

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТИХОХОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.Г. Некрасов

MOBILE SYSTEM FOR A STATE ESTIMATION OF THE LOW-SPEED ROLLING EQUIPMENT

S.G. Nekrasov

Рассмотрена мобильная система оценки состояния оборудования, адаптированная к условиям работы прокатного производства, диагностика которого традиционно является одной из наиболее сложных. Особенностью рассматриваемой системы является многоканальная обработка информации, при этом высокочастотный канал реализует известный метод «оггибающей» и выполнен резонансным. Предлагается конвертировать высокочастотный сигнал и подавать параллельно аналого-цифровому преобразователю на наушники оператора, устранив тем самым производственные шумы, проблемы оцифровки сигнала и включив самый мощный на сегодняшний день компьютер – мозг человека. Одновременное восприятие оператором аналогового акустического сигнала и графического спектра позволяет повысить надежность и достоверность полученной информации.

Ключевые слова: оценка, диагностика, подшипник, резонансные методы, спектр, оггибающая сигнала, оборудование.

Mobile system of a state estimation of equipment, adapted for the operation of plate rolling, diagnostics of which is traditionally one of most challenging, is observed. Distinctive feature of the system is multichannel data processing, thus the high-frequency channel realizes a well-known signal envelope method and is executed by the resonant. It is offered to convert a high-frequency signal and to submit it in parallel DAC on ear-phones of the operator, preventing industrial noise and digital encoder problem, having turned on the most powerful the computer which is a brain of the person. Simultaneous registration by the operator of an analogue audible signal and graphical representation of its spectrum gives the possibility to increase reliability and validity of information.

Keywords: estimation, diagnostics, bearing, resonance methods, spectrum, signal envelope, equipment.

Введение

В настоящее время накоплен значительный опыт применения методов вибрационного анализа для успешной диагностики самых различных механизмов, создана аппаратная база – от простейших виброметров до сложных виброанализаторов и стационарных систем контроля вибрации. Однако, как показывает современная мировая практика, для внедрения эффективной стратегии эксплуатации и технического обслуживания оборудования на основании сведений о его состоянии необходим комплексный подход к проблемам оценки состояния оборудования: входной контроль ответственных комплектующих и узлов, непрерывный мониторинг роторного оборудования, приемосдаточные испытания и др.

Основной составляющей повышения достоверности диагностики является использование экспертных систем, основная задача которых – максимально возможное упрощение процесса диагностики и процедуры отчетности. Экспертные системы после процедуры адаптации под конкретное оборудование и обеспечения периодичности обследований могут успешно применяться на предприятиях с организованной службой диагностики. Такие системы обычно реализуют с использованием микропроцессоров, осуществляющих аналого-цифровое преобразование (АЦП) акустических сигналов, и выполняют как стационарными, так и автономными. Последние существенно расширяют сферу применения периодического мониторинга [1, 2], так как появляется возмож-

Некрасов Сергей Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; nseg@mail.ru

Nekrasov Sergey Gennagevich – Doctor of Science (Engineering), Professor of Information and Measurement Technology Department, South Ural State University; nseg@mail.ru

ность виброакустического сканирования пространства цеха, решения нетипичных задач, связанных с утечками газа, жидкости, оценки электрической прочности трансформаторов и др.

Особенности диагностики тихоходного оборудования

Диагностика оборудования прокатных производств (приводов, редукторов, шестеренных клетей, рабочих валков, рольгангов, манипуляторов, кантователей, подъемно-качающихся столов, ножниц, пил, моталок и т. д.) – сложная техническая задача. Ее успешное решение невозможно без использования современных средств измерения, адаптированных к условиям работы оборудования на металлургических производствах (частые непериодические удары, изменяющиеся частоты вращения, реверсивное движение и т. д.), причем одним из основных требований является обеспечение процесса диагностики при малых и сверхмалых частотах вращения.

Для решения этой задачи надо учесть, что независимо от частоты вращения в подшипнике неизменными являются частоты собственных колебаний его элементов, на которых и возбуждаются колебания при движении тел качения по дефектам. Однако интенсивность колебаний будет пропорциональна скорости вращения подшипника, поэтому «видимыми» с ростом скорости будут все более и более высокие гармонические составляющие. Это, по сути, равносильно расширению частотного диапазона объекта. При малых же частотах вращения «видимый» частотный диапазон и интенсивность колебаний очень малы, что предъявляет повышенные требования к порогу чувствительности и снижает диагностические возможности оборудования. При обеспечении необходимых значений чувствительности достаточна регистрация лишь импульсов собственных колебаний подшипника и для этого обычно требуется регистрирующее оборудование с полосой частот 5–5000 Гц.

Кроме того, для достоверного диагностирования любого стационарного дефекта необходимо зарегистрировать несколько импульсов одной природы. Это предполагает проведение непрерывной регистрации вибросигналов в течение достаточно длительного времени, за которое дефект должен несколько раз проявить себя. Полагают, что для среднестатистического подшипника такая регистрация составляет примерно 10 оборотов контролируемого вала, поэтому для диагностики тихоходных подшипников это требование очень жестко определяет некоторые параметры приборов регистрации вибрации. Например, для подшипников с относительно высокой частотой вращения 50 Гц (3000 об/мин) регистрация процессов в течение 10 оборотов занимает 0,2 с. При частоте же вращения вала в 1 Гц (60 об/мин) это время составит уже 10 с.

Отсюда следуют противоположные требования к анализаторам вибросигналов. Первое требует регистрации на максимально высокой частоте, так как частота свободных колебаний конструкции после единичных импульсных воздействий от дефектов может быть достаточно велика. Однако при фиксированной по частоте длине выборки сигнала это приводит к сокращению длительности регистрации, причем чем выше частота регистрации сигнала, тем короче получаемая выборка при обычно ограниченных возможностях АЦП мобильной системы. Остановимся на этом подробнее.

Если принять частоту дискретизации 44 100 Гц и полагать, что размер быстрого преобразования Фурье сигнала (БПФ), определяемый только степеням двойки, равен 4096, тогда продолжительность сигнала из 4096 точек при данной частоте дискретизации составляет 0,0929 с. Сигнал можно разложить на постоянную составляющую (0 Гц) и частоты, кратные частоте первой гармоники разложения. Период первой гармоники равен 4096 точкам, что по времени составляет примерно 0,0929 с. Значит, частота первой гармоники будет 10,77 Гц, частота второй – 21,53 Гц и т. д. Частота последней гармоники с номером 2048 будет равна половине частоты дискретизации – 22 050 Гц. Частотное разрешение равно 10,77 Гц. Очевидно, что при фиксированной частоте дискретизации частотное разрешение пропорционально размеру БПФ. Чтобы получить более подходящее разрешение, например 4 Гц, нужно увеличить размер БПФ примерно в 2,5–3 раза. Так как размер БПФ может быть равен степеням двойки, то можно принять размер БПФ равным 16 384 и получить разрешение 2,7 Гц. Продолжительность регистрируемого сигнала уже составит 0,37 с. Если принять, что частота вращения вала составляет 1 Гц, то размер выборки сигнала за 10 оборотов вала должен быть увеличен в 27 раз, т. е. более половины миллиона выборок. Но это не предел, так как для надежного выявления периодических составляющих спектра зачастую приходится регистрировать до 100 оборотов вала. Это действительно доступно только специализированному устройству и в этом режиме уже возможной становится надежная диагностика дефектов сепаратора подшипника.

Выбор методов и устройство их реализации

Существующие методы оценки состояния оборудования обладают определенными достоинствами и недостатками, поэтому в литературе просматривается тенденция на использование их в совокупности, принимая диагностическое решение, основываясь на личных суждениях и опыте или используя алгоритмы, например, нечеткой логики. Рассмотрим кратко эти методы. Простейшая методика периодического контроля состояния подшипников качения основана на методе «ударных импульсов», разработанном шведскими специалистами еще в 1968 году [3]. Сущность метода

заключается в проведении анализа формы сигнала высокочастотной вибрации, возбуждаемой вследствие дефекта ударным импульсом, и вычисления некоего параметра дефекта (пик-фактор, к-фактор, крест-фактор и т. п.), отличающихся разным способом определения пиковых и среднеквадратичных значений сигнала. Важным недостатком метода является сложность его применения для контроля состояния низкооборотных подшипников, когда в масляной пленке даже бездефектных подшипников из-за малой скорости происходит исчезновение эффекта «клина» [4], появляются частые разрывы и, как следствие, возникают ложные ударные импульсы.

Более высокими возможностями обладает метод контроля состояния подшипников качения по спектру огибающей высокочастотной случайной вибрации, возбуждаемой силами трения в масляной пленке подшипника и ударными импульсами при ее разрывах. Спектр огибающей дает информацию о периодических изменениях мощности высокочастотной вибрации в той полосе частот, которая предварительно выделяется из сигнала вибрации полосовым фильтром. В настоящее время существует два разных по своей физической основе метода вибрационной диагностики, получивших одинаковое название (метод огибающей) из-за одинаковой последовательности операций преобразования, применяемых к периодическим и случайным компонентам сигнала. Но если первый метод, применяемый для разделения близких по частоте гармонических составляющих, используется реже, то второй метод, применяемый для исследования колебаний мощности случайных составляющих, стал одним из основных в вибрационной диагностике вращающегося оборудования.

Дело в том, что первый использует полосу частот, в которой под действием сил трения или ударных импульсов возникает сильная резонансная вибрация с собственными частотами колебаний тела качения или наружного (неподвижного) кольца подшипника. Второй подход заключается в использовании более высокочастотной нерезонансной вибрации, возбуждаемой этими же силами [3, 5]. Оба подхода дают близкие результаты, но лишь в том случае, когда в полосу частот соответствующего фильтра не попадают гармонические составляющие вибрации, превышающие по мощности случайную вибрацию, наличие которых приводит к тому, что спектр огибающей начинает давать искаженную информацию о состоянии подшипника.

Метод огибающей позволяет решать множество задач диагностики подшипников качения и других узлов роторных машин [6], включая то, что спектральный анализ огибающей позволяет обнаруживать в подшипнике качения зарождающиеся дефекты не только поверхностей качения, но и скольжения, в частности сепаратора. Появляется

возможность диагностировать низкооборотные подшипники, в которых даже при нормальной работе возникают ударные импульсы, причем диагностика в этом случае возможна также потому, что в дефектных подшипниках периодически изменяется частота возникновения ударных импульсов и, следовательно, мощность высокочастотной вибрации. Кроме того, дефекты, которые приводят к разрыву масляной пленки и появлению ударных импульсов, могут обнаруживаться еще до того, как величина дефекта будет достаточна для разрыва масляной пленки и возникновения ударных импульсов.

Естественно, что метод огибающей имеет и свои недостатки. Первый заключается в том, что на начальном этапе развития дефектов смазки разрывы масляной пленки могут быть нерегулярными, а спектральный анализ огибающей нечувствителен к непериодическим изменениям мощности высокочастотной вибрации. Вторым недостатком может считаться необходимость длительного накопления сигнала в течение 50–100 оборотов подшипника против 2–3 оборотов при использовании метода ударных импульсов, причем частота вращения за это время не должна меняться более чем на 1–2 %. Третий недостаток имеется у всех высокочастотных методов – разная чувствительность метода к дефектам неподвижного кольца подшипника, тел качения, сепаратора и подвижного кольца, так как на пути распространения высокочастотной вибрации в зависимости от вида дефекта либо нет ни одной переходной поверхности со слоем смазки, либо такая поверхность есть и, следовательно, она интенсивно поглощает звук.

Еще один недостаток заключается в том, что, как показывают эксперименты, при наличии нескольких сильных дефектов по мере их дальнейшего развития чувствительность метода падает. Для компенсации этого недостатка, параллельно спектру огибающей высокочастотной вибрации, проводят наблюдение за наличием сильных дефектов по спектру низкочастотной и среднечастотной вибрации подшипникового узла, измеряемой в направлении действия статической нагрузки на подшипник. Таким образом, можно заключить, что только разумное сочетание методов может решить поставленную задачу диагностики.

В предлагаемой системе базовым является метод огибающей высокочастотной вибрации, который позволяет проводить раннюю диагностику зарождающихся дефектов и реализован нами аналоговыми средствами в виде отдельного высокочастотного канала.

В низкочастотном канале проводится анализ по спектру низкочастотной и среднечастотной вибрации подшипникового узла, а также используется метод «ударных импульсов», который, несмотря на свою избыточность, хорошо дополняет спектральные методы. Этот канал работает поочередно с высокочастотным каналом.

Высокочастотный канал

Высокочастотный канал реализует метод огибающей высокочастотной случайной вибрации и выделяет с помощью резонансного высокочастотного датчика узкополосную составляющую входного сигнала. Фильтрация входного сигнала реализуется как в механической, так и в электрической части устройства – резонансными адаптерами контактного или бесконтактного (воздушного) типа (рис. 1, 2), пьезоактивным резонансным датчиком/датчиками и активными электрическими фильтрами, что в сумме существенно уменьшает величину алиасинговой помехи.

Одновременно решается задача повышения чувствительности устройства, так как резонансный съем сигнала с поверхности объекта на высоких частотах при прочих равных условиях улучшает чувствительность всего акустического тракта.

Электрическая часть устройства диагностики включает предварительный усилитель ультразвуковой частоты, на входе и выходе которого стоят фильтры верхних частот, модуль преобразования ультразвукового сигнала в низкочастотный с включенным в него полосовым фильтром. Далее низкочастотный сигнал поступает на усилитель звуковой частоты и затем на две системы обработки информации – программный спектроанализатор, реализующий анализ огибающей сигнала в полученном диапазоне частот, и наушники оператора. Если первая система является традиционной, то вторая требует пояснения.

Дело в том, что человеческое ухо является непревзойденной системой диагностики, которой доступны такие категории, как, например, красота, прозрачность и драматизм симфонической музыки. Вопросами восприятия звука занимается психо-

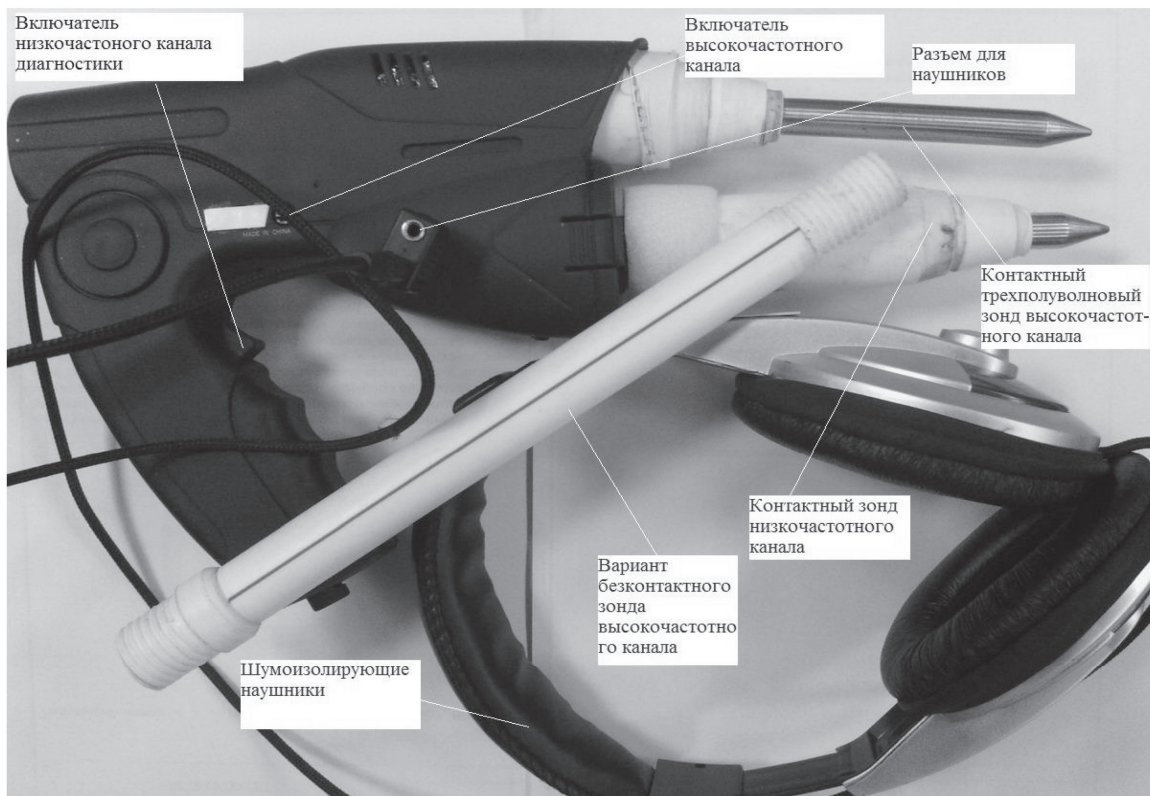


Рис. 1. Двухканальное устройство диагностики

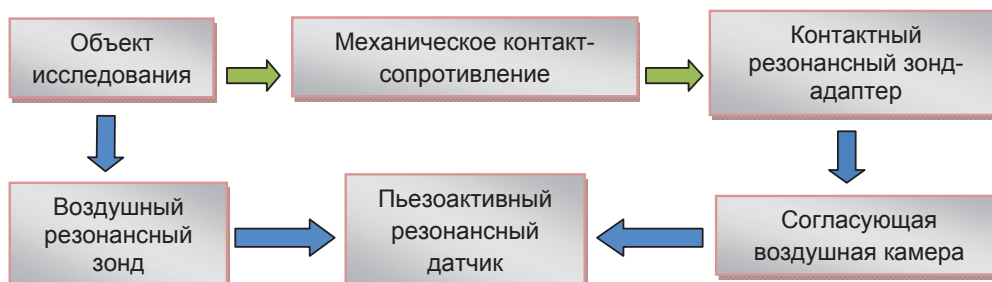


Рис. 2. Блок-схема адаптера контактного и бесконтактного типа

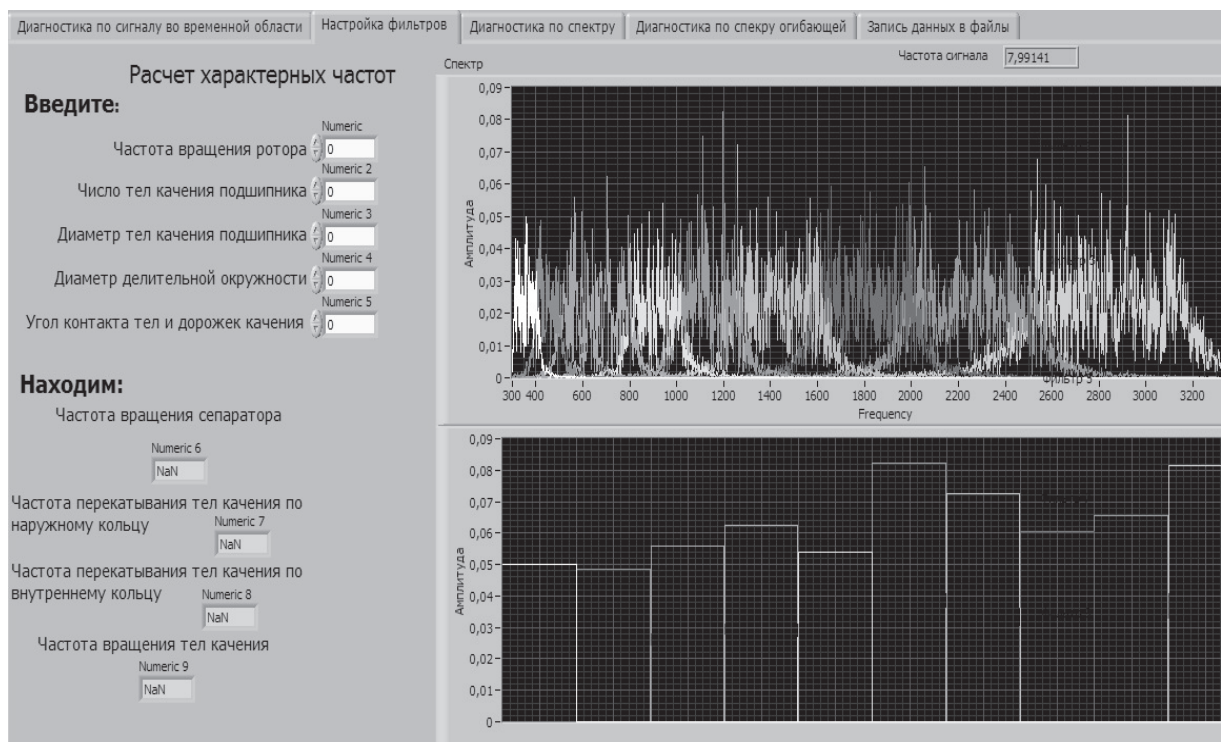


Рис. 3. Фрагмент интерфейса программного обеспечения

акустика, которая показывает, что строение уха человека определяет его как типичный спектроанализатор. Это связано со строением улитки, попадая на которую сложное звуковое колебание возбуждает на разных частях улитки резонансы, раскладываясь, тем самым, на простые колебания. К различным частям улитки подходят различные нервы, доставляющие в мозг амплитуды и моменты колебаний каждого участка улитки, передавая, тем самым, информацию о частотном спектре сигнала.

Частотный диапазон колебаний, которые воспринимаются как звуковые, простирается приблизительно от 20 Гц до 20 кГц, причем особенно интересен район средних частот (1–3 кГц), в котором человек способен улавливать звуковое давление в 20 мкПа. Отсюда и следует желаемый низкочастотный диапазон преобразования выделенной полосы высокочастотного сигнала.

Очевидно, что выполненное в устройстве частотное преобразование позволяет снизить требования к АЦП как в части частоты дискретизации, так и в части воспроизведения динамического диапазона обрабатываемого сигнала при той же разрядности АЦП.

На рис. 3 представлен фрагмент интерфейса программного обеспечения системы, который касается настройки программных фильтров. При компьютерной обработке низкочастотного и среднечастотного сигнала проводится измерение максимальных амплитуд, динамического диапазона, используется БПФ, дробно-октавный анализ и др.

Заключение

В статье рассмотрена мобильная система оценки состояния оборудования, адаптированная к условиям работы низкооборотных агрегатов прокатного производства. Особенностью системы является многоканальная обработка информации, при этом высокочастотный канал реализует известный метод «огibaющей» и выполнен резонансным. Предлагается преобразовать аналоговый высокочастотный сигнал и подавать его, параллельно АЦП, на наушники оператора. Это, с одной стороны, уменьшает погрешности цифровой обработки сигнала, включая погрешности, связанные с наложением спектров, джиттер и др. С другой стороны, одновременная регистрация оператором аналогового акустического сигнала и графического изображения его спектра позволяет повысить надежность и достоверность мобильной диагностики, связанной с субъективными возможностями оператора. Данный подход сочетается со стандартными методами диагностики, а предлагаемое устройство может быть выполнено на базе малогабаритного компьютера и использоваться как автономная система оценки состояния оборудования, в том числе тихходного, а также как сканер промышленных дефектов при наличии набора резонансных акустических преобразователей рупорного типа.

Литература

1. Новые подходы к вибродиагностике оборудования прокатных клетей / В.В. Веренев,

В.И. Большаков, Д.П. Кукуй и др. // Сб. науч. тр. Нац. гор. ун-та. – Днепропетровск: Нац. гор. ун-т, 2004. – Т. 5, № 19. – С. 110–115.

2. Сушко, А.Е. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств / А.Е. Сушко, М.А. Демин // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – № 1. – С. 6–9.

3. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учеб. пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: Издат. центр СПбТМТУ, 2000. – 158 с.

4. Nekrasov, S.G. The profiling effect on the characteristics of gas flow in fine vibrating clearances / S.G. Nekrasov, N.A. Pashnina // Journal of Friction and Wear. – 2010. – Vol. 31, No 3. – P. 171–179.

5. Петрухин, В.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В.В. Петрухин, С.В. Петрухин. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.

6. ГОСТ Р 53565–2009. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. – М.: Стандартинформ, 2010. – 5 с.

Поступила в редакцию 20 апреля 2012 г.