенно убывает, однако максимум направленности и его ширина при этом меняются в меньшей степени.

Влияние количества меандров на направленность излучения. Далее рассмотрим, как изменяется направленность излучения ЭМАП при использовании различного числа меандров (рис. 17 и 18).

На рис. 18 показаны расчетные характеристики тех же излучений (см. рис. 17), полученных при величине зазора 1 мм.

Из сопоставления результатов, приведенных на рис. 17 и 18, следует, что расчетные характеристики излучения в целом соответствуют экспериментальным, несмотря на то, что при расчетах зачастую приходилось применять оценочные значения многих электрических и магнитных параметров материалов.

Заключение

В результате проведенных исследований можно констатировать, что имеющийся теоретический аппарат с точностью, достаточной для практических целей, способен служить хорошим подспорьем при про-

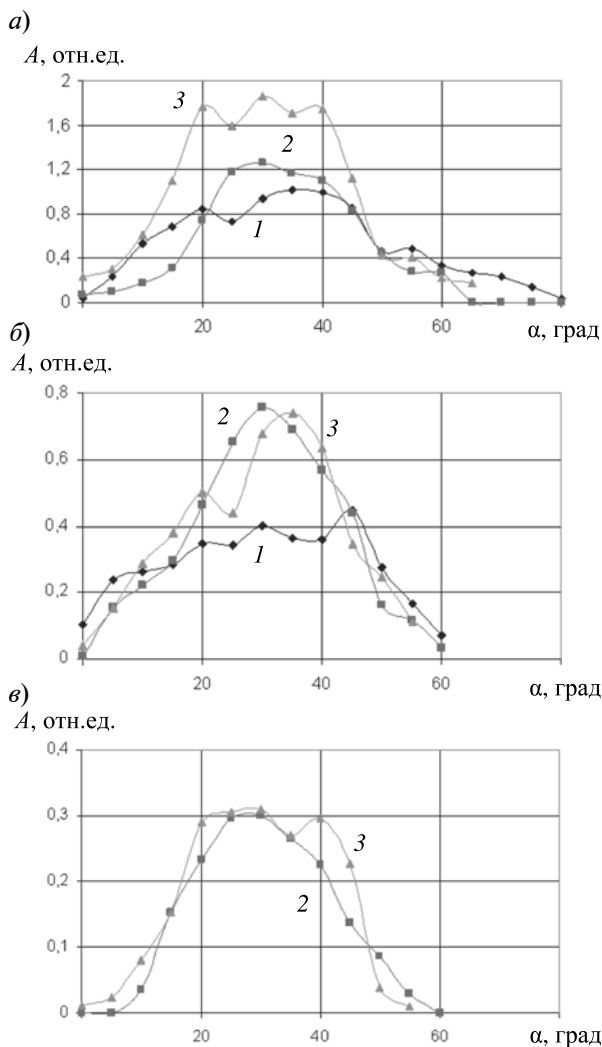


Рис. 17. Экспериментальные зависимости диаграмм направленности ЭМАП от значений величины зазора ($a - в$) и от числа составляющих ЭМАП меандров (1 – 3) на частоте 0,6 МГц. Величина зазора, мм: 0 (а), 1 (б), 2 (в); количество меандров: 1 (1), 2 (2), 3 (3)

ектировании надежных электромагнитно-акустических преобразователей.

Важно отметить, что перспективы развития ультразвукового контроля с применением ЭМАП весьма обширны. Такие преобразователи особенно эффективны при экспресс-контроле таких протяженных объектов, как трубопроводы, пластины, различные емкости и рельсы. Более того, без применения ЭМАП осуществить такой контроль в полной мере и с достаточной

надежностью вряд ли возможно. Однако данная задача далеко не является простой, поэтому без тесного взаимодействия бизнеса, теоретических и экспериментальных исследований, а также практических испытаний ее невозможно разрешить должным образом.

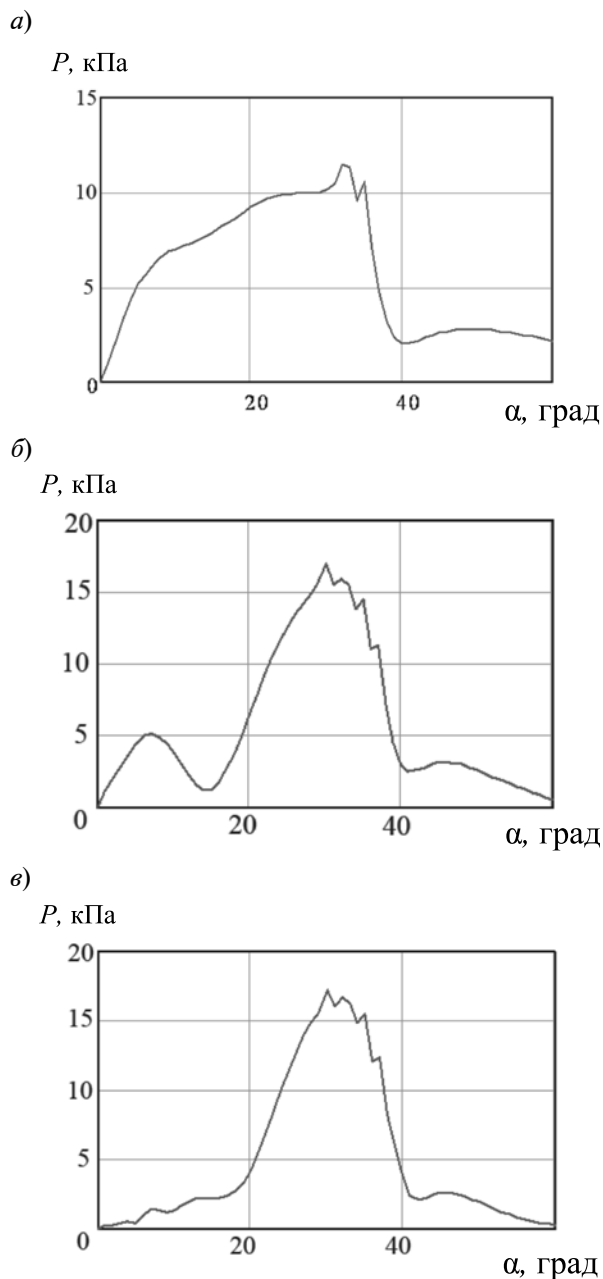


Рис. 18. Расчетные характеристики направленности излучения ЭМАП, состоящих их разного числа меандров: 1 (а), 2 (б), 3 (в). Величина зазора – 1 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чабанов В.Е., Жуков В.А.** Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 1 (59). С. 36–43.
2. **Чабанов В.Е.** Лазерный ультразвуковой контроль материалов. Л.: ЛГУ, 1986. 232 с.
3. **Горделий В.И., Чабанов В.Е., Неволин О.В.** Исследование теории и особенностей работы вихретоковых электромагнитно-акустических преобразователей // Материалы XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». СПб. 2002. С. 22–25.
4. **Чабанов В.Е., Горделий В.И.** Изучение нормальных волн, распространяющихся в трубопроводах, излучаемых ЭМА-преобразователями // 1-я Национальная научно-техническая конференция и выставка. Кишинёв, 21–24 октября 2003. С. 26–33.
5. **Чабанов В.Е., Горделий В.И.** Наклонные электромагнитно-акустические преобразователи и анализ их работы // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2004. № 2. С. 40–45.
6. **Горделий В.И., Чабанов В.Е.** Результаты экспериментального изучения влияния экранов на амплитуды и характеристики направленности прямых ЭМА-преобразователей // «Неразрушающий контроль и диагностика», ХУ11 Российская научно-техническая конференция. Екатеринбург, 2005. С. 123.
7. **Чабанов В.Е., Горделий В.И.** Особенности SH-поляризованных акустических волн, генерируемых электромагнитно-акустическими преобразователями // «Неразрушающий контроль и диагностика в промышленности». Тезисы докладов 5-й Международной конференции. М.: 2006. С. 132.
8. **Ермолов И.Н.** Теория и практика ультразвукового контроля. М: Машиностроение, 1981. 240 с.
9. **Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И.** Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие. Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1991. 283 с.
10. **Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.** Неразрушающий контроль. В 7 тт. Т. 3. Ультразвуковой контроль: Справочник. М.: Машиностроение, 2004. 860 с.
11. **Шкарлет Ю.М.** Бесконтактные методы ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1974. 56 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧАБАНОВ Владимир Емельянович — доктор технических наук, профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vtchabanov@mail.ru

ЖУКОВ Виктор Александрович — ассистент кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vic-zhukoff@yandex.ru

Chabanov V.E., Zhukov V.A. CALCULATION AND DESIGN OF EMAT FOR ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TESTING.

The article focuses on the design of electromagnetic acoustic transducer (EMAT) for ultrasonic nondestructive testing of metal products. Some theoretical calculations of a number of the inverter parameters have been carried out; the influence of the screening, the transducer sensitivity dependence on the gap between EMAT and the testing surface have been considered. The article also includes theoretical calculations of magnetic field distribution and parameters of EMAT magnetic system. The measurement results of radiation patterns of direct and oblique EMAT for a number of wave types at different frequencies are given. The experimental and theoretical data were compared. The EMAT radiation directivity dependence on the number and the relative positions of the conductors carrying a current is also presented. The results of those studies can be used in optimizing the EMAT parameters in their design.

ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE TESTING, ELECTROMAGNETIC ACOUSTIC TRANSDUCER (EMAT), ULTRASONIC WAVE, SV- AND SH-POLARIZED WAVES, DIRECTIONAL DIAGRAM.

REFERENCES

1. **Chabanov V.E., Zhukov V.A.** Osobennosti ul'trazvukovogo kontrolya s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovateley. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2013, No. 1 (59), pp. 36-43. (rus)
2. **Chabanov V.E.** *Lazernyy ul'trazvukovoy kontrol' materialov*. Leningrad, LGU, 1986, 232 p. (rus)
3. **Gordeliy V.I., Chabanov V.E., Nevolin O.V.** Issledovanie teorii i osobennostey raboty vikhretokovykh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovateley. *Materialy XVI Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika"*. St. Petersburg, 2002, pp. 22-25. (rus)
4. **Chabanov V.E., Gordeliy V.I.** Izuchenie normal'nykh voln, rasprostranyayushchikh v truboprovodakh, izluhaemykh EMA-preobrazovatelyami. *1-ya Natsional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya i vystavka*. Kishinyov, 21-24 oktyabrya 2003, pp. 26-33. (rus)
5. **Chabanov V.E., Gordeliy V.I.** Naklonnyye elektromagnitno-akusticheskie preobrazovateli i analiz ikh raboty. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'*, No. 2, 2004, pp. 40-45. (rus)
6. **Gordeliy V.I., Chabanov V.E.** Rezul'taty eksperimental'nogo izucheniya vliyaniya ekranov na amplitudy i kharakteristiki napravlenosti pryamykh EMA-preobrazovateley. «*Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika*», 17^h Rossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Ekaterinburg, 2005, P. 123. (rus)
7. **Chabanov V.E., Gordeliy V.I.** Osobennosti SH-polyarizovannykh akusticheskikh voln, generiruemyykh elektromagnitno-akusticheskimi preobrazovatelyami. «*Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika v promyshlennosti*», *Tezisy dokladov 5-y Mezhdunarodnoy konferentsii*. Moscow, 2006, P. 132. (rus)
8. **Ermolov I.N.** *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya*. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 240 p. (rus)
9. **Ermolov I.N., Aleshin N.P., Potapov A.I.** *Nerazrushayushchiy kontrol'. V 5 kn. Kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya: Prakt. posobie*. Pod red. V.V. Sukhorukova. Moscow, Vyssh. shk., 1991, 283 p. (rus)
10. **Ermolov I.N., Lange Yu.V.** *Nerazrushayushchiy kontrol'. V 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol': Spravochnik*. Moscow, Mashinostroenie, 2004, 860 p. (rus)
11. **Shkarlet Yu.M.** *Beskontaktnye metody ul'trazvukovogo kontrolya*. Moscow, Mashinostroenie, 1974, 56 p. (rus)

THE AUTHORS

CHABANOV Vladimir E.

St. Petersburg State Polytechnical University,
29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vtchabanov@mail.ru

ZHUKOV Victor A.

St. Petersburg State Polytechnical University,
29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
vic-zhukoff@yandex.ru