

**Контрольный  
экземпляр**

**На правах рукописи**

**САИНСКИЙ Иван Вадимович**

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ВЗВЕШИВАНИИ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ НА ХОДУ**

**Специальность 05.13.14 – «Системы обработки информации и управления»**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Челябинск - 1999**

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Шестаков А.Л.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Казаринов Л.С.;

кандидат технических наук,  
Мирзаева Г.Д.

Ведущее предприятие – Уральский научно-исследовательский  
институт метрологии (г. Екатеринбург).

Защита состоится 8 октября 1999 г., в 15<sup>00</sup> ч., на заседании диссертационного совета Д 053.13.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76 (ауд. 244).

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, Южно-Уральский государственный университет, ученый совет, т.(3512) 39-91-23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_ 1999 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета д.т.н., профессор

Устюгов М.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Становление рыночных отношений в нашей стране предполагает максимальное использование имеющихся технических средств, а также постоянное их обновление. В новой экономической ситуации, особенно актуально встает вопрос о повышении точности измерений. В предлагаемой работе рассматривается динамическое взвешивание движущихся железнодорожных вагонов. Задача динамического взвешивания существует во многих отраслях промышленности: металлургии, теплоэнергетической, лесной, кондитерской промышленности и т.д., одним словом везде, где приходится иметь дело с большими потоками грузов. Динамическое взвешивание существует даже на обычной почте, при взвешивании посылок. Главными факторами, ограничивающими использование динамических весов в промышленности, являются точность взвешивания, универсальность применения, требуемые быстродействие и надежность. Перспективными направлениями дальнейшего повышения точности динамического взвешивания являются поиски способов снижения возмущающего действия колебаний кузова и необressоренных масс вагона. Существующие методы практически не учитывают частоты и величины затухания динамических возмущений и поэтому не обеспечивают необходимой точности измерений. Таким образом, актуальной является разработка методов обработки данных динамического взвешивания, адаптивных к параметрам динамических возмущений.

Цель работы заключается в разработке алгоритма обработки сигнала с весоизмерительной системы с адаптацией к параметрам динамических возмущений, повышающего точность определения массы движущихся вагонов.

**Научная и практическая ценность** заключается в следующем:

1. На основе дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие в системе «вагон–путь», предложена динамическая модель системы «вагон–весы», позволяющая дать математическое описание процесса возникновения динамических возмущений в весоизмерительной системе.

2. Разработаны алгоритмы динамического взвешивания с адаптацией к параметрам динамических возмущений, действующих в весоизмерительных системах с использованием режекторных фильтров и модифицированного метода интегральной обработки.

3. Созданы алгоритмы и программное обеспечение для измерения с использованием реальной весоизмерительной платформы для посного или потележечного взвешивания вагонов на ходу.

4. Создан программно-аппаратный комплекс, позволяющий производить динамическое взвешивание с существующими весоизмерительными платформами.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, 1998 г.);
- Второй всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений физических величин» (г. Нижний Новгород, 1997 г.);
- Всероссийской научной конференции «Новые методы, технические средства и технологии получения измерительной информации» (г. Уфа, 1997 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 6 печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 164 с. машинописного текста. В работу включены 49 рис., 10 табл., список литературы ( 123 наименований) и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель исследования, указаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** проведен анализ различных методов обработки данных при взвешивании вагонов на ходу, их достоинств и недостатков. Рассмотрены принципы построения современных весов динамического взвешивания, их метрологические характеристики. Одной из основных задач, возникающих при взвешивании в движении, является выбор способа обработки сигналов, обеспечивающего требуемую точность. Исследования показывают, что при прохождении вагонов через весоизмерительную платформу в выходном сигнале силопреобразователя имеется динамическая помеха сложной формы, которая определяется главным образом колебаниями вагона с частотами 3...10 Гц.

Ряд решений предлагает оценивать измеряемый сигнал полусуммой экстремумов, однако данные решения уступают в смысле точности интегрирования за период помехи. Другие предложения предусматривают подавление динамических помех в измерительном сигнале путем выделения помехи, изменения ее фазы на  $180^\circ$  с последующим вычитанием из сигнала (Э.М. Бромберг), но указанные методы работоспособны только при моногармонической помехе, ввиду невозможности обеспечить условия равенства амплитуд и фаз для помех нескольких частот одновременно.

Большинство технических идей предусматривают достижение необходимой точности с применением интегрирования, т.е. вычисления средней оценки  $P_0$  в интервале (0, T).

$$\hat{P}_0 = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} p(t) \cdot g(t) dt,$$

где  $g(t)$  – весовая функция, вводимая для повышения точности оценки

Применению разнообразных весовых функций для целей динамического взвешивания посвящен ряд работ российских и зарубежных ученых (Ракаева А.П., Скалевого В.В., Маликова Г.Ф.). Интегрирование в различных его формах образует большинство существующих методов обработки сигнала весоизмерительного датчика. Однако интегрирование эффективно подавляет помеху лишь при слабо демпфированных колебаниях.

Суммируя данные об известных способах обработки сигнала при динамическом взвешивании отметим, следующее:

- методы ослабления помех фильтрами низких частот не обеспечивает получения удовлетворительной точности взвешивания;
- эффективность обычного интегрирования выше, чем фильтрация низких частот, но еще недостаточна для обработки ограниченного числа периодов помехи;
- двухинтегральный метод – самый экономичный в отношении обработки сигнала, но имеет небольшую степень ослабления и не может применяться в широком диапазоне помех;
- принцип частотного преобразования  $m$  «расчетных» минимумов погрешности по диапазону помех путем сдвига во времени ряда  $2^m$  интегралов позволяет получить теоретически любую наперед заданную степень ослабления помехи, но количество интегралов при этом резко возрастает;
- многointегральная обработка сигнала дает возможность несколько повысить скорость движения вагонов через весы.

Однако ни один из этих методов практически не учитывает частоты и величины демпфирования динамических возмущений, и поэтому в ряде случаев провести динамическое взвешивание стандартными методами с необходимой точностью оказывается вообще невозможным. Практическое решение этих задач может быть осуществлено с помощью методов, адаптивных к параметрам динамических помех.

Во второй главе рассмотрены динамические возмущения действующие в системе «вагон–весы». Разработана ее математическая модель, позволяющая провести моделирование процесса взвешивания с целью оценки влияния параметров и качества алгоритмов обработки данных.

Исследования механической системы, состоящей из четырехосного вагона с жестким кузовом на рессорах одинарного центрального подвешивания и части верхнего строения пути, обладающей приведенной массой на упругом основании,

показали, что при обычных связях между ее элементами, система имеет много степеней свободы и в общем случае может иметь значительное количество тонов колебаний. Каждая из характерных групп динамических процессов вагона представляет собой самостоятельную задачу с чрезвычайно большим объемом исследований. В работе были рассмотрены свободные колебания обрессоренных масс вагона в вертикальной плоскости как стационарная динамическая система, колебания которой описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Следует отметить, что линейная постановка задачи возможна для конкретных случаев, когда в рессорном подвешивании вагонов в качестве гасителей колебаний применяются гидравлические демпферы, у которых сила сопротивления линейно зависит от скорости перемещения рессорного подвешивания. Если в рессорное подвешивание входят гасители колебаний фрикционного принципа действия, рассмотрение задачи как линейной допустимо в случае линеаризации нелинейностей.

При рассмотрении динамической системы «вагон–весы» были приняты следующие допущения. Все рессорные комплекты и гасители колебаний имеют линейные характеристики. Жесткости рессорных комплектов тележек постоянны и равны между собой. Коэффициенты сопротивления демпферов также постоянны и равны между собой. Колеса имеют двухстороннюю связь, т.е. не отрываются от рельсов при колебаниях. Центр тяжести обрессоренной части вагона совпадает с осями симметрии кузова. Кузов рассматривается как твердое тело. На весоизмерительный датчик влияют колебания вагона в вертикальной плоскости. Вертикальные колебания боковой качки не влияют на датчик из-за взаимной компенсации сил давления от колес оси. Наибольшее влияние на сигнал с датчика будут оказывать следующие виды колебаний:

$Z$  – вертикальное перемещение (подпрыгивание), отсчитываемое от центра тяжести кузова в момент статического равновесия

$\theta$  – угловое перемещение (галопирование) относительно оси, проходящей через центр тяжести кузова и перпендикулярной его продольной оси

$Z_t$  – вертикальное перемещение пары тележек

$\theta_t$  – галопирование пары тележек

На основе системы дифференциальных уравнений (1) в работе получена динамическая модель весоизмерительной системы, позволившая дать математическое описание процесса возникновения динамических возмущений в весоизмерительной системе, а также давшая возможность провести моделирование процесса взвешивания, с целью оценки влияния параметров и качества алгоритмов обработки данных. Анализ динамической модели показал, что движения боковой качки кузова в выходном сигнале весоизмерительного датчика отсутствуют из-за взаимной компенсации сил давления от колес оси и не влияют на колебания подпрыгивания и галопирования.

$$\begin{cases} \ddot{z} = -\frac{4k}{m_k} \dot{z} - \frac{4g}{m_k} z + \frac{4k}{m_k} \dot{z}_T + \frac{4g}{m_k} z_T \\ \ddot{\theta} = -\frac{4kl^2}{I_y} \dot{\theta} - \frac{4gl^2}{I_y} \theta + \frac{4kl^2}{I_y} \dot{\theta}_T + \frac{4gl^2}{I_y} \theta_T \\ \ddot{z}_T = -\frac{4(k+2k_H)}{m_T} \dot{z}_T - \frac{4(g+2g_H)}{m_T} z_T + \frac{4k}{m_T} \dot{z} + \frac{4g}{m_T} z + \frac{8k_H}{m_T} \dot{S}_C + \frac{8g_H}{m_T} S_C \\ \ddot{\theta}_T = -\frac{2(k+2k_H)}{m_T} \dot{\theta}_T - \frac{2(g+2g_H)}{m_T} \theta_T - \frac{2k}{m_T} \dot{\theta} - \frac{2g}{m_T} \theta + \frac{4k_H}{m_T} \dot{\Phi}_{PC} + \frac{4g_H}{m_T} \Phi_{PC} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $k$  и  $k_H$  – коэффициенты сопротивления гасителей колебаний и пути;  
 $g$  и  $g_H$  – жесткости рессорных комплектов и пути;  
 $m_K$  и  $m_T$  – массы кузова и тележек вместе с приведенной массой части пути соответственно;  
 $I_y$  – момент инерции кузова относительно поперечной оси;  
 $l$  – расстояние от края до центра масс кузова вагона;  
 $\Phi_{PC}$  – угол наклона кузова, вызванный неровностью пути

$$\Phi_{PC} = \frac{1}{4l}(s_1 + s_2 - s_3 - s_4);$$

$S_C$  – среднее вертикальное перемещение колесных пар вагона на неровности пути или средняя ордината неровности рельсовой нити в местах контакта с колесами вагона

$$S_C = \frac{1}{4}(s_1 + s_2 + s_3 + s_4).$$

Необходимо иметь в виду, что при расчете колебаний шести или восьмiosного вагона значение  $S_C$  содержит соответственно шесть или восемь слагаемых:  $s_1-s_6$  или  $s_1-s_8$ .

При поочередном взвешивании на весы от осей вагона поочередно передаются силы:

$$\begin{cases} C_1 = gz_T + k\dot{z}_T + g\theta_T(l+a) + k\dot{\theta}_T(l+a) - gz - k\dot{z} - g\theta(l+a) - k\dot{\theta}(l+a) + gf \\ C_2 = gz_T + k\dot{z}_T + g\theta_T(l-a) + k\dot{\theta}_T(l-a) - gz - k\dot{z} - g\theta(l-a) - k\dot{\theta}(l-a) + gf \\ C_3 = gz_T + k\dot{z}_T - g\theta_T(l-a) - k\dot{\theta}_T(l-a) - gz - k\dot{z} + g\theta(l-a) + k\dot{\theta}(l-a) + gf \\ C_4 = gz_T + k\dot{z}_T - g\theta_T(l+a) - k\dot{\theta}_T(l+a) - gz - k\dot{z} + g\theta(l+a) + k\dot{\theta}(l+a) + gf \end{cases}, \quad (2)$$

С использованием систем (1) и (2) в работе для удобства рассмотрения была составлена четырехканальная структурная схема.

Анализ сил, действующих на весоизмерительный датчик, показывает, что независимо от способа взвешивания (поосного, потележечного) в выходном сигнале

датчика присутствуют четыре основных тона колебаний системы: подпрыгивание и галопирование тележек и аналогичные колебания кузова.

В третьей главе рассмотрен алгоритм компенсации непостоянства статической характеристики весов, а также метод подавления динамических возмущений при помощи режекторных фильтров с параметрами адаптивными к частотам и величинам затухания этих возмущений. Рассмотрен алгоритм настройки параметров фильтров. Указан способ позволяющий усовершенствовать существующий метод интегральной обработки сигнала весоизмерительного датчика.

Предлагаемые методы обработки данных структурно представлены на рис.1.

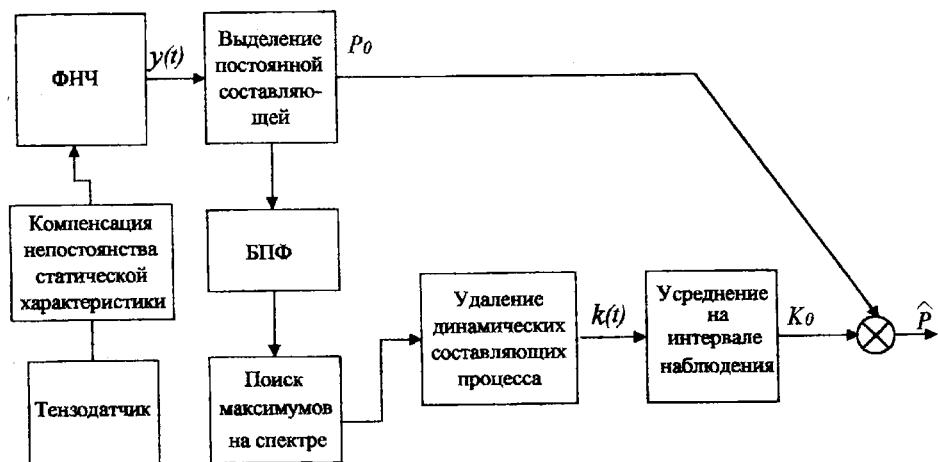


Рис.1. Структура методов обработки сигнала датчика

Согласно представленной схемы из сигнала с тензодатчика исключается погрешность, обусловленная непостоянством статической характеристики. Затем сигнал поступает на фильтр низких частот для удаления из него высокочастотных помех. После этого выполняем приближенное определение массы объекта путем выделения постоянной составляющей сигнала. Сигнал без постоянной составляющей в работе обозначен как идентификационный. После этого производим уточнение массы посредством фильтров, адаптивных к основным частотам возмущений. Для грубой оценки частот динамических возмущений в идентификационном сигнале используем дискретное преобразование Фурье. Затем по полученному спектру, используя специальный алгоритм, производим их уточнение.

После того как, динамические составляющие процесса идентифицированы, они подавляются. В работе рассмотрены два различных способа выполнения этой процедуры: использование линейных режекторных фильтров с адаптацией их к параметрам процесса и метод интегральной обработки сигнала. Первый способ позволяет получить сигнал  $\kappa(t)$  без динамических составляющих и значение  $\kappa_0$  получается усреднением на интервале наблюдения (см.рис.1). Второй же способ сразу дает значение  $\kappa_0$ .

Таким образом согласно схеме рис.1 масса движущегося объекта (оси или тележки в зависимости от способа взвешивания) определяется как сумма значений  $P_0$  и  $\kappa_0$ .

При динамическом взвешивании вследствие потери регулировки весоизмерительной платформы, статическая характеристика весов может значительно отличаться от постоянной. Причем ее вид может иметь произвольный характер. Непостоянство статической характеристики существенно влияет на погрешность измерения, присутствует большая разница показаний весов по направлению движения состава. Для ее компенсации получим статическую характеристику в виде дискретной зависимости  $\hat{P}_i = f(x_i)$ , воздействуя силой определенной величины в различных точках весоизмерительной платформы (где  $\hat{P}_i$  - показания весов,  $x_i$  определяет место приложения силы). Затем перейдем к аналитической зависимости  $\hat{P}(x)$ , путем ее аппроксимации, таким образом чтобы значения аппроксимирующего многочлена совпадали со значениями функции  $\hat{P}_i$ , в узлах интерполяции. В работе предлагается проводить аппроксимацию при помощи сплайн-функций. Для учета статической характеристики представим ее функцией времени:

$$\hat{P} = f\left(\frac{l_{ni}}{t_c} \cdot t\right), \quad (3)$$

где  $l_{ni}$  - длина весоизмерительной платформы;

$t_c$  - время прохождения объекта по весоизмерительной платформе.

Для универсализации аппроксимирующей кривой в работе введена относительная статическая характеристика:

$$st(t) = \frac{\hat{P}(t)}{P_{обр}}. \quad (4)$$

Имея зависимость  $st(t)$ , скомпенсируем непостоянство статической характеристики в сигнале  $\hat{P}(t)$  при любом весе объекта, так как при отсутствии динамических возмущений значения сигнала  $y(t)$  в любой момент времени будут равны  $P_{обр}$ . Таким образом,  $y(t)$  определится следующим выражением:

$$y(t) = \frac{\hat{P}(t)}{st(t)}. \quad (5)$$

В любой реальной системе динамического взвешивания появляются высокочастотные помехи, подавление которых обычно не вызывает затруднений и осуществляется при помощи фильтра нижних частот (ФНЧ). В работе был использован фильтр Баттервортса, как обладающий максимально плоской характеристикой в полосе пропускания и в то же время, дающий удачный компромисс между фильтрами Чебышева и Бесселя (обладает неплохой характеристикой времени запаздывания при относительно узкой ширине переходной области).

Сигнал с весоизмерительного датчика, в котором скомпенсировано непостоянство статической характеристики и удалены высокочастотные помехи представлен на рис.2.

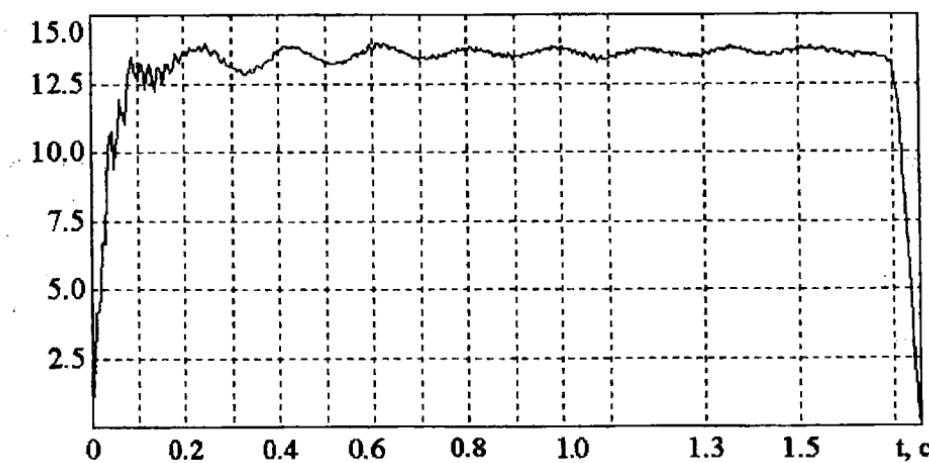


Рис.2. Сигнал с датчика

На рис.2 видны признаки наложения колебаний различных частот и амплитуд на постоянную составляющую. Для перехода от динамического взвешивания к статическому были идентифицированы и исключены вынужденные колебания из сигнала с весоизмерительного датчика. Как видно из рис.2 амплитуда вынужденных колебаний системы много меньше величины постоянной составляющей и зависит от скорости движения состава и жесткости весоизмерительной платформы. Кроме того в сигнале с датчика присутствуют переходные процессы вызванные моментами наезда и скатывания оси на платформу. Если применить преобразование Фурье к сигналу изображенному на

рис.2, то по полученному спектру будет затруднительно идентифицировать частоты динамических возмущений системы. В работе было введено понятие интервала обработки, как участка исходного сигнала на котором отсутствуют переходные процессы. Для его определения были использован алгоритм суть которого состоит в последовательном удалении участков с переходными процессами. На первом этапе - от начала сигнала, для определения времени переходного процесса обусловленного наездом оси вагона на платформу. На втором - от конца сигнала, для нахождения времени переходного процесса обусловленного скатыванием этой оси. На каждой итерации определялось среднеквадратическое отклонение относительно среднего (СКОС) на текущем интервале обработки по следующей формуле:

$$\varepsilon^2(\tau) = \frac{1}{T - \tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} (y(t) - \bar{y})^2 dt,$$

где  $\tau_1$  - продолжительность первого переходного процесса;

$\tau_2$  - продолжительность второго переходного процесса;

$T$  - продолжительность сигнала с датчика.

Таким образом критерий оптимизации при определении интервала обработки определится следующим образом: найти

$$\min \left\{ \frac{1}{T - \tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} (y(t) - \bar{y})^2 dt \right\} \quad (6)$$

$\tau_1; \tau_2;$

при ограничении

$$\tau_1 + \tau_2 < T.$$

Выражение (6) дает критерий, при минимизации которого, были определены интервалы  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , при этом в качестве критерия окончания переходного процесса, было использовано относительное приращение величины  $\varepsilon(\tau)$  при сокращении интервала обработки на  $\Delta\tau$  (7):

$$\frac{\varepsilon^2(\tau) - \varepsilon^2(\tau - \Delta\tau)}{\varepsilon^2(\tau)} \leq \varepsilon_\tau, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_\tau$  - некоторая наперед заданная малая величина.

После определения интервала обработки уменьшим отрицательное влияние постоянной составляющей на идентификацию частот динамических возмущений. Для этого сначала определяется грубая оценка веса, которая затем уточняется. Грубая оценка определяется простым усреднением значений сигнала на интервале обработки, обозначим ее  $P_0$ . Полученное значение вычитается из сигнала с датчика и отбрасываются участки с переходными процессами, полученный сигнал с

датчика был обозначен как идентификационный  $k(t)$ . Таким образом, вес оси вагона определится по следующей формуле:

$$P = P_0 + K, \quad (8)$$

где  $K$  - корректирующий коэффициент.

Корректирующий коэффициент определяется как среднее на интервале наблюдения реализации сигнала, которая получается после обработки идентификационного сигнала. Корректирующий коэффициент  $K$  представляет собой постоянную составляющую, которая присутствует в  $k(t)$ , ее определение рассмотрено ниже. Вынужденные колебания системы по амплитуде во много раз превышают постоянную составляющую идентификационного сигнала, следовательно их частоты могут быть определены по его спектру.

В работе был получен следующий алгоритм определения частот динамических возмущений по спектру. Поскольку частоты вышеуказанных движений находятся в диапазоне от 1.5 до 25 Гц, то первоначально определяются все максимумы, находящиеся в этом интервале спектра.

После нахождения всех максимумов, начиная с наибольшего, на каждый из них настраивается режекторный фильтр и определяется среднеквадратическое отклонение относительно среднего значения на конечном участке длиной  $\Delta_i$ , идентификационного сигнала до и после применения фильтра. Величину  $\Delta_i$  предлагается определять по следующей формуле:

$$\Delta_i = \tau - \sum_{i=1}^n t_i,$$

где  $\tau$  - длина интервала обработки;

$i$  - номер частоты динамической помехи;

$t_i$  - время переходного процесса, обусловленное  $i$ -м режекторным фильтром;

$n$  - количество режекторных фильтров, причем ( $n \leq 4$ ).

Если среднеквадратическое отклонение относительно среднего значения до применения фильтра  $\varepsilon_1^2$ , больше чем СКОС после фильтра  $\varepsilon_2^2$  в  $\alpha$  раз, то эта частота одна из искомых. Таким образом, критерий нахождения одной из частот динамических возмущений определится следующим выражением:

$$\frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2} > \alpha, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_1^2$  и  $\varepsilon_2^2$  - среднеквадратические отклонения относительно среднего значения до и после фильтра соответственно;

$\alpha$  - некоторая наперед заданная величина.

Ширина полосы подавления фильтров при этом минимальна, то есть  $\xi = 0.707 \dots 1$ . Если условие (9) не выполняется, то фильтр применяют к следующему максимуму, если выполняется, то фильтр оставляем и работаем с сигналом после

этого фильтра. Как указывалось выше фильтров должно быть не более четырех, в отдельных случаях, если условие (9) не выполняется, то оно может быть меньше. После того как частоты динамических возмущений системы найдены, производится их подстройка, поскольку по спектру максимумы могут быть определены лишь приближенно.

Для исключения динамических возмущений в работе предложено использовать режекторные фильтры резонансного типа. Порядок фильтра зависит от конкретных условий задачи и может иметь произвольный характер, но поскольку амплитуда собственных колебаний мала относительно постоянной составляющей, то достаточно использования фильтров второго порядка. Кроме того повышение порядка фильтра связано с резким возрастанием времени переходного процесса, что нежелательно, поскольку сигнал с датчика ограничен во времени. Поэтому лучше использовать набор режекторных фильтров, именно второго порядка, передаточная функция которых определяется следующим выражением:

$$W(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 + \omega_0^2} \quad (10)$$

где  $\omega_0$  – центральная частота;

$\xi$  – коэффициент демпфирования режекторного фильтра.

Частоты динамических возмущений системы определяются по спектру приближенно, поэтому их подавление недостаточно эффективно. Кроме того, ширина полосы подавления для каждого возмущения должна подбираться индивидуально, поскольку широкая полоса затягивает переходный процесс, обусловленный фильтром, а слишком узкая может привести к появлению двух остаточных пиков на спектре, которые обеспечат два дополнительных тона возмущений близких к основному. Вследствие, вышеизложенного параметры режекторных фильтров  $\omega_0$  и  $\xi$  предлагается сделать адаптивными.

После режекторных фильтров преобразование Лапласа идентификационного сигнала запишется в следующем виде:

$$k(p) = y_2(p) \cdot W_{pf}(p, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \xi_1, \dots, \xi_n), \quad (11)$$

где  $W_{pf}$  – передаточная функция режекторных фильтров, зависящая от центральных частот.

$n$  - количество режекторных фильтров.

СКОС идентификационного сигнала, после коррекции режекторными фильтрами, при оптимизации параметров одного фильтра, в общем виде определится следующим выражением:

$$\varepsilon_x^2(\omega_j, \xi_j) = \frac{1}{\tau} \int_{T-\tau}^T [k(t, \omega_j, \xi_j) - \bar{k}(\omega_j, \xi_j)]^2 dt, \quad (12)$$

где  $\tau$  – длительность интервала наблюдения, на котором определяется среднеквадратическое отклонение относительно среднего;

$k(\omega_j, \xi_j)$  - среднее на интервале  $\tau$ .

$j$  - номер режекторного фильтра.

Задача минимизации СКОС формулируется следующим образом: найти

$$\min \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{T-\tau}^T [k(t, \omega_j, \xi_j) - \bar{k}(\omega_j, \xi_j)]^2 dt \right\}, \quad (13)$$

$\omega_1, \dots, \omega_n; \xi_1, \dots, \xi_n;$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \omega_j - \Delta\omega_s &\leq \omega_j \leq \omega_j + \Delta\omega_s; \\ \xi_j &\geq 0.707; \end{aligned}$$

где  $\Delta\omega_s$  - дискретность определения спектра идентификационного сигнала.

Оптимизацию по частоте предлагается проводить в ограниченном диапазоне  $\pm \Delta\omega_s$ , поскольку по спектру частоты определяются с погрешностью  $\Delta\omega_s$ . Центральные частоты  $\omega_j$  независимы друг от друга. Оптимизируемая ширина полосы подавления также не зависит от значения ее центральной частоты. Поэтому оптимизацию возможно осуществлять последовательно по каждому параметру. При этом сначала производим оптимизацию по частотам  $\omega$ , а затем по параметрам  $\xi$  ( $\omega$  - вектор частот,  $\xi$  - вектор коэффициентов демпфирования).

В работе при оптимизации был использован алгоритм прямого поиска на основе метода Хука-Дживса, как наиболее простой и удобный для решения поставленной задачи.

Рассматриваемый алгоритм подстройки частот состоит из следующих операций. На первом этапе задаются начальные значения всех элементов  $f_j$ , а также начальное приращение  $\Delta f$ . За начальные принимаем значения частот определенные по спектру. Начальное приращение принимаем равным, для определенности одной десятой от дискретного шага по частоте спектральной характеристики. Затем  $\Delta f$  последовательно уменьшается до тех пор пока не будет достигнута необходимая точность определения  $f_j$ . Как показали результаты обработки данных моделирования и эксперимента,  $f_j$  достаточно определить с точностью до третьего знака.

Затем необходимо определить направление изменения  $f_j$ , этот процесс назовем «исследующим поиском». Чтобы его начать, следует вычислить значение функции  $\epsilon_k^2(f)$  в базисной точке (начальная точка представляет собой начальный вектор предполагаемых искомых значений независимых переменных на первом цикле). Затем изменяется текущая переменная (каждый раз только одна) на

выбранную величину приращения, в то время как другие параметры остаются постоянными, вычисляется новое значение  $\varepsilon_k^2(f)$  и сравнивается с предыдущим. Если целевая функция улучшается на данном шаге, то ее старое значение заменяется на новое при последующих сравнениях. Однако если произведенное возмущение  $\Delta f_j$  неудачно, то сохраняется прежнее значение  $\varepsilon_k^2(f)$ .

После проведения одного (или более) исследующего поиска применяется стратегия поиска по образцу. Удачное изменение переменной в исследующем поиске определяет направление оптимизации, которое может привести к успеху.

Затем производится оптимизация по текущему параметру, в то время как другие остаются постоянными. Серия ускоряющихся шагов, или поиск по образцу, проводится вдоль этого вектора до тех пор, пока  $\varepsilon_k^2(f)$  уменьшается при каждом таком поиске. Если  $\varepsilon_k^2(f)$  перестает уменьшаться в процессе поиска по образцу, то производим снова проводим «исследующий поиск» для определения направления оптимизации следующего параметра. Если оптимизация осуществлена уже по всем параметрам, то последовательно уменьшаем  $\Delta f_j$ , пока либо можно будет определить новое удачное направление, либо  $\Delta f_j$  не станет меньше, чем некоторая заранее установленная величина  $\varepsilon$  (допустимая). Невозможность уменьшить  $\varepsilon_k^2(f)$  когда  $\Delta f$  достаточно мало, указывает на то, что достигнут локальный оптимум и описанная последовательность поисков закончится.

В качестве критерия остановки итерационных процедур в работе использовано выполнение неравенства (14):

$$\frac{\varepsilon_k^2(f_j)_i - \varepsilon_k^2(f_j)_{i+1}}{\varepsilon_k^2(f_j)_i} < \varepsilon_f, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_k^2(f_j)_{i+1}$  и  $\varepsilon_k^2(f_j)_i$  - среднеквадратические отклонения относительно среднего определенные на  $i-1$  и  $i$  итерации соответственно.

$\varepsilon_f$  - некоторая заранее определенная величина, зависящая от класса точности весов.

После окончания оптимизации по частоте, производится расширение полосы подавления режекторных фильтров, путем увеличения коэффициентов демпфирования  $\xi_j$ . Первоначально  $\xi$  принимается равным 0.707, при этом ширина полосы подавления минимальна. Как правило такой полосы подавления недостаточно и ее необходимо расширять. Алгоритм расширения полосы задерживания фильтров состоит в последовательном увеличении каждого коэффициента демпфирования, в то время как другие остаются постоянными. Целевая функция при этом определяется выражением (13). Критерием остановки итерационных процедур, аналогично (14), было использовано выражение (15):

$$\frac{\varepsilon_k^2(\xi_j)_i - \varepsilon_k^2(\xi_j)_{i+1}}{\varepsilon_k^2(\xi_j)_i} < \varepsilon_\xi, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_\xi$  - некоторая заранее определенная величина.

В работе, рассмотрена также модификация широко известного при взвешивании вагонов на ходу метода интегральной обработки, предложенного Скалевыми В.В. и А.В. Основным недостатком этого метода является то, что частоты максимального подавления возмущений выбираются случайным образом, без учета динамических свойств весоизмерительной системы.

В работе на основе адаптивного подхода к подавлению динамических возмущений предложен модифицированный метод интегральной обработки сигнала с весоизмерительного датчика. При этом, частоты максимального подавления помех выбираются равными частотам динамических возмущений системы "вагон-путь", которые определяются по спектру идентификационного сигнала. Число основных максимумов подавления помех принимается равным количеству динамических возмущений, в этом случае оно может быть снижено до четырех и менее, что в значительной степени упрощает обработку сигнала. При этом точность определения массы вагона повысится, поскольку основные максимумы подавления помех будут совпадать с частотами динамических возмущений измерительной системы.

В четвертой главе описываются методика экспериментального исследования, рассмотрены вопросы реализации весоизмерительной системы, представлены результаты обработки реальных данных динамического взвешивания, произведен их анализ. Предложенный программно-аппаратный комплекс состоит из устройства сопряжения весоизмерительной платформы и ЭВМ типа IBM PC/AT 286 или старшего поколения. Весоизмерительные датчики питаются постоянным напряжением, вырабатываемым устройством сопряжения. Функциональная схема программно-аппаратного комплекса представлена на рис.3.

1. Коммутатор служит для переключения сигналов, подаваемых на вход усилителя. На усилитель подается либо сигнал с тензодатчика, либо сигналы с калибровочных мостов.

2. Калибровочные мосты необходимы для устранения погрешности вызванной дрейфом операционного усилителя. Эта составляющая погрешности определяется простой последовательностью алгебраических действий с показаниями весов, когда в качестве входных сигналов принимаются выходные сигналы с калибровочных мостов.

3. Усилитель предназначен для масштабирования сигнала. В работе использован прецизионный усилитель с дифференциальными входами, с коэффициентом передачи 100, предназначенный для использования в контрольно-измерительной аппаратуре.

4. АЦП является основным звеном устройства и выполняет функцию преобразования входного напряжения в цифровой код.

5. Микроконтроллер обеспечивает двустороннюю связь с компьютером через последовательный порт, а также служит устройством управления схемы.

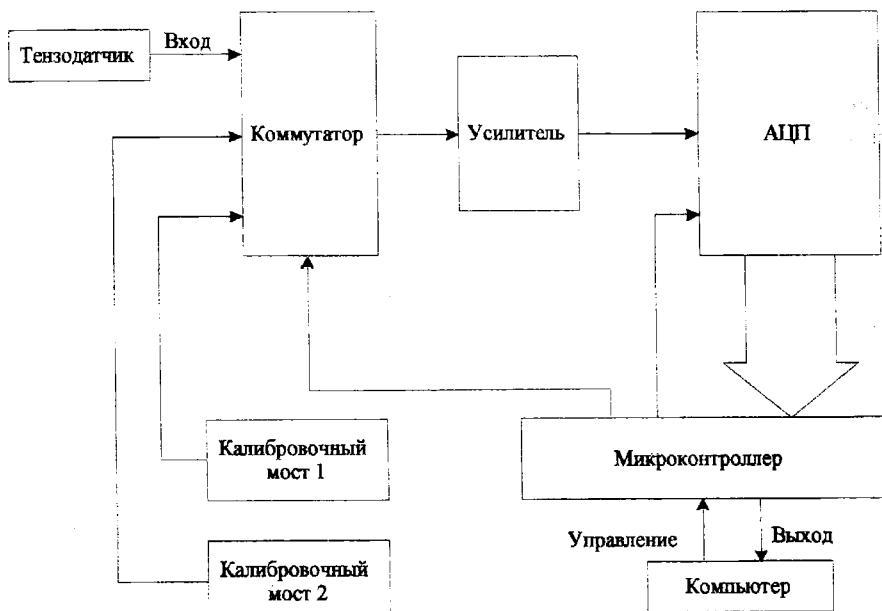


Рис.3. Функциональная схема программно-аппаратного комплекса

Методика обработки сигнала полностью реализуется на ЭВМ, она включает в себя алгоритмы исключения погрешности вызванной дрейфом нуля операционных усилителей и отклонением напряжения питания датчиков от номинального. В результате экспериментальной обработки сигнала с весоизмерительного датчика, стало возможным практически подавить динамические возмущения, возникающие при взвешивании вагонов на ходу и тем самым фактически перейти от динамического взвешивания к статическому. На скоростях 14.4км/ч и 3.46км/ч относительная погрешность взвешивания составила 0.19% и 0.17% соответственно. Применение предложенного алгоритма позволило повысить предельную скорость движения состава при одинаковых величинах погрешности определения массы промышленными весами и предложенным программно-аппаратным комплексом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрена комплексная задача, автоматизированного определения массы железнодорожных вагонов в движении. На основе материалов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе, можно сформулировать следующие выводы и результаты:

1. На основе дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие вагона и подъездного пути, предложена динамическая модель системы «вагон-весы», позволяющая математически описать динамические возмущения, возникающие в измерительном канале при взвешивании вагонов на ходу. Анализ модели и реальных данных показал, что вне зависимости от способа взвешивания (поосного, потележечного), в выходном сигнале датчика присутствуют четыре основных тона колебаний системы: подпрыгивание и галопирование тележек, и аналогичные колебания кузова. Исследования показали, что вертикальные колебания боковой качки не влияют на весоизмерительную систему, из-за взаимной компенсации сил давления от колес оси и их независимости от колебаний подпрыгивания и галопирования. При равномерной загрузке вагона (центр тяжести обрессоренной части вагона совпадает с осями симметрии кузова), колебания подпрыгивания и галопирования будут взаимно независимы. При рассмотрении модели восьмиосного вагона в сигнале датчика, аналогично четырехосному вагону, также будут присутствовать четыре основных тона динамических возмущений.

2. Разработана автоматизированная система получения и обработки информации, позволяющая существенно повысить точность определения массы движущихся вагонов, включающая:

- алгоритм получения и обработки измерительной информации, позволяющий выявить и определить частоты динамических возмущений «системы вагон-весы»;
- алгоритм компенсации непостоянства статической характеристики весов на основе аппроксимации сплайн - функциями, снимающий ограничения на направления движения состава и необходимость в частых текущих ремонтах весов, связанных с их настройкой;

– алгоритм подавления динамических возмущений на основе режекторных фильтров в сочетании с ФНЧ, адаптивных к собственным частотам и величинам затухания этих возмущений, применение которого в совокупности с алгоритмом компенсации непостоянства статической характеристики, позволяет на конечном интервале наблюдения эффективно подавить динамические возмущения и преобразовать существующую динамическую систему взвешивания к статической. По результатам обработки экспериментальных данных, относительная

динамическая погрешность может быть снижена до величины 0.10...0.21%, при скорости взвешивания от 3.42...14.4км/ч.

3. Предложен модифицированный метод интегральной обработки, включающий алгоритм идентификации частот динамических возмущений, позволяющий повысить точность взвешивания по сравнению с известным методом, эффективным при слабодемпфированных колебаниях.

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пашнин А.В., Саинский И.В. Аппаратный комплекс для приема аналоговых сигналов тензометрических весоизмерительных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. трудов. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – С.164–168.

2. Саинский И.В. Модель динамической системы «вагон-весы» при взвешивании вагонов на ходу // Всерос. научн. конф. «Новые методы, технические средства и технологии получения измерительной информации»: Тез. докл. – Уфа, 1997. – С.113–114.

3. Шестаков А.Л., Саинский И.В. Коррекция динамической погрешности при взвешивании вагонов на ходу // II Всерос. научн. - техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин»: Тез. докл. – П. Новгород, НГТУ, 18–19 июня, 1997. – Ч.1. – С.92.

4. Шестаков А.Л., Саинский И.В. Алгоритм определения и исключения динамической погрешности при взвешивании вагонов на ходу // Системы обработки информации и управления: архитектура и программное обеспечение: Сб. научн. трудов. –Челябинск: ЮУрГУ 1998. –С.23–25.

5. Шестаков А.Л., Саинский И.В. Метод обработки данных при взвешивании вагонов на ходу // Труды IV Международной конференции АПЭП-98 Новосибирск, НГТУ, 23-26 сентября, 1998. –Ч.2. –С.237–238.

6. Шестаков А.Л., Саинский И.В. Результаты обработки данных при взвешивании вагонов на ходу // Информационно-измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. трудов. –Челябинск: ЮУрГУ, 1998. –С.169–171.

*И.Саинский*

Издательство Южно-Уральского государственного университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 30.08.99. Формат

60\*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1

Тираж 70 экз. Заказ 241/51.

Группа МЭНП издательства, 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.