

Математическая модель информационно-измерительной системы косвенного контроля состояния технологических систем

А. Анцев, д.т.н.¹, Е. Янов, к.т.н.²

УДК 681.518.3 | ВАК 2.2.11

В статье рассмотрена общая структурная схема информационно-измерительной системы (ИИС) косвенного контроля состояния технологических систем. Описаны ее входные и выходные параметры и методы преобразования сигналов. Выходной сигнал ИИС характеризует работу технологической системы (оборудование выключено, оборудование простаивает или оборудование выполняет технологическую операцию) и может быть использован для предиктивного анализа состояния станка.

В условиях санкционного давления на Российскую Федерацию и ухода с отечественного рынка иностранных производителей и поставщиков машиностроительной продукции стратегически важной задачей является повышение эффективности отечественных машиностроительных производств с целью обеспечения технологической независимости.

Сдерживающими факторами, влияющими на эффективность (возможность максимально полно использовать имеющиеся ресурсы) технологических систем машиностроительных производств являются низкая технологическая дисциплина (несоблюдение технологии изготовления продукта производства) и высокие издержки при производстве продукции.

Соблюдение технологической дисциплины непосредственно влияет на качество производимой продукции, ритмичность производства и эффективность использования технологических систем машиностроительных производств. Данное влияние оценивается по следующим критериям эффективности:

- снижение простоев в отчетный период;
- сокращение продолжительности и количества переналадок оборудования;
- сокращение длительности производственного цикла;
- сокращение количества бракованной продукции;
- увеличение стойкости инструмента;

- сокращение цикла обработки продукции на оборудовании.

Для обеспечения соблюдения технологической дисциплины необходимо осуществлять оперативный контроль работы технологической системы, то есть совокупности функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций (ГОСТ 27.004-85).

При отсутствии оперативной и достоверной информации о состоянии технологической системы нет возможности контролировать соблюдение указанных ранее мер, влияющих на производительность труда и эффективность использования технологических систем. Оперативный контроль состояния технологических систем возможно осуществлять различными способами, но одним из наиболее перспективных является цифровизация.

Стоит отметить, что цифровизация машиностроительного производства положительно сказывается на конкурентоспособности и эффективности выпуска продукции в условиях формирования технологического суверенитета Российской Федерации, о чем свидетельствует анализ тенденций развития современного машиностроительного производства, который показывает рост в составе технологических переделов доли аппаратно-программных комплексов (АПК) и информационно-измерительных систем, интегрированных в технологические системы, управляемые центральным сервером предприятия.

На рынке в настоящее время присутствуют как отечественные, так и зарубежные ИИС, обеспечивающие прямой контроль состояния технологических систем. Данные продукты отличаются организацией интерфейсов, ценами

¹ Тульский государственный университет, доцент, заведующий кафедрой, a.antsev@yandex.ru.

² «Тульская инженерная школа «Интеллектуальные оборонные системы» им. академика А.Г. Шипунова», заместитель директора, dexaik@mail.ru.

и применяемой в отношении их политики лицензирования, но в большинстве случаев основным условием работы таких ИИС является необходимость их подключения к системам числового программного управления (СЧПУ) технологического оборудования станочного парка.

При этом, согласно Федеральному закону «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26 июля 2017 года № 187-ФЗ, установлены нормы регулирования отношений в области обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры (КИИ) Российской Федерации. Соответственно, при производстве продукции двойного и специального назначения в настоящее время технологическое оборудование станочного парка машиностроительных производств является объектом КИИ – автоматизированными системами управления и другими значимыми системами, функционирование которых критически важно для жизнедеятельности государства. Подключение ИИС к СЧПУ объектов КИИ требует повышения категории объекта КИИ, что ведет к увеличению издержек, зачастую несопоставимых с эффектом от внедрения ИИС. Это вынуждает предприятия отказываться от ИИС из-за невозможности соблюдения требований, предъявляемых к КИИ при повышении категории [1].

Альтернативой повышению категории объекта КИИ при внедрении ИИС, требующей подключения к СЧПУ, может быть разработка принципиально новой ИИС, косвенно контролирующей соблюдение технологической дисциплины в процессе работы технологических систем на основе методов и средств обеспечения оперативного контроля, сбора и обработки информации о технологических процессах. Указанная особенность также позволит применять такую ИИС, не требующую подключения к СЧПУ, для контроля универсального оборудования.

Рассмотрим (рис. 1) общую структурную схему ИИС косвенного контроля состояния технологической системы [2–5].

Технологическая система (станок) с помощью инструмента (или инструментов в случае многоинструментальной наладки), характеризующегося вектором параметров U_u , совершает обработку заготовки, описываемой вектором параметров U_z и закрепленной в одном или нескольких приспособлениях, характеризующихся вектором U_n , по заранее определенной управляющей программе (или рабочим в случае отсутствия у станка СЧПУ), которую можно описать в виде векторной функции времени режимов резания $U_{pp}(t)$. При этом на станок действуют различные возмущающие факторы $Z(t)$: разброс параметров инструментов и заготовок, стохастический характер процесса резания, износ

узлов станка, приспособлений и инструментов, влияние рядом стоящего оборудования и т. д.

Рассмотрим примеры векторов U_n , U_u и U_z для случая токарной обработки. Вектор U_n в этом случае можно представить в виде $U_n = (\Delta, j)$, где Δ – точность станка, которую можно оценить величиной отклонения прямолинейности движения, мкм; j – жесткость станка, Н/мкм.

Вектор U_u для токарного резца можно представить в виде $U_u = (\gamma, \alpha, \varphi, r_\phi)$, где γ – передний угол резца, α – задний угол резца, φ – угол в плане, r_ϕ – радиус при вершине резца.

Вектор U_z для токарной обработки можно представить как $U_z = (d_n, d_{вн}, l, HB)$, где d_n и $d_{вн}$ – наружный и внутренний диаметры заготовки соответственно, l – длина заготовки, HB – твердость заготовки.

К компонентам вектора $U_{pp}(t)$ при токарной обработке относятся скорость резания $v(t)$, подача $S(t)$ и глубина резания $h(t)$.

В процессе обработки происходит появление вибрации в зоне обработки $a(t)$, распространяющейся по упругим элементам станка [6]. Также процесс обработки определяет уровень потребления оборудованием электрического тока $I(t)$ [7]. Уровень вибрации $a(t) = f_1(U_{pp}(t), U_u, U_z, U_n, Z(t))$ и уровень потребления оборудованием электрического тока $I(t) = f_2(U_{pp}(t), U_u, U_z, U_n, Z(t))$ меняются в ходе реализации технологического процесса и служат косвенными метриками процесса обработки. Их значения могут быть получены с помощью разработанных измерительных приборов: модуля вибрации [8] и модуля тока, входящих в состав информационно-измерительной системы косвенного контроля состояния технологического оборудования.

Модуль вибрации, построенный на основе трехосевого акселерометра, измеряет виброускорение в зоне резания, преобразуя его в сигнал виброускорения $X_a(t)$ с учетом ускорения свободного падения g , смещения нуля акселерометра $\Delta a_{см}$ [9], диапазона измерения акселерометра a_{max} , разрядности его аналого-цифрового преобразователя (АЦП) d и вектора внешних и внутренних помех измерения $H_1(t)$:

$$X_a(t) = \frac{(a_a(t) - g - \Delta a_{см}) \cdot a_{max} \cdot g}{2^{d-1}} + H_1(t),$$

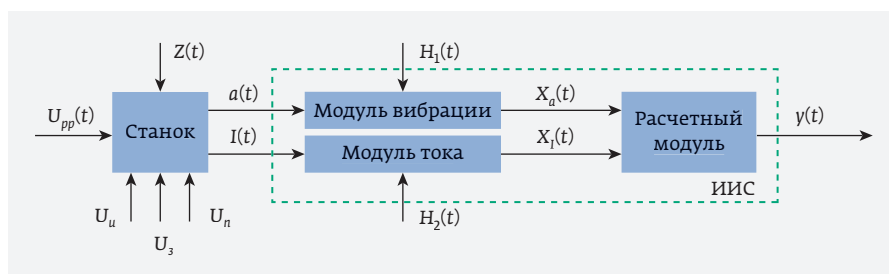


Рис. 1. Структурная схема ИИС косвенного контроля состояния технологической системы

где $a_a(t)$ – «сырые» значения уровня вибрации $a(t)$, измеренного акселерометром.

Модуль тока, построенный на основе трансформатора тока, измеряет уровень потребляемого оборудованием тока, преобразуя его в сигнал $X_I(t)$ с учетом коэффициента трансформации трансформатора k , тока вторичной обмотки трансформатора $I_2(t)$ и вектора внешних и внутренних помех измерения $H_2(t)$. Ток вторичной обмотки трансформатора $I_2(t)$ зависит от сопротивления нагрузочного резистора R и величины постоянного напряжения U_{cm} , добавляемого к напряжению $U_{изм}(t)$, измеренному на АЦП модуля тока:

$$X_I(t) = k \cdot \frac{U_{изм}(t) - U_{cm}}{R} + H_2(t).$$

Сигнал тока $X_I(t)$ дополнительно может быть использован для оценки мощности, потребляемой оборудованием за период T :

$$P = \frac{1}{T} \int U(t) \cdot X_I(t) dt.$$

На основе полученных сигналов $X_a(t)$ и $X_I(t)$ расчетный модуль ИИС формирует выходной сигнал $y(t) = f(X_a(t), X_I(t))$, описывающий работу технологического оборудования (оборудование выключено, оборудование простаивает или оборудование выполняет

технологическую операцию), который может быть использован для предиктивного анализа состояния оборудования путем выделения из сигнала $y(t)$ постоянной составляющей, характеризующей параметры технологического процесса, высокочастотной составляющей, описывающей состояние быстро изнашиваемой оснастки (инструмента), и низкочастотной составляющей, отражающей изменение состояния оборудования.

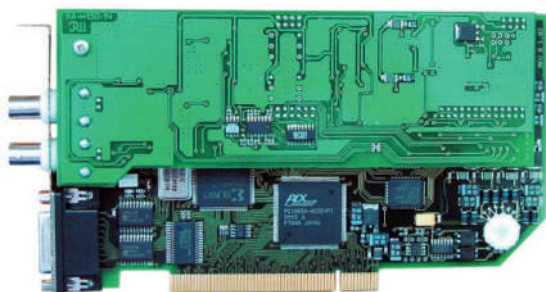
ЛИТЕРАТУРА

1. **Янов Е.С.** О проблемах интеграции информационно-измерительных систем в условиях противодействия компьютерным атакам // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2024. №6. С. 60–63.
2. **Янов Е.С.** Построение цифрового двойника производственного процесса на основе информационно-измерительной системы косвенного контроля вибрации // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2024. №7. С. 168–174.
3. **Yanov E.S., Antsev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I.** New system for indirect tool monitoring in industrial systems and processes // Russian Engineering Research, 2024. Vol. 44. No. 6. PP. 868–870.
4. **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. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-490-491.
5. **Янов Е.С., Анцев А.В.** Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства // Вестник РГРТУ, 2024. №88. С.86–95.
6. **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.
7. **Анцев А.В., Арсеньева А.А., Сальников С.В.** Мониторинг процесса резания на основе контроля потребляемого тока // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (23–24 сентября 2022 года), Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. С.37–43.
8. **Янов Е.С., Анцев А.В., Воротилин М.С., Минаков Е.И., Прокопчина С.В.** Датчик вибрации как основа системы мониторинга оборудования // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2024. Т. 22. № 3. С. 23–30.
9. **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.

ООО «Руднев-Шиляев»



Разработка и создание измерительных систем и программного обеспечения



ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЗАКАЗЧИКА!

- | | |
|---|--|
| 1. разработка измерительных систем по техническому требованию Заказчика | 4. разработка и производство приборов |
| 2. помощь в составлении технического задания Заказчика | 5. разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика |
| 3. производство измерительных систем | 6. сертификация измерительных систем и приборов |

127299, г. Москва, ул. Космонавта Волкова, дом 12
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru тел./факс: (495) 787-6367; 787-6368



ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

ЭЛЕМЕНТ

Металлокерамические корпуса (МКК) для интегральных микросхем



Единственное в России серийное производство многовыводных МКК (свыше 200 выводов)



Освоены в производстве все существующие типы МКК



Полный производственный цикл: контроль изготовления на всех этапах производства



Комплексная разработка новых изделий, собственное опытное производство



Развитая техническая база инструментального производства: изготовление контактирующих устройств и сложной оснастки

Акционерное общество
«Завод полупроводниковых приборов»
Россия, 424003, Республика Марий Эл
г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
тел: +7 (8362) 45-70-09, e-mail: info@zppl2.ru



zppl2.ru