

УДК 528.02+658.58

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

С. Могильный, А. Шоломицкий

Донецкий национальный технический университет

И. Фролов

ООО “Геоинжиниринг”

Ключевые слова: геометрические, кинематические параметры, вращающиеся печи.

Введение

В горнодобывающей, металлургической и цементной промышленности эксплуатируется множество вращающихся крупногабаритных объектов непрерывного действия: вращающиеся обжиговые печи, мельницы, барабанные сушилки и т.д. Долговечность и надежность работы такого оборудования напрямую зависит от точности его установки в проектное положение. Статистика эксплуатации такого оборудования свидетельствует, что более 30 % аварий и внеплановых простоев связано с отклонениями от прямой линии оси вращения печи [1, 2]. Если вращающиеся объекты тщательно установлены в проектное положение, увеличивается время межремонтных циклов. Кроме этого, уменьшается мощность привода для вращения печи, а, следовательно, экономится электроэнергия. Поэтому повышение качества геодезического обслуживания вращающихся объектов непрерывного производства и сокращение сроков геодезических работ является важной и актуальной задачей.

Современный подход к технической инспекции вращающихся цементных печей предполагает использование передовых технологий, приборов и программного обеспечения [3–8], что в комплексе составляет измерительную систему. Важная тенденция геодезического контроля – минимизация времени измерений, что позволяет сократить время простоя оборудования, поэтому измерения на действующем оборудовании в режиме реального времени являются наиболее перспективными для геодезического мониторинга промышленных агрегатов. При выполнении измерений в режиме реального времени возрастает роль программного интерфейса пользователя с измерительным комплексом. Для такого взаимодействия необходимо создать принципиально новые программные средства и интеллектуальные интерфейсы, которые позволят сократить время задания параметров измерений и будут иметь высокие когнитивные свойства для отображения процесса измерений. Важную роль в процессе непосредственных измерений играет возможность осознания всей картины произведенных и производимых наблюдений. При этом уменьшится вероятность принятия неправильных решений.

В процессе эксплуатации печи, под воздействием различных факторов, оболочка печи, бандажи и ролики постепенно изнашиваются. Износ вызывает изменение геометрических параметров как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости.

Отклонение от геометрических параметров и неравномерный температурный нагрев приводят к неравномерным знакопеременным напряжениям, в первую очередь на вращающихся элементах печи, что может привести к трещинам и разрывам, для устранения которых необходимо остановить печь, охладить ее и приварить ребра жесткости или заменить участок обечайки. Затем печь медленно нагревается до рабочей температуры. Поэтому периодически печь останавливают и контролируют ее геометрические характеристики методом геометрического и бокового нивелирования [1–2]. При этом невозможно достоверно определить отклонения параметров, т.к. измерения производятся на охлажденной печи в статическом состоянии.

Контроль геометрических параметров на действующем оборудовании усложняется: из-за постоянного вращения печи, высокой температуры, значительных размеров и отсутствия соответствующих методик и средств измерений. До настоящего времени определить геометрические изменения непосредственными измерениями практически было невозможно. Косвенные методики выполнения таких измерений, основанные на биении вращающейся поверхности [3–6], дают невысокую точность. Более точные способы [7] требуют остановки и охлаждения печи. А раз печь измеряется в стационарном состоянии, невозможно определить ее кинематические характеристики.

Процесс, включающий в себя установление и исправление возникших нарушений, и называется технической инспекцией печи. Основными параметрами технической инспекции, существенно влияющими на эксплуатационную готовность печи, являются: ось печи, овальность обечайки, бандажа и роликов, изгиб печи в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Регулярные проверки печи требуются, чтобы обеспечить оптимальную эксплуатационную готовность печных установок и подтверждение того, что печь работает в рамках утвержденных проектировщиком показателей нагрузок и напряжений.

Использование современных технологий и инструментов позволяет решить проблему регулярности и качества технической инспекции путем дистанционного измерения печи лазерным лучом. Для этого используют электронные тахеометры. Данные, полученные с электронного тахеометра в режиме реального времени, обрабатываются на портативном компьютере (ноутбуке) с использованием программного обеспечения *Визир 3D*. На рис. 1 представлено схематическое изображение принципа измерения печи электронным тахеометром.

Методика работ заключается в измерении точек, расположенных в характерных сечениях объектов: секций обечайки, бандажей и опорных роликов. Точки в сечениях располагаются группами, таким образом, чтобы можно было надежно определить геометрические параметры сечения. По совокупности сечений для конкретного объекта можно вычислить его геометрические параметры.

Производственные испытания программы показали, что в режиме реального времени необходимо измерить большое число точек (до 5000) на поверхности печи, которые относятся к различным объектам. При этом необходимо кодировать измерения, задавая признак “левая” сторона печи или “правая”, тип объекта, номер объекта, номер сечения, номер группы и номер точки в группе. Задать безошибочно эти параметры с помощью обычных средств интерфейса операционной системы невозможно, особенно когда интервал измерений составляет 4–8 секунд. Поэтому после первых производственных испытаний авторы поставили перед собой задачу – создать интеллектуальный графический интерфейс, который позволил бы работать в режиме реального времени, минимизировал ошибки кодирования измерений и отображал бы процесс измерений.

Моделирование печи

Для моделирования графического интерфейса разработана контекстно-свободная грамматика (КС-грамматика), которая позволяет выполнить формальное описание объекта печь. Эта грамматика затем интерпретируется в программном комплексе *Визир 3D* [8–10] для создания графического интерфейса измерений печи конкретной печи.

В общем случае модель измерений агрегата, которым может быть: обжигочная печь, мельница или барабанная сушилка, описывают так:

$$\langle \text{агрегат} \rangle ::= \{ \langle \text{секция} \rangle \}^n$$

т.е. агрегат может состоять из n секций.

Каждая секция, в свою очередь, состоит из

$$\langle \text{секция} \rangle ::= [\langle \text{ОСУ} \rangle_{\text{лев}}] \langle \text{обечайка} \rangle [\langle \text{ОСУ} \rangle_{\text{прав}}]$$

левого опорно-соединительного узла (ОСУ), собственно секции обечайки и правого опорно-соединительного узла. Для крайней левой секции нет левого опорно-соединительного узла, а для крайней правой нет правого опорно-соединительного узла. Это обусловлено тем, что грузочный и разгрузочный концы печи располагаются в закрытых помещениях и недоступны для прямых геодезических измерений.

В свою очередь, опорно-соединительный узел состоит:

$$\langle \text{ОСУ} \rangle ::= \langle \text{ролик} \rangle_{\text{лев}} \langle \text{бандаж} \rangle \langle \text{ролик} \rangle_{\text{прав}}$$

из правого и левого опорных роликов и соединительного бандажа.

Несмотря на то, что элементы агрегата сильно отличаются размерами, все они являются вращающимися поверхностями, поэтому геодезические измерения для них однотипны – измеряются характерные сечения элементов (рис. 1). Число сечений для объектов с небольшой шириной (бандажи и ролики) 2, для секций обечайки число сечений – от 2 до k , в

зависимости от длины и искривления секции. Кроме того, ролики можно измерить только с одной стороны, а бандажи и обечайки могут измеряться с двух сторон, что повышает точность и надежность определения геометрических параметров объектов. Формально это можно выразить такими выражениями:

$$\langle \text{ролик} \rangle ::= \{ \langle \text{сечение} \rangle \}^2$$

$$\langle \text{бандаж} \rangle ::= \{ \langle \text{сечение} \rangle \}_{\text{лев}}^2 \left[\{ \langle \text{сечение} \rangle \}_{\text{прав}}^2 \right]$$

$$\langle \text{обечайка} \rangle ::= \{ \langle \text{сечение} \rangle \}_{\text{лев}}^k \left[\{ \langle \text{сечение} \rangle \}_{\text{прав}}^k \right]$$

Сечение – это множество измерений, которые разделены на три группы (рис. 2). Формально это можно записать:

$$\langle \text{сечение} \rangle ::= \langle \text{группа} \rangle_1 \langle \text{группа} \rangle_2 \langle \text{группа} \rangle_3 \equiv \{ \langle \text{группа} \rangle \}^3$$

$$\langle \text{группа} \rangle ::= \{ \langle \text{измерение} \rangle \}_1^m$$

$$\langle \text{измерение} \rangle ::= \langle \text{номер} \rangle \langle X \rangle \langle Y \rangle \langle Z \rangle \langle T \rangle$$

каждое измерение имеет свой номер в пределах группы от 1 до m , координаты точки X , Y , Z на поверхности объекта, T – время момента измерения.

Чтобы применить эту модель при измерениях конкретной печи, необходимо задать только число секций n , все остальные параметры являются контрольными. Так, число сечений $k \geq 2$, необходимость его увеличения определяет пользователь. Оптимальное число измерений в группе лежит в диапазоне $6 \leq m \leq 15$, в зависимости от диаметра и угловой скорости вращения объекта, но может быть и больше. Диаметр печи и роликов, а также ширину объектов подбирают из условий наилучшего отображения объектов на экране монитора и в явном виде не задают.

Если измерения печи будут выполнены в соответствии с этой моделью, то можно выделить измерения каждого отдельного объекта печи и правильно их интерпретировать при вычислениях, а это позволит определить как геометрические параметры каждого отдельного объекта, так и всей печи в целом.

Агентная составляющая интерфейса

Управление и контроль измерений в реальном времени – задача, требующая использования современных технологий и инструментов, как для прямого, так и для обратного взаимодействия с системой через интерфейс. Модель измерений агрегата, описанная КС-грамматикой, и само измерение агрегата во времени как процесс – это разные понятия. Во время измерений могут возникнуть различные непредвиденные ситуации, например, необходимо прервать измерения для замены батарей электронного тахеометра, выйти из программы, а затем вернуться и вновь отобразить состояние измерений объекта, удалить часть измерений и т.д. Для контроля таких ситуаций и отображения состояния измерений объекта выразим формальную модель измерений объекта через аппарат агентно-ориентированных моделей [12, 13]. Добавим в модель ещё один абстрактный образ – агент измерений. Агент измерений – это понятие, информационно тождественное понятию $\langle \text{группа} \rangle$ КС-грамматики,

но вдобавок оно обладает интеллектуальностью и может эволюционировать в соответствии с наличием жизненной цели. В нашем случае можно выделить такие свойства агентов измерений:

1. **Знание структуры модели** Агент знает свое место в структуре модели, и сам вырабатывает кодирующие признаки для измерений.

2. **Агрегатность.** Агенты могут образовывать группы, которые обладают новыми свойствами, например, три агента могут образовать сечение, у которого есть новые параметры: точка центра сечения, средний радиус, отклонения от окружности. Шесть агентов, расположенных на двух сечениях, могут составлять объекты: бандаж, ролик или обечайка, которые имеют геометрическую ось, ось вращения и т.д. Все агенты вместе образуют объект печь.

3. **Взаимодействие с окружением.** Агент реагирует на изменения в окружении, изменяя свое состояние.

4. **Жизненная цель.** Агент хочет быть измеренным.

5. **Память.** Агент все помнит: свое состояние, число измерений, сами измерения. Агент может восстановить свое состояние, если измерение объекта состоит из нескольких сеансов.

6. **Ресурсы.** Агент имеет ресурсы, которые выделяются для хранения измерений, ресурсы освобождаются при удалении измерений.

7. **Квазинеzависимость.** Агент не зависит от других агентов. Но все агенты вместе представляют собой одно целое.

8. **Состояние.** Агент может иметь несколько состояний, которые соответствуют эволюционным состояниям объекта и отображаются размером, поведением и цветом в интерфейсе: *неактивным* (черный квадрат), *возможным для выбора* (голубой квадрат), *текущим* (желтый увеличенный квадрат), *измеряемым* (мигающий увеличенный желтый квадрат) и *измеренным* (красный квадрат) (рис. 3–4).



Рис. 1. Принцип измерения печей электронным тахеометром

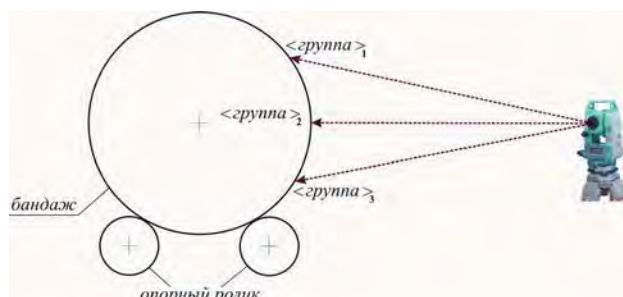


Рис. 2. Схема измерения сечения

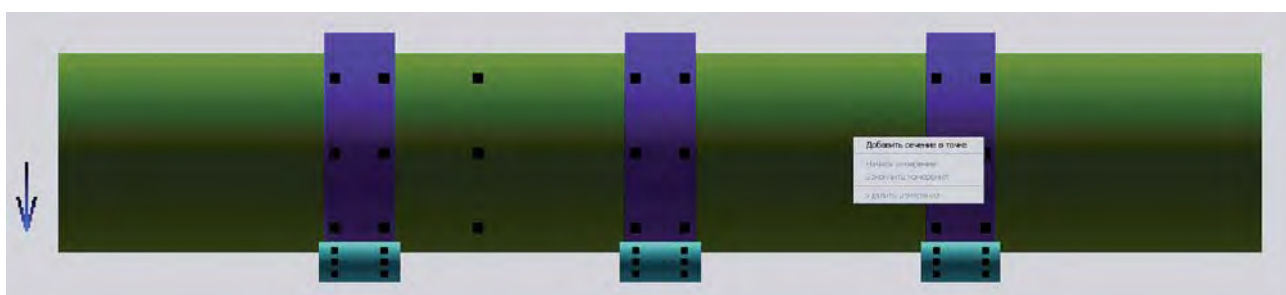


Рис.3 Добавление сечения обечайки в шаблон измерения печи

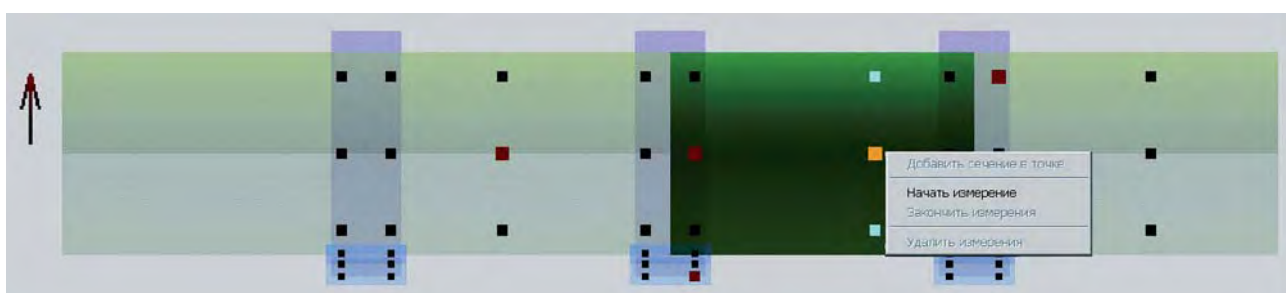


Рис. 4. Выработка команды начала автоматических измерений агента

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЧЕНИЙ НА ТЕЛЕ ПЕЧИ

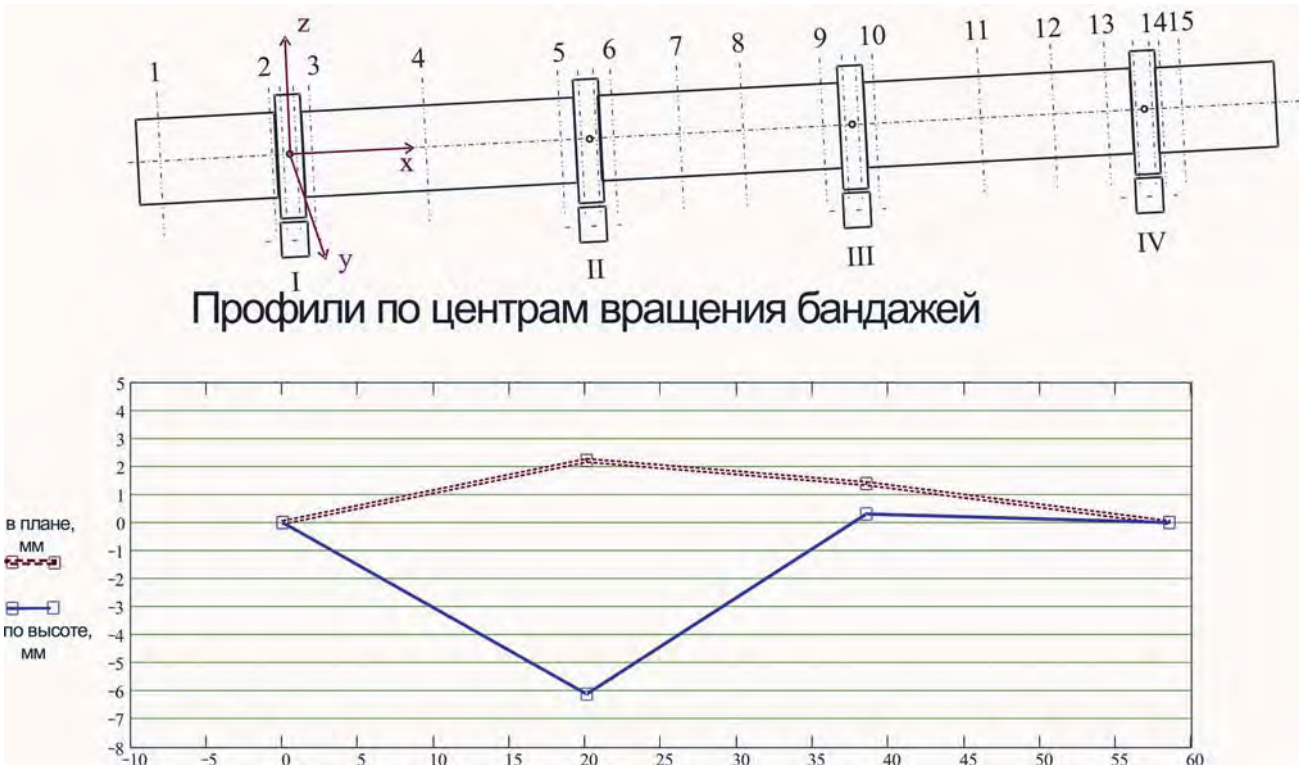


Рис. 5. Результаты измерения прямолинейности оси вращения бандажей

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЧЕНИЙ НА ТЕЛЕ ПЕЧИ

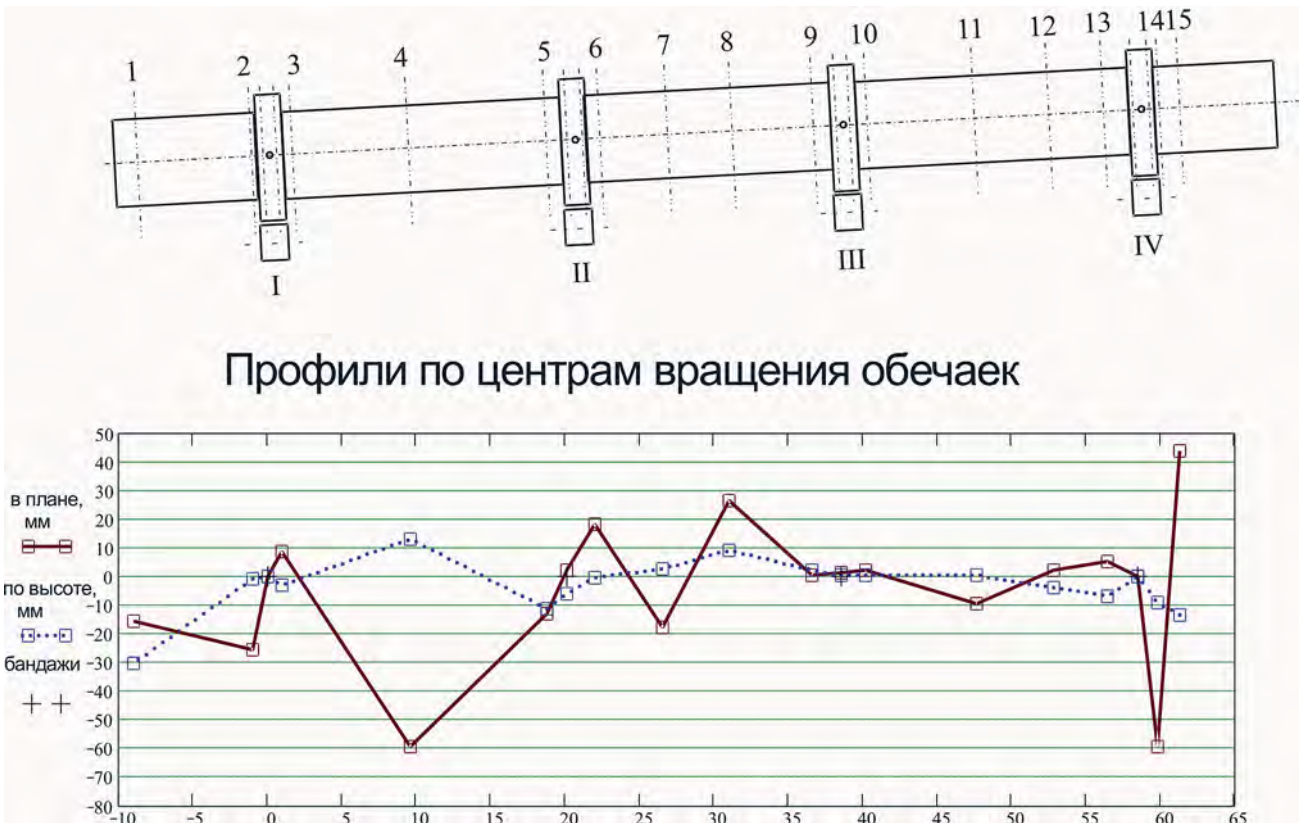


Рис. 6. Результаты определения прямолинейности оси вращения обечаек

Для агентной модели можно ввести понятие шаблона агентов, предполагающего различные конфигурации агентов перед началом измерений. Например, на рис. 4 приведен простой шаблон агентов: по два сечения на бандаже и на ролике, а на обечайке можно создавать произвольное число сечений, по три агента в каждом, в процессе измерений, просто щелкнув правой кнопкой мыши в нужном месте и выбрав команду – добавить сечение в определенной точке.

На рис. 4 показано начало измерений для активного агента первого сечения третьей секции обечайки левой стороны печи.

Гибкость модельно-ориентированного интерфейса заключается в наличии КС-грамматики и языка модели печи, позволяющих оперативно настраивать интерфейс под конкретную печь.

Производственные измерения печи

Производственные измерения печи по обжигу доломита выполнены для проверки эффективности предлагаемой технологии. Условия измерений были сложными, поскольку измерения выполнялись летом при температуре от 32° до 60°С. Однако сбоев оборудования в процессе измерений замечено не было. Опорная геодезическая сеть для приведения всех точек стояния тахеометра в единую систему координат была закреплена на окружающих металлических конструкциях пятью магнитными поворотными марками, так что привязка любой точки обеспечивалась к трем или четырем точкам.

Время одного оборота печи составляло 59 с. На сечении группа точек насчитывала не менее 10 измерений, таким образом, на каждом сечении определялось от 30 до 36 точек, равномерно расположенных по окружности сечения.

Всего на печи было измерено 15 сечений на обечайке и бандажах, расположение которых показано на рис. 5. Кроме того, на каждом опорном ролике измерялось по два сечения. По паре сечений бандажа вычисляли ось и центр его вращения. На рис. 5 показаны профили отклонений центров вращения бандажей от прямой, соединяющей крайние центры. Отступления сравнительно невелики, что можно объяснить недавним ремонтом печи.

В этой печи обечайки не закреплены жестко в бандажах, поэтому их центры вращения имеют некоторую свободу. Расположение центров вращения сечений обечаек показано на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что при вращении корпус обечайки претерпевает довольно значительные отклонения от прямой, до 60 мм.

На рис. 7 показан результат измерения одного из сечений бандажа. Видно, что отступление профиля сечения (сплошная линия) от окружности (штриховая линия) составляет 1–3 мм. Причем это отклонение может быть вызвано не только неровностями поверхности бандажа, но и некоторой нестабильностью положения мгновенных центров вращения.

Пример сечения обечайки (рис. 8) имеет большие отклонения от окружности. Возможно, что ее поверхность не столь гладка и правильной формы, но, скорее

всего это вызвано блужданием мгновенных центров вращения в процессе одного оборота печи. Если векторы отклонений от окружности отнести к центру вращения, то получим облако (в центре) точек вокруг него, которое наглядно характеризует область блуждания мгновенных центров вращения.

Совокупность профилей сечений дает детальную информацию о кинематике узлов печи в процессе вращения, позволяет механикам оперативно оценить состояние установки и принять обоснованные решения по устранению недостатков.

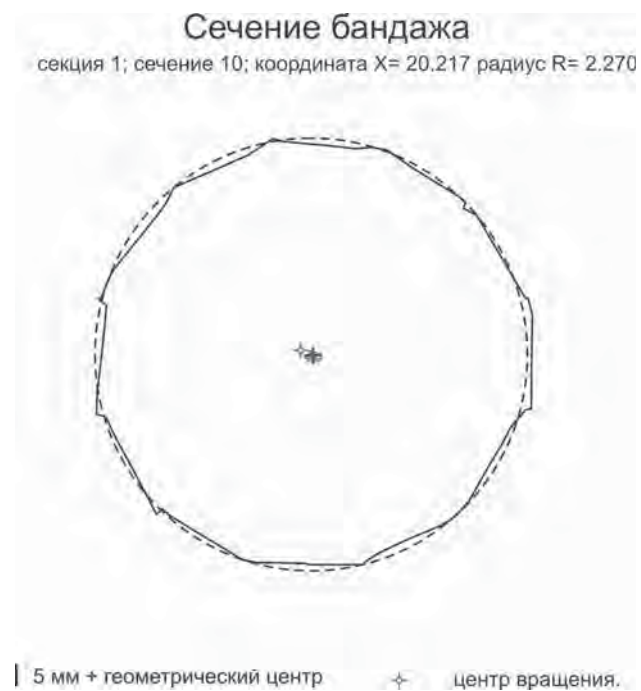


Рис. 7. Профиль сечения бандажа



Рис. 8. Профиль сечения обечайки

Заключення

Промышленные испытания подтвердили высокую эффективность технологии измерений геометрических и кинематических параметров вращающейся печи. Применение агентного интерфейса позволило выполнить измерения печи в полтора раза быстрее и без ошибок.

Вычисления показали, что точность результатов определяется точностью измерения расстояния. Для испытаний использовали тахеометр со средней ошибкой измерения расстояния ± 1 мм, следовательно, и полученные линейные параметры имеют такую среднюю погрешность.

Время однократного измерения печи составляет один рабочий день, результаты для анализа состояния печи получают на месте.

Предлагаемая технология обеспечивает высокую безопасность выполнения работ. Ее можно рекомендовать для различных вращающихся агрегатов. Способ определения геометрических и кинематических характеристик вращающихся агрегатов защищен патентом на изобретение [11].

Литература

- Кузьо И.В. Расчет и контроль установки агрегатов непрерывного производства / И.В. Кузьо, Т.Г. Шевченко. – Львов: Вища школа, 1987. – 176 с.
- Руководство по выверке технологического оборудования металлургической промышленности / Т.Г. Шевченко, С.Г. Хропот, В.П. Пивоваров, А.А. Игнатов, В.Ф. Меньшиков // Министерство металлургии СССР, 1991, – 212 с.
- Krystowczyk B. Ausrichten von Drehofen und Korrektur der Tragrollen-Verdrehungen waehrend des Betriebes // ZEMENT-KALK-GIPS. – № 5, 1983. – P. 288–292.
- Josef By., Robertson L. Killn Alignment Method Allows Corrections While Operating // Rock Products, 1987. – P. 21–22.
- Krystowczyk B., Krystowczyk Z. Nasz biznes z Hindusami // Geodeta, № 4, KWIECIEN, 2002. – P. 1–7.
- Krystowczyk Z. Geometry Measurement Of Killn Shell in Dynamic Condition // Cemend & Building Materials, № 16, June 2004. – P. 34–37.
- Петров В.В. Технология контроля геометрических характеристик вращающихся печей // В.В. Петров, С.В. Тюрин // Целлюлоза. Бумага. Картон – 2005. – № 7. – С. 66–70.
- Измерительный комплекс “Визир 3D” на предприятиях Украины: Геодезический контроль и выверка технологического оборудования / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, В.Н. Ревуцкий, В.А. Пригаров // Геопрофиль. – 2009. – № 3 (6). – С. 12–19.
- Могильный С.Г. Трьохкоординатний вимірювальний комплекс “Визир 3D” / С.Г. Могильний, А.А. Шоломицький, Є.І. Шморгун // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вип. 9 (143). – С. 13–25.
- Sholomytskyu A.A., Dzhura S.G. Model-oriented graphic interface of the measuring system // Материалы одиннадцатого Международного научно-практического семинара “Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы” в 3-х кн. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. – Кн. 2.2010. – № 10. – С. 12–19.
- Патент на винахід № 92655 “Спосіб визначення параметрів поверхні обертових агрегатів” / Могильний С.Г., Шоломицький А.А. Дата публ. 25.11.2010. Бюл. № 22.
- Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А.В. Борщев // Методы. Алгоритмы. Программы. – 2004. – № 3–4 (7–8). – С. 38–47.
- Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

Нова технологія визначення геометричних і кінематичних параметрів обертових печей в процесі їх функціонування

С. Могильний, А. Шоломицький, І. Фролов

Описано технологію вимірювання обертових печей програмно-апаратним комплексом: електронний тахеометр плюс керуючий комп'ютер. Фіксуються моменти часу вимірювань координат точок на поверхні обертової печі, що дає змогу обчислити положення центрів обертання бандажів і осі обертання печі без її зупинки. Дистанційні вимірювання забезпечують безпеку і комфортність робіт. Наведено результати вимірювання обертової печі з випалювання доломіту.

Новая технология определения геометрических и кинематических параметров вращающихся печей в процессе их функционирования

С. Могильный, А. Шоломицкий, И. Фролов

Описано технологию измерения вращающихся печей программно-аппаратным комплексом: электронный тахеометр плюс управляющий компьютер. Фиксируются моменты времени измерений координат точек на поверхности вращающейся печи, что позволяет вычислить положение центров вращения бандажей и оси вращения печи без ее остановки. Дистанционные измерения обеспечивают безопасность и комфортность работ. Приведены результаты измерения вращающейся печи по обжигу доломитов.

New technology for determining geometric and kinematic parameters of rotary kilns in the course of their operation

S. Mogilniy, A. Sholomytskiy, I. Frolov

Measurement technology of rotary kiln with the software-hardware is described: tacheometer and control computer. Time measurement of coordinates of points on the surface of the rotary kiln is fixed, allowing calculate the position of the center of rotation of bandages and axis of rotation of the kiln without stopping it. Remote measurements provide the safety and comfort while working. The results of the measurement of rotary kiln for firing dolomite is presented.