

*На правах рукописи*

**ТЮРИН Сергей Вячеславович**



**КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ  
ПУТЕМ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
ДАЛЬНОСТЕЙ ДО ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

*Специальность 25.00.32 – Геодезия*

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2006**

**Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Санкт-Петербургском государственном университете.**

***Научный руководитель –***

**доктор географических наук, профессор**

***Курошев Герман Дмитриевич***

***Официальные оппоненты:***

**доктор технических наук, профессор**

***Козгия Вилио Александрович,***

**кандидат технических наук, доцент**

***Астапович Анатолий Владимирович***

**Ведущее предприятие – Сибирский научно-исследовательский и производственный центр геоинформации и прикладной геодезии.**

**Защита диссертации состоится 21 декабря 2006 г. в 15 ч на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт-Петербургском государственном горном институте имени Г.В.Плеханова (техническом университете) по адресу: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд.1160.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного горного института.**

**Автореферат разослан 17 ноября 2006 г.**

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент**



**Ю.Н.КОРНИЛОВ**

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Определение геометрических характеристик вращающихся агрегатов в условиях современного производства является важной задачей. Подобные агрегаты присутствуют на многих промышленных объектах. Это и вращающиеся печи, и валы бумагоделательных машин, бронировочные машины и многое другое. От своевременности и качества проводимых контрольных обмеров зависит эффективность и качество работы оборудования, его безаварийность. Требования, предъявляемые к точности изготовления и выверки подобных агрегатов, всегда были высокими и со временем только ужесточаются. Так, например, допуск на овальность по наружному диаметру бандажа вращающейся печи составляет 0.0005 диаметра, то есть при диаметрах в 4-6 метров он составит 2-3 мм. Допуски же для формы валов бумагоделательных машин составляют 0.05-0.7 мм, что требует проведения прецизионных измерений.

В связи с повышением требований к точности деталей машин и механизмов, их усложнением особую важность приобретает задача проведения контрольных обмеров без остановки производственного цикла. Это связано с тем, что работающие агрегаты претерпевают деформации, связанные с тепловым режимом оборудования, неравномерным износом его частей, деформациями фундаментов и т.п. Эти деформации невозможно выявить на остановленном оборудовании, а их игнорирование может привести к аварийной ситуации. Кроме этого важен и экономический фактор, так как простой оборудования ведет к убыткам предприятия.

Такого рода задачи, особенно на крупногабаритных агрегатах, всегда решались с привлечением геодезических методов. Большой вклад в их развитие внесли геодезисты Асташенков Г.Г., Баран П.И., Островский А.Л. и др. Ими и другими специалистами предложены методы предполагающие проведение измерений на работающем оборудовании. Однако большинство из них требуют контакта с объектом, что зачастую невозможно. Те же геодезические методы, которые позволяют выполнять бесконтактный обмер оборудования, трудоемки и не позволяют получать данные с достаточной точностью и в непрерывном режиме.

Положение изменилось с появлением электронных приборов, позволяющих автоматически в бесконтактном режиме определять расстояние (или его изменение) до поверхности объектов с заданной частотой и высокой точностью. В этом качестве могут выступать как геодезические приборы (лазерные рулетки и тахеометры с безотражательным дальномером), так и устройства, разработанные для измерений в машиностроении, например, лазерные триангуляционные датчики положения.

Появление таких приборов в сочетании с достижениями математической теории и ростом производительности вычислительных машин создает предпосылки к разработке измерительно-программных комплексов, предназначенных для определения характеристик вращающихся агрегатов различного назначения. Одной из проблем, возникающих на этом пути, является отсутствие методов обработки получаемых данных, позволяющих воспользоваться преимуществами нового оборудования. Подобного рода методы должны обеспечивать расчет геометрических параметров объекта, выявлять источники возмущений в положении объекта и обладать устойчивостью к зашумлению данных, возникающему вследствие различных технологических причин (вибрация, запыленность и др.).

Целью настоящей работы является:

Разработка методов определения геометрических параметров вращающихся объектов цилиндрической формы по измеренным дальностям до их поверхности.

В соответствии с целью сформулированы следующие задачи исследования:

- Анализ существующих способов определения геометрических параметров вращающихся объектов.
- Изучение средств автоматического, дистанционного измерения расстояния до объекта.
- Изучение математических методов анализа временных рядов.
- Разработка методов выявления отклонений формы сечения объекта от окружности по измеренным дальностям до поверхности объекта.

– Разработка способа определения координат центра вращения и среднего радиуса сечения объекта по измеренным дальностям до поверхности объекта.

#### Методика исследований.

В исследовании применялись методы математической обработки геодезических измерений, матричной алгебры, спектрального и корреляционного анализа. Предлагаемые методы и алгоритмы тестировались на математических моделях, создаваемых при помощи специально разработанной программы на ПЭВМ. Также проводилась экспериментальная проверка предлагаемых методов на промышленных предприятиях.

#### Научная новизна работы заключается в следующем:

– Показана возможность использования методов анализа сингулярного спектра для выделения из измеренных дальностей до вращающегося объекта данных соответствующих деформациям формы и другим возмущающим факторам.

– Предложен способ определения периода выделенных при анализе сингулярного спектра составляющих, что необходимо для их интерпретации.

– Разработан алгоритм расчета координат точки вращения и радиуса сечения по измеренным дальностям до поверхности объекта с трех точек.

#### Научные результаты, выносимые на защиту:

– Решена задача выявления отклонений формы сечения объекта от окружности путем измерения дальностей до поверхности объекта с одной точки.

– Предложен способ определения координат центра вращения и среднего радиуса сечения объекта по синхронным измерениям дальностей до поверхности объекта с трех точек.

#### Практическое значение работы:

– Разработанные методы позволяют осуществлять контроль геометрических параметров вращающихся цилиндрических промышленных объектов в динамике.

– Предложенные алгоритмы реализованы в виде программ для ПЭВМ.

#### Реализация результатов исследований.

Разработанные методы прошли апробацию в ЗАО «БУМТЕХНО» при выполнении работ на комбинате «Фосфорит» и Сыктывкарском ЛПК.

Диссертация содержит 123 страницы и состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 83 наименований, в том числе 5 зарубежных. Основные результаты исследований опубликованы в 4 печатных работах.

Во введении обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи исследования.

В первой главе дается обзор основных инструментальных средств контроля параметров вращающихся объектов. Рассматриваются преимущества использования бесконтактных датчиков. Подробно рассматриваются триангуляционные лазерные датчики положения. Так же в главе дается обзор математических методов обработки данных, представляющих собой временные ряды. Формулируется цель исследования.

Во второй главе рассматриваются методы обработки одного ряда измеренных дальностей. Решается задача выявления отклонений формы сечения объекта от окружности путем измерения дальностей до поверхности объекта с одной точки.

В третьей главе рассматриваются вопросы обработки рядов измеренных дальностей, полученных с нескольких точек. Предлагается способ определения координат центра вращения и среднего радиуса сечения объекта по синхронным измерениям дальностей до поверхности объекта с трех точек.

В четвертой главе приведены примеры использования некоторых предлагаемых методов при обмерах вращающихся печей на комбинатах «Фосфорит» и Сыктывкарский ЛПК. Выполнено сравнение результатов с данными обмера остановленной печи, полученными при помощи тахеометра.

### **Содержание работы**

На основании проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Решена задача выявления отклонений формы сечения объекта от окружности путем измерения дальностей до поверхности объекта с одной точки.

Данные о расстоянии до поверхности объекта поступают с датчика последовательно через равноотстоящие моменты времени, то есть представляют собой временной ряд. Анализ временных рядов представляет собой самостоятельную область математической статистики. Одной из основных задач анализа временных рядов является выделение из ряда различных составляющих его компонент (трендов, периодических составляющих, шумовых).

Наибольший интерес вызывают периодические составляющие. Если объект вращается без контакта с другими объектами (валиками, роликами и т.п.), то факторами, порождающими периодические компоненты, могут быть его форма и эксцентриситет. В случае вращения в контакте с другими объектами, добавляются еще периодические составляющие вызванные, например, неправильностью форм этих объектов. К перечисленным факторам могут добавляться и другие (например, периодическое нагревание объекта), которые еще более усложняют картину. Как правило, основной задачей является выделение периодической составляющей, связанной с особенностями самого объекта (его формой), что позволяет определить период и скорость вращения объекта, а также отклонения от идеальной формы.

В отношении третьей, случайной компоненты задача состоит в ее удалении из ряда, т.е. фильтрации так называемого «белого шума».

Как уже указывалось, ряд данных является композицией нескольких составляющих, порожденных различными факторами. Для разделения ряда на составляющие его компоненты предлагается применить метод, получивший в отечественной математической литературе двойное название: «Гусеница» - SSA (Singular Spectrum Analysis). Суть его состоит в следующем. Рассмотрим временной ряд  $L_N = (l_0, \dots, l_{N-1})$  длины  $N$ ,  $N > 2$ . Основным параметром алгоритма служит так называемая длина окна  $W$ ,  $1 < W < N$ .

Первый шаг, вложение, состоит в формировании из ряда траекторной матрицы  $X$  размера  $W \times K$ ,  $K = N - W + 1$ , следующим

образом. Будем последовательно брать из ряда отрезки длины  $W$  и составим из них траекторную матрицу  $X = [X_1 : \dots : X_K]$ , где  $X_j = (I_{j-1}, \dots, I_{j+W-2})^T$ ,  $j=1, \dots, K$ . Далее проводится сингулярное разложение матрицы  $X$ :

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, \quad X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T, \quad (1)$$

где  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_d > 0$  – упорядоченные ненулевые собственные числа матрицы  $XX^T$ ,  $\{U_i\}_{i=1}^d$ :  $U_i \in \mathbb{R}^W$  – соответствующие им собственные вектора, а  $\{V_i\}_{i=1}^d$ :  $V_i = \lambda_i^{-1/2} X^T U_i \in \mathbb{R}^K$  будем называть факторными векторами. Собственный и факторный вектора называют сингулярными векторами, а совокупность  $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$  – собственной тройкой.

На третьем шаге проводится группировка компонент разложения. Разбив множество  $\{1, \dots, d\}$  на  $m$  непересекающихся подмножеств  $I_j$ , получим

$$X = X_{I_1} + X_{I_2} + \dots + X_{I_m}, \quad X_{I_j} = \sum_{k \in I_j} X_k.$$

Последним шагом является восстановление рядов  $L_N^{(j)}$  по сгруппированным матрицам  $X_{I_j}$ . Элемент ряда  $L_n^{(j)}$  получается с помощью усреднения вдоль антидиагонали элементов матрицы  $X_{I_j}$  с индексами  $a$  и  $b$  такими, что  $a+b=n+2$ . Таким образом, получаем разбиение ряда  $L_N = L_N^{(1)} + \dots + L_N^{(m)}$ .

У метода есть два параметра. Первый – это длина окна  $W$ , второй параметр является структурным – это способ группировки компонент сингулярного разложения. В большинстве случаев длину окна нужно задавать близкой к половине длины ряда, по крайней мере, в первом приближении. Однако если известно, что временной ряд имеет периодическую составляющую с известным периодом  $T$ , то предпочтительно взять длину окна  $W$  пропорциональной величине этого периода.



Тестирование этого и других алгоритмов проводилось на моделях, построенных в специальной авторской программе. Она позволяет моделировать измерения до вращающегося объекта. Полученные измерения при необходимости могут быть искажены случайными ошибками. Так для объекта, представляющего собой эллипс с полуосями равными  $a=300$ ,  $b=299$ , координатами центра вращения  $X_T=0.6$ ,  $Y_T=0$ , углом поворота между отсчетами  $t=1.55^\circ$ , числом измерений  $N=5000$  были получены измерения, показанные на графике (рис. 1).

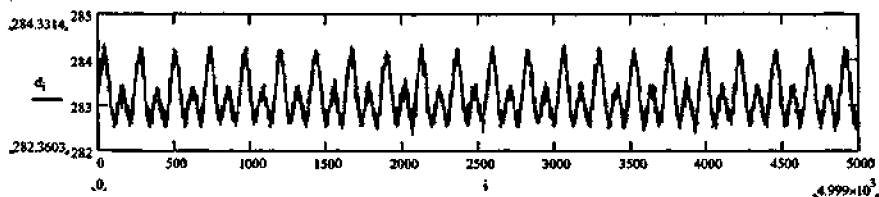


Рис. 1. Смоделированные измерения.

Необходимой процедурой при обработке реальных данных является обнаружение грубых промахов, которые могли возникнуть, например, из-за кратковременного внешнего воздействия на датчик. Критерием может служить резкое, непродолжительное изменение в данных, превышающее допустимую величину, которая устанавливается в зависимости от точности датчика, качества поверхности и величины вибрации. В случае выявления таких промахов, данные в эти моменты времени заменяются средним из данных, полученных в соседние моменты. Затем данные центрируются.

Применяя метод «Гусеница» для данных из нашего примера, возьмем длину ряда равной 1858, приблизительно 8 периодов, а длину окна 929, приблизительно 4 периода. После центрирования ряда и построения траекторной матрицы  $X$ , вычисляем вектор собственных чисел  $\lambda$  и матрицы, собственных  $U$  и факторных  $V$  векторов.

$$\lambda^T = [280.768 \quad 280.283 \quad 232.144 \quad 232.117 \quad 13.745 \quad 7.063 \quad 7.037 \quad 7.000]$$

По формуле 1 вычисляем элементы сингулярного разложения.

Самым неформализуемым шагом является шаг группировки. Вся информация о каждой из компонент  $X_i$  содержится в собственном числе  $\lambda_i$ , а также в собственном  $U_i$  и факторном  $V_i$  векторах. Поиск компонент для требуемой группировки проводится, главным образом, на основе анализа собственных троек. Прежде всего, необходимо обратить внимание на столбец собственных чисел  $\lambda$ . Чем больше сингулярное значение в собственной тройке, тем больше вклад соответствующей восстановленной компоненты ряда. Собственное число можно рассматривать в качестве характеристики этого вклада. Периодической компоненте обычно соответствуют две собственные тройки сингулярного разложения, собственные числа в которых близки по значению. Искать относящиеся к таким компонентам пары собственных троек удобно на двумерных диаграммах. В идеальной ситуации собственные векторы это косинусоида и синусоида с периодом  $T$  и с одной и той же амплитудой и фазой. То же самое верно и для факторных векторов. Двумерное изображение двух таких собственных векторов создаст точки, лежащие на окружности.

К шумовой компоненте относят те собственные тройки, которые не содержат ни тренда, ни колебаний.

Таким образом, сгруппировав компоненты 1-2, 3-4, 5-929, получим восстановленные компоненты ряда (рис. 2).

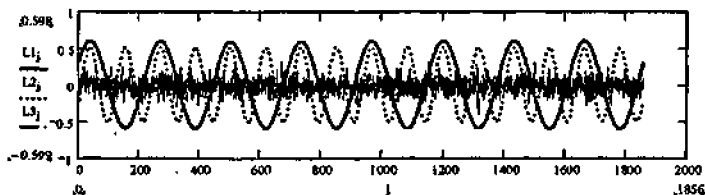


Рис. 2. Восстановленные компоненты ряда.

Первая компонента ( $L_1$ ) отражает влияние эксцентриситета, вторая ( $L_2$ ) это влияние формы, а третья ( $L_3$ ) – выделенный «белый шум».

Используя ряд  $L_2$ , строим график отклонений формы объекта от окружности, который соответствует заложенной при моделировании форме - эллипсу.

На следующем графике (рис. 3) изображены фрагменты смоделированного шума и выделенной шумовой компоненты. Видно, что они практически совпадают.

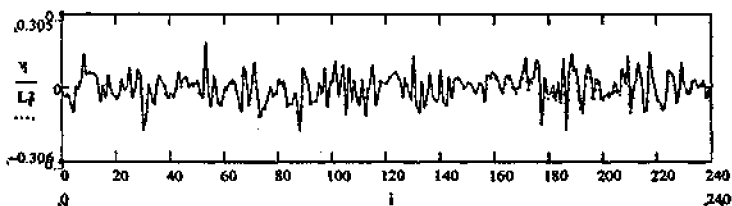


Рис. 3. Фрагмент смоделированного шума и выделенной шумовой компоненты.

Следует отметить, что приведенный пример в большой степени идеален, и на практике правильная идентификация и группировка собственных троек часто является довольно сложной задачей.

Кроме этого при использовании метода на реальных объектах отдельной задачей становится интерпретация полученных составляющих ряда применительно к конкретной ситуации. Основным критерием для этого служит период той или иной составляющей.

Для определения периода предложен следующий способ, основанный на корреляционном анализе. Он может применяться как к полному ряду данных, так и к конкретной выделенной составляющей.

Рассмотрим ряд данных  $L = (l_0, \dots, l_{n-1})$  длины  $n$ . Возьмем фрагмент данных  $L_f = (l_0, \dots, l_{m-1})$  длины  $m$ . Будем последовательно брать из ряда отрезки длины  $m$   $X_i = (l_i, \dots, l_{i+m-1})$ ,  $i = 0, \dots, n - m$ . Между каждым отрезком  $X_i$  и фрагментом  $L_f$  найдем коэффициент корреляции  $\rho_i(X_i, L_f)$ . Из-за особенностей формы объекта и внешних возмущающих факторов получившийся ряд может содержать ложные максимумы корреляции. Для их устранения повторяется описанная процедура еще один, а если позволяет длина ряда то два, раза, рассматривая ряд коэффициентов корреляции как ряд данных. В итоговом ряду устанавливаются максимумы корреляции, и подсчитывается число измерений между ними —  $p$ . Если это число  $p$  меняется незначительно (зависит от равномерности

вращения и дискретности взятия отсчетов) при переходе от одной пары максимальных значений к другой, то считается, что периодичность выявлена.

Для установления точного значения периода рассматриваем последовательно пары точек: первая точка  $i$  – точка максимума корреляции, вторая – одна из соседних точек  $i \pm 1$ , имеющая наибольшее значение. Интерполируя по формуле

$$i \pm \frac{(1 - \rho_i)}{2 - \rho_{i \pm 1} - \rho_i},$$

находим новые точки максимума. Найдя разности между ними и взяв среднее, определяем величину периода.

Установленный период и известная дискретность взятия отсчетов позволяет при необходимости вычислить скорость вращения.

Необходимо отметить, что интерпретация выделенных составляющих, основанная только на величине периода, может быть не корректной.

Рассмотрим объект, имеющий сечение изображенное на рис. 4.

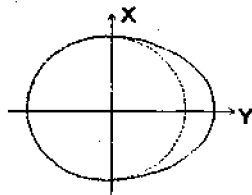


Рис. 4. Сечение смоделированного объекта.

Одна его часть представляет собой половину эллипса, другая часть – половина окружности. Разница между радиусом окружности и большей полуосью эллипса равна 20.

При его вращении вокруг точки с координатами (5.0, 0.0) получены следующие данные (рис. 5).

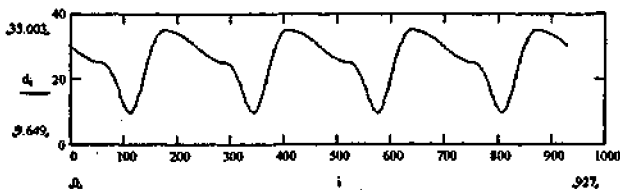


Рис. 5. Смоделированные измерения.

Применив метод «Гусеница» получим следующие восстановленные компоненты ряда (рис. 6).

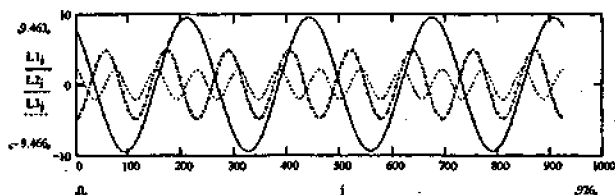


Рис. 6. Восстановленные компоненты ряда.

Первая компонента  $L1$  имеет период, равный полному повороту объекта, у второй  $L2$  период равен половине оборота, а у третьей  $L3$  - одной трети оборота. В данном случае первая составляющая соответствует движению центра тяжести вокруг центра вращения. Если рассчитать положения центра тяжести в начальный момент, то его координаты будут  $(0.0, 8.0)$ . Следовательно, расстояние от центра вращения  $(5.0, 0.0)$  до центра тяжести равно 9.43. Это хорошо согласуется с полученной величиной 9.46 (рис. 6).

Что касается формы, то ее влияние выразилось не в одной, а в двух составляющих ( $L2, L3$ ). Первая отражает «овальность» сечения (рис. 7), а вторая - другие, более высокочастотные отклонения (рис. 8). Вместе они полностью описывают заданную форму (рис. 9).

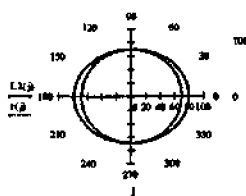


Рис. 7

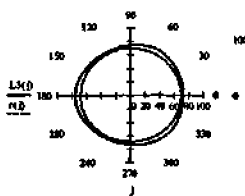


Рис. 8

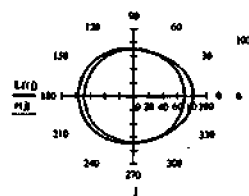


Рис. 9

Для облегчения задачи интерпретации выделенных составляющих предложен следующий способ предварительного определения формы объекта.

Образуем разности между первым измерением и всеми последующими. Затем эти разности прибавим к предполагаемой величине радиуса сечения ( $r$ ).

$$df_j = r + (d_0 - d_j), \quad j = 1 \dots n \quad (2)$$

При принятом значении  $r=70$ , получен следующий круговой график (рис. 10).

Как видно форма сечения определена верно, а несовпадение центра тяжести и центра вращения привело к некоторому смещению.

Этот способ может применяться в случае, если центр тяжести сечения совпадает с центром вращения или описывает вокруг него окружность.

Приведенный пример показывает, что интерпретация восстановленных компонент является сложной, трудно формализуемой задачей, правильное решение которой возможно при наличии априорной информации об особенностях объекта и знания законов его функционирования.

По итогам проведенных исследований предложена следующая последовательность обработки результатов измерений дальностей, полученных с одной точки:

1. Удаление грубых ошибок и центрирование данных
2. Разложение ряда на составляющие с помощью метода «Гусеница»
3. Определение периода соответствующих компонент ряда
4. Предварительное определение формы по совокупности выделенных составляющих, исключая шумовую и другие высо-

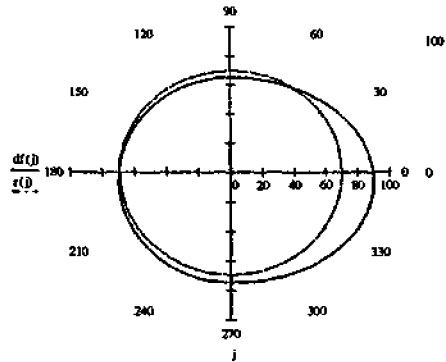


Рис. 10. Полученная форма сечения.

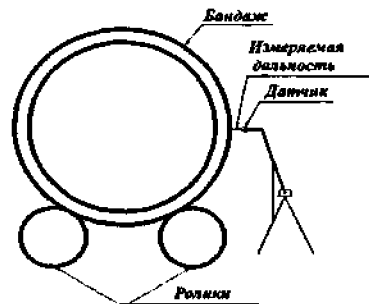


Рис. 11. Размещение датчика у контролируемой поверхности.

кочастотные составляющие

5. Интерпретация выделенных составляющих

6. При необходимости построение параметрических моделей отдельных составляющих ряда.

Экспериментальная проверка предлагаемых методов была выполнена во время работ по контролю геометрических характеристик вращающихся печей обжига на комбинатах «Фосфорит» и Сыктывкарском ЛПК.

В этих работах использовались датчики фирмы «Рифтэк» серии РФ600. Датчики размещались у контролируемой поверхности на специальных кронштейнах или выдвижных штангах (рис. 11). Так при работе на первом бандаже известерегенерационной печи Сыктывкарского ЛПК были получены измерения, которые после центрирования могут быть представлены в виде графика (рис. 12).

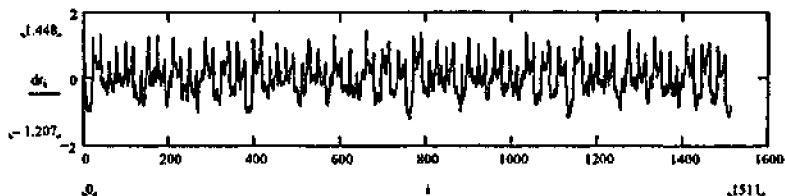


Рис. 12. Измерения по бандажу.

После разложения на составляющие получили семь периодических компонент с различными периодами. Ограничимся рассмотрением первых трех, вносящих наибольший вклад (рис. 13).

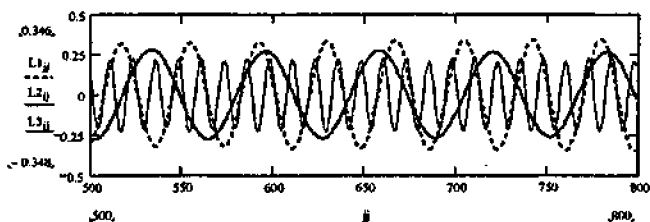


Рис. 13 Восстановленные компоненты.

Первая имеет период 14.8 сек., вторая - 24.8 сек., третья - 4.8 сек. Исходя из того, что период вращения печи составляет 50-55

сек., а роликов соответственно 12.5-13.8 сек., можно предположить, что первая компонента порождена влиянием роликов, а вторая «овальностью» бандажа. Что касается третьей компоненты, то ее источник не выявлен. На следующем графике (рис. 14) показаны: форма бандажа построенная по второй выделенной составляющей (жирная линия) и форма, полученная по данным с электронного тахеометра (тонкая линия).

Так как обмер бандажа на остановленной печи производился лишь с одной стороны, сравнение результатов возможно только для половины поверхности.

Заметное расхождение между линиями наблюдается лишь в одном месте и составляет 0.4 мм, что не намного превышает точность координат, которые были получены по измерениям электронным тахеометром *Leica TDA 5005* с ошибкой 0.2 – 0.3 мм.

**2. Предложен способ определения координат центра вращения и среднего радиуса сечения объекта по синхронным измерениям дальностей до поверхности объекта с трех точек.**

Добавляя в измерительную систему датчики, мы получаем дополнительную информацию, которая позволяет повысить достоверность получаемых результатов, облегчить их интерпретацию и оценить дополнительные параметры. Необходимое количество датчиков зависит от особенностей наблюдаемого объекта и поставленной задачи. Рассмотрим задачи, решаемые разным количеством датчиков при наблюдении за вращающимся объектом цилиндрической формы.

1. При наличии одного датчика мы можем определить радиальное биение объекта в необходимом месте и, используя изложенные ранее методы выделить влияние различных факторов (эксцентриситет, отклонения от окружности и др.).

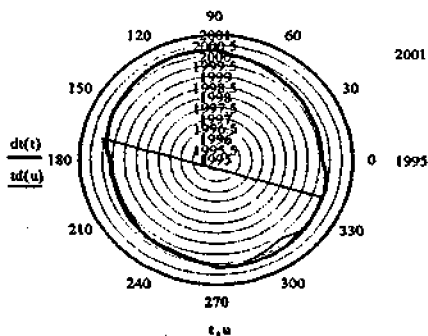


Рис. 14 Совместный график отклонений.



2. При использовании двух датчиков, расположенных в одном поперечном сечении, обеспечиваются те же результаты, что и в первом случае, однако надежность их повышается.

3. Использование трех и более датчиков, расположенных в одном поперечном сечении, позволяет дополнительно определить три параметра: средний радиус и координаты центра вращения по данному сечению (при условии, что координаты датчиков определены).

4. Использование большого количества датчиков дает возможность одновременно получать данные для множества сечений объекта, что обеспечивает полное описание наблюдаемого объекта в динамике. Кроме этого датчики можно расположить и на объектах сопряженных с наблюдаемым и получить информацию о их взаимном влиянии.

Подходы к обработке данных, полученных с группы датчиков, изложены для случая работы с тремя датчиками. Работа с сетью датчиков, расположенных в различных сечениях, затрагивается только в вопросах ее уравнивания.

Расположение датчиков должно удовлетворять следующим условиям:

- Датчики должны располагаться в плоскости перпендикулярной оси объекта.
- Они должны быть доступны для координатоопределяющей системы.
- Датчики желательно располагать равномерно по всей окружности.

После закрепления датчиков производится определение их координат с помощью геодезических приборов. В работе рассмотрены основные моменты, связанные с определением координат применительно к оптическим триангуляционным датчикам. Также в работе рассмотрены вопросы уравнивания свободных пространственных геодезических сетей, построение которых необходимо при использовании большого количества датчиков, расположенных в нескольких сечениях.

У каждого датчика определяются координаты трех точек. Используя эти координаты и учитывая геометрию датчиков, вычисляются координаты двух точек, лежащих на луче визирования. После

этого для упрощения последующей обработки осуществляется переход из пространственной системы координат хуз в плоскую систему координат ХУ, принадлежащую плоскости, образованной датчиками, т.е. плоскости сечения. Предлагается один из возможных способов такого перехода.

По координатам всех точек в плоской системе координат, вычисляются дирекционные углы лучей визирования, а затем, используя измеренные расстояния, находятся координаты точек на поверхности объекта на все моменты времени. Для оценки СКП полученных координат выведены формулы:

$$m_{X_{pn}}^2 = m_{X_n}^2 + m_{dn}^2 \cos^2(\alpha n) + 2m_{X_n}^2 \left( \frac{\Delta Y_n}{\Delta X_n^2 + \Delta Y_n^2} \right)^2 + 2m_{Y_n}^2 \left( \frac{\Delta X_n}{\Delta X_n^2 + \Delta Y_n^2} \right)^2 (dn_i \sin(\alpha n))^2, \quad (3)$$

$$m_{Y_{pn}}^2 = m_{Y_n}^2 + m_{dn}^2 \sin^2(\alpha n) + 2m_{X_n}^2 \left( \frac{\Delta Y_n}{\Delta X_n^2 + \Delta Y_n^2} \right)^2 + 2m_{Y_n}^2 \left( \frac{\Delta X_n}{\Delta X_n^2 + \Delta Y_n^2} \right)^2 (dn_i \cos(\alpha n))^2, \quad (4)$$

где  $\alpha n$  – дирекционный угол визирного луча с  $n$ -го датчика;  $dn_i$  – расстояние от датчика до точки на поверхности объекта в  $i$ -ый момент времени;  $\Delta X_n, \Delta Y_n$  – приращения координат между точками на  $n$ -ом датчике;  $m_{X_n}, m_{Y_n}$  – СКП координат  $n$ -го датчика;  $m_{dn}$  – СКП измерения расстояния.

Для определения среднего радиуса сечения и координат центра вращения предложен следующий алгоритм.

На каждый момент времени, в который производились измерения, мы имеем координаты трех точек, лежащих на поверхности объекта. Зная эти координаты, мы можем построить окружность, проходящую через эти точки для любого из моментов времени, то есть вычислить координаты центра окружности и радиус.

Полученные, координаты центра и радиус окружности для первого момента времени, принимаются в качестве предваритель-

ных значений параметров и дальнейшую обработку производим по методу наименьших квадратов.

В качестве измеренных величин, принимаем координаты точек на поверхности объекта. Их СКП рассчитываются по формулам (3-4). Веса измерений устанавливаются обратно пропорциональными квадратам величин СКП. Ввиду большого количества данных обработку целесообразно производить рекуррентным МНК.

На основании проведенного исследования предложена следующая последовательность обработки рядов измерений дальностей, полученных с трех точек, расположенных в одном, перпендикулярном к оси объекта, сечении.

1. Обработка данных, полученных с каждой точки отдельно. Сравнение результатов, между собой. Это позволяет по данным, из которых исключены грубые ошибки, получить величину скорости вращения объекта и разложение рядов данных на составляющие.

2. Переход от пространственной системы координат, к плоской системе координат на плоскости сечения. Вычисление координат точек на поверхности объекта на все моменты времени.

3. Определение среднего радиуса объекта и координат центра вращения.

4. Построение модели сечения объекта на основе выделенных составляющих, отражающих отклонения формы от окружности, и с учетом вычисленного среднего радиуса.

5. Пересчет при необходимости координат центра вращения вновь в пространственную систему координат.

Предлагаемые методы тестировались на смоделированных объектах.

### **Заключение**

В соответствии с целями и задачами исследования получены следующие результаты:

— Решена задача выявления отклонений формы сечения объекта от окружности путем измерения дальностей до поверхности объекта с одной точки. Ее решение основано на разделении ряда данных на компоненты соответствующие различным факторам и определении их периодов. Таким образом, можно выделять влияние

отклонения формы объекта от окружности, эксцентриситета, влияние на вращение других, сопряженных, объектов. Работоспособность способа проверена на моделях и на промышленном объекте.

– Предложен способ определения координат центра вращения и среднего радиуса сечения объекта по синхронным измерениям дальностей до поверхности объекта с трех точек. Способ позволяет определять вероятнейшие значения таких геометрических характеристик сечения объекта как средний радиус и координаты точки вращения. Работоспособность способа проверена на моделях.

– Создана компьютерная программа для пакета по обработке данных наблюдений за вращающимися объектами, реализующая предлагаемые методы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными на математических моделях, а также опытом практического применения на производственных объектах.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Петров В.В., Тюрин С.В. Контроль геометрических характеристик вращающихся печей / В.В. Петров, С.В. Тюрин // М.: Целлюлоза. Бумага. Картон, 2005, №7, с.66-70.
2. Тюрин С.В. Уравнивание свободных пространственных сетей. Современные проблемы геомеханики, геотехнологии, маркшейдерского дела и геодезии / Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2004. (Записки горного института. Т.156). с. 193-197.
3. Тюрин С.В. Определение скорости вращения по многократным измерениям дальностей до объекта / С.В. Тюрин // СПб., 2005, 8 с. – Деп. в ВИНТИ 22.11.05, №1519В2005.
4. Тюрин С.В. Применение метода сингулярного разложения для обработки данных с датчика расстояний при наблюдениях за вращающимися объектами / С.В. Тюрин // СПб., 2005, 20 с. – Деп. в ВИНТИ 22.11.05, №1520В2005.

РИЦ СПГИ. 13.11.2006. З.478. Т.100 экз.  
199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2

