

В МИРЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

АВТОРСКИЙ ЭКЗЕМПЛЯР

ЕЖЕКВАРТАЛЬНОЕ ЖУРНАЛЬНОЕ ОБОЗРЕНИЕ

№ 4(26) ДЕКАБРЬ 2004

НЕЛИНЕЙНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ВАГОННЫХ КОЛЕСНЫХ ПАРАХ

Nonlinear Acoustic Technique for the Crack Detection in the Railway Car Wheel Sets

A. L. Matveev, V. E. Nazarov, V. Yu. Zaitsev, A. I. Potapov, E. S. Erilin, S. V. Sorokin, A. L. Fogel

The new technique for the crack detection in the railway car wheel sets is introduced along with the implementation principles. The technique is based on the non-linear effects occurring while the different frequency components of an ultrasonic signal interact in the solid containing the discontinuity. The setup used for the trials and the results obtained on the car wheel set shafts and disks are described, said results reflect the feasibility of the automatic cracks detection.

Об авторах

Сотрудники Института прикладной физики РАН:



Матвеев Александр Львович
С. н. с., к. ф.-м. н.

Назаров Вениамин Евгеньевич
В. н. с., д. ф.-м. н.

Зайцев Владимир Юрьевич
В. н. с., д. ф.-м. н.

Потапов Андрей Иосифович
Научный сотрудник

Сотрудники Нижегородского
отделения ВНИИЖТ:



Ерилин Евгений Сергеевич
директор, к. т. н.

Сорокин Сергей Вениаминович
Ведущий инженер

Фогель Александр Львович
Заведующий отделом, к. т. н.

Введение

Несмотря на разнообразие существующих методов и приборов, задача НК вагонных колесных пар на всех стадиях ремонтных работ не может считаться решенной. Как известно, в настоящее время для НК вагонных осей и колес используются средства ультразвукового, магнитопорошкового и феррозондового контроля [1, 2]. Сочетание этих хорошо развитых методов НК достаточно для обнаружения практически всех видов дефектов в колесных парах. Однако их комплексное использование в условиях стопроцентного контроля весьма трудоемко, а значительная субъективность в принятии решения об отбраковке изделий при этом сохраняется.

В статье рассматривается новый метод НК, позволяющий, по мнению авторов, повысить эффективность обнаружения дефектов в колесных парах.

Физические основы метода

Суть предлагаемого метода нелинейного акустического контроля состоит в следующем. При прохождении высокочастотного акустического излучения через упругую среду, включающую трещину, и при одновременном возбуждении в среде низкочастотных акустических колебаний на собственных частотах происходит модуляция высокочастотной волны низкочастотными упругими колебаниями. Модуляция звука звуком при наличии трещины приводит к образованию акустических волн комбинационных частот, которые могут быть сравнительно легко измерены. В отсутствие трещины акустические волны на комбинационных частотах не возбуждаются, что является признаком отсутствия дефекта.

В качестве пояснения принципиального различия традиционных линейных

и нелинейных методов акустического НК можно привести следующий пример. При линейной эхо-локации объекта, как известно, в рассеянном от дефекта сигнале присутствуют только те частотные компоненты, которые изначально были в спектре зондирующего сигнала. Если же рассеивающий дефект нелинеен (а трещины и подобные им несплошности являются именно нелинейными дефектами), то в спектре рассеянного сигнала присутствуют не только спектральные составляющие, которые исходно присутствовали в спектре зондирующей волны, но и возникают новые комбинационные частоты. Именно благодаря наблюдению в эхо-сигнале этих комбинационных частот оказывается возможным эффективно обнаружить трещину, расположенную в любом месте контролируемого изделия, как внутри, так и вблизи его границы. Это связано с тем, что граница является линейным рассеивателем, а потому даже сильный рассеянный сигнал от границы в отличие от линейных методов не может замаскировать новые спектральные компоненты, возникшие за счет нелинейности трещины. Следует отметить, что, наряду с высокой эффективностью обнаружения трещин вблизи границ, нелинейный метод в принципе не может выявлять округлые дефекты типа пор, раковин, шлаковых включений, если они не сопровождаются трещинами.

Нелинейные акустические эффекты для целей выявления трещин в деталях подвижного состава до настоящего времени не использовались. Согласно традиционному мнению, заметные отклонения от линейного закона Гука, описывающего упругие материалы, могут проявляться только при больших деформациях, сравнимых с порогом разрушения. Однако такой подход соответствует действительности лишь для однородных материалов, не содержащих микроструктурных дефектов. В противоположность этому, в материалах с дефектами структуры (т. е. содержащими трещины, расслоения и т. д.) нелинейные компоненты в спектре акустического отклика могут заметно проявляться уже при небольших деформациях (порядка $10^{-8} - 10^{-5}$), характерных для зондирую-

щих волн, используемых в НК. При этом важно подчеркнуть, что, несмотря на сильное различие нелинейных свойств дефектного и бездефектного изделий, их линейные характеристики остаются практически неразличимыми. Именно поэтому традиционные методы диагностики часто оказываются недостаточно эффективными, особенно на начальном этапе развития различных дефектов, в частности микротрещин. Перспективность нелинейных акустических методов НК в последние годы привлекает повышенное внимание и зарубежных исследователей (в США, Франции, Германии и т. д.), где в настоящее время значительно активизированы работы в этом направлении [3–7].

Пояснить физическую природу акустической нелинейности трещины удобно на примере прохождения звука через упругий контакт шероховатых поверхностей двух твердых тел. Для этого рассмотрим основной нелинейный эффект, заключающийся в модуляции высокочастотной акустической волны низкочастотными вибрациями (модуляция звука звуком). Пусть слабая продольная акустическая волна проходит через упругий контакт двух шероховатых поверхностей, которые подвержены воздействию сильного низкочастотного внешнего напряжения. В зависимости от фазы низкочастотного колебания площадь контакта этих поверхностей будет изменяться, а именно: в фазе сжатия площадь контакта возрастает по сравнению с начальной, а в фазе разрежения – уменьшается. В результате амплитуды прошедшей и отраженной акустических волн будут также изменяться в соответствии с изменением площади контактирующих шероховатых поверхностей, а прошедшая и отраженная волны приобретут амплитудную модуляцию с частотой внешнего воздействия. Аналогичным образом может быть объяснено и искажение монохроматической волны, проходящей через такой контакт. В этом случае изменение площади контакта создается уже самой волной. Это приводит к тому, что амплитуда прошедшей волны в фазе сжатия становится больше, чем в фазе разрежения, при этом в ее спектре появляются составляющие на частотах, кратных частоте исходной волны.

Реализация метода

Для исследований нелинейного акустического метода НК были разработаны экспериментальные установки, позволяющие проводить автоматизированный процесс обнаружения трещин в осях и дисках колесных пар, находящихся в свободном состоянии, на ремонтных предприятиях (рис. 1).

Установка состоит из следующих основных блоков и узлов: генератора 1, усилителя мощности 2 и излучающего ПЭП ультразвукового синусоидального сигнала с устройством закрепления 3; приемного ПЭП с устройством закрепления 4; приемного усилителя 5; аналого-цифрового преобразователя (АЦП) принимаемого сигнала и вычислительного устройства (ПК) с пакетом программного обеспечения 6. Кроме этого в комплект установки входят: ударное устройство 8; подставка для закрепления оси или диска колесной пары в процессе их контроля 7; эталонные образцы для настройки и калибровки установки.

Монохроматический непрерывный сигнал ультразвуковой частоты подается на излучающий ПЭП, приклеенный к торцевой поверхности вагонной оси либо к внутренней боковой поверхности обода колеса. В качестве приемного элемента может использоваться широкополосный измерительный ПЭП, работающий в диапазоне частот от 20 до 100 кГц. Он также приклеивается к тому же или к противоположному торцу вагонной оси, либо к внутренней боковой поверхности обода на противоположном конце диаметра колеса.

Контролируемая ось устанавливается на двух пластмассовых опорах, расположенных на расстоянии примерно равным 0,2 длины от каждого края оси. Ударное устройство представляло собой электромагнит, который по задаваемому электрическому сигналу, производит удар металлическим бойком массой 2 кг по центру оси в вертикальной плоскости. Способ закрепления оси и выбор точки удара определяются из условия максимально эффективного возбуждения основных мод собственных колебаний вагонной оси, которые заставляют колебаться поверхности трещины. Те же соображения учитываются при выборе условий закрепления и точки удара колеса.

Принцип действия установки основан на том, что появление трещины в оси или колесе сильно увеличивает его акустическую нелинейность. При распро-

странении акустических волн происходит нелинейное взаимодействие ультразвуковой волны, создаваемой излучателем, и колебаний на собственных частотах, возбуждаемых ударным воздействием, в результате чего происходит генерация волн на комбинационных частотах. Принятые ПЭП акустические сигналы после усиления поступают в компьютер для обработки, в результате которой рассчитывается коэффициент нелинейности изделия. При превышении этим коэффициентом порогового уровня, соответствующего бездефектной оси или колесу, контролируемая деталь признается дефектной.

Вычисление коэффициента нелинейности контролируемой оси, являющееся критерием отбраковки, выполняется по следующему алгоритму. Для каждой частоты ультразвуковой волны из предварительно заданного диапазона производится ударное возбуждение оси или колеса, и принятая акселерометром реализация сигнала регистрируется в памяти компьютера. Частота дискретизации сигнала при аналого-цифровом преобразовании равна 200 кГц, а общая длина реализации равна 1 с. Из измеренной реализации выбирается временной интервал фиксированной длительности (200 – 400) мс, внутри которого амплитуда сигнала находится в заданных пределах. По выбранному временному ряду вычисляется частотный спектр сигнала, а затем по нему определяются амплитуды A_{nm} частотных компонент, соответствующих возбужденным ударом выбранным собственным упругим колебаниям в оси или в диске. Из того же спектра определяется амплитуда A_n частотной составляющей, отвечающей ультразвуковой волне в оси или в диске, а также определяются амплитуды частотных компонент, соответствующих вторичным волнам на комбинационных частотах, генерируемых на трещине. Все указанные выше вычисления повторяются для каждой ультразвуковой частоты из выбранного диапазона. По окончании измерений коэффициент нелинейности для контролируемой оси или диска колеса вычисляется по формуле:

$$K_{HT} = (1/M) \left\{ \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N (A_{nm}^- + A_{nm}^+) \right] / A_m \sum_{n=1}^N A_{nm} \right\},$$

где:

K_{HT} – коэффициент нелинейности;

$m = 1...M$ – номера частот ультразвуковых волн;

$n = 1...N$ – номера собственных частот упругих колебаний;

M – число используемых собственных частот упругих колебаний;

N – число выбранных частот ультразвуковых волн;

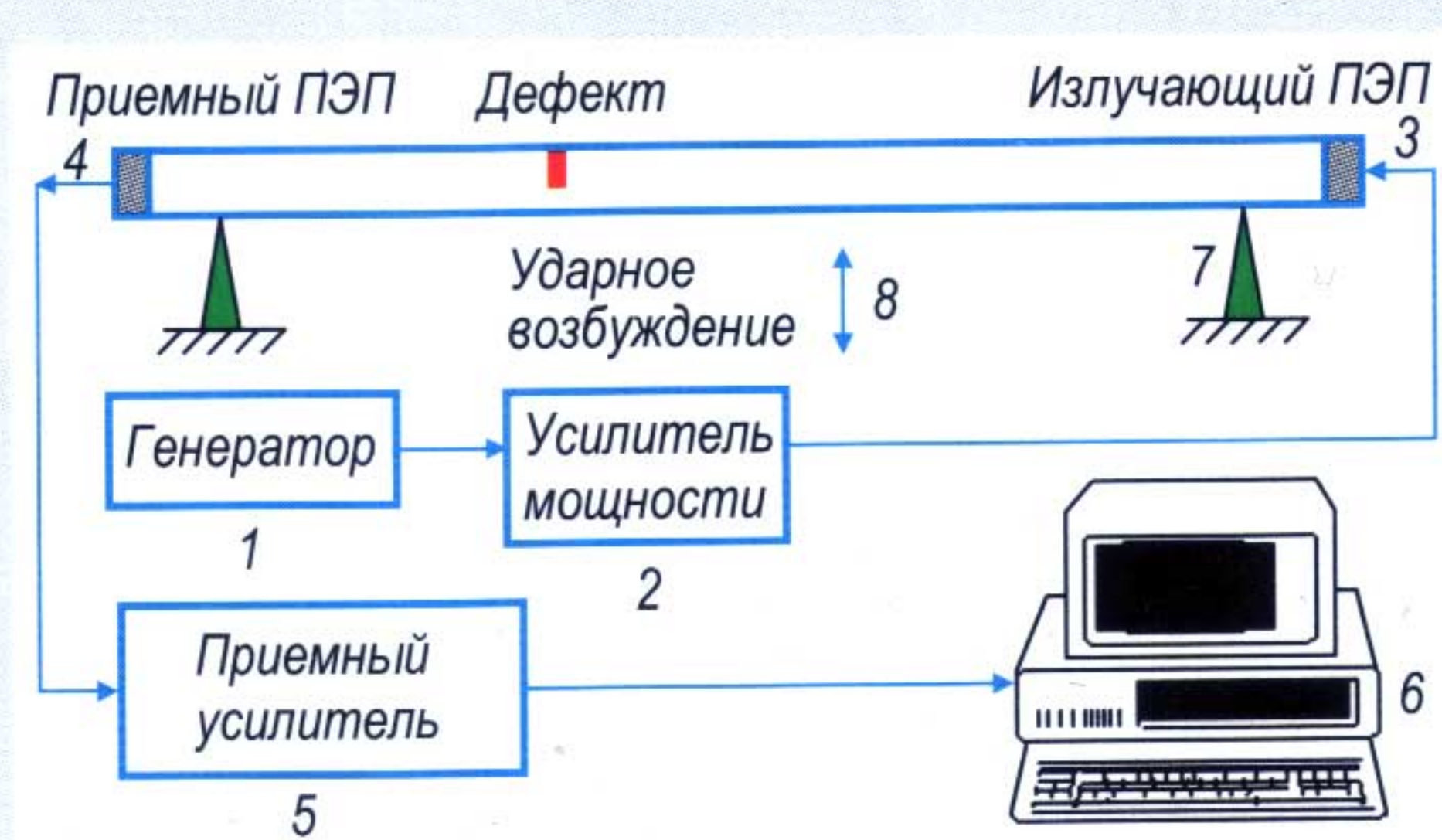


Рис. 1. Блок-схема установки для нелинейного акустического НК трещин в вагонных осях

A_{nm} – амплитуда упругого колебания на собственной частоте с номером m при возбуждении ультразвуковой волны на частоте с номером n ;

A_n – амплитуда ультразвуковой волны на частоте с номером n ;

A_{nm}^- и A_{nm}^+ – амплитуды волн на комбинационной частоте, образованной соответственно как разность и сумма частоты ультразвуковой волны с номером m и собственной частоты упругих колебаний с номером n .

Экспериментальные результаты

Апробация метода производилась в вагонно-колесных мастерских вагонного депо Горький-Сортировочный Горьковской ж.д. В течение нескольких дней контролировались оси, подготовленные к использованию в отремонтированных колесных парах, а также специально отобранные оси с известными трещинами, выявленными другими методами. На рис. 2 показано, как выглядело рабочее место для контроля осей в ВКМ ГЖД. В приборной стойке, расположенной рядом с конвейером, было установлено электронное оборудование и ПК. На рис. 2б показано ударное устройство и пьезоэлектрические преобразователи излучаемого и принимаемого сигналов.

Для иллюстрации нелинейного эффекта на рис. 3 показаны спектры принимаемого сигнала через 0,3 с после удара для бездефектной оси и оси с трещиной. Видны две характерные области спектра сигнала: вблизи нуля – спектральные компоненты ударного возбуждения (на собственных частотах оси) и область вокруг излучаемого монохроматического ультразвукового сигнала на частоте 61596 Гц.

Уровни комбинационных компонент вблизи частоты ультразвукового сигнала для бездефектной оси не превышают -70 дБ, а для оси с трещиной имеются спектральные составляющие с уровнями превосходящими -30 дБ. Количественной характеристикой этого различия является величина КНТ, которая для оси с трещиной составляет -4 дБ, а для оси без трещин -48 дБ. Таким образом, в данном случае значения $K_{НТ}$ отличаются более чем в 150 раз, что обеспечивает уверенное обнаружение трещины при помощи введенного критерия.

Еще лучше отличия в спектрах принимаемого сигнала для бездефектной оси и оси с трещиной видны на рис. 4. Для наглядности спектр низких частот зеркально отражен от горизонтальной оси, а высокочастотный спектр смещен по оси частот в ноль. При этом просуммированы энергии спектральных компонент на



Рис. 2. Рабочее место для контроля вагонных осей методом нелинейной акустики

зеркальных частотах относительно высокочастотной несущей зондирующего сигнала. При таком отображении можно выделить дискретные составляющие в спектре возбуждения, на которых происходит эффективное нелинейное взаимодействие. Так, например, для оси с поперечной трещиной (рис. 4а) эффективная нелинейная генерация происходит на частотах 904, 1335, 1800 Гц и некоторых других. Отметим большую разницу в уровнях спектров нелинейно генерированных компонент (красные кривые) для оси с трещиной и оси без трещины, достигающую 50 дБ. В то же время форма спектра низкочастотного возбуждения имеет незначительные отличия.

На рис. 5 приведены спектры НЧ возбуждения и модуляции (аналогичные графикам рис. 4), измеренные для колеса с трещиной в мембране и бездефектного колеса. Хорошо видны собственные частоты колеса и видно, что амплитуда комбинационных гармоник для колеса с трещиной (-50 ÷ -45 дБ) существенно больше, чем для колеса без трещины (-65 ÷ -60 дБ). Величины коэффициентов нелинейности КНТ для колеса с

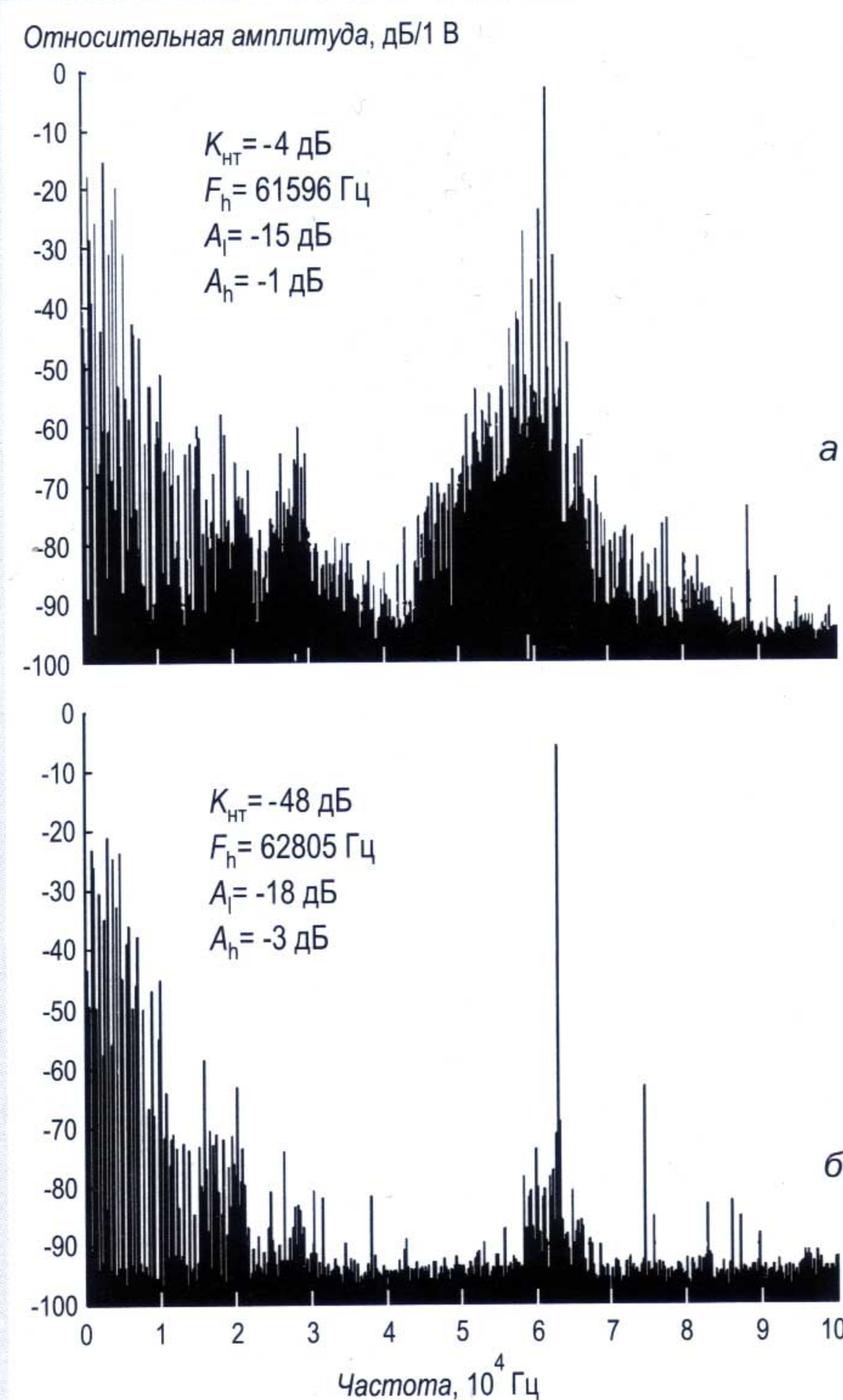


Рис. 3. Спектры принятого сигнала через 0,3 с после удара для двух осей:
а — с поперечной трещиной (РУ1 № 35432);
б — без трещин (РУ1 № 67386);
 F_h — частота зондирующего высокочастотного сигнала, излучаемого датчиком с торца оси;
 A_l и A_h , дБ/1 В — амплитуды соответственно низкочастотного и высокочастотного возбуждения;
 $K_{НТ}$ — значение нелинейного коэффициента (критерия отбраковки)

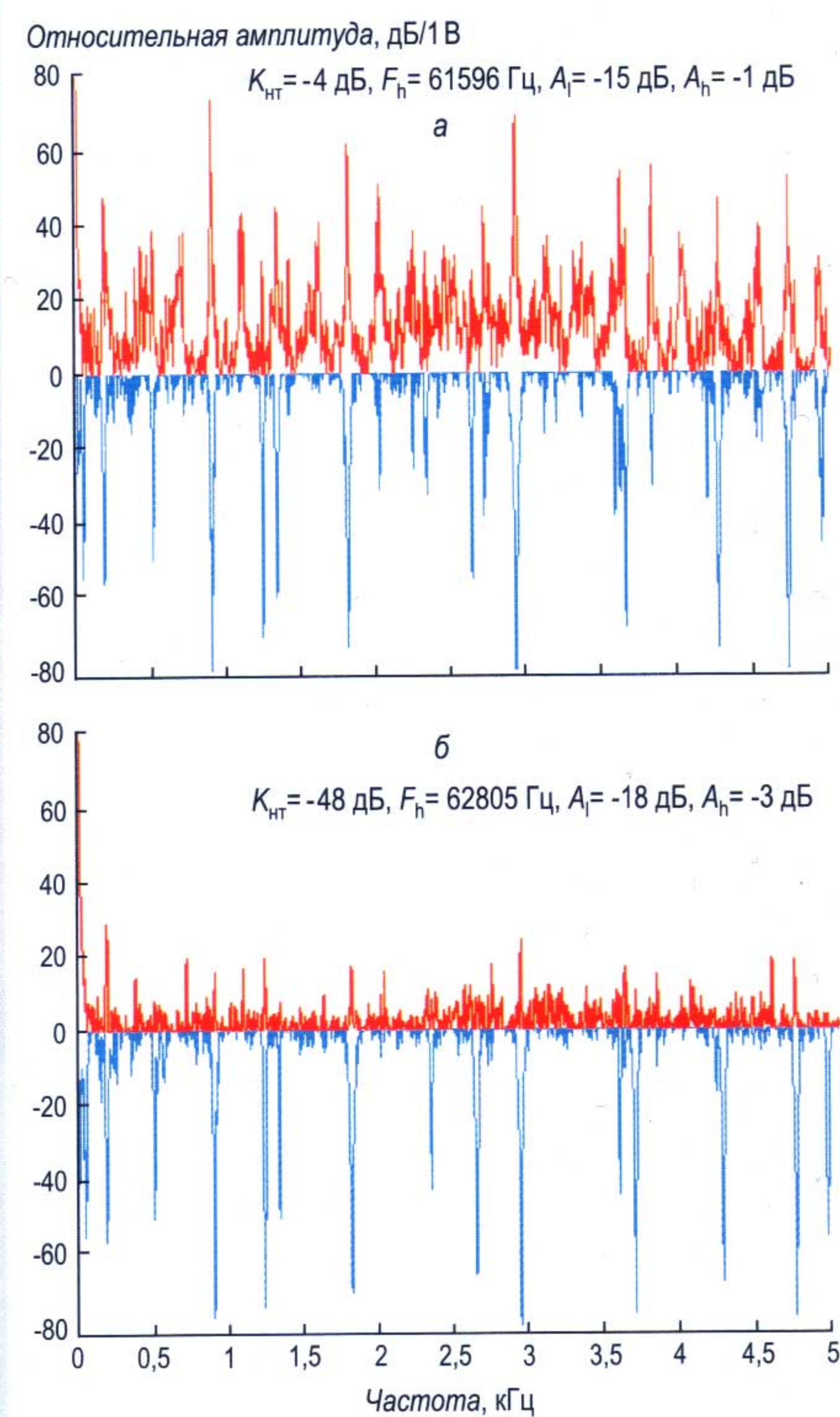


Рис. 4. Спектры НЧ возбуждения (синий цвет) и модуляции (красный) для двух осей:
а — с поперечной трещиной (№ 35432);
б — без трещин (№ 67386)

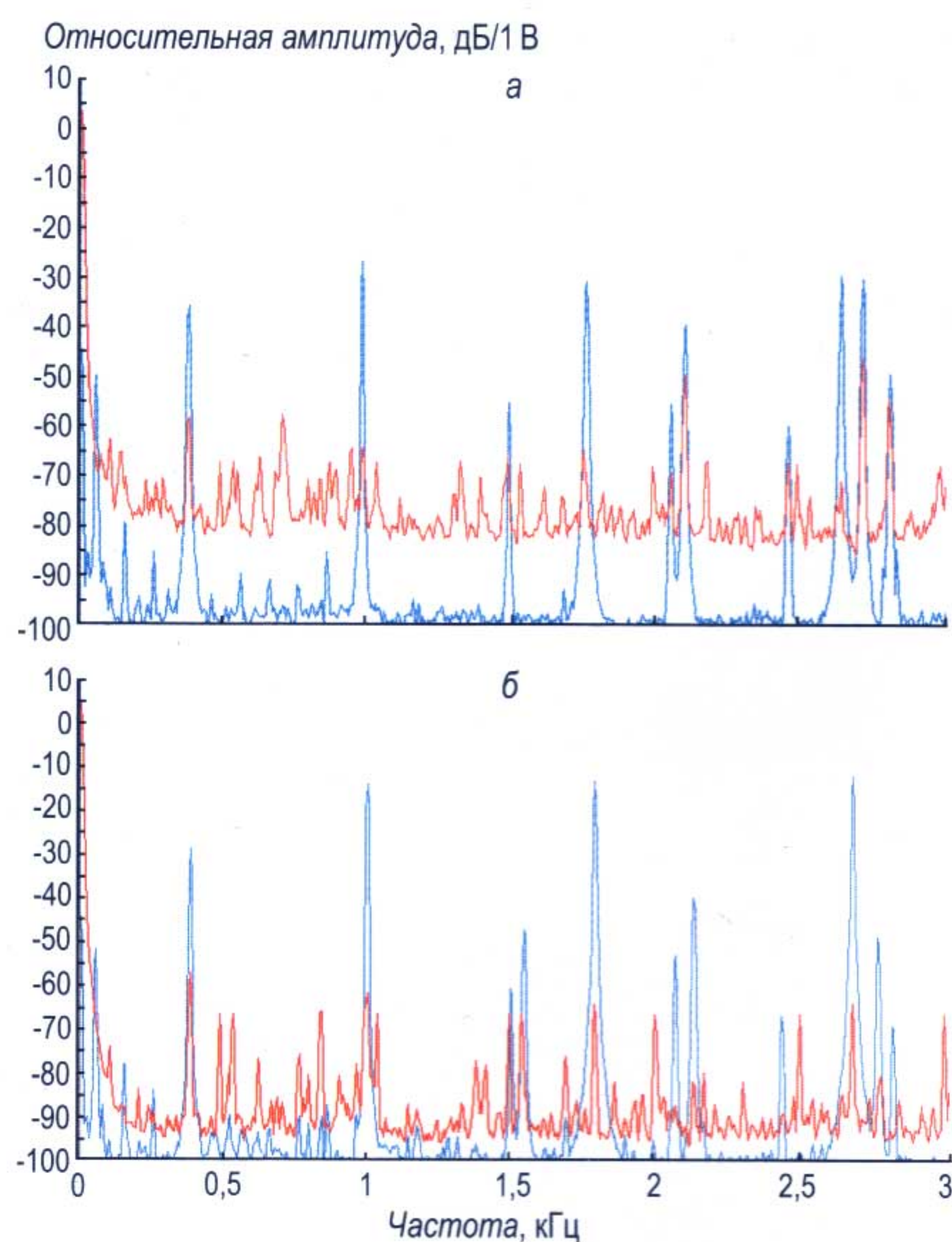


Рис 5. Спектры НЧ возбуждения (синий цвет) и модуляции (красный) для двух колес: а — с трещиной в мембране (№ 7215_183665); б — без трещин

трещиной и бездефектного колеса были равны -23 и -49 дБ соответственно. Измерения проводились на Выксунском металлургическом комбинате, и наличие трещины подтверждалось штатным ультразвуковым контролем.

Всего нелинейным акустическим методом было исследовано примерно сто вагонных осей и двадцать колес, и к

настоящему времени получены первые оценки достоверности метода и его чувствительности. Так, если установить значение порога для коэффициента нелинейности равным -34 дБ, вероятность пропуска поперечной трещины величиной не менее 1 мм для оси составляет примерно $0,001$, а вероятность ошибки второго рода (перебраковки оси) оказывается равной $0,14$.

Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют, что использование нелинейных акустических эффектов может быть полезным для поиска трещин в колесных парах. Однако для практического использования метода остается невыясненным ряд вопросов, связанных с его метрологическим обеспечением. Несмотря на то, что уже более 6 месяцев в ВКМ депо Горький-Сортировочный проводится опытная эксплуатация макетного образца установки, набрать достаточное число осей с естественной трещиной практически невозможно, так как для этого требуется проконтролировать сотни тысяч осей. С другой стороны, в отличие от стандартных образцов для калибровки ультразвуковых дефектоскопов, выполняемых обычно в виде заданных пропилов и отверстий, изготовление искусственных трещин для калибровки нелинейного акустического метода представляет серьезную научно-техническую проблему. После решения ряда техноло-

гических проблем, связанных с возбуждением различных типов собственных волн в оси, креплением пьезоэлектрических преобразователей и т. п., метод нелинейной акустической диагностики колесных пар может иметь некоторые конкурентоспособные преимущества по сравнению с другими методами НК, используемыми на железнодорожном транспорте.

Литература

1. Акустические методы и средства контроля. — В кн.: Неразрушающий контроль и диагностика/Справочник//Под. ред. В. В. Клюева — М.: Машиностроение, 1995, с.142.
2. Руководство по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов/РД 07.09-97 — М.: МПС РФ, 1997. — 145 с.
3. Collacott R. A. Structural integrity monitoring — London: Chapman and Hall Ltd. 1985.
4. Nazarov V. E., Sutin A. M. Nonlinear elastic constants of solids with cracks. — J. Acoust. Soc. Am.. 1997. V. 102. No. 6. P. 3349–3354.
5. Zaitsev V. Yu., Sutin A. M., Belyaeva I. Yu., and Nazarov V. E., Nonlinear interaction of acoustic wave due to cracks and its possible usage for cracks detection. — J. Vibration & Control. 1995. V. 1. No. 3. P. 335–344.
6. Ostrovsky L. A., Sutin A. M., Soustova I. A. et al. Nonlinear, low-frequency sound generation in a bubble layer: Theory and laboratory experiment. — J. Acoust. Soc. Am.. 1998. V. 104. No. 2. Pt 1. P. 722–726.
7. Ерилин Е. С., Матвеев А. Л., Назаров В. Е. и др. Способ обнаружения трещин в твердом теле/Патент РФ № 2219538. Оpubл. 20.12.2003, Бюлл. № 35.

Статья получена 27 июля 2004 г.

НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

29–30 июня 2004 г. в вагонном депо Челябинск-сортировочный Южн.-Ур. ж.-д. прошла сетевая школа по НК деталей вагонов. Особый интерес ее участников вызвала аппаратура фирмы «ЗОНД» (Санкт-Петербург). Многоканальный переносной ультразвуковой дефектоскоп УДС2-52 «ЗОНД-2» — единственный из всех сумел обнаружить в труднодоступном месте серьезное повреждение оси («Гудок» от 23.11.2004).

13–14 сентября 2004 г. в ИПКП ПГУПС прошел научно-практический семинар «Неразрушающий контроль и безопасности на ж. д. транспорте» (см. стр.). В последующие два дня более 170 участников семинара из городов России, Беларуси, Казахстана, Латвии, Литвы, Молдовы ознакомились на Международной выставке «Дефектоскопия 2004», в частности: с образцами средств сплошного УЗ контроля рельсов с регистрацией результатов АВИКОН-01МР, АВИКОН-11 и АДС-02 (Россия), РДМ-2 и РД-2 (Молдова), УДС2-73 (Украина); с принципом работы установок автоматизированного УЗ контроля колесных пар в депо «ПЕЛЕНГ-АВТОМАТ» (Россия) и колес и осей на заводах-изготовителях «Унискан-Луч» (Украина); с образ-

цами многоканального УЗ дефектоскопа для механизированного и автоматизированного контроля колесных пар УДС2-52 «ЗОНД» (Россия); портативных дефектоскопов для контроля сварных стыков и отдельных сечений рельсов АВИКОН-02Р, ДЮ-562, УДС-102Р ПЕЛЕНГ и «ЭХО+» (Россия), РДМ-33 (Молдова) для контроля осей и колесных пар УДС2-32 «ЗОНД» и УДС2-102В ПЕЛЕНГ (Россия), УД4-Т (Молдова), с ультразвуковым компакт-дефектоскопом УКД-«ТВЕМА» на базе карманного компьютера и с программно-аппаратурным комплексом НАК НК для сбора, анализа и хранения данных НК рельсов на дистанциях пути средствами различного типа (Россия).

21–22 сентября 2004 г. в г. Магнитогорске состоялось 120-е, юбилейное, заседание Российской межведомственной рельсовой комиссии по повышению качества и эксплуатации ж. д. рельсов и рельсовых скреплений.

По традиции особое внимание уделялось повышению качества рельсов при их производстве. Рекомендовано: «ОАО «НТМК» и ОАО «НКМК» обеспечить сплошной НК прямолинейности рельсов категории Т1 посредством установок типа «Электрон» (В мире НК. 2002. №

3(17). С. 56–58); НИИ мостов и дефектоскопии во втором квартале 2005 года разработать первую редакцию стандарта предприятия (ОАО «РЖД») «Контроль неразрушающий приемочный для железнодорожных рельсов. Технические требования» и направить ее на рассмотрение металлургическим комбинатам и причастным организациям.

27–28 октября 2004 г. в СП НПП «РДМ» состоялся Международный научно-практический семинар «Анализ предложений потребителей и результаты работ по совершенствованию методов и средств дефектоскопии технических объектов ж. д. транспорта». Специалисты (67 участников) из Беларуси, Болгарии, Венгрии, Казахстана, Латвии, Литвы, Молдовы, России и Украины прослушали и обсудили 18 докладов, ознакомились с устройством и работой новых УЗ дефектоскопов для сплошного контроля рельсов РДМ-22 и сварных стыков РДМ-33, УЗ дефектоскопом-толщиномером РДМ-34 (измеряет толщину стальных изделий без удаления слоя краски), прибором для УЗ диагностики высоковольтного фарфора УДС2ВФ и выработали рекомендации по дальнейшему повышению эффективности системы НК рельсов.