

МОНИТОРИНГ ПАРКА СТАНКОВ ЧПУ В КОНТЕКСТЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**И.С. Решетников (ИПУ РАН), С.А. Чуранов (ГК “Цифра”)**

Рассмотрен эволюционный подход к построению системы мониторинга оборудования современного машиностроительного предприятия. Представлена функциональность типовой системы мониторинга применительно к парку станков с ЧПУ. Приведены рекомендации по внедрению систем мониторинга в зависимости от базового уровня развития предприятия.

Ключевые слова: управление производством, MES, станки с ЧПУ, системы мониторинга, эволюция.

Введение

Тенденция тотальной цифровизации и построения предприятия уровня Industry 4.0, получившая в последнее время широкое распространение, на практике часто оборачивается для предприятия значительными затратами без реальной операционной отдачи, а современные программные и аппаратные комплексы становятся лишь дополнительной финансовой нагрузкой. Реальная операционная эффективность предприятия сильно уступает аналогичным по профилю мировым стабильным компаниям.

Анализ подобных проектов и причин такого серьезного недостижения целей позволил выделить два ключевых фактора, которые присутствуют практически во всех случаях.

Во-первых, это сильная переоценка текущего состояния развития предприятия. При планировании цифровой трансформации предприятие исходит из того, что текущий уровень развития соответствует Industry 3+. А по факту он больше похож на «2+», а бывает что и на «2-»: имеющиеся информационные системы производственного управления (ERP, MES) носят разрозненный характер, не содержат управленческих функций. Учетные функции реализуются по внутренней модели, не связанной с финансовым учетом предприятия. «Серийное» производство реально таковым не является, так как 100% повторяемость процессов отсутствует.

Во-вторых, системы управления производством не имеют нужного объема достоверных данных, а процесс управления без этого неосуществим. Локальные системы сбора технологических и производственных данных разрознены, информация не анализируется, реально действующих регламентов сбора и ее обработки по факту нет.

Попытка построить современное предприятие с такими предпосылками будет успешна лишь тогда, когда отправная точка проекта будет выбрана адекватной реальному уровню развития предприятия, а дорожная карта будет учитывать реальные цели и задачи процесса такой трансформации [1].

Для базового анализа текущего уровня развития предприятия необходимо и достаточно понимать реальное состояние дел на цеховом уровне. Если начать проект с правильного выбора методики создания системы мониторинга оборудования и цеховых процессов, то на первом этапе будет получен ответ на вопрос «где мы находимся», а потом уже можно обсуждать «куда двигаться». Подобная методика позволит пра-

вильно выбрать оптимальные шаги трансформации, максимально использующие потенциальные возможности на конкретном этапе развития.

Мониторинг в контексте управления предприятием

Система мониторинга, наверное, единственный объективный источник управленческих метрик для принятия решений. Важно относиться к данным системы мониторинга именно как к показателям для оценки и улучшения производственного процесса, а не как к системе контроля и наказания персонала. И первое, с чего необходимо начинать процесс построения и внедрения системы мониторинга, — это реинжиниринг бизнес-процессов, чтобы сначала получить четкий ответ: как будут использованы данные и кто, как и какие корректирующие действия будет предпринимать.

Процесс мониторинга — вполне самостоятельный и важный процесс, который помогает решать целый ряд ключевых задач:

- контроль эффективности использования производственного времени;
- контроль выполнения производственных планов;
- контроль технологического процесса изготовления продукции;
- контроль параметров качества выпускаемой продукции;
- контроль и прослеживаемость материалов и деталей и сборочных единиц в ходе технологического процесса;
- контроль расхода производственных ресурсов;
- технический мониторинг состояния оборудования и др.

На начальном же этапе надо фокусироваться на решении ключевых проблем предприятия, жестко ограничивая набор показателей необходимым минимумом, но при этом обеспечивая максимальное качество данных. Избыток информации вреден, он разфокусирует внимание, отвлекает ресурсы и подменяет процесс «мониторинг ради операционной эффективности» на «мониторинг ради мониторинга».

Являясь компонентом блока систем оперативно-го управления, система мониторинга не может быть создана одномоментно раз и навсегда, это всегда эволюционный поэтапный процесс роста [2]. Типовая схема развития на каждом «витке» одинаковая:

- анализ ключевых проблем;
- выбор точек и методик мониторинга и показателей достижения успеха;

Эволюция систем мониторинга станков с ЧПУ

- внедрение (настройка, развитие) системы мониторинга;
- анализ потока данных, обеспечение качества данных;
- принятие корректирующих мер;
- контроль улучшения операционных показателей;
- фиксация изменений в скорректированных бизнес-процессах;
- переход на мониторинг по новым показателям и критериям.

Развивая систему мониторинга, крайне важно следить и стремиться к тому, чтобы всегда 100% собираемых показателей использовались для принятия управленческих решений, а процесс управления был на 100% обеспечен актуальной и достоверной информацией. Такой аудит должен стать составной частью процесса выстраивания процессов мониторинга, поскольку без его выделения типичные проблемы с данными могут сильно снизить или даже сделать отрицательным эффект от наличия системы мониторинга [3].

Развитие системы мониторинга может вестись по нескольким направлениям. Но при этом чрезвычайно важно следить, чтобы результаты отдельных мероприятий не интерферировали друг с другом, так как это, во-первых, не позволит оценить общую эффективность приведенной бизнес-цепочки «проблема — решение», а во-вторых, попытка проводить одновременно несколько мероприятий, направленных на один результат, приводит к распылению ресурсов и недостижению целей [4].

Методически правильным является подход построения системы мониторинга с одновременным развитием как «вширь», так и «вглубь». В этом случае выбирается один или несколько «пилотных» участков, на которых начинается построение системы мониторинга сначала от обобщенных показателей с постепенным переходом (по мере достижения целей) к более глубокому анализу. Важно в модели такого развития не допустить расхождения в области обработки и модели данных, обеспечить соответствие стандартам [5], проводить параллельное формирование корпоративной регламентной базы, анализировать накопленный опыт и внутрикорпоративные лучшие практики.

При выборе пилотного участка и задач, особенно на начальных стадиях проекта, желательно избегать традиционно «проблемных» участков производства, например, цехов инструментального производства, поскольку на них, как правило, процессы наименее нормализованы, и будет сложно оценить эффективность процесса. Наоборот, в начале целесообразнее ориентироваться на наиболее простые, ограниченные по номенклатуре и операциям участки, так как это позволит лучше выявить «подводные камни» и выстроить стандартизируемые в масштабах предприятия процессы.

Рассмотрим задачи мониторинга в контексте управления на примере парка станков с ЧПУ современного машиностроительного предприятия. Станки с ЧПУ на сегодняшний день являются основным оборудованием в дискретном производстве. Такие станки относятся к дорогостоящему оборудованию, для которого рациональное использование и долговечность имеют первостепенное значение. Поэтому и контроль эффективного использования станков с ЧПУ является важной задачей на каждом предприятии.

Процесс производства продукции на станках с ЧПУ характеризуется целым рядом параметров. И поэтапное, адаптированное к общим операционным задачам предприятия использование значений этих параметров, вовлечение в процессы принятия решений обеспечит долгосрочный рост и развитие предприятия.

На первых этапах это может быть «традиционный» контроль эффективности производства, ограниченный оценкой производительности станочного оборудования и учетом затраченных при этом ресурсов: материалы, электроэнергия, человеческий труд.

Далее, по мере развития алгоритмов и методов менеджмента, становятся востребованными более «интеллектуальные» системы мониторинга, например, производственного времени, которые позволяют намного точнее рассчитывать показатели эффективности, опираясь на измерения длительности различных этапов производства при одновременном более прозрачном и всестороннем «видении» нюансов протекающих на производстве технологических процессов.

Следующим этапом развития систем мониторинга станут решения, в которых имеются средства оценивания и анализа параметров технологического процесса, контролирующие выполнение технологических операций «на лету», то есть в on-line режиме. Такая степень контроля и общей осведомленности позволяет ставить и решать задачи оперативного контроля эффективности технологического процесса, в том числе задачи контроля качества продукции и предотвращения выпуска бракованных деталей.

Рассмотрим кратко основные задачи мониторинга станочного парка современного предприятия.

Мониторинг производственных процессов

Фиксация значений времени начала/конца выполнения производственного задания, обычно включая время обработки детали, время вспомогательных перемещений, время вспомогательных действий. При таком мониторинге (контроль персонала в данном контексте не рассматривается) ключевым фактором является время, часто усредненное по партии изделий. Анализ ведется с точки зрения стабильности процессов и их соответствия технико-экономическим показателям, заложенным в себестоимость продукции. Процессы менеджмента на основании этих данных проводят корректирующие мероприятия приведению параметров технологических процессов в соответствие с заданными величинами. Обычно за-

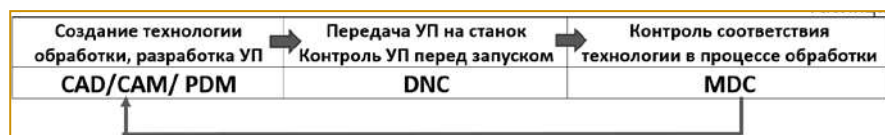


Рис. 1. Контур разработки и контроля технологического процесса

Таблица. Структура распределения времени при выполнении УП

Время технологической операции	Выполняемые действия
Время обработки детали	Перемещение станка на рабочей подаче
Время вспомогательных перемещений	Перемещения станка на подаче быстрого хода
Вспомогательные действия	Включение/выключение агрегатов станка. Смена инструмента, палет с заготовкой. Технологические остановы

дачи производственного мониторинга решаются при помощи специализированного ПО или цеховых систем уровня MES.

Контроль эффективности технологического процесса

Специфика станков с ЧПУ состоит в том, что технологический процесс на них выполняется в соответствии с управляющей программой (УП), созданной технологом, как правило, при помощи CAD/CAM систем. Поэтому автоматизированный контроль технологической операции на станках с ЧПУ начинается с точной идентификации УП, загружаемой для выполнения на станке (рис. 1). Именно это позволяет, во-первых, исключить ошибки при запуске процесса обработки и, во-вторых, получать необходимую и достоверную технологическую информацию в ходе обработки детали.

Непосредственный контроль технологического процесса выполняет система мониторинга промышленного оборудования (MDC — Machine Data Collection). При этом система мониторинга должна контролировать не только параметры работы оборудования, а выполнять контроль процесса в целом. Параметры технологического процесса требуется контролировать для каждого инструмента, а также для временных интервалов черновой и чистовой обработки. Это дает возможность подробно и всесторонне оценивать ход выполнения технологической операции.

В рамках такого мониторинга анализируется несколько факторов.

Во-первых, это производительность технологической операции или УП, которая определяется временем ее выполнения (машинным временем). Время выполнения УП включает три составляющие (таблица). Контролируя соотношение затрат времени на указанные действия, сравнивая его с нормативным, можно оценить эффективность техпроцесса, а расчет производительности сводится при этом к контролю времени непосредственной обработки детали, которое определяется временем рабочей подачи.

Второе, это контроль соответствия заданным технологом параметрам техпроцесса, когда на протяжении обработки контролируются фактические значения заданных технологических параметров. Для станков с ЧПУ можно выделить два основных параметра, которые задаются в УП: скорость вращения шпинделя S (об./мин) и скорость контурной подачи F (мм/мин). При этом различаются рабочая подача, на которой происходит обработка детали, и быстрый ход, то есть быстрое перемещение рабочего органа станка без обработки детали. Контролируя параметры для каждого инструмента (среднее значение, максимальное, минимальное) и сравнивая их с заданными значениями для «идеального» цикла, можно сделать вывод о степени соответствии техпроцесса эталонному.

Анализируя эти показатели, корректируются рабочие процессы на станке, оптимизируются УП, инструмент и инструментальные сборки и т. д. Выигрыш в данных улучшениях на порядок (а то и больше) меньше эффекта от нормализации общепроизводственных процессов, поэтому этот этап мониторинга стоит развивать после наведения общего порядка на уровне общецеховых и логистических процессов, проведения мероприятий 5S¹ на рабочих местах и т. п.

Анализируя эти показатели, корректируются рабочие процессы на станке, оптимизируются УП, инструмент и инструментальные сборки и т. д. Выигрыш в данных улучшениях на порядок (а то и больше) меньше эффекта от нормализации общепроизводственных процессов, поэтому этот этап мониторинга стоит развивать после наведения общего порядка на уровне общецеховых и логистических процессов, проведения мероприятий 5S¹ на рабочих местах и т. п.

Контроль показателей качества

В настоящее время получение необходимых результатов практически любой производственной деятельности предполагает достижение заданных характеристик по объему продукции, срокам изготовления, качеству (потребительским свойствам) и затратам. Обеспечение требуемых значений этих характеристик не только после изготовления детали или партии деталей, но и непосредственно в ходе этой работы диктует необходимость оперативного контроля технологических процессов.

В рамках мониторинга качества можно выделить два блока: учет несоответствующей продукции (обычно это стандартная функциональность MES) и анализ причин, приведших к выпуску такой продукции. Даже полное соответствие техпроцесса эталонному не гарантирует 100% качества, при этом еще есть и задача, которая называется «качество с первого изделия».

При ориентации предприятия на борьбу за качество продукции анализ данных мониторинга позволяет выявлять корневые причины брака и отклонений, но это требует большой нормативной базы, развития аналитических инструментов и структурного аналитического подразделения (своего или на аутсорсинге). Поэтому при развитии этого направления мониторинга важно не только сначала нормализовать остальные процессы, но и развить новые компетенции и модели принятия решений.

Контроль качества заготовок

Некачественную заготовку детали отличают обычно по несоответствию ее размеров и свойств материала

¹ 5S — система организации и рационализации рабочего места (рабочего пространства), один из инструментов бережливого производства.

(например, повышенная твердость) заданным в технологическом процессе значениям. Определить такую заготовку можно при контроле нагрузочных параметров: нагрузка на шпиндель, вибропараметры. Обнаружение отклонений, выходящих за установленные допустимые пределы, позволяет оценить качество заготовки и предотвратить возможность выпуска бракованных деталей.

Метод контроля требует развитой нормативно-методической базы, возможности принятия корректирующих воздействий (смена поставщика, контрактные обязательства, введение входного контроля) и т.д. Поэтому все данные вопросы должны быть проработаны до принятия решений о запуске мониторинга контроля качества заготовок.

Контроль качества инструмента

Деталь может быть изготовлена некачественно вследствие износа, поломки или дисбаланса инструмента.

Для обнаружения поломки инструмента контролируется резкое увеличение значений параметров, характеризующих нагрузку и ударные воздействия на шпиндель, а затем резкое снижения значений этих параметров до уровня холостого хода. Например, для выявления дисбаланса инструмента оценивается вибропараметр «Дисбаланс» и его выход за предел порогового значения.

Контроль износа инструмента различного типа является значительно более сложной задачей. Для контроля износа могут применяться такие параметры, как суммарное время работы инструмента, средняя и максимальная нагрузка на шпиндель и др. Для некоторых инструментов используются специальные параметры, например, для мониторинга износа фрезы используются гармоники вибросигнала, кратные числу зубьев фрезы.

Крайне полезно, когда инструмент отмаркирован (например, через RFID-метки) и поверочный (калибровочный) стенд интегрирован с системой мониторинга. Тогда появляется возможность контролировать проверки, эффективность применения инструмента, корректировать УП с учетом износа. Но это «высший пилотаж», предприятие (участок) должно иметь очень высокую культуру производства и реальную потребность в такой функциональности, например, серийный выпуск продукции с небольшой маржинальностью.

Контроль технического состояния оборудования

Система мониторинга является как основанием для планирования технического обслуживания и ремонта (ТОиР) в модели «по состоянию», так и причиной выпуска изделий с отклонениями. Это могут быть различные неисправности станка: недостаточная точность позиционирования, прямолинейности и перпендикулярности осей перемещения станка, дисбаланс шпинделя, неисправность устройства зажима инструмента, системы смазки, системы охлаждения и др. Предупредить появление этих неисправностей позволяет своевременное проведение ТОиР.

Отдельной задачей является технический мониторинг, когда система постоянно фиксирует параметры условий эксплуатации станка и предупреждает воз-

никновение аварийных ситуаций. При этом оперативно информируется персонал, обслуживающий станок, информация передается в систему ТОиР для проведения профилактического обслуживания или ремонта. Постоянно контролируемые системой параметры определяются индивидуально для каждого станка. Рекомендуется постоянно контролировать: столкновения и удары, перегрузку станка и его узлов, отсутствие или низкое качество смазочных материалов, низкое напряжение элементов резервного питания (батарей).

Мониторинг показателей технического состояния сам по себе не сложен, но чрезвычайно сложной является задача формирования нормативной базы. Без тщательной проработки такой базы система предиктивного мониторинга будет лишь служить системой поддержки принятия решений, при этом далеко не факт, что она будет реально помогать и приносить положительный экономический эффект. Эти риски надо обязательно учитывать при построении дорожной карты развития систем мониторинга.

Структурная модель системы мониторинга

В практическом ракурсе система мониторинга захватывает функции не только MDC, но и DNC, и MES, только в таком варианте можно ожидать эффективности на всех этапах развития предприятия. Это могут быть как отдельные компоненты, так и рыночные решения, где такое объединение уже присутствует в архитектуре системы, например АИС «Диспетчер» [6].

В связке «комплексный контроль — управление» задействовано три крупных блока:

- непосредственно блок мониторинг;
- блок подготовки эталонной модели технологической операции;
- блок оперативного информирования оператора;
- аналитический блок обработки накопленных данных.

Оптимально-достаточным в целевой модели управления можно считать следующий набор специфических контрольных функций:

- контроль корректной загрузки УП в ЧПУ и контроль изменений УП оператором в процессе ее отработки;
- мониторинг текущих величин рабочих параметров, извлекаемых из стойки ЧПУ или контроллеров посредством программных протоколов прямого доступа, в частности, параметры «скорость шпинделя», «контурная подача», «счетчик деталей», «нагрузка на шпиндель», вибропараметры;
- измерение параметров вибрации, тока, потребляемой мощности, снимаемых с соответствующих датчиков и обрабатываемых устройствами, дополнительно установленными на станке.

Задача построения эталонной модели техпроцесса самая критичная, так как она определяет корректность выбора целевой точки эффективности. Кроме экспертной работы технолога и анализа САД/САМ систем, полезными являются и средства самообучения. Так, например, в АИС «Диспетчер» присутствует функция

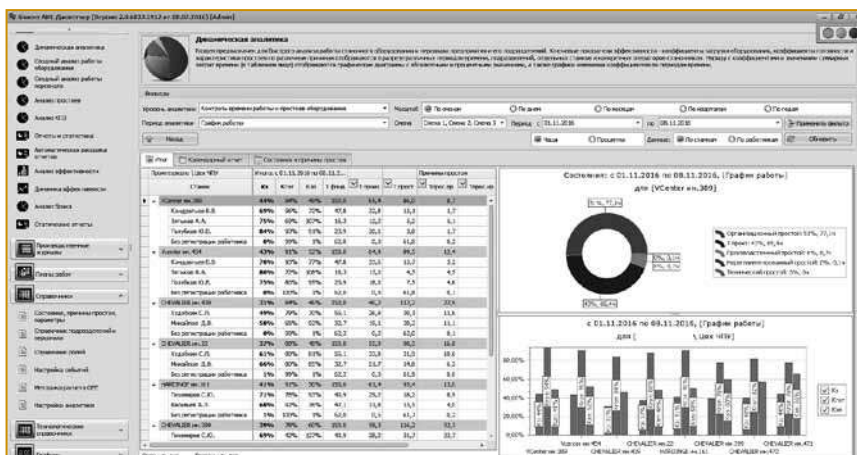


Рис. 2. Блок аналитических отчетов АИС «Диспетчер»

автоматического «самообучения» в ходе наладки технологической операции, обычно для этого требуется 1...3 цикла выполнения УП с отклонением во времени цикла $\leq 5\%$. Режим обучения завершается, когда оператор станка подтверждает изготовление эталонной детали. Далее, по анализу изготовления реальных партий изделий эталонная модель может уточняться.

Оперативное информирование персонала требует интеграции с системами визуализации производства и наличие локальных терминальных систем отображения информации. При этом существенно, что оператор станка является полноправным участником контроля технологического процесса и может в ручном режиме дополнить или уточнить информацию о причинах аномалий. А отклонения, требующие вмешательства технолога или мастера цеха, должны поводиться средствами MES до целевого получателя.

Отклонения в ходе технологического процесса, о которых должны быть проинформированы операторы и вышестоящие руководители, определяются корпоративными нормативными документами и производственной стратегией. Наиболее часто оповещение настраивается на изменение корректоров F%, S%, изменение текста УП оператором, поломка, износ режущих кромок инструмента, неверный ввод оператором параметра инструмента, дисбаланс инструмента, отсутствие эмульсии и т. п., то есть на показатели, которые сводят к минимуму риск выпуска продукции несоответствующего качества.

Аналитическая компонента комплекса ориентирована на процессы принятия бизнес-решений и корректировки параметров процессов. Данный модуль должен удовлетворять соответствующим требованиям: высокая наглядность, возможность группировки отклонений по типам, проведение минимального анализа данных

Решетников Игорь Станиславович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИПУ РАН, Контактный телефон (916) 671-19-74

E-mail: i.reshetnikov@mescenter.ru

Чуранов Сергей Александрович — технический директор направления MDC ГК «Цифра».

E-mail: sergey.churanov@zyfra.com

и пр. Такой набор инструментов обычно состоит из стандартных отчетов (рис. 2) и открытой витрины данных², которая позволяет проводить сложный анализ в различных разрезах. Данная информация должна быть оперативно доступной для всех заинтересованных специалистов.

Заключение

Система мониторинга оборудования — это то, с чего начинают процесс построения системы управления производством. Ее развитие всегда идет чуть впереди всей производственной системы, обеспечивая отработку «пилотных» новых методов контроля и управления. Важно соблюдать баланс достаточности и разумности объема данных, соответствующий на каждом этапе корпоративного роста реальным задачам и потребностям.

Система мониторинга оборудования — это живой, постоянно эволюционирующий механизм: нужные показатели появляются, ненужные устраняются, показатели анализируются, становятся основой новых методов управления, в корпоративных стандартах и стратегиях фиксируются целевые значения, по мере развития они пересматриваются, ставятся новые задачи и ориентиры. И всегда это строится только на системе сбора технологических данных, обеспечивающей достоверные и актуальные данные. Но при этом крайне важно правильно этот фундамент строить и не допускать ошибок.

Список литературы

1. Решетников И.С. MES - стратегическая инициатива, М.:НГСС, 2019.
2. MESA WP 19. Использование поэтапного подхода к внедрению MES, в сб. MES - Теория и практика. Выпуск 1, М: НГСС, 2009.
3. Ицкович Э.Л. Особенности современных АСУТП, М: Изд-во ИПУ РАН. 2017.
4. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Модель управления качеством продукции и деятельности предприятия в пространстве состояний // Автоматизация в промышленности 2019. № 8. С. 36-38.
5. Козлецов А.П., Решетников И.С. Современные способы организации обмена данными с системами управления // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2010. № 2. С. 17-23.
6. Сайдуллин Р.М., Чуранов С.А. Системы мониторинга «Диспетчер» как элемент повышения степени использования оборудования и эффективности персонала // Автоматизация в промышленности. 2018. № 5. С. 16-22.

² Витрина данных — срез хранилища данных, представляющий собой массив тематической, узконаправленной информации, ориентированный, например, на пользователей одной рабочей группы или департамента.