

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

© 2020 Лапшина Е. А., Хаймович А.И.

Самарский университет, г.Самара, Россия

В статье проведен обзор существующих систем мониторинга операций механической обработки, выявлен ряд недостатков. В качестве сигнала для анализа выбран параметр акустической эмиссии, который позволяет сделать выводы о протекании процесса. Рассмотрены различные алгоритмы кластерного анализа для структуризации полученных данных. Изложены понятия цифровой тени и цифрового двойника, определяющие эталонный процесс механической обработки. Рассмотрены пригодные для анализа стабильности процесса статистические инструменты – контрольные карты, индексы воспроизводимости, пригодности и возможностей процесса. Поставлены задачи для экспериментальной части исследования.

Ключевые слова: механическая обработка, онлайн-мониторинг, акустическая эмиссия, кластерный анализ, цифровой двойник.

В современных реалиях каждое предприятие должно быть конкурентным, чтобы удержать свое место на рынке. Конкурентоспособность любого предприятия связана с двумя параметрами – уровнем цены и уровнем качества продукции, именно поэтому управление качеством, постоянное улучшение, надежная эксплуатация прогрессивного технологического оборудования, а также воспроизводимость производственных процессов являются первостепенными задачами любой современной организации.

С распространением концепции Индустрии 4.0, неотъемлемой частью которой являются технологии индустриального интернета вещей, разработка системы онлайн мониторинга технологического процесса является перспективным направлением.

Разработка точной, быстрой, надежной системы оперативного контроля процесса резания позволяет:

- 1) управлять несоответствиями, а значит повысить уровень качества производимой продукции;
- 2) снизить уровень брака посредством внедрения предупреждающих мероприятий (адаптивное управление);
- 3) обнаружить и предупредить некомпетентное вмешательство человека в процесс (изменение параметров технологического процесса, неправильное базирование детали);

- 4) прогнозировать состояние режущего инструмента, таким образом исключить брак дорогостоящих деталей с помощью прогнозирования поломки инструмента; повысить выработку ресурса инструмента;
- 5) отслеживать непредвиденные и запланированные остановки оборудования, отслеживать его производительность.

Сидоров А.С. в своем исследовании в области мониторинга работоспособности инструмента отметил, что большинство систем мониторинга состояния инструмента построены по схожему принципу, то есть измеряются несколько параметров процесса резания, имеющих корреляционную связь с износом инструмента (составляющие силы резания, вибрация, сигналы акустической эмиссии, мощность привода главного движения) [1]. Измеренные сигналы фильтруются, усиливаются, извлекаются полезные характеристики сигналов (амплитуда, спектр, статистические оценки, коэффициенты волнового спектра), которые поступают на вход нейронной сети.

Burne G. показал, что существующие системы выполнены в качестве изолированной системы для одного станка и не интегрированы в единую систему мониторинга [2].

Marinescu I. отметил, что большинство разработок на данный момент направлены на использование сигналов акустической эмиссии (АЭ) для мониторинга состояния режущего инструмента. Хотя АЭ-датчики могут

зафиксировать не только неисправность инструмента, но и другую полезную информацию о состоянии поверхности заготовки, если ее правильно интерпретировать [3].

Стоит отметить, что большинство существующих систем мониторинга могут быть использованы только в лабораторных условиях, то есть не обладают универсальностью и рассчитаны на запрограммированные режимы. В то же время методики косвенного измерения не дают высокой степени достоверности [1, 4].

Рассмотрим измерение сигналов в процессе механической обработки. В процессе резания может быть измерен ряд параметров, таких как силы резания, вибрации, температура, звук, акустическая эмиссия [5]. Однако из бесконтактных методов анализ АЭ-сигналов является одним из наиболее эффективных. Главное преимущество АЭ заключается в том, что частота диапазона сигнала намного выше окружающих шумов и вибраций, не связанных с процессом резания [6].

Акустическая эмиссия – это явление, при котором возникают упругие колебания за счет быстрого высвобождения энергии в материале. АЭ возникает в первичной (из-за образования стружки), вторичной (из-за трения между режущим инструментом и стружкой) и локальной (из-за трения между режущим инструментом и заготовкой) зонах резания. Датчики позволяют обнаружить даже незначительные отклонения в процессе [5].

Источниками акустической эмиссии в процессе механической обработки могут быть различные сопутствующие процессы такие как пластическая деформация, удары стружки о заготовку, фазовое превращение материалов [7].

При креплении АЭ-датчика необходимо учитывать, что поверхность датчика и поверхности заготовки должны соприкасаться. Заготовка должна быть без загрязнений, краски и прочих барьеров, которые могут оказать влияние на акустическую пару (заготовка-датчик).

Рассмотрим верификацию качества процесса. Для того чтобы сделать полученные сигналы пригодными для анализа, необходимо структурировать полученные данные. Одним из инструментов реализации поставленной цели является кластерный анализ.

Кластерный анализ - многомерная статистическая процедура, выполняющая сбор данных, содержащих информацию о выборке объектов, затем упорядочивающая объекты в сравнительно однородные группы [8].

Принадлежность объекта к группе определяется путем составления вектора характеристик набора числовых характеристик, описывающих объект.

В работе Ершова К.С. и Романовой Т.Н. рассмотрены две основные классификации алгоритмов кластеризации: иерархические и плоские [8].

Иерархические алгоритмы позволяют разбить данные на непересекающиеся кластеры, таким образом, получаем дерево, корнем которого является вся выборка. Плоские алгоритмы строят одно разбиение на кластеры.

Разбиения могут быть четкими и нечеткими.

При четком разбиении каждому объекту выборки присваивается номер кластера, таким образом, объекты не пересекаются. В нечетких алгоритмах каждый объект принадлежит сразу к нескольким кластерам с указанием определенной вероятности.

В рамках работы Дмитриева А.А. по исследованию пластической деформации металлов с использованием акустической эмиссии [9] рассмотрены основные методы кластеризации, применимые для обработки сигналов акустической эмиссии, а именно метод k -средних, метод главных компонент, самоорганизующиеся карты Кохонена.

Для разработки модели системы оперативного контроля операции механической обработки необходимо рассмотреть два понятия - цифровой двойник и цифровая тень процесса.

Цифровые двойники – это виртуальные прототипы реальных объектов, групп объектов или процессов. Цифровые двойники представляют собой сложный программный продукт, который создается на основе самых разнообразных данных и технологий, объединяет в себе искусственный интеллект, компьютерное обучение и программное обеспечение со специальными данными для создания живых цифровых моделей [10].

Цифровая тень – это система связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, как правило, в нормальных ус-

ловиях работы и содержащихся в избыточных больших данных (Big Data), получаемых с реального объекта при помощи технологий промышленного интернета.

Таким образом, можно выделить существенное различие цифровой тени и двойника. Цифровая тень не имеет автоматической обратной связи по отношению к физическому объекту, что не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект не эксплуатировался. Цифровой двойник в данной работе является предпочтительным вариантом эталона процесса, так как он адаптивен, что позволяет действовать в рамках предиктивной методологии.

Рассмотрим статистические методы управления качеством. Выпуск продукции соответствующего качества с одновременным достижением высоких экономических показателей может быть реализован с применением процессного подхода (предупреждение дефектов, а не их исправление), а также снижением нежелательной вариабельности технологических процессов. Поставленные задачи могут быть реализованы с помощью инструментов статистического контроля.

Контрольная карта Шухарта является одним из методов статистического контроля и предназначена для разделения причин изменчивости контролируемой характеристики на случайные или специальные.

Контрольная карта, как правило, имеет два типа границ – контрольные границы, обозначающие допуск параметра, и предупреждающие границы. Предупреждающие границы являются частью системы по принятию решений, так как при вылете параметра в область за пределами предупреждающих границ, но в пределах допуска, необходимо обратить внимание на процесс для выявления специальных причин изменчивости и принять решение о необходимости его корректировки.

Garcia-Escudero в своем исследовании использовал быстрое преобразование Фурье и вейвлет-преобразование сигналов для того, чтобы отследить значительные скачки в зафиксированном сигнале. Затем были применены контрольные карты для фиксации ухудшения параметра.

Messaoud и Weihs использовали нелинейное моделирование во времени для онлайн-мониторинга процесса. Стратегия онлайн-контроля основана на контрольных картах, которые предназначены для обнаружения вибраций. В результате такой подход позволил отследить переход процесса сверления в нестабильное состояние.

Количественная оценка управляемости процессов в виде числовых критериев, прогноз уровня дефектности производимой процессом продукции проводится расчетом индексов пригодности Pp и Ppk , воспроизводимости S_p и S_{pk} и возможностей процесса C_m и C_{mk} .

Для применения данных индексов необходимо убедиться, что процесс является управляемым. На практике это означает, что получаемые значения должны в большинстве находиться внутри оговоренного техническими условиями допуска и не иметь существенных видимых колебаний. В противном случае сначала нужно устранить причины выхода параметров за поле допуска или сильных колебаний параметров.

С учетом выявленных преимуществ и недостатков существующих систем мониторинга ставятся следующие задачи исследования:

- 1) предложить и апробировать метод идентификации параметров процесса механической обработки, влияющих на качество конечного изделия, в увязке с параметрами косвенного измерения по акустической эмиссии процесса резания (полезной составляющей сигнала);
- 2) определить корреляцию между параметрами процесса механической обработки и параметрами полезной составляющей сигнала, установить зависимости, определить чувствительность метода;
- 3) разработать подход к созданию электронного эталона процесса механической обработки по идентифицирующим сигналам его косвенного измерения с целью управления качеством обработки;
- 4) предложить метод построения электронных карт качества процесса по выделенным параметрам сигнала, определить пригодность метода;
- 5) разработать эскизный проект технического задания на создание системы монито-

ринга процесса механической обработки в соответствии с концепцией Индустрия 4.0 (интеграция с MDP-системами).

В итоге можно сделать следующие выводы. Большинство существующих методик прямого измерения состояния объекта могут быть реализованы только в лабораторных условиях, поскольку в промышленных условиях затруднительно подвести датчики, регистрирующие отклонения геометрии обрабатываемой детали или вибрации технологической системы инструмент-заготовка непосредственно в зону резания, кроме того, процесс резания осуществляется в агрессивной среде. В то же время существующие системы, основанные на методике косвенного измерения, не дают высокой точности.

Результатом мониторинга процесса резания является база данных, которая может быть использована для интеллектуального алгоритма, который может не только оповещать о некорректности процесса резания, но и также предотвращать отклонения посредством адаптивного управления.

Мониторинг процессов механической обработки позволяет не только повысить срок службы инструмента, осуществить контроль изделия после обработки, снизить потребление электроэнергии и материала, а также сформировать базу данных для создания адаптивного управления без вмешательства человека. Выбор метода отслеживания является сложной задачей из-за денежных затрат и требований к каждому из методов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сидоров А.С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: автореферат дисс. канд. тех. наук. - Уфа, 2007. – 16 с.
2. Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I. Tool condition monitoring (TCM)—the status of research and industrial application // *Annals of CIRP*. - 1995. – Vol. 44(2). - Pp. 541–567.
3. Marinescu I., Dragos A. A time-frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunction in milling with multiple teeth cutting simultaneously // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2009. – Vol. 49.- Pp. 53-65.
4. Teti R., Jemielniak K. Advanced monitoring of machining operations // *Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 59. – Pp. 717–739.
5. Lauro C.H., Brandao L.C. Monitoring and processing signal applied in machining process // *Measurement*. – 2014. – Vol. 58. - Pp. 73-86.
6. Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Рационализация организации производства машиностроительного предприятия на основе реинжиниринга // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. - 2006. - № 3 (11). - С. 53-57.
7. Khaimovich A.I., Balaykin A.V. Analysis of plastic properties of titanium alloys under severe deformation conditions in machining // *International Journal of Engineering and Technology*. - 2014. - Т. 6. - № 5. - С. 2184-2190.
8. Ершов К.С., Романова Т.Н. Анализ и классификация алгоритмов кластеризации: в сборнике «Новые информационные технологии в автоматизированных системах». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 274 с.
9. Дмитриев А.А. Исследование пластической деформации металлических сплавов с использованием вейвлет-разложений сигналов акустической эмиссии: дисс. канд. физ. мат. наук. – Самара, Самарский университет, 2019. – 230 с.
10. Курганова Н.В., Филин М.А. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2019. - Vol. 5. – Pp. 105-115.

DEVELOPMENT OF MACHINING OPERATION MONITORING SYSTEM

© 2020 Elizaveta A. Lapshina , Aleksandr I. Khaimovich

Samara University, Russia, Samara

The paper deals with the review of current monitoring systems of machining operation. Acoustic emission was chosen as analysis signal, which allows making conclusions about actual process flow. It's stated about different algorithms of cluster analysis for received data structuring. The authors mention digital twin and digital shadow terms for definition of standard process. Control chart, indexes of process capability, suitability and opportunity were suggested as applicable statistical tools for process stability analysis. The paper sets the tasks for experimental part of research.

Key words: machining process, online monitoring, acoustic emission, cluster analysis.