

# Построение цифрового двойника производственного процесса на основе информационно-измерительной системы косвенного контроля вибрации

Е. Янов, к. т. н.<sup>1</sup>

УДК 658.5.012.7 | ВАК 2.2.11

В статье рассмотрены вопросы построения цифровых двойников с помощью информационно-измерительной системы косвенного контроля вибрации. Разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) контроля технологической дисциплины, который предлагается использовать в качестве основы для построения цифровых двойников технологических систем машиностроительных предприятий. Представлен пример использования АПК для сбора статистических данных о протекании технологических процессов.

**П**отребность промышленности в цифровой трансформации отечественной производственной сферы подчеркивают как промышленники, так и представители власти, так как уровень внедрения цифровых технологий в Российской Федерации отстает от развитых стран мира [1]. Безусловным приоритетом цифровизации стоит отметить создание цифровых двойников производства [2].

Цифровой двойник производственного процесса представляет собой виртуальную модель процесса и обеспечивает возможность повышения его эффективности с помощью применения анализа данных и мониторинга работы технологических систем. Ранее в [3, 4] описан аппаратно-программный комплекс (далее – АПК) контроля технологической дисциплины, который можно рассматривать как основу для построения цифровых двойников технологических систем машиностроительных предприятий. Также в [5] рассмотрены проблемные вопросы интеграции различных средств мониторинга оборудования на предприятиях оборонно-промышленного комплекса.

АПК представляет собой радиальную информационно-измерительную систему (ИИС) (рис. 1) из совокупности функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств получения, преобразования и обработки

информации в целях ее представления пользователю в требуемом виде или автоматического осуществления логических функций измерения, контроля, диагностирования, идентификации.

С целью удовлетворения требованиям информационной безопасности в настоящей статье из представленных примеров исключено упоминание о типе, наименовании и инвентарных номерах оборудования, подключенного к АПК, а также осуществлена замена наименований изготавливаемых деталей. Реальная планировка участка заменена на схематичное отображение.

В разработанном АПК (рис. 2) с помощью веб-сервера IIS пользователям предоставляется возможность взаимодействия на любом доступном веб-браузере с веб-приложением MachineControl, написанным на языке C# и обеспечивающим просмотр интерактивной карты производства, на которой схематично или с учетом утвержденной планировки показано размещенное на участке оборудование (рис. 3).

Веб-сервер IIS использует протокол HTTPS. Вспомогательный веб-сервер http.server, написанный на языке Python, предназначен для передачи отчетов из локальной папки Reports по запросам пользователей веб-приложения MachineControl по протоколу HTTP.

Веб-приложение позволяет осуществлять следующие операции:

- в режиме реального времени контролировать, работает или нет оборудование;
- в режиме реального времени получать информацию о причинах простоя оборудования;

<sup>1</sup> «Тулская инженерная школа «Интеллектуальные оборонные системы» им. академика А.Г. Шипунова», заместитель директора, dexaik@mail.ru.

- в режиме реального времени получать информацию о температуре и качестве воздуха на участке, а также уровне освещенности;
- в режиме реального времени получать информацию о величине потребляемой оборудованием электроэнергии;
- формировать статистическую отчетность о работе оборудования исходя из анализа временных рядов сигнала вибрации за счет сбора сложноорганизованных данных о протекании технологических процессов машиностроительных производств.

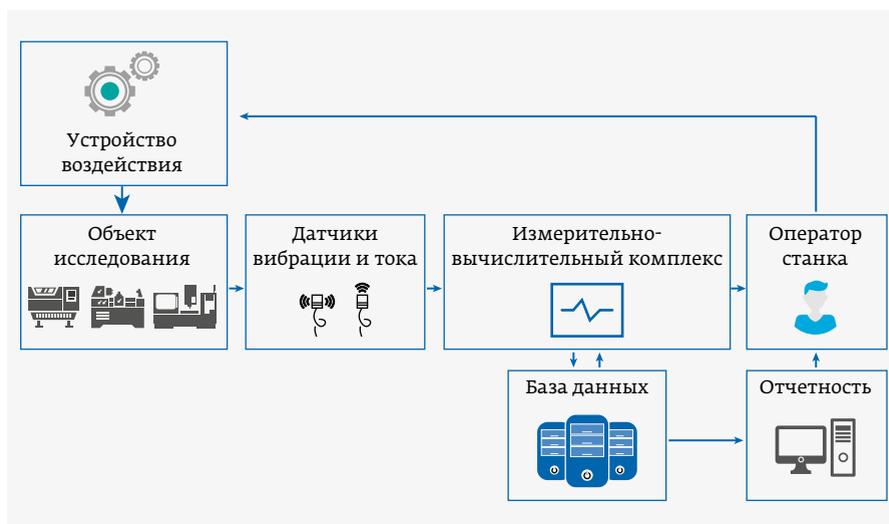


Рис. 1. Схема ИИС

Так, на рис. 3 представлен фрагмент работы программы, когда пользователь запрашивает отчет о работе оборудования под условным обозначением «1», за 16 июня 2023 года.

При этом пользователь может просмотреть отчет за любой день с момента подключения оборудования к АПК, так как формирование отчетов происходит в автоматическом режиме каждые 24 часа. Перед формированием

отчета, кроме даты, необходимо указать вид: ежедневный, еженедельный, ежемесячный.

Сформированный отчет открывается в соседней вкладке веб-браузера, с помощью которого осуществляется работа с веб-приложением, имеет формат .pdf и может быть сохранен на компьютере пользователя. Для повышения эффективности и оперативности

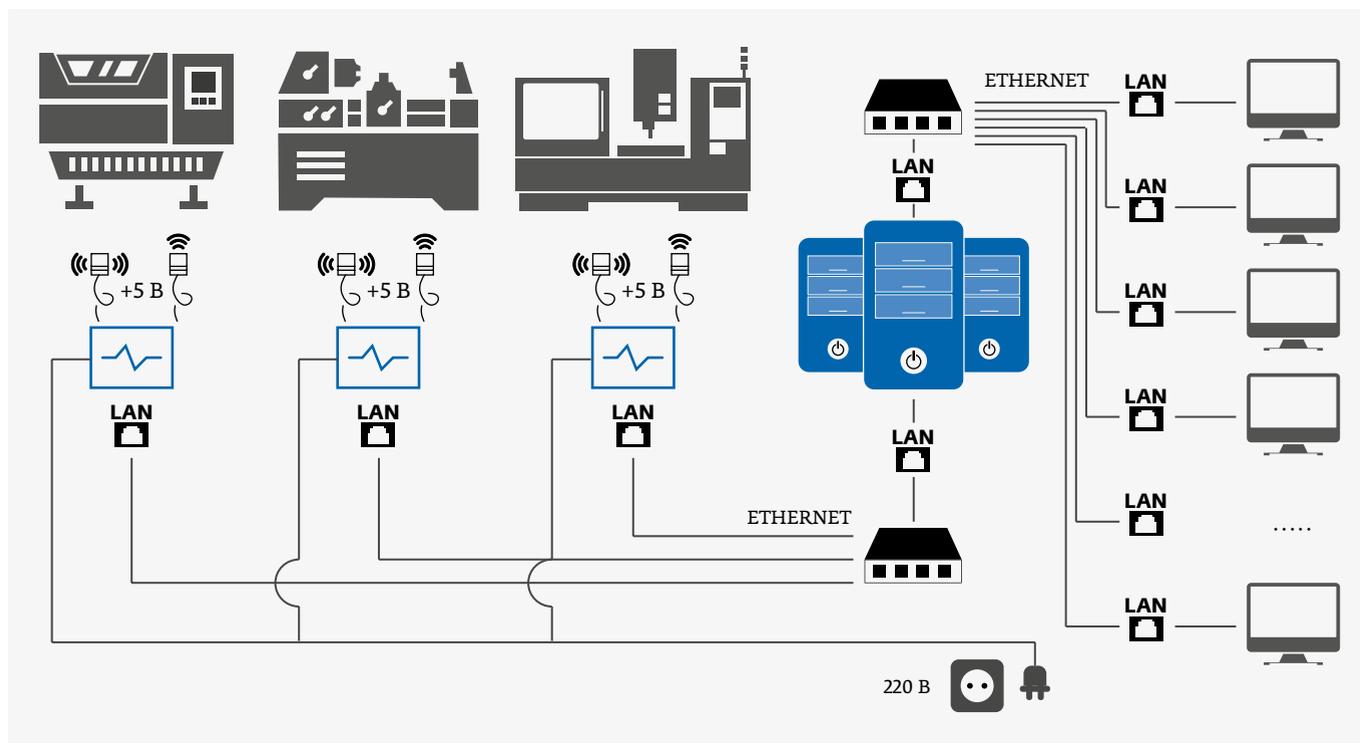


Рис. 2. Схема АПК

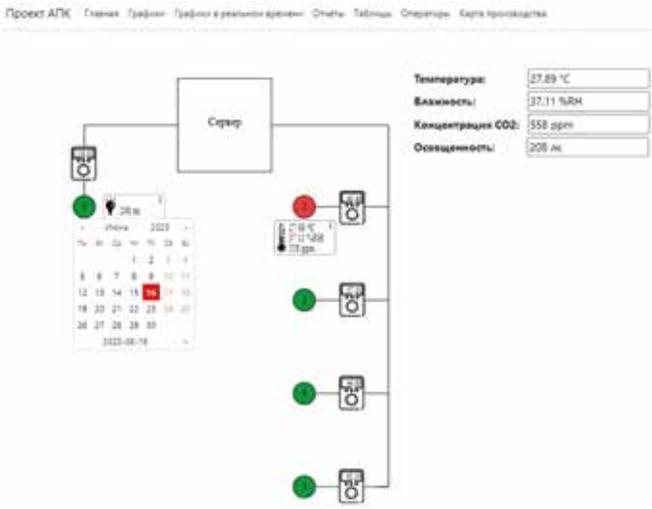


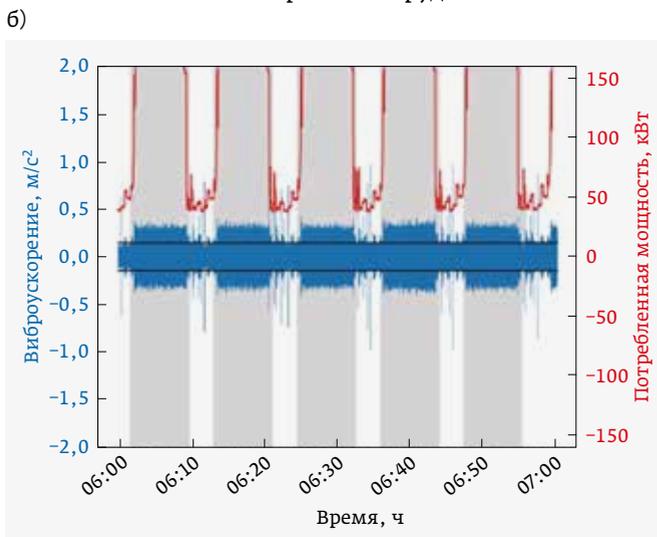
Рис. 3. Фрагмент веб-интерфейса, открытого на вкладке «Карта производства»

Отчёт 2023-06-16 - СПК1

Секунд всего	Секунд работы	Процент работы в сутки, %	Процент работы в рабочее время, %	Потребленная мощность, кВт*ч	Деталей	Инструментов	Период формирования
86400	62162	71.95	76.74	2046.78	52	0	0:00:00 - 23:59:59
3600	2238	62.17	62.17	103.54	4	0	0:00:00 - 1:00:00
3600	2501	69.47	69.47	109.87	2	0	1:00:00 - 2:00:00
3600	2054	57.06	57.06	97.13	3	0	2:00:00 - 3:00:00

- а)  
**Обработанные детали**  
 06:01:36 - 06:09:46 Деталь А  
 06:12:58 - 06:21:08 Деталь А  
 06:24:21 - 06:32:31 Деталь А  
 06:35:47 - 06:43:57 Деталь А  
 06:47:06 - 06:55:16 Деталь А

Рис. 4. Фрагмент отчета о работе оборудования:  
 а – информация о загрузке;  
 б – информация о номенклатуре изготовленных деталей;  
 в – информация о почасовой работе оборудования



в)

принятия корректных управленческих решений анализ отчетов автоматизирован с использованием технологий машинного обучения и искусственных нейронных сетей.

На рис. 4 представлены фрагменты отчета, который в общем случае включает в себя 4 основных блока данных на 27 листах:

- общая информация на 2 листах: указываются дата, номер станка, для которого построен отчет, наименование оборудования и его инвентарный номер. Формируется таблица из двадцати пяти строк, из них первая показывает общий фонд времени в сутках и фактическое количество времени работы станка за сутки, коэффициент загрузки оборудования, потребленную оборудованием мощность, общее количество изготовленных за сутки деталей, количество смен инструмента. На оставшихся 24 строках располагается та же информация, что указана ранее, но с часовой разбивкой с 00:00 до 01:00, с 01:00 до 02:00 и т.д. до окончания суток. Фрагмент таблицы представлен на рис.4а;
- рабочая картина дня на 1 листе: схематичное отображение работы оборудования в течение всего рабочего дня, которое позволяет оперативно оценить длительность простоя и ритмичность работы;
- время изготовления и номенклатура деталей на 2 листах: показывает в какое время какая деталь была изготовлена (рис. 4б);
- часовая картина работы оборудования на 22 листах (рис. 4в): отображает уникальную для каждой детали схематичную картину работы оборудования по совокупности временных рядов вибрации и энергопотребления. Позволяет оценить время изготовления, длительность цикла, режимы резания и определить время возникновения нештатных ситуаций.

На рис. 5а представлен фрагмент сменно-суточного задания, в котором указано, что в период времени с 21:30 до 00:30 рабочий должен изготовить 7 деталей «Б», за 14 мин каждую. Анализ записанных сигналов вибрации за соответствующий промежуток времени, приведенных на рис. 5б, показал, что указанный фрагмент сменно-суточного задания был выполнен полностью.

Случай нарушения технологической дисциплины выглядит следующим образом. На рис. 6а представлен фрагмент сменно-суточного задания, в котором указано, что рабочий в период времени с 14:00 до 20:30 должен изготовить 16 деталей «В», за 22 мин каждую. Анализ записанных сигналов вибрации за соответствующий промежуток времени, приведенных на рис. 6б, показал несоблюдение сменно-суточного задания: перед выполнением сменно-суточного задания



# ВОЗДУШНЫЕ ЗАМКИ – ЭТО ВЫДУМКА, А ДОЛГОСРОЧНОЕ ПАРТНЕРСТВО – РЕАЛЬНОСТЬ

Наша задача не ограничивается тем, чтобы вовремя поставить вам качественные технологические материалы. Для нас не менее важно создать с вами отношения, наполненные взаимным уважением, доброжелательностью и пониманием. Мы уверены, что именно за таким взаимодействием – будущее. Наши клиенты – это партнеры, которым мы доверяем как себе и для которых стараемся сделать все так же хорошо, как сделали бы для себя.

Потому что есть вещи, которые покупаются и продаются, а есть то, что не купишь ни за какие деньги.

> 96% клиентов с нами уже более 5 лет

> 15 лет срок сотрудничества со многими постоянными клиентами

4,98 из 5,00  
средняя оценка удовлетворенности наших клиентов за последние 3 года

Имя	Исполнитель	Материал	Деталь	Смена	Время														
Иванов И.И.					16:00	17:30	16:00	17:30											
Петров С.С.					17:30	21:30	17:30	21:30											
Деталь В	7	44	21-30	00:30	24:30	00:30													

Рис. 5. Пример контроля соблюдения технологической дисциплины: а – фрагмент сменно-суточного задания; б – сигнал вибрации оборудования за указанный период

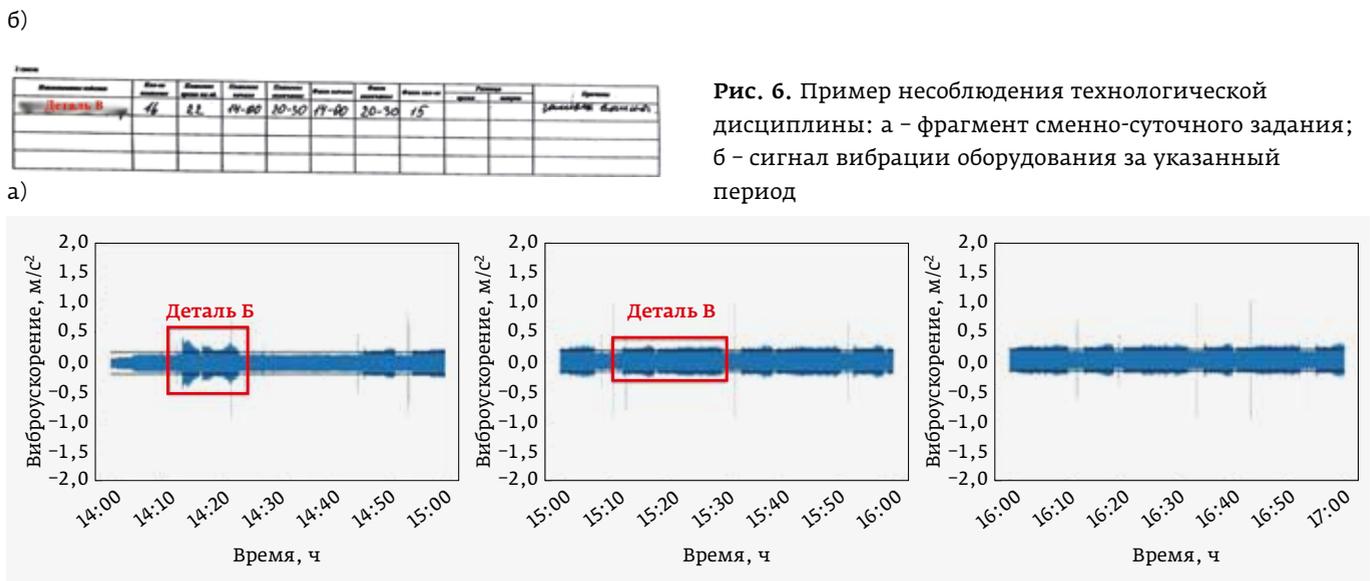
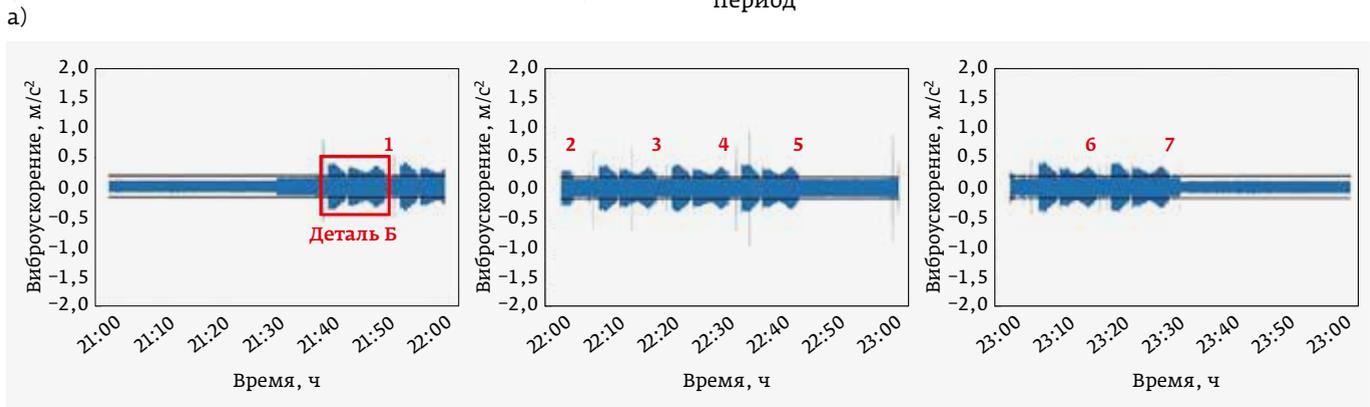


Рис. 6. Пример несоблюдения технологической дисциплины: а – фрагмент сменно-суточного задания; б – сигнал вибрации оборудования за указанный период

б)

по обработке деталей «В» была обработана одна единица детали «Б».

Как видно из приведенных примеров, на основе интеллектуального анализа с использованием искусственных нейронных сетей можно выполнять классификацию технологических процессов, по результатам которой осуществляется анализ состояния технологического оборудования.

На рис. 7 приведены записи сигналов вибрации, на которых видно изменение амплитуды вибрационного сигнала по мере изнашивания инструмента с последующим его выходом из строя, из-за чего фактическое количество обработанных деталей оказалось меньше запланированного (см. рис. 6а).

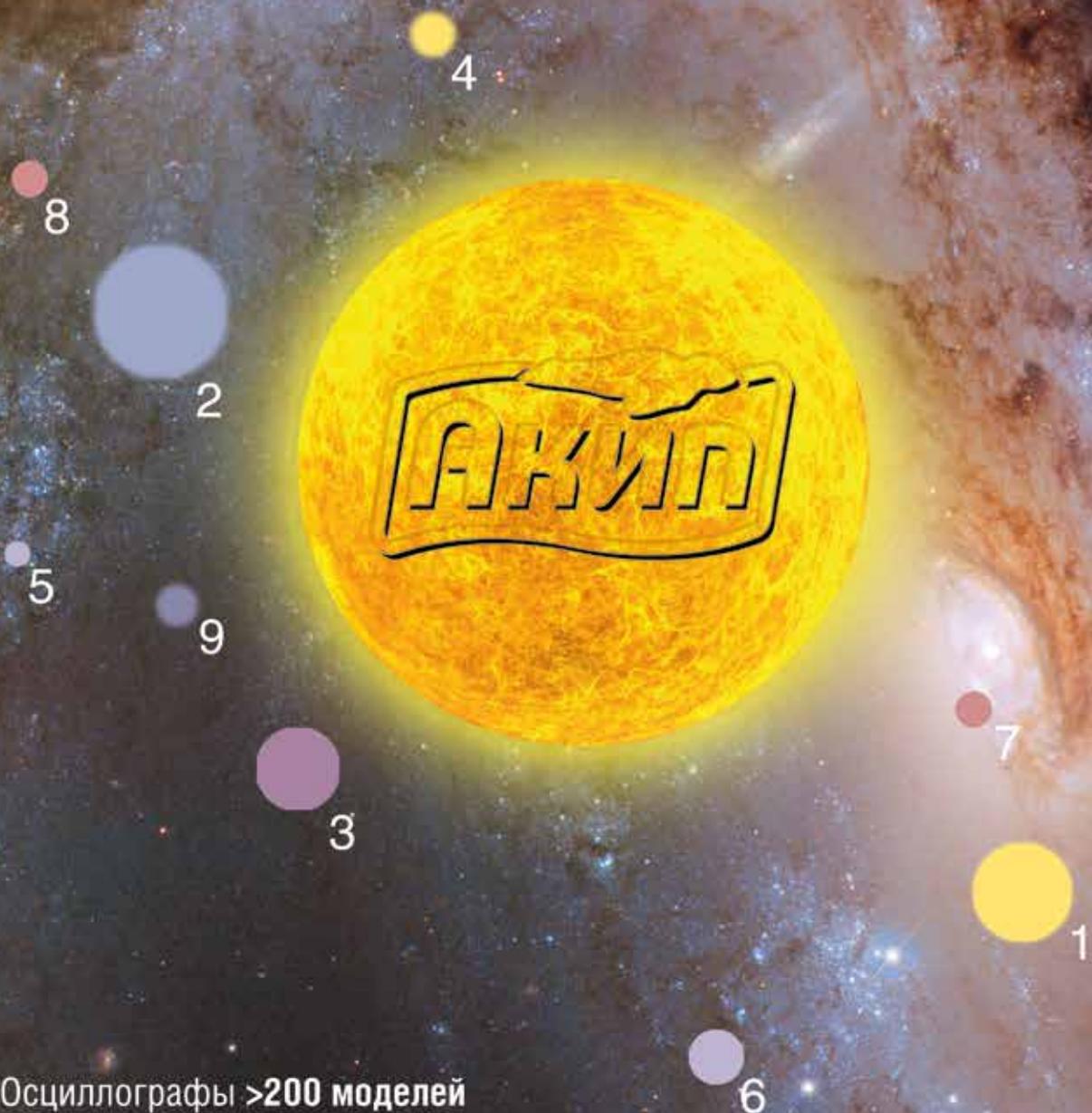
Полученные с помощью АПК данные описывают различные аспекты состояния технологического оборудования, протекания технологических процессов и могут

быть отправлены цифровому двойнику. На основе полученных статистических данных обновляется цифровая модель. На базе актуализированной модели могут быть сформированы рекомендации по оптимизации режима эксплуатации и обслуживания оборудования.

Современный уровень развития цифровых технологий, включая технологию цифрового двойника, дает возможность для повышения конкурентоспособности промышленности за счет использования ИИС, способных анализировать большие объемы данных и помогать принимать оптимальные решения в режиме реального времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ласковец С.В., Асланян Е.А. Сравнительный анализ развития цифровой экономики в ЕС и РФ // ЦИТИСЭ, 2022. №3. С. 29–42.



1. Осциллографы **>200 моделей**
2. Источники питания **>770 моделей**
3. Электронные нагрузки **>250 моделей**
4. Меры сопротивления **>80 моделей**
5. Генераторы сигналов **>130 моделей**
6. Анализаторы спектра **>30 моделей**
7. Промышленная мебель **>500 номенклатурных позиций**
8. Мультиметры и клещи **>40 моделей**
9. Источники-измерители и калибраторы **>20 моделей**

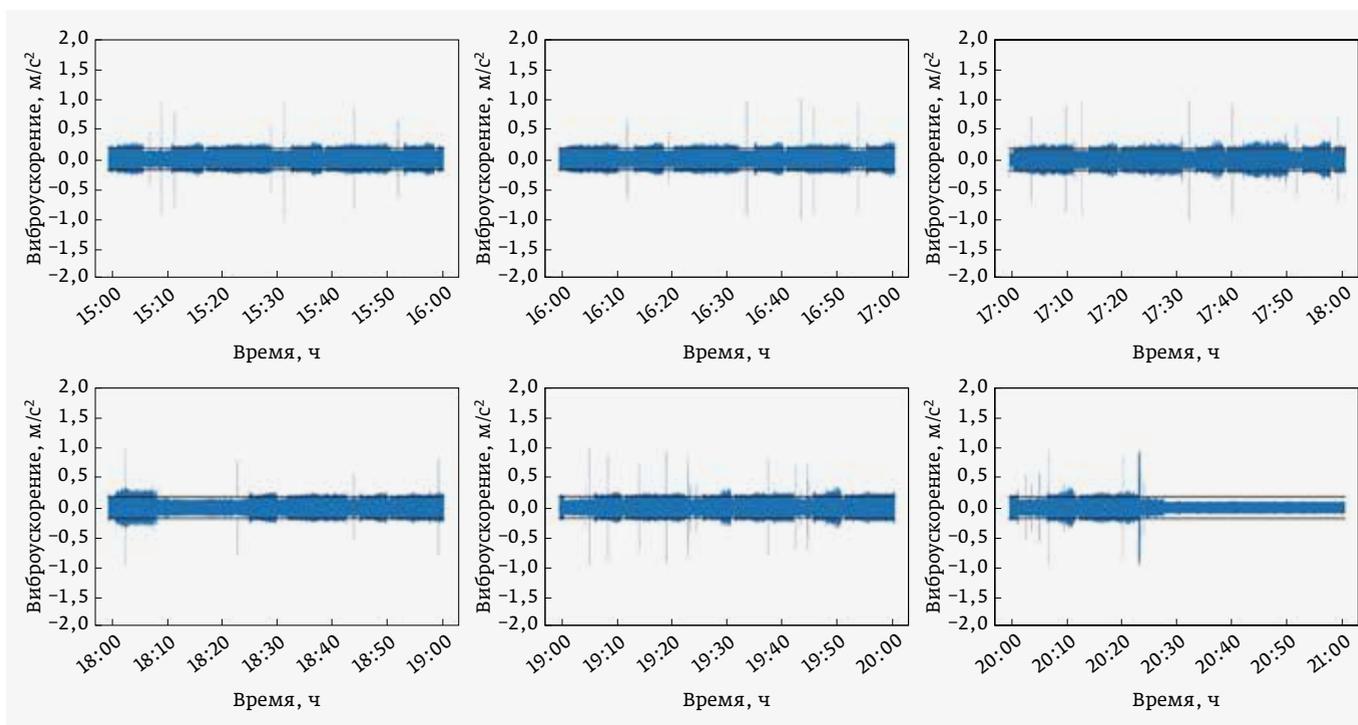


Рис. 7. Пример изменения сигнала вибрации по мере изнашивания инструмента

2. **Прохоров А., Лысачев М.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. // М.: ООО «Альянс-Принт», 2020. 401 с.
3. **Янов Е.С., Анцев А.В., Воротилин М.С., Минаков Е.И.** Аппаратно-программный комплекс мониторинга технологических систем и процессов // СТИН, 2024. №5. С. 32–35.
4. **Янов Е.С., Анцев А.В., Воротилин М.С.** Исследование влияния износа режущего инструмента на вибрацию тонкостенных заготовок при точении. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. 173 с.
5. **Янов Е.С.** О проблемах интеграции информационно-измерительных систем в условиях противодействия компьютерным атакам // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2024. №6. С. 60–63.

ООО «АК Микротех»

Комплексные решения в области микроэлектронного и микросборочного производства  
 Поставка, наладка и ремонт технологического оборудования  
 Отработка и постановка технологических процессов  
 Обеспечение материалами и комплектующими

WWW.AKMICROTECH.RU +7 (499) 398 0770 SALES@AKMICROTECH.RU





## РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

**Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...**  
Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 3,2 ... 485  
Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , мкФ, 1,0 ... 470 000  
Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °С -60 ... 125



**Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...**  
Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 3,2 ... 200  
Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , мкФ, 1,5 ... 60 000  
Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °С -60 ... 175



**Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...**  
Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 2,5 ... 63  
Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , мкФ, 0,033 ... 2 200  
Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °С -60 ... 175



**Суперконденсаторы K58-...**  
Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 2,5 ... 2,7  
Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , Ф, 1,0 ... 4 700  
Диапазон температур среды и эксплуатации,  $T_{ср}$ , °С -60 ... 65



**Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ**  
Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 5,0 ... 48  
Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , Ф, 0,08 ... 783  
Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °С -60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, д. 3  
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48  
e-mail: [elecond-market@elcudm.ru](mailto:elecond-market@elcudm.ru); [www.elecond.ru](http://www.elecond.ru)