

УДК 625.03.032.32 + 629.4.067 + 629.4.027

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ЛАЗЕРНЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

В. В. Сотников

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: sotnikov@laser.itp.nsc.ru*

Описывается обработка сигналов в автоматической измерительной системе «Комплекс», предназначенной для бесконтактного контроля колесных пар грузовых составов. Выбранный координатный базис, методы фильтрации и восстановления сигналов позволили получить высокую достоверность результатов измерений при промышленной эксплуатации даже в условиях интенсивных атмосферных помех.

Ключевые слова: контроль геометрических параметров, дистанционный контроль, колесная пара, координатный базис, триангуляционный датчик.

Введение. Задача дистанционного контроля геометрических параметров колес вагонов при движении поезда является одной из важнейших на железнодорожном транспорте. Процесс измерений осложняется интенсивными промышленными и природными помехами (снег, дождь, пылевые и снежные вихри, возникающие при движении состава, грязь, осаждающаяся на контролируемые поверхности), которые снижают достоверность измерений.

Существующие устройства для контроля геометрических параметров колес в депо [1], на специализированных крытых полигонах [2], а также на перегоне при низкой скорости движения поезда и отсутствии атмосферных осадков [3] не могут обеспечить контроль геометрических параметров колесных пар на ходу поезда в реальных условиях эксплуатации.

В Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения РАН (КТИ НП СО РАН) создана автоматическая измерительная система «Комплекс» [4] (далее система «Комплекс»). Она предназначена для бесконтактного контроля геометрических параметров поверхности катания, выявления износа и дефектов цельнокатанных колес при движении поезда на скоростях до 60 км/час, регистрации неисправностей колесных пар и оперативной передачи полученной информации на ближайший пункт технического обслуживания (ПТО). Своевременное использование полученной информации позволяет сократить время простоя вагонов на ПТО.

В данной работе обсуждается реализация обработки сигналов в модуле алгоритмического анализатора системы «Комплекс» [4]. В качестве основных критериев выбора методов и алгоритмов обработки рассматривались: обеспечение максимальной достоверности получаемых результатов измерений, учет воздействий внешних факторов в условиях промышленной эксплуатации, а также возможность работы в условиях интенсивных атмосферных помех.

Принцип работы измерительной системы «Комплекс». В базовой конфигурации система «Комплекс» осуществляет контроль следующих параметров колесной пары грузовых железнодорожных вагонов (рис. 1): ширина обода (a), толщина обода (b), толщина гребня (c), высота гребня (h), сумма и разность толщин гребней по сторонам колесной

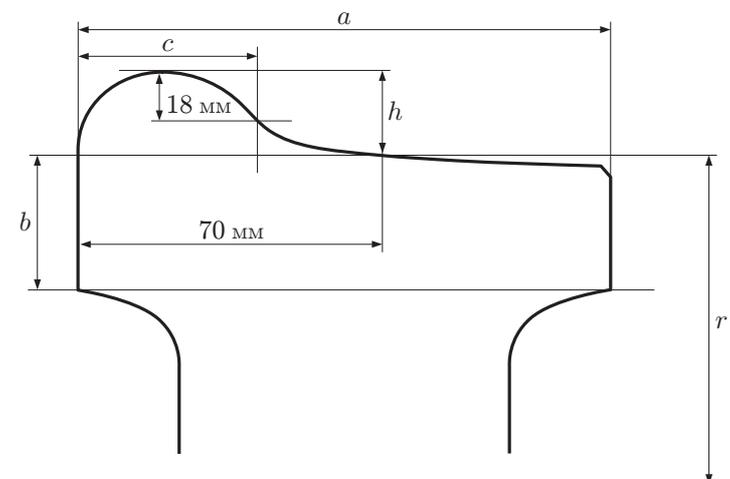


Рис. 1

пары, диаметр ($2r$) и разность диаметров по сторонам колесной пары, равномерный прокат ($h - 28$), угол набегания колесной пары на рельс, скорость движения колесной пары.

Определение геометрических параметров колесной пары подвижного состава в системе основано на принципе сканирования колес триангуляционными датчиками (режим самосканирования). На рис. 2 изображен координатный базис системы «Комплекс», выбранный для обработки сигналов, и схема взаимного расположения измерительных датчиков, предназначенных для контроля геометрических параметров правого (по ходу движения состава) колеса (далее правая сторона). Аналогичный, но зеркально расположенный относительно оси железнодорожного полотна набор датчиков обеспечивает контроль левого колеса (далее левая сторона).

Как видно из рис. 2, измерительные датчики закреплены на раме, которая установлена на специальных опорах и не имеет механического контакта с железнодорожным полотном. Каждое колесо, проходя через зону измерений системы, сканируется с двух сторон соответственно внутренним и внешним колесными датчиками. Датчики имеют по два аналоговых выхода, напряжение на которых несет в себе информацию о расстоянии до объекта измерений. Типичная аттестованная абсолютная погрешность измерения не превышает 150 мкм. При движении колесной пары каждый из датчиков измеряет текущее расстояние до поверхности колеса (вдоль заданного направления). В итоге формируются сигналы, отражающие профиль колесной пары в некоторых сечениях, определяемых в координатном базисе конкретного датчика, заданном его положением.

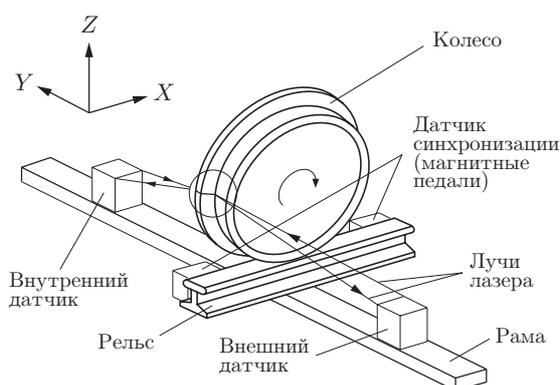


Рис. 2

Границы зоны измерений колесных датчиков задаются с помощью датчика синхронизации (см. рис. 2). Он состоит из трех индуктивных датчиков фиксации факта прохода колеса [5] (далее магнитных педалей). Первая педаль формирует сигнал захода колеса в зону измерений, вторая — фиксирует положение оси колеса в центре зоны измерений, а третья — формирует сигнал выхода объекта из зоны измерений. Напряжение на его аналоговом выходе пропорционально расстоянию до оси колесной пары. На цифровом выходе формируется логический сигнал наличия колеса в зоне измерения.

Оцифровка аналоговых сигналов всех измерительных датчиков каждой стороны производится многоканальным параллельным АЦП. Управление запуском—остановкой АЦП осуществляется сигналами с цифрового канала датчика синхронизации. Для обеспечения избыточной достаточности оцифрованных данных частота дискретизации АЦП изменяется динамически в зависимости от скорости движения колесной пары.

По ходу движения состава для каждого колеса формируются оцифрованные наборы исходных данных (кадры), которые помещаются во временную базу данных для последующей обработки алгоритмическим модулем.

Описание работы алгоритмического модуля. Как было отмечено выше, после прохода поезда все оцифрованные аналоговые сигналы и другая необходимая служебная информация находятся во временной базе данных. Такой подход выбран по ряду причин. Во-первых, чтобы разгрузить модули сбора данных (в реальности это отдельные микропроцессоры с АЦП и буферным ОЗУ) от одновременной оцифровки и передачи данных при проходе состава. Во-вторых, чтобы обеспечить возможность повторной передачи данных с модулей сбора данных в случаях сбоев в работе канала передачи. В-третьих, чтобы после того как весь состав проследует через участок контроля, осуществить его идентификацию согласно автоматизированной системе управления движением. В-четвертых, чтобы исходные данные по составу были доступны заданное время для возможности анализа сбоев в работе системы.

Структурная схема алгоритмического модуля системы «Комплекс» приведена на рис. 3. По мере готовности данные поступают в алгоритмический модуль анализатора, где и производится вычисление искомых геометрических параметров колесных пар. Данные поступают последовательно по каждой колесной паре, начиная с первой, что позволяет организовать два параллельных потока обработки (блоки обработки левой и правой стороны соответственно). Типичное время обработки сигналов от одной колесной пары алгоритмическим модулем составляет 10–15 мс.

Предварительный анализ и черновая фильтрация сигналов выполняются в блоках предварительной обработки. Сигналы с датчика синхронизации обрабатываются в первую очередь, так как на этом этапе меняются граничные условия для алгоритма преобразования сигналов с триангуляционных измерителей. В результате обработки уточняются границы кадра данных, определяются x -координата положения оси колеса в кадре и масштабные коэффициенты для преобразования координат по оси X (переход от порядкового номера отсчета АЦП к миллиметрам в выбранном координатном базисе, изображенном на рис. 2).

На рис. 4 приведен пример оцифрованного сигнала с датчика синхронизации (по горизонтали обозначен номер отсчета, по вертикали — амплитуда в единицах АЦП). Левый пик соответствует сигналу от стартовой педали, средний — сигналу от педали положения оси колеса в кадре, а правый — сигналу от стоповой педали. Соответственно вершины левого и правого пиков задают границы кадра, а вершина среднего пика — положение оси колеса в этом кадре.

Отметим особенности использования триангуляционных датчиков для контроля движущихся объектов (в данном случае колес вагонов) в промышленных условиях.

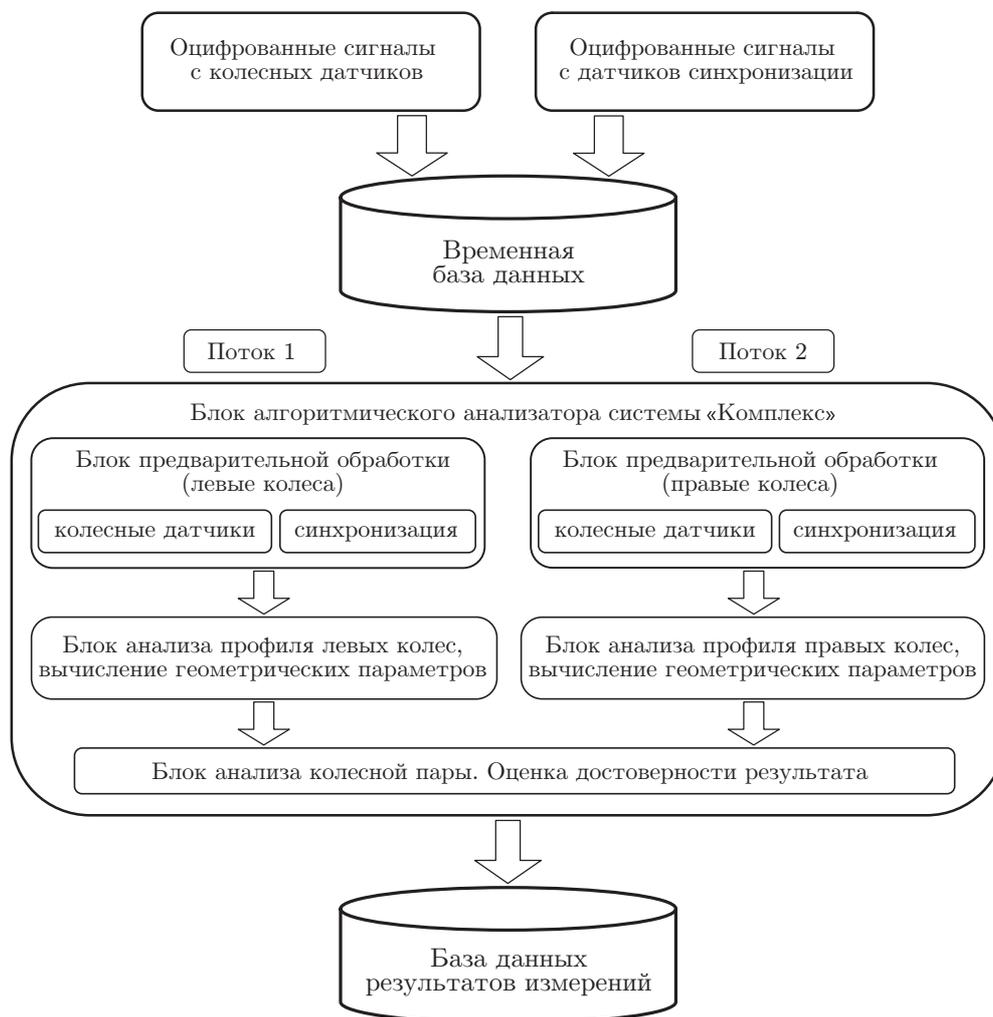


Рис. 3

Специфичными для триангуляционной схемы являются искажения, вызванные изменениями диаграммы рассеяния зондирующего излучения и возникающие даже при контроле ровной поверхности исследуемого объекта. При этом амплитуда сигнала может изменяться в широком диапазоне. Кроме того, для движущихся объектов невозможно повторение измерений в интервалах исчезновения или ослабления сигналов. В таких ситуациях для достоверного восстановления сигналов целесообразно воспользоваться априорной информацией об ожидаемой форме объекта и заведомо избыточной информацией. Кроме полезной информации в сигнале могут присутствовать фрагменты, возникающие вследствие помех от посторонних предметов, окружающих объект измерений (в случае измерения колесных пар это тормозные колодки, рессоры, ледяные наросты в зимний период и т. д.), а также от воздействия окружающей среды (снег, дождь, пылевые частицы и т. д.). Для борьбы с такого рода помехами необходимо четко выделять зону, содержащую полезную информацию, путем пространственной фильтрации сигналов, основанной на заранее известной форме и ожидаемом положении измеряемого объекта. Применение пространственной фильтрации позволяет локализовать сомнительные участки сигнала и по возможности исключить их из последующей обработки.

Триангуляционные датчики [4], предназначенные для работы в составе системы «Комплекс», способны обеспечивать свои метрологические характеристики в большом ди-

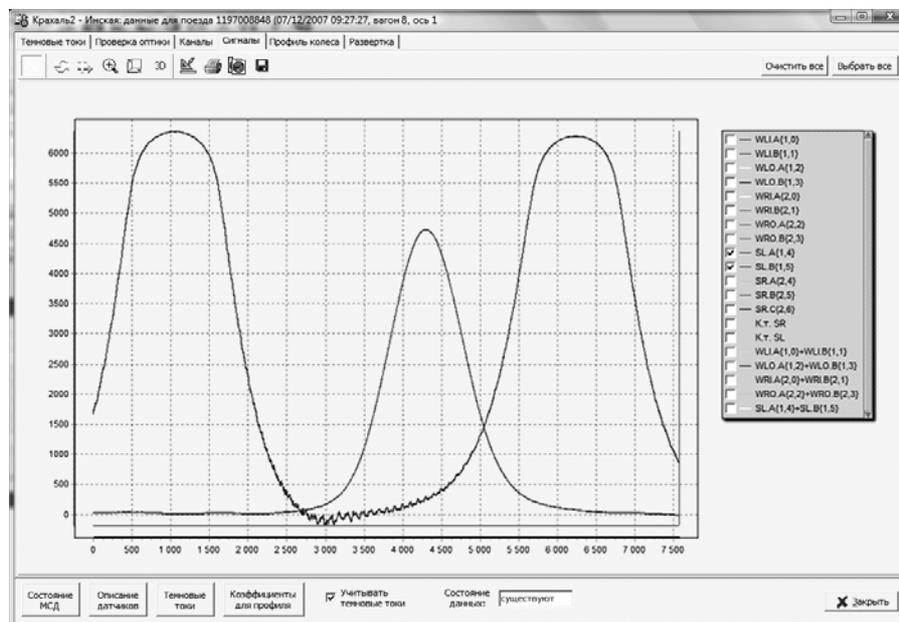


Рис. 4

намическом диапазоне внешних засветок за счет применения эффективной системы автоматической регулировки усиления с динамическим учетом внешней освещенности. Однако для достижения заявленной погрешности измерений необходимо учитывать начальные смещения на выходах датчика, возникающие в отсутствие объекта в зоне измерений.

Исходя из вышеизложенного в блоках предварительной обработки (см. рис. 3) для сигналов триангуляционных датчиков выполняются следующие преобразования:

- учет начальных смещений в каналах;
- амплитудная пороговая фильтрация, обеспечивающая работу электронного тракта датчика в линейном режиме;
- исключение из дальнейшей обработки участков сигнала, расположенных в зонах, где объект находится не может (используется априорная модель объекта измерений);
- перевод порядкового номера отсчета (x -координата) в миллиметры;
- вычисление текущего расстояния до объекта (в относительных единицах);
- пересчет расстояний в абсолютные единицы (миллиметры) с учетом лабораторной калибровки, выполненной на этапе их изготовления;
- исключение из дальнейшей обработки участков сигнала, выходящих за пределы диапазона лабораторной калибровки;
- переход от расстояний к x - и y -координатам в системе отсчета датчика;
- переход из системы отсчета датчика (xyz) к единому координатному базису (XYZ) для обеспечения возможности последующей совместной обработки данных по стороне.

Для согласования систем отсчета в системе «Комплекс» предусмотрен режим совместной калибровки систем координат датчиков на этапе монтажа оборудования или в случае замены одного из лазерных триангуляционных датчиков. Для этого в измерительную зону датчиков с помощью специального устройства вводятся калибровочные пластины. По результатам привязки вычисляются величины Δx , Δy и Δz , связывающие между собой системы координат датчиков.

Примеры типичной формы сигналов на выходе блоков предварительной обработки приведены на рис. 5. Верхняя кривая — результат обработки сигналов наружного колесного датчика, а нижняя — внутреннего. (Обозначение осей: по горизонтали — номер

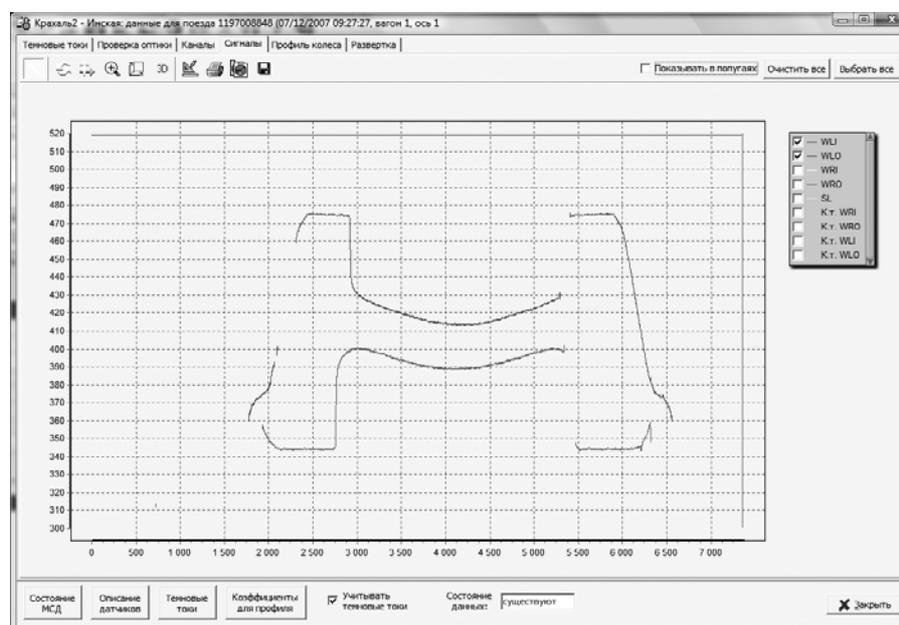


Рис. 5

отсчета, по вертикали — Y -координата в миллиметрах.)

Для вычисления геометрических параметров колеса достаточно восстановить его профиль, после чего можно в соответствии с ГОСТ 9036-88 найти их численные значения. Под профилем колеса здесь и далее понимается его сечение в плоскости, в которой находится ось вращения колеса. Другими словами, для каждой точки измерений на колесе необходимо перейти от ортогональной системы отсчета XYZ в полярную систему координат RY , где $R(XZ)$ — полярный радиус в плоскости XZ .

Дальнейшие вычисления выполняются в блоках анализа профиля (см. рис. 3). Для получения профиля колеса необходимо знать истинное положение оси колеса относительно измерительного координатного базиса. Границы кадра измерений жестко фиксированы датчиком синхронизации, поэтому всегда имеется значение ожидаемого положения X -координаты оси колеса (или его центра) для случая равномерного его движения в пределах кадра. Однако колесо может двигаться с некоторым ускорением. Поэтому для каждого колеса производится уточнение положения проекции его центра на ось X из анализа сигналов колесных датчиков с учетом априорной информации об объекте измерений.

В выбранной системе координат ось колеса должна быть направлена вдоль оси Y . Однако по разным причинам ось колеса может двигаться не перпендикулярно оси X , а под некоторым углом, называемым углом набегания. Величина этого угла учитывается при вычислении координат центра колеса.

Для восстановления Z -координаты оси колеса используется проточка (переход с обода на центральную часть колеса) с известным радиусом на внутренней и наружной поверхности обода колесной пары. По координатам центра для внутренней (X_{in} , Y_{in} и Z_{in}) и наружной (X_{out} , Y_{out} и Z_{out}) поверхности колеса определяется положение оси колеса относительно выбранного координатного базиса.

Положение оси в пространстве позволяет учесть наклон колеса в плоскости YZ , который возможен по ряду причин (например, разная величина прогиба рельса по сторонам, неравномерная загрузка вагона, развал колес под грузеными вагонами и др.). Игнорирование этого угла приводит к построению искаженных профилей колеса и недостоверным результатам измерений.



Рис. 6

На рис. 6 приведен пример восстановленного профиля колеса (по горизонтали обозначена Y -координата в миллиметрах, по вертикали — R -координата в миллиметрах), полученного из анализа сигналов, изображенных на рис. 5 в отсутствие интенсивных атмосферных помех.

Эффективность алгоритмов обработки сигналов иллюстрируют рис. 7 и 8: соответственно восстановленный профиль колеса без фильтрации сигналов и участки того же профиля в зонах, используемых для определения толщины обода и гребня.

Дальнейшая обработка происходит в блоке анализа колесной пары (см. рис. 3). Здесь из полученных профилей вычисляются искомые геометрические параметры колесной пары. При этом алгоритм расчета параметров повторяет отраслевую методику их измерения с помощью стандартного контактного инструмента [6, 7]. Каждый из вычисленных параметров имеет свою оценку достоверности. Абсолютное значение погрешности измерений этих параметров не превышает 0,5 мм.

Вычисленные геометрические параметры сохраняются в базе результатов и переда-

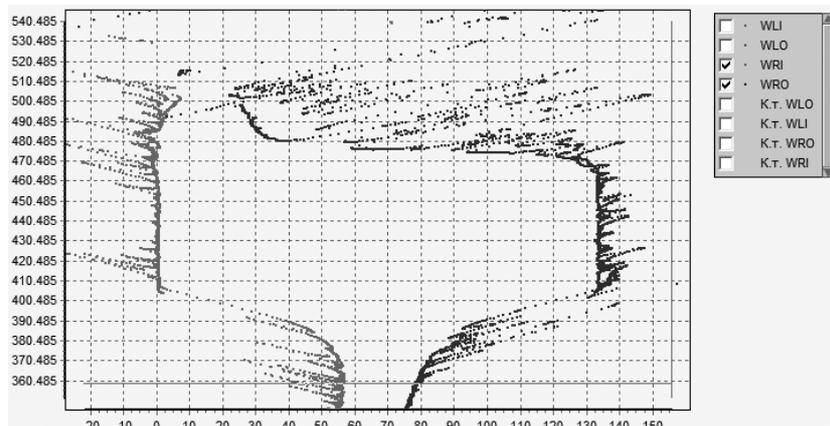


Рис. 7

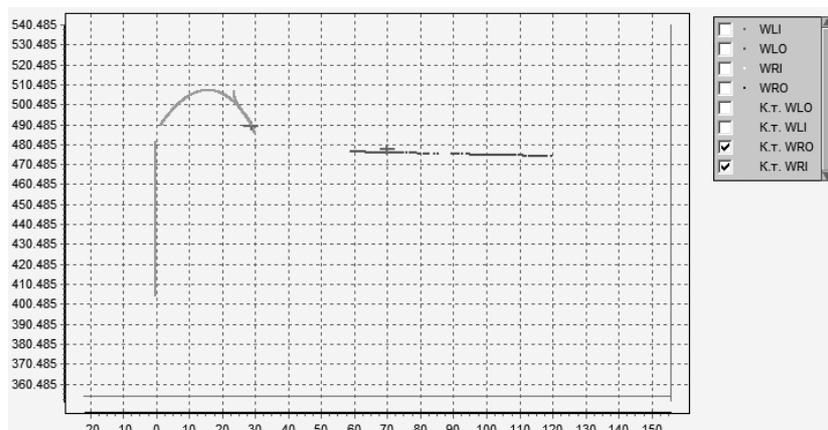


Рис. 8

ются по локальной сети оператору ПТО. В случае если измеренные значения выходят за допустимые границы, эти измерения помечаются как тревожные, что позволяет оператору принять решение о возможности дальнейшего следования этого вагона.

Оценка подтверждаемости результатов контроля параметров колесной пары производится путем сравнения измерений, полученных системой «Комплекс», с прямыми замерами, выполненными традиционным контактным способом на неподвижном составе в ПТО штатным измерительным инструментом. В летний период подтверждаемость составляет около 97 %, а в зимний — 93 % в отсутствие интенсивных снежных помех и снижается до 89 % при их наличии. Повысить достоверность измерений в зимний период можно путем ограничения скорости движения составов на участке контроля до 30–40 км/ч.

Заключение. Применение описанного в данной работе алгоритма позволило достичь высокой достоверности обработки сигналов в условиях интенсивных атмосферных и промышленных помех.

Работоспособность системы «Комплекс» с оценкой достоверности результатов обеспечивается практически в любых погодных условиях, о чем сообщается обслуживающему персоналу ПТО.

Результаты многократных сравнительных замеров подтверждают высокую достоверность автоматических замеров в диапазоне скоростей движения поездов до 60 км/ч на участке контроля от 89 до 97 % в зависимости от наличия и интенсивности атмосферных помех.

По состоянию на начало 2009 г. в эксплуатации находятся более пятидесяти систем «Комплекс», установленных на 14 железных дорогах России. Еще более десяти установок находится в стадии монтажа. В среднем за год вводится в эксплуатацию около полутора десятков новых устройств контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаушильд Г., Нойманн П. Автоматическая диагностика колесных пар с помощью системы ARGUS // ЖДМ. 2001. № 12. С. 36–42.
2. Морган Р. Оценка систем измерения колес // ЖДМ. 2003. № 11.
3. Венедиктов А. З., Демкин В. Н., Доков Д. С. Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении // ЖДМ. 2003. № 9.
4. Байбаков А. Н., Гуренко В. М., Патерикин В. И. и др. Автоматический контроль геометрических параметров колесных пар во время движения поезда // Автометрия. 2004. 40, № 5. С. 94–103.

5. **Пат. на полезную модель № 48172.** Индуктивный датчик фиксации факта прохода колеса /С. В. Плотников, К. И. Кучинский, В. И. Патерикин и др. Заявл. 06.05.2005. Оpubл. 27.09.2005, Бюл. № 27. 2 с.
6. **ГОСТ 9036-88.** Колеса цельнокатаные. Конструкция и размеры. М.: Госстандарт, 1988.
7. **Инструкция** осмотрицику вагонов. М.: ТРАНСИНФО, 2003. 135 с.

Поступила в редакцию 5 июня 2008 г.
