

# Алгоритмы идентификации сигналов дефектного буксового узла постовой системы ранней диагностики



**А. С. Ададулов,**  
к. т. н., директор  
Научно-информационно-аналитического центра-филиала АО «ВНИИЖТ», доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

Тепловые датчики не дают возможности контролировать зарождающиеся дефекты буксовых узлов грузовых вагонов. Тенденции их развития и включаются в диагностику отказов на последней стадии развития дефектов. Новая система, построенная на датчиках ускорения, сможет дать более достоверный прогноз по безопасному пробегу вагона. Возможности системы в перспективе могут быть расширены дополнительными функциями: контролем поверхности катания колеса и контролем рыскания тележек.

## Алгоритм получения вибрационного сигнала буксы при измерениях на рельсовом пути

Предположим, что измерительный участок включает рельсовый путь с равномерными установленными датчиками ускорений  $B_1-B_n$  и многоканальную систему измерений. По измерительному участку проходит состав с буксами  $B_1-B_n$ .

На рис. 1 представлены предполагаемые временные диаграммы прямых, преобразованные в непрерывные реализации ускорения для каждой буксы. Количество таких реализаций соответствует числу букс проходящего состава. Каждая колесная пара проходит один и тот же участок пути, поэтому полученные реализации ускорений должны быть коррелированы между собой

с временным сдвигом, соответствующим расстоянию между датчиками. Это вытекает из предположения, что места, где установлены датчики, при прохождении колесных пар имеют примерно одинаковые реакции, а в разностной части и будет находиться интересующая нас диагностическая информация. На практике эти реакции могут существенно отличаться в силу разных причин. Главными из них следует считать состояние колесных пар, состояние тележки с элементами сухого трения, тип и загрузку вагона, влияющие на динамику тележки, влияние внешних факторов, например акустического шума, и т. д.

Если по измерениям информации диспетчерской службы или других источников провести идентификацию проходящего состава вплоть до букс по конструктивным, технологическим, динамическим параметрам и внешним факторам, результатом которой станет объединение временных реализаций ускорений в группу, то, проведя взаимный корреляционный анализ, можно вычлени из реализаций, изображенных на рис. 2, коррелированные составляющие спектра, а по оставшейся части сигнала провести диагностику подшипниковых узлов букс.

Очевидно, что чем полнее будет проведена идентификация проходящего состава и внешних влияющих факторов, тем точнее будет диагностика буксовых узлов. Для выделения из результата измерения выборок ускорений, соответствующих прохождению данной колесной пары, используются сигналы pedalных датчиков, срабатывающих при

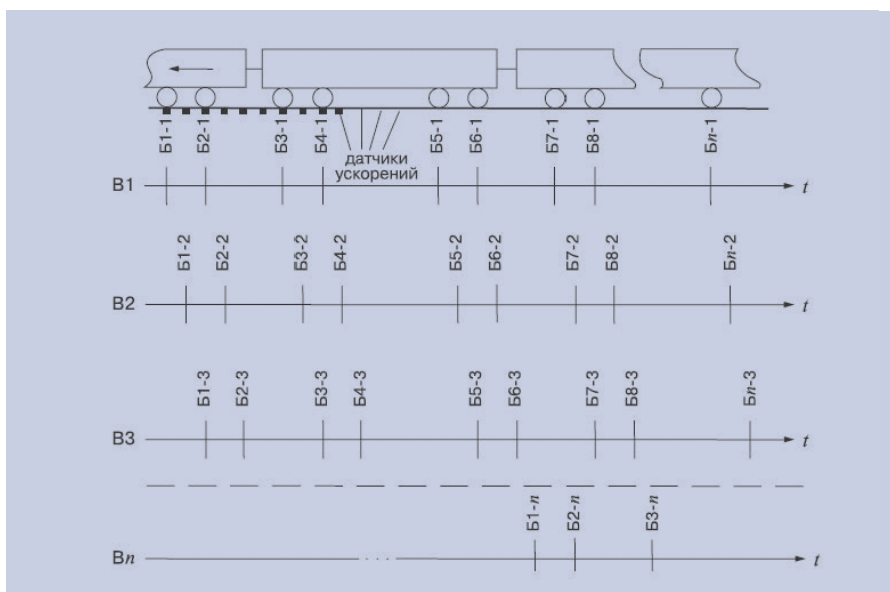


Рис. 1. Временные диаграммы предполагаемых измерений ускорений на рельсе

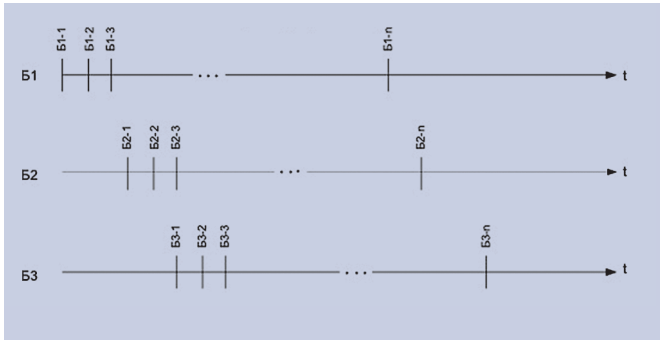


Рис. 2. Скомпонованные диаграммы ускорений по буксам

прохождении колеса. Эта информация помогает идентифицировать также тип тележки, тип вагона и скорость. Установка под рельс датчика силы позволит оценить нагрузку на буксу от веса вагона.

Предположим, тележка вагона с четырьмя буксами движется с неизвестной скоростью  $V$ , диаметр обода колесной пары  $D$  (мм), расстояние между осями колесных пар  $\ell$  (мм), число роликов (тел качения)  $N_{TK}$ , отношение среднего диаметра подшипника к диаметру тела качения  $D_c/D_{TK}$ , частота вращения колесной пары  $F_1$  (Гц).

Частоту вращения колесной пары находим по формуле:

$$F_1 = \frac{\ell}{\pi D \times \tau}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время, соответствующее запаздыванию в прохождении двух колесных пар тележки, определяется по результатам спектрального анализа зарегистрированной реализации процесса по одному из датчиков при прохождении состава.

Кепстр — это энергетический состав спектра, в котором абсцисса — ось времени. Очевидно, что первая гармоника спектра с максимальной амплитудой будет соответствовать интересующему нас времени  $\tau$ , так как состав в подавляющем большинстве случаев формируется тележками с двумя колесными парами. Точность определения  $\tau$  зависит от разрешающей способности спектрального анализа (длительности реализации) и постоянства скорости движения. Естественно, чем длиннее проходящий состав, тем точнее определение  $\tau$ .

Основные частоты, на которых могут проявляться подшипниковые дефекты, находим по известным формулам [1].

Частота перекачивания тела качения по внутренней обойме (BPF<sub>i</sub>):

$$F_B = \frac{N_{TK}}{2} \cdot F_1 \left( 1 + \frac{D_{TK}}{D_C} \right) \quad (2)$$

Частота сепаратора (FTF):

$$F_C = \frac{F_1}{2} \left( 1 - \frac{D_{TK}}{D_C} \right) \quad (3)$$

Частота вращения ролика (BSF):

$$F_{TK} = \frac{F_1}{2} \cdot \frac{D_C}{D_{TK}} \left[ 1 - \left( \frac{D_{TK}}{D_C} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Частота возбуждения при дефекте формы тел качения (F<sub>FB</sub>):

$$F_{FB} = 2 \cdot F_1 \left( \frac{D_C^2}{D_{TK}^2} \right) \quad (5)$$

Частота возбуждения при изменении формы внутренней дорожки (F<sub>FI</sub>)

$$F_{FI} = \frac{F_1 \cdot N_{TK}}{2} \left( 1 - \frac{D_{TK}}{D_C} \right) \quad (6)$$

Согласно поставленной задаче необходимо определить оптимальное количество пьезоакселерометров, устанавливаемых на рельсовом пути, и расстояние между ними. При этом необходимо выполнить следующие требования:

1. Ускорения, создаваемые колесной парой при прохождении места, где установлен датчик, должны быть максимально ограждены от ускорений, создаваемых следующей или предыдущей колесной парой.

2. Количество измерительных преобразователей (датчиков), устанавливаемых на рельсе, должно быть таким, чтобы длительность скомпонованной временной реализации для каждой буксы обеспечивала требуемое высокое разрешение спектрального анализа, с помощью которого уверенно выделились бы диагностируемые частоты подшипника, и в то же время статистическую надежность оценки.

Первое требование выполняется применением взвешивающего окна во временной области. Разрешение спектрального анализа обеспечивается степенью перекрытия взвешенных выборок процесса. Характер взвешивания и перекрытия выборок отражен на рис. 2.

Максимальная длительность одной выборки процесса определяется на основе расстояния между осями колесных пар и скорости движения тележки вагона и должна быть не более  $\tau$ , а разрешение спектра:

$$B_e = \frac{1 \cdot K_B}{\tau \cdot n_q} \quad (7)$$

где  $n_q$  — количество устанавливаемых датчиков,  $K_B$  — количество датчиков (усредненное значение).

Анализируя перечень диагностируемых частот, можно расположить их в порядке возрастания:  $F_C$  (FTF),  $F_1$ ,  $F_{TK}$  (BSF),  $F_{FI}$  (F<sub>FI</sub>),  $F_B$  (BPF<sub>i</sub>) и  $F_{FB}$  (F<sub>FB</sub>).

При спектральном анализе реализации вида (рис. 2) получаем линейчатый спектр с нулевыми составляющими на частотах

$$F_{ON} = \frac{1}{t_B} N, \quad (8)$$

где  $N = 1, 2...N$

Нетрудно заметить, что при  $N = 1$  и  $t_B = \tau$ ,  $F_{O1} = F_1$ , т. е. амплитуда основной частоты вращения колесной пары превращается в ноль. Для того чтобы не произошло попадания диагностируемых частот в нулевые узлы, необходимо, чтобы все диагностируемые частоты находились в диапазоне частот  $0 - F_{O1}$ . Иначе говоря,  $t_B < \tau$ .

Задаваясь частотой затухания  $F_0$ , можно определить длительность одного участка записи по показанию одного датчика, а именно:

$$t_B \leq \frac{1}{F_0}, \quad (9)$$

положим,  $F_0 = K \cdot F_B$  (BPF<sub>i</sub>) — наивысшая частота первой гармоники из списка диагностируемых частот, где  $K$  — количество ударов (неусредненное). Частоту  $F_{FB}$  исключаем из рассмотрения, так как она на порядок выше, чем  $F_B$  (BPF<sub>i</sub>).

Расстояние между датчиками должно быть таким, чтобы на места их расположения колесная пара наезжала новыми контактными точками, т. е. контакт колеса с местом распо-

ложения следующего датчика составлял угол сектора, соответствующий неравенству:

$$\frac{360}{\varphi} \neq N, \quad (10)$$

где  $N$  — целое число,  
 $\varphi$  — угол дуги сектора.

Количество датчиков определяется из нижней частоты диагностирования (в нашем случае частота сепаратора  $F_C$ ) таким образом, чтобы был охвачен как минимум один период частоты  $F_C$ . С другой стороны, количество датчиков определяет длительность реализации, с которой связана статистическая надежность спектра (7).

С учетом этих положений выполним расчет минимально необходимого количества устанавливаемых датчиков и расстояния между ними.

Из выражения (3) минимальная длительность реализации процесса:

$$T_p = \frac{1}{F_C} = \frac{1}{F_1 \left(1 - \frac{D_{TK}}{D_C}\right)}. \quad (11)$$

Полагая, что отдельные выборки процесса имеют одинаковую длительность  $t_0$ , можем записать:

$$T_p = t_0 \cdot n_q \cdot \frac{1}{K_B}, \quad (12)$$

где  $n_q$  — количество датчиков.

С учетом выражений (8) и (9) при  $N = 1$ :

$$t_0 = \frac{1}{K \cdot F_0}, \quad (13)$$

тогда

$$n_q = \frac{T_p}{t_0} = T_p \cdot K \cdot F_0 \cdot K_B.$$

Подставляя в данное выражение (11) и (2), получаем:

$$n_q = K \cdot \frac{1}{F_1 \left(1 - \frac{D_{TK}}{D_C}\right)} \cdot \left(\frac{1}{2} F_1 \left(1 + \frac{D_{TK}}{D_C}\right) \cdot N_{TK}\right) \cdot K_B = K \cdot \frac{D_C + D_{TK}}{D_C - D_{TK}} \cdot \frac{N_{TK}}{2} \cdot K_B \quad (14)$$

**Пример:**

Параметры объекта диагностирования (тележка модели 18–100 ЦНИИ-ХЗО):

- расстояние между осями колесных пар тележки  $\ell = 1850$  мм;
- диаметр обода колесной пары  $D = 950$  мм;
- измеренное время задержки прохождения сигнала при скорости движения  $V = 90$  км/ч —  $\tau_3 = 0,0768$ ;
- число тел качения в подшипнике  $N_{TK} = 14$ ;
- отношение среднего диаметра подшипника к диаметру тела качения  $D_C/D_{TK} = 5,94$ ;

Определить:

- диагностируемые частоты;
- необходимое количество датчиков  $n_q$ ;
- расстояние между датчиками  $\ell_q$ ;
- разрешающую способность спектрального анализа  $B_e$ .

По формуле (1) находим частоту вращения колесной пары (основная частота для подшипника):

$$F_1 = \frac{l}{\pi D \tau} = \frac{1850}{3,14 \cdot 950 \cdot 0,0768} = 8,07.$$

По формулам (2) – (6) находим диагностируемые частоты:

$$F_C = \frac{F_1}{2} \left(1 - \frac{D_{TK}}{D_C}\right) = \frac{8,07}{2} \left(1 - \frac{32}{190}\right) = 3,36 \text{ Гц}$$

$$F_B = \frac{F_1}{2} \left(1 + \frac{D_{TK}}{D_C}\right) \cdot N_{TK} = \frac{8,07}{2} \cdot \left(1 + \frac{32}{190}\right) \cdot 14 = 66,0 \text{ Гц}$$

$$F_{TK} = \frac{F_1}{2} \cdot \frac{D_C}{D_{TK}} \left[1 - \left(\frac{D_{TK}}{D_C}\right)^2\right] = \frac{8,07}{2} \cdot \frac{190}{32} \left[1 - \left(\frac{32}{190}\right)^2\right] = 23,28 \text{ Гц}$$

$$F_{FI} = \frac{F_1}{2} \cdot N_{TK} \left(1 - \frac{D_{TK}}{D_C}\right) = \frac{8,07}{2} \cdot 14 \cdot \left(1 - \frac{32}{190}\right) = 46,98 \text{ Гц}$$

$$F_{FB} = 2 \cdot F_1 \left(\frac{D_C^2}{D_{TK}^2} - 1\right) = 2 \cdot 8,07 \left(\frac{190^2}{32^2} - 1\right) = 533,1 \text{ Гц}$$

Минимально необходимое количество датчиков находим по формуле (14). Задавая  $K = 1,2$  и  $K_B = 3$ , получим:

$$n_q = K \cdot \frac{D_C + D_{TK}}{D_C - D_{TK}} \cdot \frac{N_{TK}}{2} \cdot K_B = 1,2 \cdot \left(\frac{190 + 32}{190 - 32}\right) \cdot \frac{14}{2} \cdot 3 = 35,4.$$

Находим частоту перехода огибающей спектра в ноль:

$$F_0 = 1,2 F_C = 1,2 \cdot 3,36 = 4,03 \text{ Гц}$$

В соответствии с возможностями системы измерений (максимальное число каналов 64) принимаем число датчиков, устанавливаемых на один рельс,  $n_q = 32$ .

Разрешающая способность спектра при этом составит:

$$B_e = \frac{1}{t_0 \cdot n_q} = \frac{F_0}{n_q} = \frac{4,03}{32} = 0,126 \text{ Гц}$$

Принимаем  $B_e = 2,5$  Гц, получим  $F_0 = 80$  Гц

Длительность одной выборки  $t_0 = 0,0125$  с

Длительность реализации процесса  $T_p = 0,4$  с

Находим расстояние между датчиками

$$\ell_q = \frac{\ell \cdot t_0}{\tau_3} = \frac{1850 \cdot 0,0125}{0,0768} = 301,1 \text{ мм}$$

Расстояние между шпалами  $\ell_{ш} = 600$  мм, поэтому принимаем  $\ell_q = 300$  мм.

Проверяем условие (10):

$$\frac{\pi D}{\ell_q} \neq N;$$

$$\frac{3,14 \cdot 950}{300} = 9,94.$$

Длина измерительного участка должна составить около 10 м:

$$\ell_R = \ell_q \cdot (n_q - 1) = 300 \cdot (32 - 1) = 9300 \text{ мм}$$

Из приведенного расчета диагностируемых частот подшипника качения следует, что группа частот  $F_C, F_{TK}, F_{FI}, F_B, F_{FB}$  находится в нижней части спектра, в то время как частота  $F_{FB}$  (частота возбуждения) при дефекте формы тела качения приблизительно в 10 раз выше, чем  $F_{FI}$ . В приведенной статистической модели диагностирования этот параметр может быть и не определен по той причине, что находится выше частоты  $F_0$  и при обработке может попасть на частоту  $F_{FB} = N \cdot F_0$  или близкую к ней. С позиций диагностики частота  $F_{FB}$  представляется важным критерием оценки состояния подшипника и требует контроля.

Поэтому наряду со статистической моделью диагностирования рассмотрим резонансную модель, определяющую в первую очередь частоту  $F_{FB}$ . Метод заключается в измерении ускорения на рельсе вблизи стыка в момент прохождения колесной парой этого места. Датчики должны располагаться слева или справа от стыка. В спектре сигнала находят

частоту  $F_{FB}$ , ее кратные составляющие и оценивают их амплитуду.

Учитывая, что частоты  $k F_{FB}$  входят в диапазон звуковых частот, целесообразно проводить диагностирование с использованием акустических датчиков давления, устанавливаемых вблизи стыка рельсового пути. На этом принципе основано действие так называемого «Поста комплексного контроля» [8]. Однократное измерение может не обеспечить выявления дефекта тела качения, так как в момент прохождения стыка могут отсутствовать условия возбуждения дефектного тела качения.

В принципе, число измерений должно соответствовать количеству тел качения  $N_{TK}$ , а стыки должны располагаться на расстоянии, определяемом частотой сепаратора  $F_C$  и числом тел качения:

$$\ell_{cm} = M \cdot \frac{\pi D F_1}{F_C (N_{TK} - K)}, \quad (15)$$

где  $K, M$  — целое число, причем  $0 < K \leq (N_{TK} - 1)$  и  $M > 0$ .

**Пример:** Пусть из предыдущего примера известно, что  $D = 950$  мм;  $F_1 = 8,38$  Гц;  $F_C = 3,35$  Гц;  $N_{TK} = 14$ .

Определим возможные варианты расстояний между стыками.

Минимальное расстояние при  $M = 1$  и  $K = 1$

$$\ell_{ст.мин} = M \frac{\pi D F_1}{F_C (N_{TK} - K)} = \frac{3.14 \cdot 950 \cdot 8.38}{3.35(14-1)} = 574 \text{ мм.}$$

Расстояние при  $M = 1$  и  $K = 11$

$$\ell_{ст K=11}^{M=1} = \frac{3.14 \cdot 950 \cdot 8.38}{3.35(14-11)} = 7462 \text{ мм.}$$

### Алгоритм идентификации акустического сигнала дефектной буксы

На сети железных дорог широко применяется система «Пост акустического контроля» (ПАК). Она позволяет выявлять дефекты буксовых узлов на ранней стадии их развития с помощью измерения и анализа акустических шумов, которые излучаются вибрацией дефектных подшипников буксовых узлов поездов, проходящих пост ПАК. Система функционирует как самостоятельная установка, соединенная с компьютерной сетью железной дороги, и позволяет обмениваться данными с другими системами контроля [6]. В основе этой системы лежит так называемая Trackside Acoustic Detection System (TADS), в которой акустические измерения построены по принципу линейной решетки [3], состоящей из двух микрофонов в каждой точке контроля, ориентированных в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 3).

Выделение звукового сигнала объекта основано на корреляционном анализе, точность которого обеспечивается наибольшим количеством усреднения выборок, поэтому количество точек наблюдения (узлов решетки) выбирается главным образом с учетом стоимости используемого оборудования.

В частности, в системе ПАК количество таких точек — по шесть с каждой стороны пути с суммарным количеством микрофонов 24. Расстояние между точками измерения выбирается таким образом, чтобы объект контроля постоянно находился в поле зрения микрофона, а обзор в вертикальном направлении должен охватывать только объект контроля, в нашем случае это букса. В системе ПАК объектом контроля была зона контакта колесной пары с рельсовым путем.

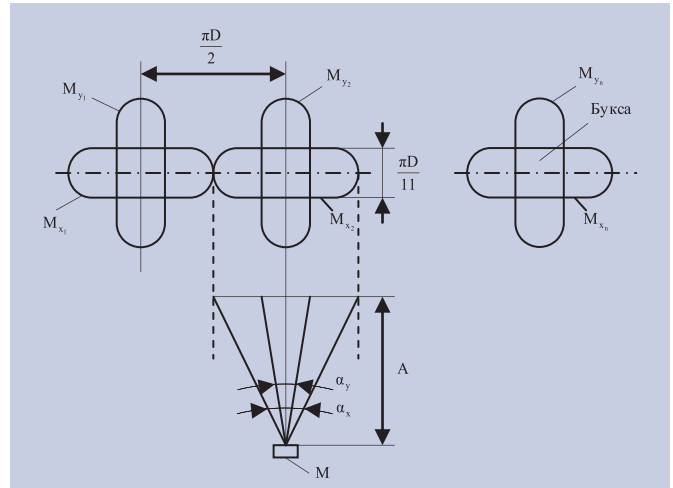


Рис. 3. Схема придорожной акустической системы слежения «Пост акустического контроля»

Совмещение буксового узла с узлом микрофонной решетки фиксируется стробом, получаемым от контакта колеса с педалью, установленной напротив микрофона.

Далее приведен пример расчета углов микрофонной насадки. Длина и параметры насадки должны обеспечивать наименьшую из возможной резонансной частоты. Наивысшая мода не должна превышать 1 кГц. Насадки должны быть изготовлены с высокой точностью, чтобы отклонение передаточных характеристик измерительных каналов было минимальным.

#### Обозначения:

- $M_x, M_y$  — вертикальные и горизонтальные микрофоны акустической решетки;
- $D$  — диаметр обода колесной пары;
- $A$  — минимальное расстояние от микрофона до буксы;
- $\alpha_x, \alpha_y$  — углы для защитных насадок микрофонов.

**Пример расчета.** Пусть для тележки 18-100  $D = 957$  мм,  $A = 1500$  мм. Тогда углы защитных насадок микрофонов:

$$\alpha_x = \arctg \frac{\pi \times 957}{2 \times 1500} = \arctg(0.994) \quad \alpha_x = 45.7^\circ$$

$$\alpha_y = \arctg \frac{\pi \times 950}{11 \times 1500} = \arctg(0.181) \quad \alpha_y = 10'10''$$

Принимаем, что  $\alpha_x = 45^\circ$ ;  $\alpha_y = 10^\circ$ .

Рассмотрим модель прохождения акустических сигналов, измеряемых в одной точке микрофонами  $M_x$  и  $M_y$  (рис. 4).

Пусть на входы микрофонов  $M_x$  и  $M_y$  поступает акустический шум  $Z(t)$ , излучаемый проходящим составом. Сигналы  $x(t)$  и  $y(t)$  — шум, измеряемый микрофонами. Ненаблюдаемые сигналы  $x_1(t)$  и  $y_1(t)$  — шум, излучаемый буксой при движении состава, который искажается передаточными характеристиками микрофонов и их усилителей. Шумы  $n_x(t)$  и  $n_y(t)$  — неинформативные шумы проходящего состава, которые не должны попадать в узел решетки микрофонов: они не коррелированы ни между собой, ни с сигналами  $x_1(t)$  и  $y_1(t)$ . Требуется определить спектры только сигналов буксы.

Принимая во внимание, что измерительный тракт откалиброван и настроен так, что передаточные характеристики  $M_x$  и  $M_y$  одинаковы и стабильны, имеем:

$$x_1(t) = y_1(t) = v(t). \quad (16)$$

Тогда:

$$x(t) = v(t) + n_x(t);$$

$$y(t) = v(t) + n_y(t).$$

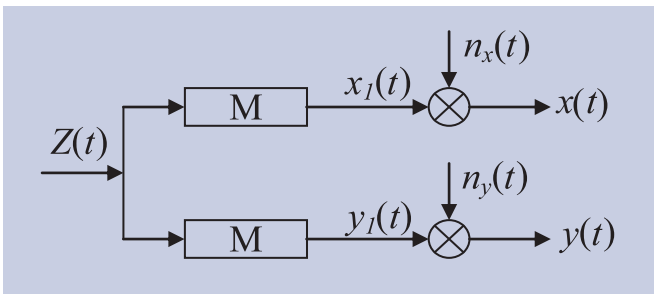


Рис. 4. Модель с одним входом и двумя выходами

Переходя к частотной области, имеем спектральные плотности мощности:

$$G_x(f) = G_v(f) + G_{n_x}(f);$$

$$G_y(f) = G_v(f) + G_{n_y}(f).$$

В известном выражении функции когерентности

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)};$$

из условия (16) следует, что:

$$|G_{xy}(f)|^2 = G_v(f)G_v(f).$$

Тогда:

$$\gamma^2(f) = \frac{G_v^2(f)}{G_x(f)G_y(f)}$$

и, следовательно, спектр шумов буксы:

$$G_v(f) = \gamma_{xy}(f) \sqrt{G_x(f)G_y(f)}. \quad (17)$$

На основании полученного спектра можно получить оценку дефекта формы тела качения подшипника буксы.

Таким образом, из рассмотренных вариантов построения системы оперативной диагностики буксовых узлов колесных пар при прохождении состава в случае измерений на рельсе сле-

дует, что постовая служба контроля должна располагать двумя измерительными участками рельсового пути, один из которых должен иметь стыки. На стационарном измерительном участке диагностирование подшипниковых узлов ведется на частотах  $F_c, F_{TK}, F_{FP}, F_B$  по датчикам ускорений, установленных на рельсовом пути. В результате промышленной эксплуатации пяти постов акустического контроля (ст. Ижоры Октябрьской железной дороги, ст. Лоста – Северной; ст. Миасс – Южно-Уральской; ст. Инская – Западно-Сибирской; ст. Багайск Северо-Кавказской железной дороги), основанной на описанных в статье алгоритмах, установлена 98-процентная подтверждаемость показаний по выбраковке подшипников буксовых узлов. **Т**

**Литература**

1. Краковский Ю. М., Эльхуттов С. Н. Комплексная вибродиагностика оборудования роторного типа. Контроль. Диагностика. № 8, 2003 (ОАО «Иркутск НИИ Химмаш»).
2. Гепкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
3. Wayside detection of faults in railway axle bearings using time spectral kurtosis analysis on high-frequency acoustic emission signals. <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1687814016676000>
4. Ададунов А., Бушуев Р., Крячко А. и др. Experimental determination of the optical fiber sensor characteristics for determining the loading of freight car // Формирование современного информационного сообщества – проблемы, перспективы, инновационный подход. 15-й международный форум. 2015.
5. Корниенко А. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. и др. Автоматизированная система мониторинга и прогнозирования состояния элементов подвижного состава и рельсовых нитей // Интеллектуальные системы на транспорте: матер. 4-й межд. науч.-практ. конф. «Интеллект Транс – 2014». СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2014. С. 84–94.
6. [http://www.rzdexpo.ru/innovation/eastholme\\_management\\_and\\_traffic\\_safety\\_reducing\\_the\\_risk\\_of\\_emergencies/diagnosis](http://www.rzdexpo.ru/innovation/eastholme_management_and_traffic_safety_reducing_the_risk_of_emergencies/diagnosis)
7. Ададунов А. С., Бушуев Р. Ю., Долгий А. И. и др. Пост комплексного контроля как инновационный подход к диагностике ходовой части вагона // Вагоны и вагон. хоз-во. 2015. № 4.