



## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ НАКЛОННЫХ ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. Е. ЧАБАНОВ

*Описаны основные трудности, возникающие при проектировании наклонных электромагнитно-акустических преобразователей, а также способы повышения их чувствительности и помехозащищенности.*

*The main difficulties arising in design of electromagnetoacoustic transducers are described, as well as the methods to increase their sensitivity and noise protection.*

Необходимость разработки надежных электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) обусловлена, в первую очередь, тем, что традиционный УЗК на основе пьезопреобразователей не позволяет осуществлять контроль изделий бесконтактно, в условиях высоких и низких температур, затруднен при дефектоскопии движущихся изделий и проч. Это ограничивает сферу экономически оправданного и технически достоверного контроля с помощью ультразвука, затрудняет применение его при поточном производстве, препятствует автоматизации контроля. ЭМАП дают возможность во многом разрешить указанные проблемы, однако их чувствительность, помехоустойчивость, избирательность сигналов, особенно при наклонном контроле оставляют желать лучшего.

Это объясняется, в первую очередь, недостаточной теоретической проработкой этой проблемы. Поскольку параметров, от которых зависит работа ЭМА-преобразователей, много, то только экспериментальная оптимизация конструкции преобразователей, зависящая от их корреляции, становится непростой и дорогостоящей. Некоторые параметры не могут быть получены путем эксперимента, а поэтому хорошо работающие ЭМАП в большей мере обязаны своей конструкции таланту и искусству разработчиков, чем надежной теории, экспериментальному или аналитическому анализу их работы.

Теоретические исследования ЭМАП осуществлялись многими исследователями, и прежде всего авторами работ [1–6]. Вместе с тем некоторые важнейшие особенности их работы до настоящего времени остаются не выясненными. Так, не установлено воздействие на характеристики возбуждаемого звука экранов (магнитопроводов), их параметров, влияние различных конструктивных зазоров, неизбежных при изготовлении преобразователей. Не определено в достаточной мере влияние формы импульсных сигналов на характеристики генерируемых акустических волн и т. д. И хотя проектирование прямых ЭМАП обычно не встречает особых трудностей, разработка надежно работающих высокочувствительных и помехозащищенных наклонных ЭМАП в настоящее время является сложной задачей.

Авторами разработан физико-математический аппарат, применение которого позволяет во многом процесс проектирования требуемых ЭМАП сво-

дить к численному моделированию их конструкции. Его особенности описаны в статьях [7, 8]. Основные положения теории авторами проверены неоднократно не только численно, но и экспериментально, что подтвердило адекватность получаемых с их помощью выводов. Это позволило установить некоторые принципы проектирования надежно работающих прямых и наклонных ЭМАП, выявить основные требования к их магнитному и электронному трактам.

Некоторые из них приводятся в настоящей работе. В частности, установлены следующие положения

1. Проектировать прямые ЭМАП, катушка которых состоит из прямых синфазно нагруженных токопроводов, сравнительно несложно. Тем не менее, трудности имеются и здесь. В частности, они заключаются в необходимости оптимизации магнитной системы, чтобы индукция постоянного магнитного поля в наименьшей степени зависела от зазора между магнитопроводом и поверхностью контролируемого изделия (данная трудность характерна и для наклонных ЭМАП), а также в выборе рабочей частоты, при которой достигается требуемая чувствительность контроля, и в то же время сохраняются приемлемые соотношения сигнал/помеха. Эта проблема является достаточно острой, поскольку амплитуды излучаемых и принимаемых ЭМАП сигналов оказываются тем большими, чем выше рабочая частота. В то же время, отражающая способность дефектов повышается с ростом частоты.

При проектировании ЭМАП важную роль играет правильный подбор соотношения длины катушки и поперечных размеров магнитопровода, устанавливающих ширину диаграмм направленности. Кроме того, на амплитуды сигналов также существенно влияет материал магнитопровода (экрана). При этом оказывается, что чем меньше их электропроводность, тем выше при прочих равных условиях амплитуды излучаемых и принимаемых сигналов. На амплитуду и ширину «мертвой зоны» существенное воздействие оказывают форма и длительность импульсных сигналов, однако конкретные их значения могут быть установлены только путем численного или практического эксперимента.

2. ЭМАП, предназначенные для работы под наклонными углами, работают устойчиво только в том случае, если максимумы их излучения со-

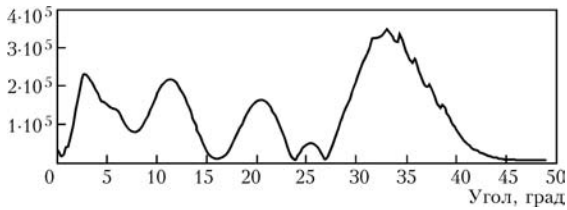


Рис. 1. Расчетная характеристика направленности типового ЭМАП (Па), спроектированного без компенсации паразитных углов излучения, на рабочей частоте 0,9 МГц, при наличии зазора между преобразователем и поверхностью изделия, равного 0,5 мм

ответствуют углам 30... 40° и 55... 60°. Причем, устойчивость первого максимума обеспечивается влиянием третьего критического угла излучения (при котором  $\theta = \arcsin(c_t/c)$ , где  $c_t$  и с соответственно скорости распространения поперечной и продольной волны в материале контроля). Устойчивость второго максимума обусловлена тем, что, с одной стороны, путем вариации базы диполей и длины волны можно добиться максимума сигнала при требуемом рабочем угле, а с другой — имеется явно выраженное ограничение по излучению поперечных волн сосредоточенными источниками, обойти которое невозможно [9]. На всех других углах максимумы излучения неустойчивы и способны перемещаться в пространстве в зависимости от вариации частоты, длительности сигналов, размеров всевозможных зазоров и проч.

**3.** ЭМА-преобразователи, работающие под наклонными углами, способны одновременно с сигналами, излучаемыми и принимаемыми под описанными выше рабочими углами, генерировать и фиксировать также сигналы со значительными амплитудами под меньшими углами. Это обусловлено тем, что интерферировать способны не только импульсы, излучаемые соседними токопроводами, но и более дальними. Это ведет к расширению диаграмм направленности и понижает чувствительность, помехозащищенность ЭМАП. Данная проблема решается путем подбора материалов экрана, характером намотки катушек, а также выбором нужной формы импульсного сигнала. Это можно проделать с помощью численного эксперимента с применением теории ЭМАП, разработанной авторами данной статьи с последующей проверкой полученных рекомендаций экспериментально (рис. 1, 2).

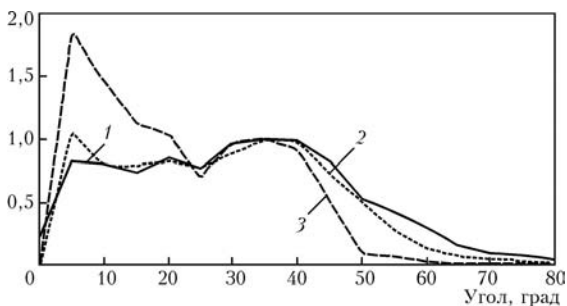


Рис. 2. Сравнительные нормированные экспериментально измеренные диаграммы направленности того же преобразователя (вольты на выходе усилителя) при различных зазорах, мм: 1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2

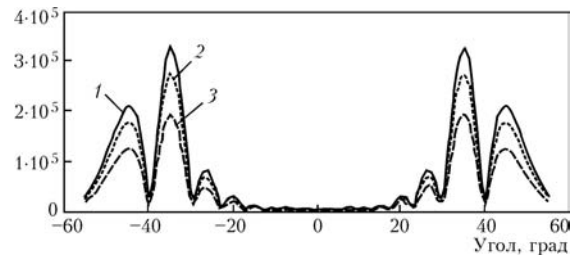


Рис. 3. Расчетные диаграммы направленности излучения оптимизированного ЭМА-преобразователя, предназначенного для работы под углом 35° при различных зазорах, мм: 1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2

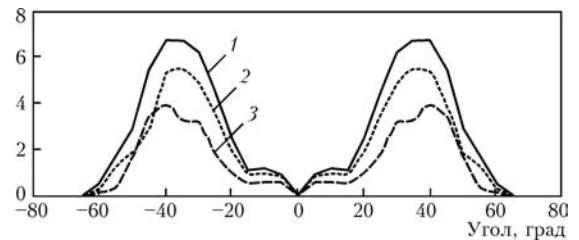


Рис. 4. Экспериментально измеренные и статистически обработанные характеристики направленности излучения того же ЭМАП при тех же зазорах (вольты на выходе усилителя) (зазоры соответствуют показанным на рис. 3)

На рис. 3, 4 показаны оптимизированные характеристики ЭМАП, работающего на той же частоте.

Характерно, что тот же самый преобразователь, возбужденный на другой частоте, уже способен надежно работать и под другим углом. Его расчетные и экспериментальные характеристики показаны на рис. 5, 6.

Нетрудно видеть, что и здесь результаты расчета и эксперимента качественно совпадают. А провалы, наблюдаемые при расчетах, как правило, плохо наблюдаются в эксперименте. Важно отметить, что если амплитуды паразитных сигналов, излучаемых обычным ЭМАП (см. рис. 2), с увеличением зазора растут непропорционально, то у оптимизированных вплоть до зазора 2 мм такого не происходит.

**4.** Наклонные ЭМАП одновременно излучают (и принимают) сигналы симметрично относительно нормали к поверхности контроля. Значительное нарушение этой симметрии возможно только при использовании нескольких генераторов, питающихся с различными фазами тока разные токопроводы. Вместе с тем можно добиться этого и регулированием формы импульсного сигнала, подбором материала и выбором ширины экрана, характером намотки катушки, неравномерностью используемой в ней базы диполей и др. В частности, такой пре-

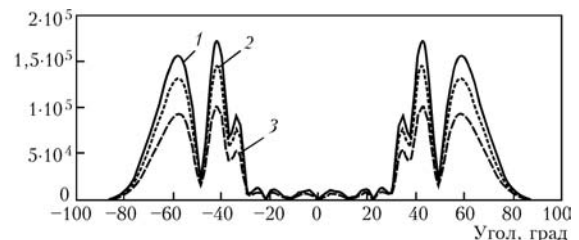


Рис. 5. Расчетная характеристика оптимизированного ЭМАП при его работе на другой частоте (зазоры те же)

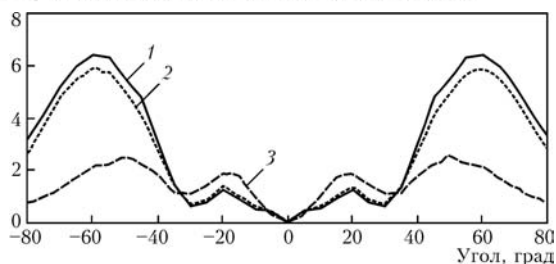


Рис. 6. Экспериментальная характеристика оптимизированного ЭМА при его работе на другой частоте (зазоры те же)

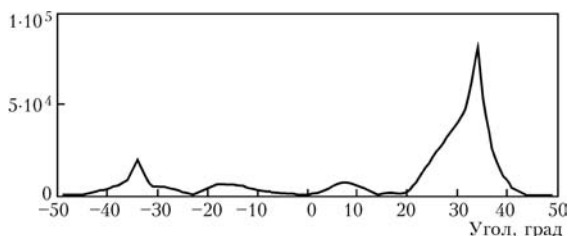


Рис. 7. Акустическое поле ЭМАП с односторонним излучением

образователь был смоделирован численным путем и его характеристика показана на рис. 7.

5. При проектировании наклонных ЭМАП принцип моделирования не работает. Поэтому для каждого случая, для всякой рабочей частоты или требуемой направленности приходится подбирать собственные параметры преобразователя.

На рис. 8 показан внешний вид некоторых из разработанных ЭМАП.

1. Буденков Г. А., Гуревич С. Ю. / Дефектоскопия. — 1981. — № 5. — С. 5–33.

НПП «ВИГОР»,  
Москва



Рис. 8. Некоторые типы ЭМАП, спроектированных в НПП «ВИГОР» и работающих в созданных им установках НК

2. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. — М: Информприбор, 1974. — 57 с.  
3. Dobbs R. Phys. Acoustics. — V.10. — Academic Press. New York and London, Ch.3. — P. 1073.  
4. Комаров В. А. Квазистационарное ЭМА-преобразование в металлах. — Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986.  
5. Шубаев С. Н. Возбуждение упругих волн в металлическом проводнике электромагнитным методом // Дефектоскопия. — 1974. — № 4. — С. 45–55.  
6. Ильин И. В. К вопросу о возбуждении объемных волн в ферромагнитных металлах электромагнитным акустическим преобразователем // Там же. — 1987. — № 12. — С. 13–28.  
7. Горделий В. И. Теоретическое и экспериментальное исследование ЭМА-преобразователей / Тр. 4-й Нац. науч.-техн. конф. и выставки «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 2003. — С. 312–317.  
8. Чабанов В. Е., Горделий В. И. Наклонные электромагнитно-акустические преобразователи и анализ их работы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 2. — С. 40–45.  
9. Чабанов В. Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. — Л: МГУ, 1986. — 231 с.

Поступила в редакцию  
22.02.06



**2-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И  
ВЫСТАВКА «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ  
КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ»**

19–20 октября 2006 года

Белорусско-Российский университет и Институт прикладной физики НАН Беларуси 19-20 октября 2006 года проводят 2-ю международную конференцию «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Одновременно с конференцией Белорусская ассоциация НКИТД организует выставку приборов и систем контроля.

**Основная тематика**

1. Дефектоскопия материалов и промышленных изделий.
2. Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов и изделий.
3. Контроль геометрических параметров объектов.
4. Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов.
5. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле.

**Круглый стол.** Подготовка кадров и сертификация персонала в области неразрушающего контроля и технической диагностики.

**Контактные адрес и телефоны:**

тел.: (+375) 222 225212; (+375) 222 236422; fax: (+375) 222 225821;  
E-mail: [konf@bru.mogilev.by](mailto:konf@bru.mogilev.by) [sss.bru@tut.by](mailto:sss.bru@tut.by)