

Разработка автоматизированной системы управления балансировкой шлифовальных кругов на основе цифрового двойника

Елизавета Каширская, Аслиддин Назриев

Актуальная задача металлообработки вообще и обработки шлифованием в частности – обеспечение заданного уровня качества выпускаемых изделий, для чего необходима своевременная балансировка шлифовального круга. Экспериментальные исследования, проведённые авторами данной работы, показали, что автоматизация балансировки шлифовальных кругов на основе цифрового двойника в процессе его работы помогает устранить дисбаланс во время шлифования, при этом повышая качество работы и экономя ресурсы и время. На основе данного заключения был разработан цифровой двойник для разных станков балансировки шлифовальных кругов. В статье проведён обзор применения цифрового двойника технологического процесса шлифования и балансировки шлифовальных кругов. Определены причины возникновения вибрации при круглом шлифовании, также были изучены методы борьбы с ними для повышения точности обработанной детали. Поставлена и решена задача разработки системы управления и цифровым двойником технологического процесса.

Введение

В отрасли металлообработки один из важнейших процессов – это шлифовальные детали. Возникающие вследствие неуравновешенности круга динамические силы вызывают вибрацию шпинделя станка, вследствие чего ухудшается качество шлифуемой поверхности, чрезмерно растёт износ подшипников и круга, уменьшается срок службы станка.

На геометрическую точность обработки, в первую очередь, влияет уравновешенность шлифовального круга. Тщательная балансировка шлифовальных кругов гарантирует длительную и безопасную эксплуатацию станка и

высокое качество выпускаемых заготовок.

Основная часть

Разработка автоматизированной системы управления балансировкой шлифовальных кругов на основе цифрового двойника

Цифровой двойник (ЦД) технологического процесса позволяет управлять процессом балансировки и предсказывает, когда круг разбалансируется, а также ЦД может предсказывать, через какой промежуток времени нужно сделать правку круга (рис. 1). ЦД следит

за количеством материала, и перед тем как материал будет заканчиваться, ЦД даст визуализированное сообщение о том, что нужно пополнить материал на складе. Также идёт запись в базу данных (рис. 2), сколько было израсходовано и сколько осталось на складе материала.

Входными значениями ЦД являются (рис. 3):

- состояние станка;
 - готовность шлифовального круга;
 - количество используемых деталей на складе.
- Выходные значения ЦД:
- состояние станка;
 - готовность шлифовального круга к работе;
 - количество правок;
 - остаток и сколько было израсходовано материала на складе;
 - дисбаланс круга;
 - колебания шлифовального круга.

Разработка программного обеспечения системы управления

Система управления – это совокупность элементов и набор средств, позволяющих собирать сведения о контролируемом объекте и средствах воздействий, которые были направлены на поведение объекта для достижения поставленных целей.

Устройство для автоматической балансировки шлифовальных кругов состоит из электронного измерительного прибора с датчиком колебаний.

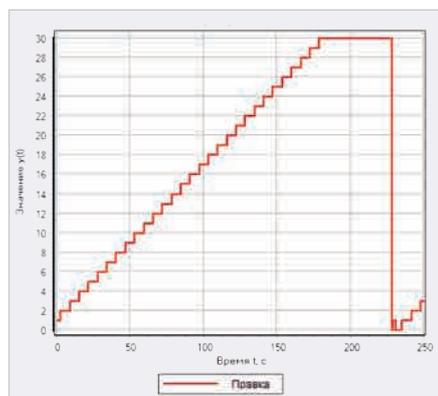


Рис. 1. Авария и правка шлифовального круга

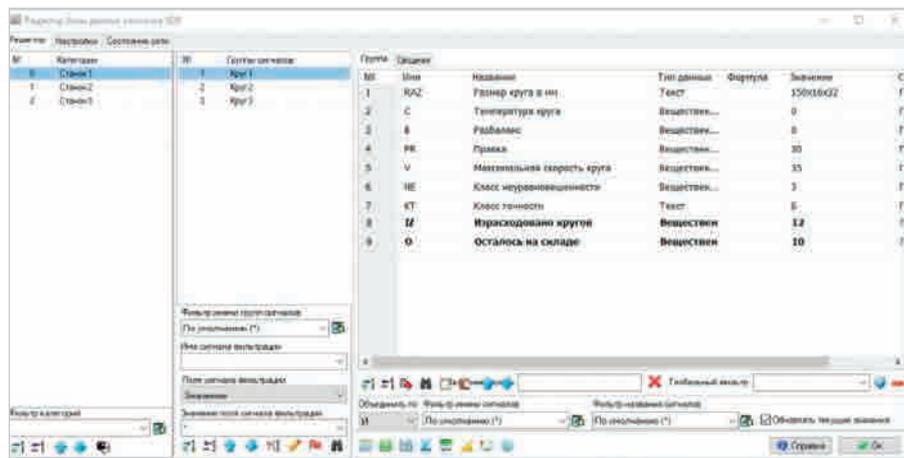


Рис. 2. База данных шлифовальных станков и кругов

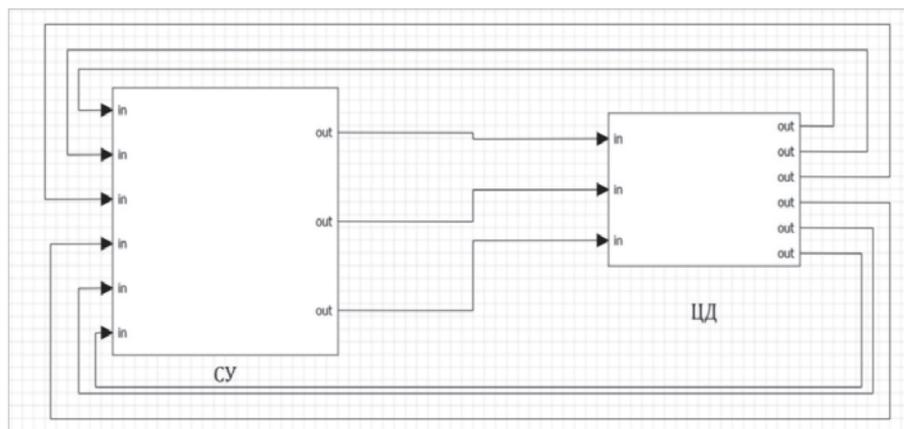


Рис. 3. Структурная схема цифрового двойника балансировки

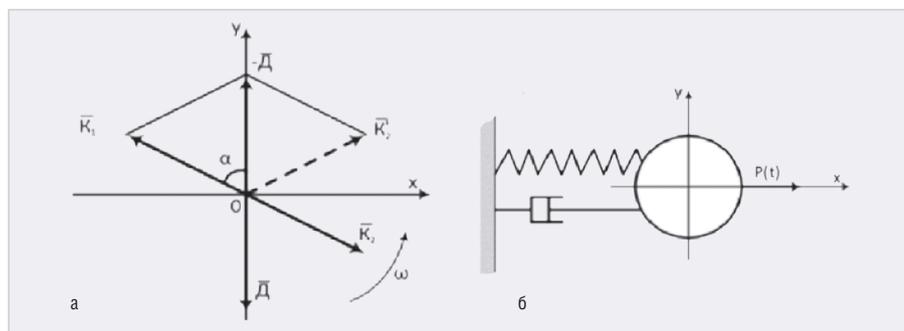


Рис. 5. Схема сил, действующих в плоскости центра тяжести круга в начальный момент балансировки (а, б)

Неуравновешенность шлифовального круга определяется измерительным устройством.

Для разработки системы управления была создана математическая модель.

Моделирование процесса балансировки

На качество обработки и точность влияют погрешности, возникшие вследствие дисбаланса шлифовального круга. Балансирующие устройства, разрабатываемые в мире, позволяют балансировать шлифовальный круг в процессе обработки деталей. Возникает вопрос о влиянии балансировки на качество поверхности обрабатываемой детали.

Образующуюся при круглом шлифовании поверхность можно рассматривать как след движения одной производящей линии по другой: образующей по направляющей. Производящие линии задаются формирующими движениями, точность которых обусловлена классом точности станка.

Для оценки этого влияния необходимо проанализировать весь частотный спектр относительных колебаний с целью качественной оценки влияния отдельных частот на характер формообразования и, в конечном итоге, на

точность обработки (размер, продольную и поперечную геометрию).

Для создания модели процесса балансировки шлифовального круга нужно построить траекторию движения центра масс системы непосредственно во время работы шлифовального круга. Узел регулировки масс (рис. 4) представляет собой два кольца с регулируемыми массами 1 и 2, помещённые в центре тяжести шлифовального круга на плоскости 3, в пазу 4.

Производится балансировка поворотом колец поочередно 1 и 2 в сторону снижения дисбаланса при последовательном подключении привода к первому кольцу, затем вновь ко второму и т.д. Дисбаланс снижается со временем до требуемого уровня. Задачей балансировки является создание вектора силы, равного вектору дисбаланса и противоположно направленного ему, за счёт поворота регулируемых масс 2 и 1. На рис. 5а показана схема действующих сил в плоскости центра тяжести круга в начальный момент балансировки. Здесь K_1 и K_2 – дисбалансы регулируемых масс 1 и 2, а Δ – дисбаланс шлифовального круга. Если рассмотреть случай, где показано $K_1 = K_2 = \Delta$ и $\alpha = 60^\circ$, то очевидно, что получить замкнутую систему трёх данных векторов (т.е. отба-

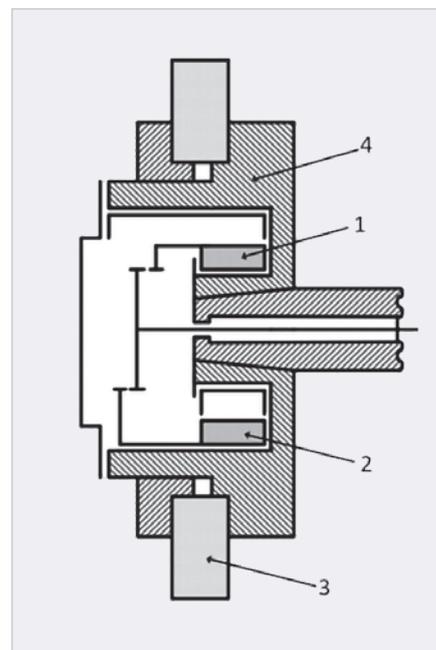


Рис. 4. Узел регулировки масс балансира

лансировать круг) можно поворотом K_2 на 60° против часовой стрелки. Понятно, что сила $P(t)$, действующая на вращающийся шпиндель шлифовального круга, изменится за время поворота K_2 от $P(t) = \Delta$ до $P(t) = 0$.

На рис. 5б представлена упрощённая модель колебательной системы шпинделя при воздействии переменной силы $P(t)$. Поскольку наиболее важными являются колебания в направлении радиальной силы резания, рассматриваются перемещения шпинделя вдоль оси X, совмещённой с направлением радиуса шлифовального круга.

Уравнение движения расчётной массы для этой схемы имеет вид:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + p^2x = \frac{2K_1}{m} \cos\left(\alpha + \frac{\omega t}{2}\right), \quad (1)$$

где h – коэффициент затухания колебаний системы;

x – расстояние между центром масс шлифовального круга и мгновенным центром его вращения;

c – жёсткость шпинделя;
 $p = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – частота собственных колебаний;

K_1, K_2 – дисбалансы регулирующих масс;

m – суммарная масса шлифовального круга и шпинделя;

α – угол между D, K_1 и K_2 ;

t – время;

ω – разность между угловой скоростью регулирующей массы и угловой скоростью круга.

Работа была реализована с помощью программы SimInTech в структурной схеме, показанной на рис. 6.

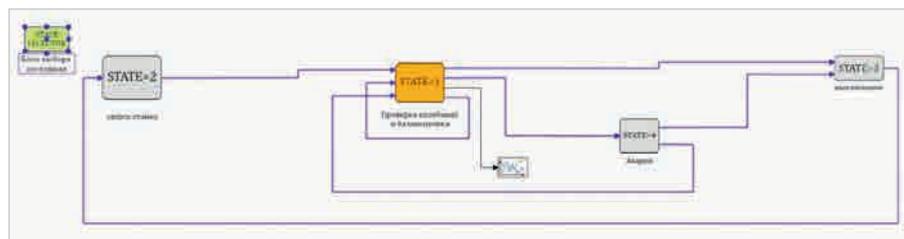


Рис. 6. Структурная схема системы управления



Рис. 7. Система управления на стенде завода «ФИЗПРИБОР»

Программная часть системы управления

На рис. 7 показана программа системы управления. Система управления была разработана с помощью математической модели.

Описание программных блоков:

1. блок «Входные данные» собирает значения с датчиков и передаёт в программу;
2. блок «Служебные блоки» – функциональный блок «БКИН», который показывает напряжение на выходе из блока;
3. блок «Стойка ввода аналоговых параметров для 4HZ02» не используется в системе;
4. блок «Система управления» – схематичное представление системы управления;
5. блоки из базы данных отправляют на другую машину параметры, которые получают с цифрового двойника;
6. блок «Выходные данные» передаёт сигналы из программы на датчики.

Визуализация цифрового двойника

Цифровой двойник будет делать четыре предсказания:

- сколько материала осталось на складе (будет учитываться, сколько шлифовальных кругов было использовано и сколько осталось);
- через какое время необходимо сделать правку (правка круга будет зависеть от того, насколько часто происходила балансировка круга);
- когда наступит дисбаланс круга;

- готовность круга к работе (шлифовальный круг с каждой правкой становится меньше по размерам, примерно на 5 процентов от начального состояния).

ЦД будет выдавать значения дисбаланса круга, а система управления будет исправлять дисбаланс.

На визуализации показана модель ЦД, которая выполняет балансировку шлифовального круга (рис. 8 смотрите в электронной версии журнала). На визуализации есть кнопка включения и выключения ЦД, также есть лампа, которая загорается при аварии, и кнопка для сброса аварийного режима. Дополнительно показан график правки и окно, где выводится количество правок за весь жизненный цикл шлифовального круга, также есть кнопка сброса правки. Кнопка сброса правки нужна для обнуления значения правки – это будет происходить, если система автоматически не будет сбрасывать значение после выполнения замены шлифовального круга. Состояние круга зависит от его правки, при каждой правке шлифовальный круг в среднем теряет 5 процентов от своих предыдущих размеров. Окно «Состояние станка» показывает число 1, если станок включен, и значение 0, если станок выключен. Информацию о станке ЦД получает от системы управления. Окно «Остаток на складе» и «Израсходовано материала» берётся из базы данных, которая ведёт подсчёт количества материала, база данных показана на рис. 2. Модель балансировки показывает, на какой угол происходит откло-

нение шлифовального круга. Примеры работы ЦД представлены на рис. 8, 9 (смотрите в электронной версии журнала).

Визуализация системы управления (СУ)

На визуализации СУ показана балансировка шлифовального круга, на которой будет загораться сигнал о том, включён или выключен станок. Показывается, в каком состоянии находится балансир (в работе/включен/готов), также есть окна, на которых виден текущий, допустимый и программный дисбаланс круга. Кнопки выбора режима работы балансировки нужны для выбора ручного или автоматического режима, также есть лампочка аварии и кнопка сброса аварии, сигнал правки. Измерения колебаний показывает шкала, где отклонение может быть на 3 градуса вправо и 3 градуса влево. Пример работы СУ представлен на рис. 10, 11 (смотрите в электронной версии журнала).

Заключение

В процессе работы были изучены принципы технологического процесса шлифования деталей типа «вал». В результате работы был проведён сравнительный анализ оборудования и спроектированы система управления и цифровой двойник процесса балансировки шлифовальных кругов. Предложенный цифровой двойник прогнозирует и мониторит входные и выходные данные технологического процесса балансировки шлифовального круга, а также записывает в базу данных значения, которые обрабатывает цифровой двойник. Применение разработанной системы позволит добиться более точной обработки деталей типа «вал» и тем самым снизить затраты и время на обработку деталей.

Какими бы точными ни были станки, процесс шлифования всегда сопровождается различными возмущениями, поэтому дальнейшее повышение точности шлифования возможно лишь с применением автоматического управления и диагностики, чем и определяется актуальность данного исследования. Для диагностики процесса была предложена схема расчёта, которая позволила теоретически исследовать поведение неуравновешенного шлифовального круга в процессе работы с учётом упругих свойств абразива.

Результаты моделирования могут быть использованы для решения задач оптимизации процесса шлифования, прогнозирования качества выпускаемых изделий и проектирования систем автобалансировки. В результате тестирования прототип системы продемонстрировал стабильную и корректную работу. Выявленные недостатки были оперативно устранены. Однако системе можно развивать в дальнейшем для большего количества выполняемых задач.

Литература

1. *Kasbirskaya E.N., Kurnasov E.V., Kholopov V.A., Shmeleva A.G.* Methodology for assessing the implementation of the production process // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), IEEE. P. 232–235.
2. *Kasbirskaya E.N., Kholopov V.A., Shmeleva A.G., Kurnasov E.V.* Simulation model for monitoring the execution of technological processes // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), IEEE. P. 307–310.
3. *Zarubin G., Deev K.A.* Process model of digital manufacturing // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. M. 8. P. 714–719.
4. *Byrne G., Abearne E., Cotterell M., Mullany B., O'Donnell G.E., Sammler F.* High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing – A Roadmap. *Procedia CIRP* 46:1–6 // URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.038>.
5. *Pan X., Lu J., Huo J., Gao J., Wu H.* A Review on Self-Recovery Regulation (SR) Technique for Unbalance Vibration of High-End Equipment. *Chinese J Mech Eng* 33:89 // URL: <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00514-7>.
6. *Okita T., Kawabata T., Murayama H., Nishino N., Aichi M.* A new concept of digital twin of artifact systems: Synthesizing monitoring/inspections, physical/numerical models, and social system models. *Procedia CIRP* 79:667–672 // URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.048>.
7. *Kasbirskaya E.N., Kholopov V.A., Antonov S.V., Pimenov A.V.* Transient oscillatory processes at the balancing device operation of abrasive wheel grinder. *J Phys Conf Ser* 1679:022070 // URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022070>.
8. Московский завод «ФИЗПРИБОР». Программно-технические комплексы средств автоматизированного управления ПТК САУ: описание комплекса технических средств // Документация продукта. 2017. С. 20–40.
9. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий.
10. *Генис Б.М.* Шлифование на кругошлифовальных станках // Б.М. Генис, Л.Ш. Доктор, В.С. Терган. М.: Высш. шк., 1965. 57–59 с.
11. *Степанин С.С.* Цифровой двойник как инструмент подготовки производства // Сб. тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научн. конф. «Гагаринские чтения – 2018». М.: НИУ МАИ, 2018. 245 с.



НОВОСТИ МИРА

ЗАКРЫТЫЙ АМЕРИКАНЦАМИ РОССИЙСКИЙ ЗАВОД JABIL КУПИЛА КОМПАНИЯ «АКВАРИУС»

Российский производитель серверов и СХД «Аквариус» приобрёл завод американской компании Jabil в Твери. Помимо этого, компания забрала к себе несколько десятков уволенных сотрудников с производства, среди них технологи, инженеры, операторы и т.д. Всего на заводе площадью 27 тыс. кв. м планируется организовать до 1,5 тыс. рабочих мест. Производство серверов, СХД, ПК, ноутбуков и планшетов на нём начнётся в ближайшее время.

Общая площадь производственного комплекса в Твери составляет 27 тыс. кв. м. Это в два раза больше комплекса «Аквариуса», располагающегося в Ивановской обл. (14 тыс. кв. м). В ближайшие месяцы на новой площадке будет развёрнуто производство (участки конвейерной сборки, роботизированные линии сборки оборудования, а также автоматические линии сборки и монтажа печатных плат). На заводе будут выпускать всю производимую «Аквариусом» продукцию: серверы, системы хранения данных (СХД), персональные компьютеры, ноутбуки, планшеты, моноблоки, принтеры и МФУ. Стоимость завода в компании не раскрывают. Оборудование на нём будет только «Аквариуса».

«Это позволит до конца года увеличить производственные мощности «Аквариуса» в 2,5 раза: до 2,5 млн устройств», – расска-

зал Алексей Калинин, председатель совета директоров компании. О покупке производственно-логистического комплекса «Аквариусом» стало известно в марте 2022 г. Инвестиции в проект составят 5 млрд руб.

На заводе Jabil в Твери с 2009 г. выпускалась потребительская электроника, в частности, телевизоры и дисплеи, телекоммуникационное и сетевое оборудование, приставки для приёма сигналов спутникового и цифрового телевидения, а также POS терминалы и промышленное оборудование. На заводе Jabil в том числе выпускали ЖК-телевизоры Sony, а также цифровые IPTV-приставки Cisco.

В России у компании Jabil была налажена обширная партнёрская сеть с точками сбора оборудования на гарантийное и послегарантийное обслуживание, включая Москву, Санкт-Петербург, Калининград, Казань, Самару, Ростов и пр. Ремонтный центр в Твери также обслуживал бытовую и промышленную электронику. Об этом в одном из своих интервью заявил Филипп Костемаль (Philippe Costemale), глава Jabil в России.

Корпорация Jabil Circuit была основана в Мичигане в 1966 г., это третья по величине компания в мире, которая занимается контрактной сборкой сложной электроники. У Jabil размещены сотни заводов в 30 странах мира, на которых работает больше 180 тыс. сотрудников. Конечные потребители ком-

пании крупные западные корпорации, среди которых Amazon, Apple, Cisco Systems, Hewlett-Packard, Ericsson, Tesla и т.д.

С февраля 2022 г. «Аквариус» официально принадлежит ИТ-интегратору «Смарт технолоджис». Это стало следствием многомесячной битвы за контроль над «Национальной компьютерной корпорацией» (НKK) между семьей Калининых (Алексея и его отца Александра, основателя и акционера компании) и группой акционеров Леонидом Гольденбергом и Евгением Лачковым, а также президентом (на тот момент) НKK Денисом Фроловым, в декабре 2021 г. было заключено мировое соглашение. Его исходом стала договорённость о продаже крупнейшего актива НKK – группы «Аквариус» – «Смарт технолоджис», подконтрольного Калинину.

Согласно базе ЕГРЮЛ, 99% долей ООО «Аквариус» с 27 декабря 2021 г. принадлежит ООО «Смарт холдингу», 1% – Владимиру Степанову и менее 1% остаётся у Александра Калинина. В свою очередь, с 16 февраля 2022 г. 64% долей ООО «Смарт холдинга» находятся у ООО «Смарт технолоджис». Остальные 33% принадлежат Александру Калинину и 3% – группе «Аквариус». Наконец, ООО «Смарт технолоджис» на 40% принадлежит Алексею Калинину, а остальные 60% в равных долях распределены между Олегом Кот, Надеждой Бланкет и Антоном Ефремовым.

www.russianelectronics.ru