

УДК 681.518.3:658.5.012.7

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДИСЦИПЛИНЫ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е. С. Янов, к.т.н., заместитель директора Передовой инженерной школы ФГБОУ ВО ТулГУ, г. Тула, Россия;

e-mail: dextra@mail.ru

А. В. Анцев, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой МиМ ФГБОУ ВО ТулГУ, г. Тула, Россия;

orcid.org/0000-0002-0923-6285, e-mail: a.antsev@yandex.ru

Целью работы является разработка системы автоматического контроля технологической дисциплины на основе аппаратно-программных комплексов. Рассматривается задача применения измерительной информационной системы контроля механических колебаний технологической системы для контроля производственного процесса. Приведены основные причины нарушения технологической дисциплины. Для мониторинга технологических процессов и соблюдения технологической дисциплины и исключения из цепочки принятия решения человеческого фактора предложен вариант внедрения системы автоматического контроля технологической дисциплины на основе разработанного аппаратно-программного комплекса мониторинга и оптимизации технологических процессов (АПК), представляющего собой набор диагностических модулей, установленных на оборудовании, которые снимают со станка определенный набор показателей и позволяют интерпретировать работу оборудования в течении заданного времени. Полученная информация хранится на сервере и является источником определения коэффициента загрузки оборудования, количества обработанных заготовок, номенклатуры обработанных заготовок и ритмичности работы оборудования. Применение предложенного способа косвенного контроля состояния технологического оборудования позволяет контролировать соблюдение технологической дисциплины путем регистрации факта работы оборудования на холостом ходу для имитации работы и факта работы оборудования, имитирующей работу станка по управляющей программе; выявления фактов изменения режимов резания; фиксации прерывания технологического процесса и переделки некоторых переходов; анализа ритмичности производства и фактической производительности каждого оператора; обнаружения несоблюдения сменно-суточного задания. Предложенный вариант использования АПК позволяет повысить эффективность технологических процессов обработки резанием за счет своевременного системного выявления отклонений технологической дисциплины.

Ключевые слова: измерительные информационные системы, аппаратно-программный комплекс, технологическая система, вибрация, машиностроительное производство, мониторинг, контроль за производственным процессом, технологическая дисциплина.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-85-94

Введение

В условиях интеграции России в мировую экономическую систему, обеспечивающих свободный доступ на рынки иностранных конкурентов, стратегически важной задачей является повышение уровня конкурентоспособности продукции машиностроения. К сожалению, отечественное машиностроение имеет невысокий уровень конкурентоспособности как внутри России, так и на международном рынке [1]. Признанный специалист в области изучения экономической конкуренции, в том числе и конкуренции на международных рынках, профессор Гарвардской школы бизнеса Майкл Портер в своей теории конкурентных преимуществ выделил два вида конкурентного преимущества предприятия: низкие издержки и дифференциация товаров [2].

Технологические процессы изготовления машиностроительной продукции, проектируемые при наличии неопределенности характеристик обрабатываемых заготовок и инструмен-

та, содержат недоработки и упущения, приводящие к увеличению издержек производства, а следовательно, к увеличению цены и снижению конкурентоспособности продукции вследствие [3, 4]:

- снижения коэффициента использования металлорежущих станков и нарушения ритмичности производственного процесса изготовления продукции из-за увеличения вспомогательного времени;
- снижения эффективности использования ресурса режущего инструмента из-за назначения неоптимального порядка его восстановления;
- увеличения основного времени, необходимого на изготовление деталей машин из-за назначения неоптимальных режимов резания;
- повышения вероятности возникновения брака, связанного с отказом режущего инструмента во время обработки, из-за совместного влияния вариативности параметров режущего инструмента и обрабатываемых заготовок;
- повышения себестоимости продукции из-за включения в нее затрат на брак, связанный с отказом режущего инструмента во время обработки.

Кроме рассмотренных выше факторов, также в снижении конкурентоспособности и увеличении издержек стоит рассмотреть такое понятие, как технологическая дисциплина.

Технологическую дисциплину стоит рассматривать, как обязательное соблюдение технологических регламентов и технологического режима.

Соблюдение технологической дисциплины является важным условием, позволяющим выпускать высококачественную продукцию с минимальным браком и снизить ее себестоимость, так как примерно 20-30 % отказов систем напрямую или косвенно связаны с ошибками человека, в том числе с неправильно принятыми решениями, а 10-15 % всех отказов непосредственно связаны с ошибками человека [5].

Нарушение технологической дисциплины является причиной низкого качества продукции, брака, ухудшения использования сырья, остановок и поломок оборудования, что, в свою очередь, ведёт к снижению выпуска готовой продукции. Нарушения технологической дисциплины происходят по следующим причинам:

- 1) недостаточная подготовка сотрудников;
- 2) невнимательное исполнение сотрудниками своих должностных обязанностей;
- 3) самостоятельное изменение сотрудниками технологических процессов, указанных в технологических и операционных картах.

Если с первой причиной вполне понятно, как бороться, так как существуют различные варианты повышения квалификации сотрудников любого предприятия, то причины, обозначенные в пунктах 2 и 3, носят бессистемный характер и могут относиться к сотрудникам любого уровня компетенций.

Безусловно, производственный мастер обязан в процессе выполнения своих служебных обязанностей постоянно контролировать последовательность и правильность выполнения технологических операций, следить за состоянием оборудования, следить за чистотой и культурой производства на рабочих местах, особое внимание уделять рабочим местам, где работают ученики, новые рабочие (операторы), но в условиях текущей загруженности и даже перегруженности предприятий для обеспечения нужд СВО это не всегда представляется возможным.

В настоящее время для мониторинга различных чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера используются киберфизические системы, например [6]. Соответствующие системы мониторинга реализуются в виде аппаратно-программных модулей [7], относящихся к системам класса MDC/MDA. Обзор технологий контроля, обработки и анализа данных в процессе работы оборудования и создаваемого на их основе продукта – информационно-измерительной системы (ИИС), предназначенной для повышения эффективности эксплуатации технологических систем, представлен в работе [8]. Россия, возможно, благодаря политике импортозамещения, интереса государства к тематике промышленного интернета

вещей и инициативе Индустрия 4.0, в части количества разработок систем MDA, оказалась на втором месте после США, где исторически располагается наибольшее число разработчиков MDC/MDA [9]. В последние годы иностранные разработчики систем мониторинга были вытеснены в этой связи с отечественного рынка [10]. Для решения проблемы мониторинга технологических процессов и исключения из цепочки принятия решения человеческого фактора актуальной научной задачей становится разработка системы автоматического контроля технологической дисциплины на основе аппаратно-программных комплексов.

Аппаратно-программный комплекс контроля механических колебаний технологической системы

Авторами предложен вариант системы автоматического контроля технологической дисциплины на основе разработанного аппаратно-программного комплекса мониторинга и оптимизации технологических процессов (АПК). Указанная выше система представляет собой набор диагностических модулей, установленных на оборудовании, которые снимают со станка определенный набор показателей и позволяют визуальнo интерпретировать работу оборудования в течении заданного времени. Обобщенная структурная схема АПК представлена на рисунке 1, а общий вид АПК – на рисунке 2.

В состав АПК входят следующие регистрирующие устройства: модуль сбора информации, который обеспечивает регистрацию и передачу данных об уровне виброускорения технологической системы; датчики тока, датчик температуры и влажности; датчик CO₂.

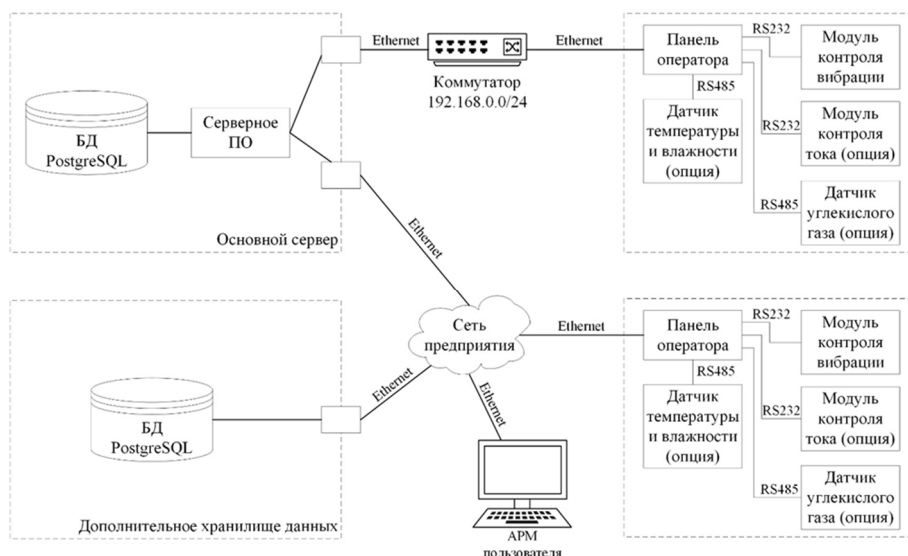


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема аппаратно-программного комплекса

Figure 1 – Generalized block diagram of hardware and software complex

Самой важной информацией, собираемой модулем сбора информации, является уровень виброускорения технологической системы, потому что информация об уровне вибрации технологической системы, как кардиограмма человека, дает исчерпывающую информацию о ее состоянии. Уровень виброускорения технологической системы измеряется с помощью MEMS-акселерометра MPU6050, состоящего из трехосных измерителей линейного ускорения (до 16 g) и трехосных измерителей угловой скорости (до 2000 °/с) [11]. Модуль MPU6050 имеет цифровой выход по интерфейсу I2C. Частота обновления информации о действующем ускорении 1000 Гц. Напряжение питания 3,3 В.

Собранные с помощью MEMS-акселерометра MPU6050 сигналы должны пройти ряд обработок для их преобразования в удобный для анализа вид:

- 1) удаление влияния ускорения свободного падения;
- 2) компенсация смещения нуля акселерометра;
- 3) перевод сырых данных акселерометра в виброускорение;

4) выделение части сигнала, соответствующего работе оборудования.

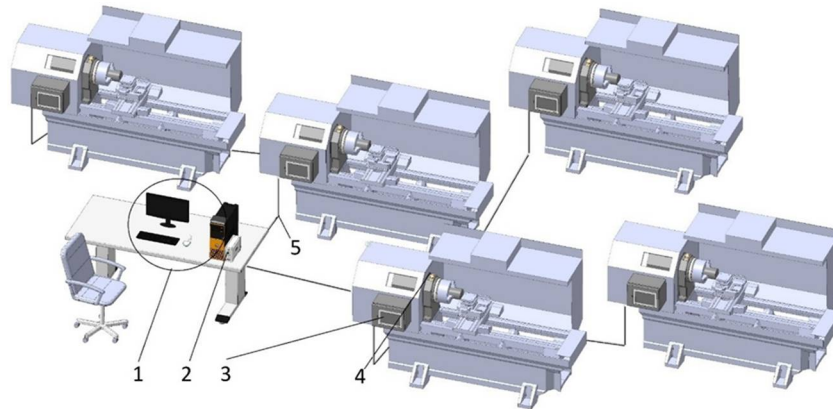


Рисунок 2 – Общий вид аппаратно-программного комплекса:

**1 – сервер с сетевым коммутатором; 2 – источник бесперебойного питания;
3 – панель оператора; 4 – модуль сбора информации; 5 – витая пара и силовой кабель**

Figure 2 – General view of hardware and software complex

1 – server with network switch; 2 – uninterruptible power supply; 3 – operator panel; 4 – information collection module; 5 – twisted pair and power cable

Первоначальная обработка исходного сигнала состоит в удалении из него ускорения свободного падения g , постоянно влияющего на MEMS-акселерометры. Основные примеры такого влияния в зависимости от расположения датчика рассмотрены в работе [12]. В простейшем случае датчик расположен неподвижно и одна из его осей (например, ось Z) расположена параллельно вектору ускорения свободного падения. Такое размещение датчика возможно на державке резца в револьверной головке, на задней бабке и на станине станка. В этом случае колебания технологической системы с учетом ускорения свободного падения могут быть пересчитаны из показаний датчика следующим образом:

$$a'_x = a_x; a'_y = a_y; a'_z = a_z - g,$$

где a_x , a_y , a_z – показания акселерометра по соответствующим осям; a'_x , a'_y , a'_z – колебания технологической системы.

Смещение нуля акселерометра в зависимости от условий можно разложить на составляющие по следующей модели, рассмотренной в работе [13]:

$$\Delta a_{\text{см}} = \Delta a_{\text{Т.сист}} + \Delta a_{\text{хр}} + \Delta a_{\text{т}} + \Delta a_{\text{нестаб}},$$

где $\Delta a_{\text{Т.сист}}$ – систематическая составляющая смещения нуля, зависящая от температуры; $\Delta a_{\text{хр}}$ – изменяющаяся от времени хранения систематическая составляющая смещения нуля; $\Delta a_{\text{т}}$ – систематическая составляющая смещения нуля, зависящая от времени с момента включения при неизменных внешних условиях; $\Delta a_{\text{нестаб}}$ – нестабильность смещения нуля от включения к включению.

В условиях рассматриваемой задачи всеми составляющими смещения нуля можно пренебречь, кроме $\Delta a_{\text{Т.сист}}$, поэтому колебания технологической системы по всем осям с учетом смещения нуля могут быть пересчитаны из показаний датчика следующим образом:

$$a'' = a' - \Delta a_{\text{Т.сист}},$$

где a' – колебание технологической системы, полученное после учета ускорения свободного падения.

MEMS-акселерометр MPU6050 позволяет получить значение виброускорения в диапазонах $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$ в зависимости от настройки после включения. По каждой оси вне зависимости от диапазона измерения датчик выдаёт 16-битное знаковое значение от -32768 до 32767. Перевод сырых данных в величину СИ (м/с^2) осуществляется следующим образом:

$$a''' = \frac{a'' \cdot a_{\max} \cdot g}{2^{15}},$$

где $a_{\max}$ – максимальное значение виброускорения в g в зависимости от диапазона измерения; g – ускорение свободного падения, 9,80665 м/с².

Из преобразованных таким образом данных можно выделить часть сигнала, соответствующего работе оборудования. Для этого назначается пороговый уровень виброускорения $a_{\text{порог}}$, превышение которого соответствует эксплуатации технологического оборудования по назначению. Таким образом, все значения виброускорения, превышающие пороговый уровень из всего множества записанных сигналов $\mathbf{A}$, $\forall a \in \mathbf{A}, a \geq a_{\text{порог}}$, соответствуют работе оборудования.

Полученная со всех датчиков информация хранится на сервере и может быть визуализирована как последовательность рисунков, характеризующих состояние технологической системы за отчетный или рассматриваемый период.

Также, вышеуказанная информация является источником для определения:

- коэффициента загрузки оборудования

$$k_{\text{загр}} = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{|\mathbf{A}|}, \quad (1)$$

где $|\mathbf{A}|$ – мощность множества записанных сигналов $\mathbf{A}$, т. е. число элементов множества; $|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|$ – число элементов множества $\mathbf{A}$, соответствующих работе оборудования;

- количества обработанных заготовок (подсчитывается визуально по сформированным отчетам);

- номенклатуры обработанных заготовок (оценивается визуально по сформированным отчетам);

- ритмичности работы оборудования, которая в условиях поточного измеряется средним линейным или квадратическим отклонением от расчетного темпа работы оборудования или коэффициентом вариации темпа [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n}}; \theta = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})}{n}; V = \frac{\sigma}{\bar{t}},$$

где $t = 1/r$ – фактический темп работы оборудования; $r = \Phi_n / Q$ – такт работы оборудования, мин./шт.; Φ_n – полезный фонд времени работы оборудования за определенный период, мин; Q – производственная программа линии за этот же период, шт.; $\bar{t}$ – расчетный темп работы оборудования; n – число наблюдений; θ – среднее линейное отклонение темпа; V – коэффициент вариации темпа; σ – среднее квадратическое отклонение темпа.

В условиях серийного и индивидуального выпуска продукции, где объект изготовления меняется, ритмичность работы оборудования означает выполнение одинакового объема, хотя и разных по содержанию, работ в равные промежутки времени и измеряется степенью соответствия фактического выпуска установленному графику изготовления продукции

$$K_p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i}, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент ритмичности; O_i – отрицательные отклонения фактического выпуска от планового в i -м периоде (недовыполнение плана по периоду); Π_i – плановые задания на i -й период; n – количество анализируемых периодов.

Пример мониторинга технологической дисциплины современного машиностроительного производства

В ходе проведенных исследований были выявлены интересные случаи нарушения технологической дисциплины при изготовлении различных деталей на технологическом оборудовании с использованием разработанного АПК.

На рисунке 3 представлена регистрация факта работы оборудования на холостом ходу для имитации работы.

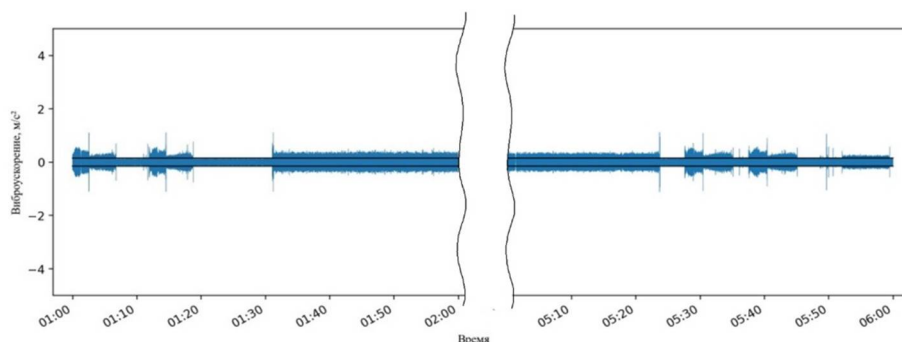


Рисунок 3 – Картина работы станка с 01:00 до 06:00
Figure 3 – Image of machine operation from 01:00 to 06:00

После получения операторами обратной связи о выявленных фактах нарушения технологической дисциплины наблюдалась иная картина рабочего дня. На рисунке 4 представлен вариант использования программы, имитирующей работу станка по управляющей программе. Также видно, что график начинается с хорошо визуализированных образов деталей, характерных для этого оборудования, однако далее АПК регистрирует лишь повторяющиеся холостые ходы суппорта и вращение револьверной головки.

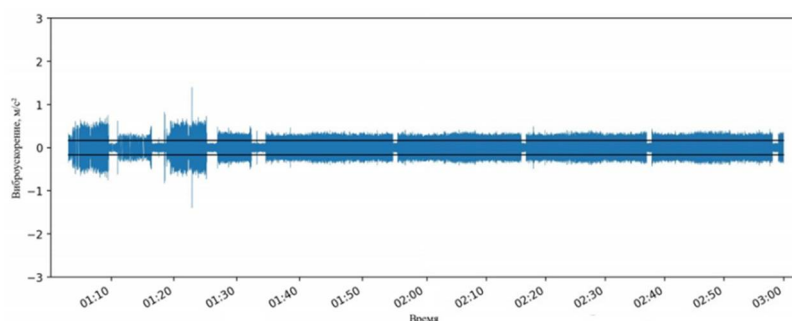


Рисунок 4 – Картина работы станка с 01:00 до 03:00
Figure 4 – Image of machine operation from 01:00 to 03:00

В заключение вопроса о нарушениях хотелось бы рассмотреть аспект самовольного изменения рабочими режимов резания или фактов отклонения от технологического процесса.

Стоит пояснить, что ранее была сделана сноска о возможности идентификации номенклатуры обработанных заготовок. Это становится возможно при системном анализе работы оборудования, которое каждый день делает одни и те же операции на одних и тех же деталях.

Так, на рисунке 5, а видно, что на одном из переходов были уменьшены режимы резания, вследствие чего рисунок детали приобрел более вытянутые очертания, а время изготовления детали увеличилось во времени. На рисунке 5, б представлено прерывание технологического процесса (процесса обработки детали) и переделки (повтора) некоторых переходов.

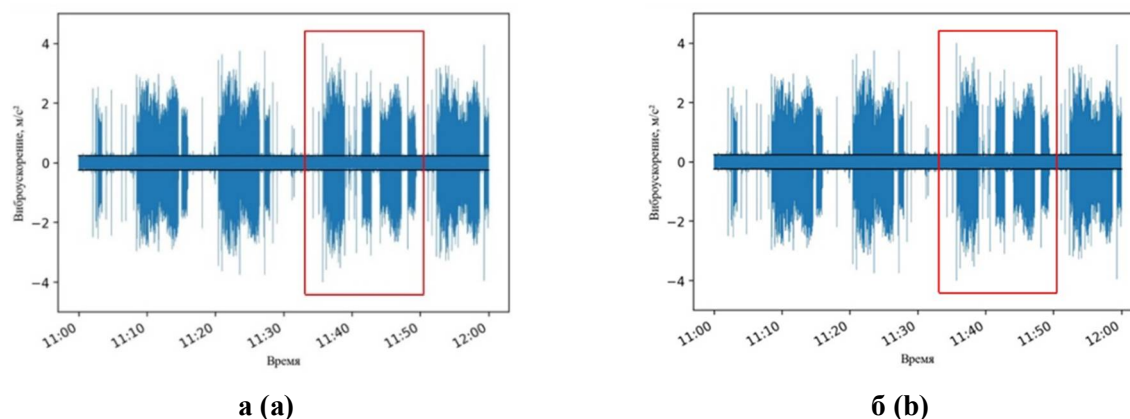


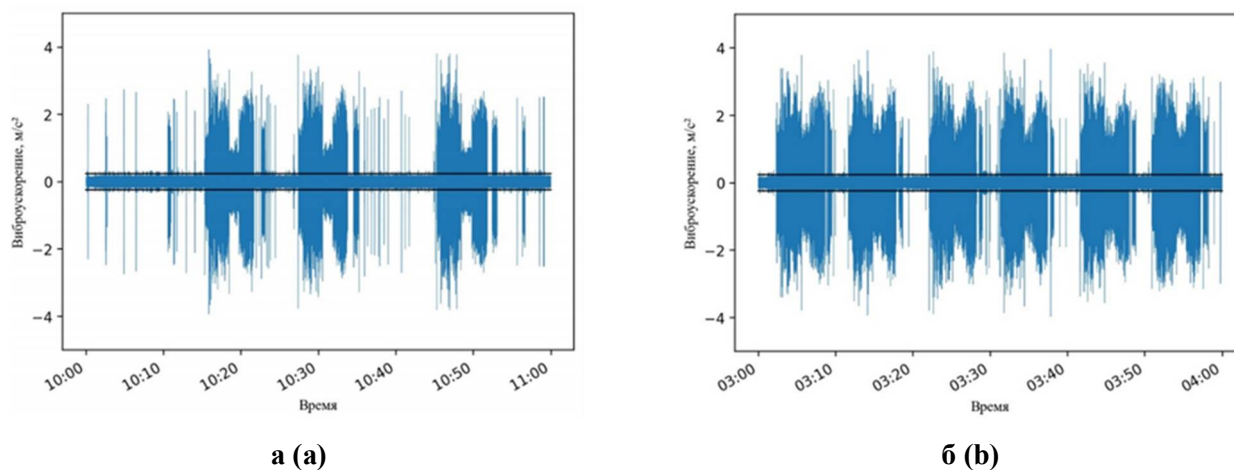
Рисунок 5 – Картина работы станка:

а – при изменении режимов резания; б – при прерывании процесса обработки и повторе переходов;

Figure 5 – Picture of the machine's operation

а – when changing cutting modes; б – when interrupting processing process and repeating operations

Далее рассмотрим ритмичность производства. Как видно из анализа рисунка 6, сигнал на графиках можно четко интерпретировать как последовательность обработки одинаковых деталей, что подтверждено записями в журнале исследуемого станка (эта же деталь рассматривалась в предыдущем примере об изменениях режимов резания). Видно, что в зависимости от смены и оператора меняются ритмичность и производительность работы – выпуск готовых деталей увеличился от 3 до 6 готовых деталей в час, коэффициент загрузки оборудования (1) увеличился с 0,395 до 0,789, а коэффициент ритмичности (2) увеличился с 0,5 до 1. Анализ такой информации позволяет оценить фактическую производительность каждого оператора, что дает возможность более точно планировать производство.



а (a)

б (b)

Рисунок 6 – Картина работы станка в разные смены:

а – первая смена; б – третья смена

Figure 6 – Image of machine operation in different shifts

а – first shift; б – third shift

Также интересен случай обнаружения несоблюдения сменно-суточного задания, представленный на рисунке 7.

На рисунке 7, а представлен фрагмент записанного сигнала вибрации, соответствующий сменно-суточному заданию по обработке в период времени с 21:30 до 00:30 семи деталей номер 1 с затратой 14 минут времени на каждую. Анализ фрагмента записанных сигналов вибрации за соответствующий промежуток времени показал, что сменно-суточное задание было выполнено полностью.

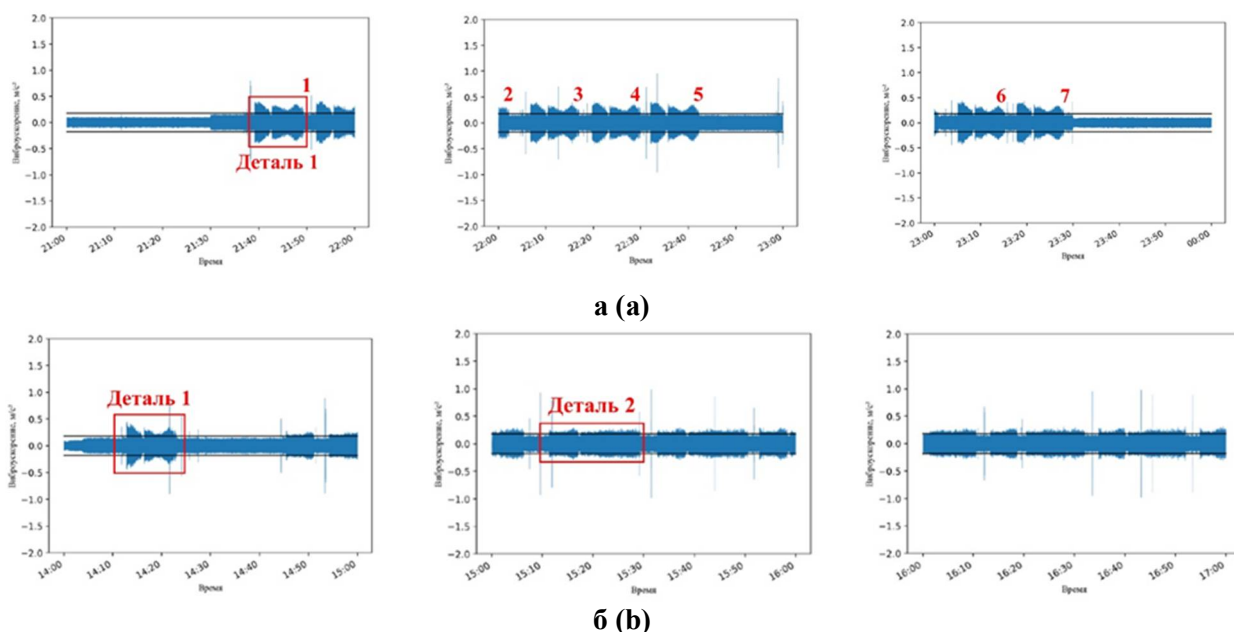


Рисунок 7 – Пример несоблюдения технологической дисциплины:
а – обработка детали 1; б – обработка детали 2
Figure 7 – Example of non-compliance with technological discipline:
a – processing of workpiece 1; b – processing of workpiece 2

На рисунке 7, б представлен фрагмент записанного сигнала вибрации, соответствующий сменно-суточному заданию по обработке в период времени с 14:00 до 20:30 шестнадцати деталей номер 2 с затратой 22 минут времени на каждую. Анализ записанного сигнала вибрации за соответствующий промежуток времени показал, что перед выполнением сменно-суточного задания была обработана одна единица детали 1, что является нарушением трудовой дисциплины, и этот инцидент должен быть рассмотрен мастером участка.

Заключение

Применение предложенного способа косвенного контроля состояния технологического оборудования позволяет контролировать соблюдение технологической дисциплины путем:

- регистрации факта работы оборудования на холостом ходу для имитации работы;
- регистрации факта работы оборудования, имитирующей работу станка по управляющей программе;
- выявления фактов изменения режимов резания;
- фиксации прерывания технологического процесса и переделки некоторых переходов;
- анализа ритмичности производства и фактической производительности каждого оператора;
- обнаружения несоблюдения сменно-суточного задания.

Предложенный вариант использования АПК позволяет повысить эффективность технологических процессов обработки резанием за счет своевременного системного выявления отклонений технологической дисциплины.

Библиографический список

1. **Сергеев А.А.** Конкурентоспособность машиностроения: реальность и перспективы // Экономика. Налоги. Право. 2014. № 5. С. 44-49.
2. **Портер М.** Конкурентная стратегия: Методика анализа отраслей и конкурентов: пер. с англ. 4-е изд. М.: Альпина Паблишер, 2015. 456 с.
3. **Анцев А.В.** Информационная поддержка назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 5. С. 128-136.

4. **Астахов В.П.** Принцип наименьшей энергии пластической деформации при разрушении как основа понимания и оптимизации обработки металлов резанием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 141-153.
5. **Шубинский И.Б.** Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. М: ООО «Журнал Надежность», 2012. 296 с.
6. **Ручкин В.Н., Колесников А.Н., Фулин В.А., Дроздова В.А.** Анализ техногенной обстановки средствами киберфизических систем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 122-128.
7. **Гоев Н.В.** Синтез автоматизированных систем контроля на основе аппаратно-программных модулей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 32. С. 98-102.
8. **Анцев А.В., Янов Е.С., Воротилин М.С.** Информационно-измерительные системы мониторинга работы станочного парка предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 495-498.
9. **Куркова Ю., Васильев А., Ловыгин А., Степанов В.** Системы мониторинга станков с ЧПУ в России. Обзор технологий и рынка // САПР и графика. 2016. № 12. С. 24-31.
10. **Нестерова А., Самойлова Т.** MES-системы на российском рынке промышленности: от истоков к будущему // ИСУП. 2010. № 2(26). С. 51-53.
11. **Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О., Трубин В.Г., Трубин М.В.** Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. 2018. № 3 (25). С. 9-22.
12. **Анцев А.В., Данг Ч.Х., Янов Е.С., Полев М.В.** Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 151-158.
13. **Крылов А.А.** Уменьшение смещения нуля МЭМС-датчиков при температурном гистерезисе // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 48-56. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-48-56.
14. **Андреев И.Д.** Ритмичность труда и производства. Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд., 1971. 96 с.

UDC 681.518.3:658.5.012.7

AUTOMATED CONTROL OF TECHNOLOGICAL DISCIPLINE IN MODERN ENGINEERING PRODUCTION

E. S. Yanov, PhD (in technical sciences), Deputy Director of Advanced Engineering School, Tula State University, Tula, Russia;;
e-mail: dextra@mail.ru

A. V. Antsev, Dr. in technical sciences, head of the department, Tula State University, Tula, Russia
orcid.org/0000-0002-0923-6285, e-mail: a.antsev@yandex.ru

The aim of the work is to develop the system for automatic control of technological discipline based on hardware and software systems. The article discusses the problem of using measuring information system for monitoring mechanical vibrations of technological system to monitor production process. The main reasons for violation of technological discipline are given. To monitor technological processes and adhere to technological discipline and exclude the human factor from decision-making chain, the authors have proposed the option to introduce automatic control system for technological discipline based on developed hardware and software complex for monitoring and optimizing technological processes (SPC) being a set of diagnostic modules installed on the equipment that take a certain set of indicators from the machine and allow you to interpret equipment operation over a given time. The information received is stored on a server being the source to determine equipment load factor, the number of processed workpieces, processed workpieces range and equipment operation rhythm. The use of the proposed method for indirect monitoring of technological equipment state makes it possible to monitor compliance with technological discipline by recording the fact of equipment operation at idle speed to simulate operation as well as the fact of equipment operation

simulating the operation of a machine according to a control program; identifying the facts of changes in cutting modes; recording interruptions in technological process and reworking some operations; analysis of production rhythm and actual productivity of each operator; detection of non-compliance with daily shift assignments. The proposed option for using hardware and software complex makes it possible to increase the efficiency of technological processes of cutting processing due to timely systematic identification of deviations in a technological discipline.

Keywords: measuring information systems, hardware and software complex, technological system, vibration, mechanical engineering production, monitoring, production process control, technological discipline.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-85-94

References

1. **Sergeev A.A.** Konkurentosposobnost' mashinostroenija: real'nost' i perspektivy .*Competitiveness of mechanical engineering: reality and prospects. Jekonomika. Nalogi. Pravo.* 2014, no. 5, pp. 44-49. (in Russian).
2. **Porter M.** Konkurentnaja strategija: Metodika analiza otraslej i konkurentov (Competitive strategy: Methodology for analyzing industries and competitors): per. s angl. 4-e izd. M.: Al'pina Publisher, 2015. 456 p. (in Russian).
3. **Antsev A.V.** Informacionnaja podderzhka naznachenija strategii jeffektivnoj jekspluatacii lezviy-nogo instrumenta. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta.* 2019, vol. 15, no. 5, pp. 128-136. (in Russian).
4. **Astahov V.P.** Princip naimen'shej jenerгии plasticheskoj deformacii pri razrushenii kak osnova poni-manija i optimizacii obrabotki metallov rezaniem. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo univer-siteta. Tehničeskie nauki.* 2016, no. 8-1, pp. 141-153. (in Russian).
5. **Shubinskij I.B.** Funkcional'naja nadezhnost' informacionnyh sistem. Metody analiza. M.: «Zhurnal Nadezhnost'», 2012. 296 p. (in Russian).
6. **Ruchkin V.N., Kolesenkov A.N., Fulin V.A., Drozdova V. A.** Analiz tehnogennoj obstanovki sredstvami kiberfizicheskikh system. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehničeskogo universiteta.* 2016, no. 57, pp. 122-128. (in Russian).
7. **Goev N.V.** Sintez avtomatizirovannyh sistem kontrolja na osnove apparatno-programmnyh module. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehničeskogo universiteta.* 2010, no. 32, pp. 98-102. (in Russian).
8. **Antsev A.V., Yanov E.S., Vorotilin M.S.** Informacionno-izmeritel'nye sistemy monitoringa raboty stanochnogo parka predprijatija. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehničeskie nauki.* 2023, no. 9, pp. 495-498. (in Russian).
9. **Kurkova Ju., Vasil'ev A., Lovygin A., Stepanov V.** Sistemy monitoringa stankov s ChPU v Rossii. Obzor tehnologij i rynka (Monitoring systems for CNC machines in Russia. Review of technologies and market). *SAPR i grafika.* 2016, no. 12, pp. 24-31. (in Russian).
10. **Nesterova A., Samojlova T.** MES-sistemy na rossijskom rynke promyshlennosti: ot istokov k budushhemu (MES systems in the Russian industrial market: from origins to the future). *ISUP.* 2010, no. 2(26), pp. 51-53. (in Russian).
11. **Zhmud' V.A., Kuznecov K.A., Kondrat'ev N.O., Trubin V.G., Trubin M.V.** Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkljuchenie na STM32 i issledovanie pokazanij v statike. *Avtomatika i programnaja inzhenerija.* 2018, no. 3 (25), pp. 9-22. (in Russian).
12. **Antsev A.V., Dang Ch.H., Yanov E.S., Polev M.V.** Jeksperimental'naja ustanovka kontrolja vibracii pri obrabotke na stankah s ChPU . *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta.* 2019, vol. 15, no 2, pp. 151-158 (in Russian).
13. **Krylov A.A.** Umen'shenie smeshhenija nulja MJeMS-datchikov pri temperaturnom gisterezise. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antej».* 2021, no. 2. pp. 48-56. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-48-56. (in Russian).
14. **Andreev I.D.** Ritmichnost' truda i proizvodstva (The rhythm of labor and production). Voronezh: Centr.-Chernozem. kn. izd., 1971, 96 p. (in Russian).