

СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ СТАНКА ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Л.И. Мартинова, Н.В. Козак, И.А. Ковалев, А.Б. Любимов (ФГБОУ ВО МГТУ "СТАНКИН")

Представлена структура программных компонентов ядра системы ЧПУ для обеспечения мониторинга здоровья станка. Рассмотрены алгоритмы сбора данных в процессе эксплуатации станочного оборудования. Предложена структура в организации сбора, агрегирования и обработки данных на основе технологий IoT, облачных вычислений и хранения данных. Примеры сбора и анализа данных продемонстрированы на основе 5-координатного фрезерного обрабатывающего центра¹.

Ключевые слова: ядро ЧПУ, программные компоненты, здоровье станка, цифровое производство, алгоритмы сбор данных, шлюз сбора данных.

Введение

Сложность и высокая стоимость современного технологического оборудования требует его постоянного мониторинга и оценки работоспособности. В сочетании с новыми требованиями, продиктованными переходом промышленных предприятий к цифровым производствам, эта задача значительно усложняется. Отказ или поломка критически важных механических компонентов машины может приводить к потере производительности, качества изделий и даже угрожать безопасности окружения такой машины.

Большинство систем мониторинга оборудования ориентированы на сбор информации о технических показателях работы станка, на основе которой составляются графики планово-предупредительных ремонтов. Многие текущие негативные факторы и их причины остаются без внимания сервисных служб, а актуальная информация со станка не всегда им доступна.

В цифровых производствах требования к работоспособности станков особо жесткие, так как в условиях высокой автоматизации, когда предприятие должно функционировать на разных уровнях как единый организм, от станка требуется не просто факт его исправности, но гарантия того, что на данный момент при его фактическом состоянии он способен выполнить заданную программу по выпуску требуемого числа изделий в соответствии с предписанным технологическим процессом. Поэтому необходимо постоянно оценивать и поддерживать состояние критически важных компонентов станка. Оценка может проводиться в реальном времени и в режиме прогнозирования, исходя из накопленных данных.

Требования к системам оценки здоровья станка

Новые подходы к оценке работоспособности технологического оборудования в рассмотрении берут «здо-

ровье станка», что подразумевает не просто сбор показателей о его техническом состоянии, но и оценку его способности выполнять в конкретный момент времени возлагаемые на него функции в соответствии с инструкциями и требованиями технологического процесса. Для этого станок с числовым программным управлением (ЧПУ) необходимо рассматривать как киберфизическую систему, способную, взаимодействуя с информационными ресурсами разных уровней, принимать решения и функционировать без участия человека.

Для оценивания здоровья станка нужно его актуальные технические показатели сравнивать с соответствующими техническими индикаторами (уставками), что позволит делать вывод и прогноз о дальнейшем его состоянии. На разных этапах жизненного цикла станка образуется много информации, характеризующей состояние самого станка и его компонентов. Для станка с ЧПУ наиболее информативными в этом плане являются: разработка и изготовление, пуско-наладка, эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт. При пуско-наладке станка выполняется настройка станка и конфигурирование системы ЧПУ, обработка тестовой детали. Образующаяся на этих этапах информация может быть собрана и сохранена для дальнейшего использования в качестве уставок для обнаружения отклонений состояния станка от нормы. Особенность станков с ЧПУ в том, что их системы управления позволяют: сохранять информацию о ключевых состояниях станка, сохранять в памяти устройства ЧПУ и извлекать из нее необходимые данные, получать подробные сведения о текущих параметрах технологического процесса, таких как режимы обработки, состояние режущего инструмента и силы резания, а также выдавать код ошибки и др.

Сбор и сохранение истории электронных данных в течение всего жизненного цикла станка с ЧПУ в со-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00305\20.



Рис. 1. Облачная инфраструктура системы прогнозирования и поддержки здоровья станка

четании с эффективными методами их анализа составляют информационную базу автоматизированной системы оценки и поддержки здоровья станка, а также долгосрочного прогноза.

Однако в настоящее время существует ряд проблем, затрудняющих объединение большого массива полезной информации с разных этапов жизненного цикла станка в единую систему оценки здоровья станка [1]. Не останавливаясь на причинах этих проблем, поскольку они описаны многими исследователями [2, 3], отметим, что для решения задач мониторинга и оценки состояния здоровья станка требуются специализированные компоненты, а также механизмы и алгоритмы сбора данных от технологического оборудования. Современные системы ЧПУ должны иметь инструментарий для предоставления данных о состоянии узлов станка.

Далее в статье представлен анализ современных решений, ориентированных на создание систем оценки работоспособности станков и разработанный на базе управляющей платформы отечественной системы ЧПУ инструментарий для оценки здоровья станка [4].

Решения по мониторингу здоровья станков в современных производствах

Современные технические предложения по мониторингу состояния станков и поддержке их качественной работы ориентированы на исключения каких-либо сбоев, поломок оборудования и потери качественного уровня выпускаемой продукции [3]. Многие исследовательские инициативы (авторов: Lee J., Yang S., Lapira E., Kao H.-A., B. Bagheri, Deng C, Guo, R, Liu C., Zhong R, Liu C., Xu X.) направлены на поиск решений для встраивания их в интеллектуальные промышленные производства [5–7]. Так, в on-line режиме можно получать информацию о состоянии элементов работа-

ющего оборудования (шпинделя, приводов, подшипников и др.), например, посредством использования встроенных или подключаемых датчиков (например, через USB). Но для полноценного контроля и прогнозирования работы элементов станка требуется не просто on-line мониторинг, но и накопление истории. Классические системы мониторинга производства (Machine Data Collection) лишь частично смогли удовлетворить этот запрос, так как они ориентированы лишь на сбор и хранение информации без ее анализа и принятия решений, как например, решения на базе коммуникационного стандарта MTConnect или OPC-сервера [8].

Подключение исполнительных механизмов технологического оборудования к информационному пространству предприятия остается проблемным. С одной стороны, это связано с тем, что в разных системах управления станков используются различные протоколы передачи данных, которые зачастую несовместимы друг с другом, а в разных станках и системах различаются способы доступа к данным, предоставляемым системами управления и пр. С другой стороны, сказываются такие факторы, как ограниченные вычислительные ресурсы и высокая стоимость поддержки информационной инфраструктуры. Активные исследования в этом направлении привели к новым идеям по формированию архитектуры интеллектуальных промышленных систем и механизмов подключения технологических компонентов в единую информационную среду [9–10].

Новый тренд в виде технологий облачных сервисов способствовал развитию идеи создания систем прогнозирования и поддержки здоровья станка на базе облачной инфраструктуры с использованием накопленной аналитики. Система управления каждого станка дополняется сервисным каналом, который обеспечивает синхронизированную связь между станком с ЧПУ и удаленной сервисной платформой (рис. 1). Сервисный канал содержит разнообразные приложения: файлы настройки станка, управляющие программы, приложения диагностики компонентов станка, файлы диагностической информации и др., которые используются в процессе настройки, отладки и эксплуатации станка.

В сервисном канале накапливается информация о состоянии станка. При необходимости она может быть по запросу передана в промежуточную сервисную платформу, где она становится доступной для сервисных служб. Кроме того, из промежуточной сервисной платформы информация может использоваться MES-службами для решения задач оптимизации и прогнозирования. В критических ситуациях к решению проблем может подключаться станкостроитель, который, используя облачные сервисы, может быстро исследовать причины сбоя и помочь восстановить работоспособность станка.

Облачные технологии позволяют собирать большие объемы данных, но для их активного использования

в цифровых производствах требуются прикладные приложения (cloud application), выполняющие преобразование собранных данных в приемлемый для анализа и принятия решений формат, в чем в настоящее время остро нуждаются разработчики облачных сервисов [3]

Компоненты мониторинга здоровья станка в ядре системы ЧПУ

Контроль состояния здоровья станка, можно разделить на два взаимодополняемых процесса:

- определение состояния здоровья станка при его запуске в начале смены или при настройке на новую технологическую операцию;
- мониторинг состояния здоровья станка в ходе его работы, то есть в течение времени обработки деталей, перерывов в работе или технического обслуживания.

Для реализации процесса по первому варианту предложена структура программных компонентов в ядре системы ЧПУ АксиОМА Контрол, показанная на рис. 2.

При включении станка, например, в начале рабочей смены или после длительного перерыва в работе, необходимо проверить состояние подсистем станка и его возможности обеспечивать параметры конкретной технологической операций (по точности позиционирования, динамическим характеристикам разгона и торможения, максимальным моментам и т.п.). Подобная проверка особо актуальна при наладке станка на операцию по обработке массивных заготовок, вес которых способен повлиять на механические узлы станка и, как следствие, на характеристики их движения [5].

Для выполнения такой проверки необходимо отработать на станке определенный набор тестовых заданий, таких как: движение с заданной скоростью, позиционирование осей, движение по заданной траектории (окружности). В процессе выполнения этих заданий в режиме реального времени собираются данные и формируется буфер измерений (“Данные измерений” на рис. 2). По завершении очередного испытания эти данные передаются приложениям клиентов ядра системы ЧПУ, на их стороне будет вы-

полняться анализ и формироваться общее представление о здоровье станка.

Анализ данных может заключаться в выявлении максимальных отклонений от допустимых значений (отклонения от траектории, ошибки по скорости) или максимальных значений моментов на двигателях приводов или другое [9]. С учетом ранее сохраненных на сервере данных полученные измерения можно сравнить с эталонными значениями, зафиксированными при начальной настройке станка или в ходе очередного его технического обслуживания. Таким образом можно отслеживать тенденции в изменении состояния узлов станка (например, привода координатного стола) и планировать его очередное обслуживание или ремонт. На основании собранных данных можно проводить обучение нейронных сетей для алгоритмов прогнозирования работы подобных систем, эксплуатируемых в схожих условиях.

Мониторинг текущего состояния станка в процессе его работы, как правило, реализуют специализированные системы, относящиеся к уровню управления производством. В основе таких систем лежит трехуровневая структура, содержащая:

- 1) уровень представления данных об оборудовании (станки с ЧПУ), а также сбора данных с дополнительных датчиков (температуры, вибрации и др.), устанавливаемых на станок или его технологическое оснащение;
- 2) уровень накопления данных на серверах производственных участков и предприятия в целом;
- 3) уровень анализа данных для получения характеристик здоровья станочного оборудования в соответствии с определенной моделью его оценки.

Взаимодействие уровней реализуется на основе сетевых технологий: промышленных протоколов для сбора данных в режиме реального или мягкого реального времени (OPC, MTConnect); протоколов взаимодействия с базами данных для запроса собранной и накопленной в процессе анализа информации.

Между тем, задачи мониторинга нельзя отнести к управлению в жестком реальном времени, когда требуется очень быстро реагировать на возникновение отказа или ошибки в процессе управления. Поэтому в системе ЧПУ нужна подсистема текущего анализа и контроля движения (блок “Текущий анализ данных” на рис. 2) с возможностью в течение одного такта управления среагировать на отклонение от штатной ситуации (например, отклонение от контура или превышение допустимого крутящего момента в течение определенного времени), то есть выдать управляющее воздействие на канал управления для корректировки режима работы или остановки движения.



Рис. 2. Структура компонентов в ядре для определения состояния здоровья

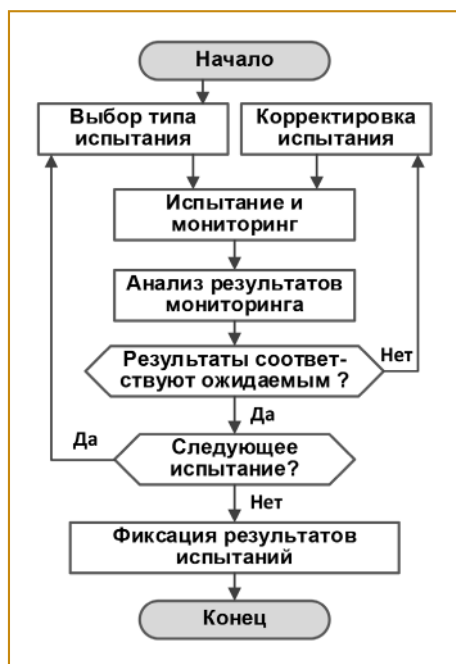


Рис. 3. Алгоритм получения данных для мониторинга здоровья станка



Рис. 4. Алгоритм испытания и получения данных от станка

Алгоритмы сбора данных для мониторинга здоровья станка

Операции мониторинга здоровья станка должны быть максимально автоматизированы, а в лучшем исполнении — выполняться автоматически при включении станка, по команде от клиента тестирования (удаленно) или от оператора станка. Когда система ЧПУ включена, загружены все ее компоненты, нет критических ошибок, запрещающих работу станка (отсутствие силового питания, давления в магистралях пневматики и гидравлики и т.п.) — система готова к работе, в том числе к мониторингу здоровья. Для задачи мониторинга здоровья в компоненте предоставления данных проверяется подключение клиентов, определяются клиенты, обеспечивающие задачу мониторинга здоровья, например, по IP адресу, имени, глобальному уникальному идентификатору (GUID) или на основе специализированных запросов в протоколе обмена данными. При наличии нужных клиентов возможно выполнение мониторинга здоровья. Для этого система либо автоматически (в соответствии с настройками), либо по команде оператора переходит в режим «самотестирования» с движениями и работой технологической оснастки (блокировка рабочей зоны, подача СОЖ, команды гидравлики и т.п.) при выполнении M-команд на стороне подсистемы электроавтоматики [10].

Алгоритм автоматизированного получения данных для мониторинга здоровья станка в режиме самотестирования представлен на рис. 3. По алгоритму из определенного перечня испытаний выполняется очередной тест либо как самотестирование в ядре (в соответствии с настройками), либо по команде от клиента, реализующего задачу мониторинга здоровья.

В зависимости от типа испытания может проводиться в режимах JOG (ручной режим работы станка), MDI (ручной ввод данных) или Auto (автоматическое управление). По завершении испытания в ядре системы фиксируется результат, в частности, ошибки и предупреждения. При наличии критических ошибок возможна корректировка параметров испытания (например, изменение координат перемещений, скоростей подачи, оборотов шпинделя и т.п.) и его повторное выполнение. На этапе фиксирования результатов в ядре системы создается файл протокола о завершённых испытаниях и их результатах (название, параметры выполнения, коды полученных ошибок и предупреждений).

Для системы ЧПУ АксиОМА Контроль этап «Испытание и мониторинг» представлен в виде алгоритма на рис. 4. В начале запускается режим сбора данных в ядре для фиксации в режиме реального времени данных от приводов, осей, канала управления. Далее запускается испытание, например, движение по команде, заданной в строке в режиме ручного ввода данных (MDI), и отслеживается состояние выполнения. По завершении сбор данных останавливается. Поскольку буфер данных для измерений ограничен, необходимо передать эти данные, относящиеся к текущему испытанию, на сторону клиентов мониторинга. На этапе фиксации результатов испытаний определяется наличие ошибок, добавляются данные в протокол испытаний.

Получение данных текущего испытания из ядра выполняется по интерфейсу АксиОМА API. Клиентами этих данных могут быть серверы данных, шлюзы, облачные хранилища, которые предоставляют полученные и накопленные таким образом данные в структурированном виде для их последующего анализа.

Уровни сбора данных для мониторинга здоровья станка

В структуре организации удаленного мониторинга выделим четыре уровня (или ступени) сбора, агрегирования и обработки данных (рис. 5):

- шлюз сбора данных с объекта управления (IoTHub);
- шлюз сбора данных с систем управления объектом (CNCHub);
- хранилище данных мониторинга и результатов анализа (CNCIoTCloud);
- клиенты анализа и визуализации результатов мониторинга (решения анализа и визуализации).

Устройства типа IoTHub обеспечивают взаимодействие с различными устройствами сбора данных с объекта управления, то есть датчиками, интеллектуальными датчиками или микроконтроллерами сбора данных. CNCHub взаимодействует с системами

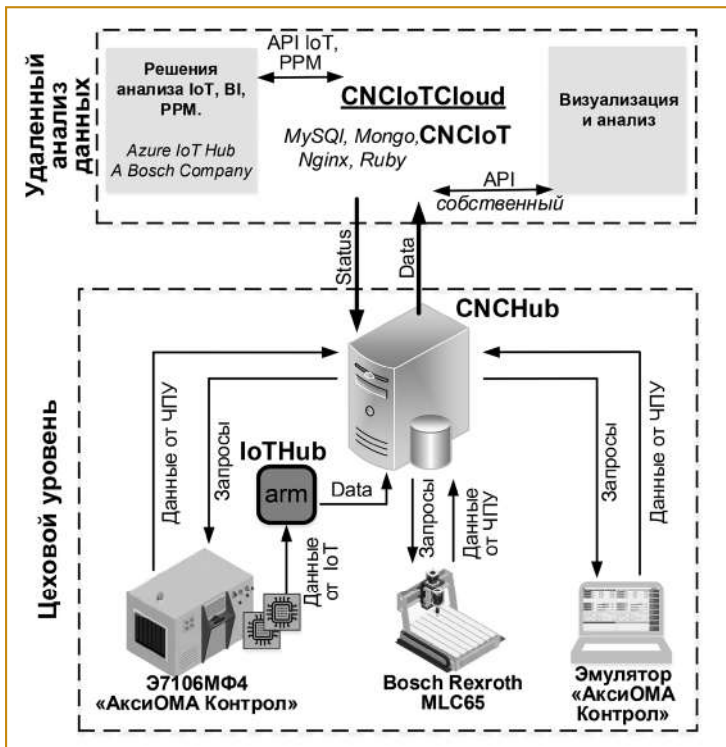


Рис. 5. Удаленный мониторинг здоровья станка на основе аналитики IoT

управления на основе стандартных и специализированных промышленных протоколов и агрегирует данные с IoTHub устройств. Данные разных форматов собираются от систем ЧПУ и устройств IoTHub в единый формат (на основе текстового формата обмена данными JSON) и далее передаются на сервер-хранилище CNCIoTCloud, где разбираются с учетом определенных на сервере структур и групп данных для размещения в СУБД (MySQL или MongoDB). CNCIoTCloud предоставляет (выгружает) информацию в различные системы аналитики (например, Nexeed Production Performance Manager (Rexroth)).

Сбор данных на основе интерфейсов коммуникации ЧПУ может выполняться с испытательных стендов. Это предоставляет возможности отслеживать состояние различных версий системы управления, отлаживать механизмы предоставления данных и воспроизводить проблемы, возникающие при эксплуатации станков с учетом их настроек (то есть за счет реализации цифрового двойника).

В настоящее время в представленной структуре разрабатываются и испытываются собственные решения уровней IoTHub, CNCiHub и CNCIoTCloud на основе взаимодействия с системой ЧПУ АксиОМА Контрол, системой управления обрабатывающего центра Э7106МФ4, а также стендовыми образцами других систем ЧПУ (Fanuc, Siemens, Fagor).

Примеры анализа данных в процессе мониторинга здоровья станка

В качестве примера испытаний и сбора данных, предоставляемых системой ЧПУ, выделим следующие

три случая проверки параметров движения по оси X:

- движение в ручном (JOG) режиме на заданную дистанцию;
- движение в автоматическом (Auto) режиме с заданной подачей (например, реверсивное);
- движение по контуру совместно с другой осью (например, Y и движение по окружности).

В первом случае определяется время выхода в заданную позицию, когда значение ошибки по положению становится меньше точности станка (4 мкм для Э7106МФ4). Как показано для текущего случая (рис. 6), выход в позицию задерживается на 0,7 с по сравнению с нормальным случаем. При этом накопленные данные подобного испытания могут отражать состояние оборудования по параметрам, анализ которых пока не производится (например, наибольшая ошибка по положению), но может быть реализован впоследствии, при внедрении новых стратегий оценки здоровья станка.

В управлении движением по программе в режиме Auto используется интерполятор для получения промежуточных точек траектории и расчета разгонов и торможений на стыке кадров. Для этих испытаний актуально определение ошибки скорости как разницы командной и фактической скорости для выявления максимальных значений на определенных участках траектории. Если значение ошибки больше допустимых, это означает плохое состояние станка — возможно, износ исполнительных механизмов, трение из-за отсутствия смазки на направляющих или неправильные коэффициенты регуляторов скорости в системе ЧПУ.

На рис. 7 представлены графики изменения ошибки скорости при реверсивном движении оси X

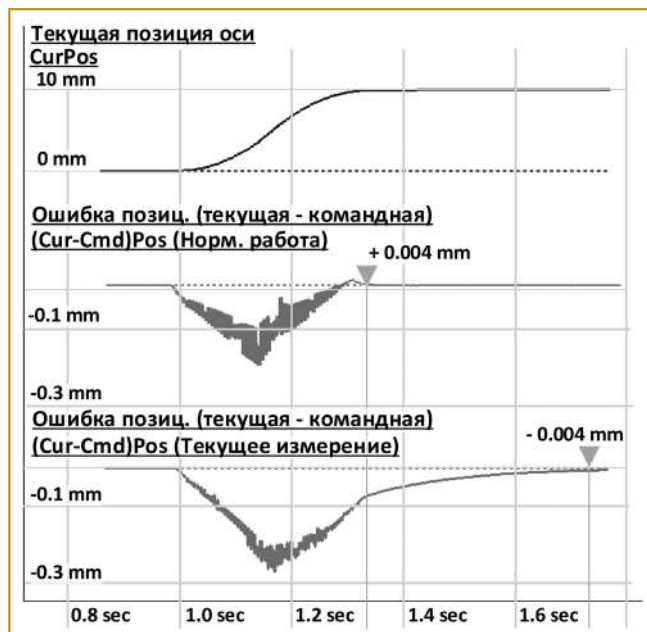


Рис. 6. Данные проверки команд позиционирования

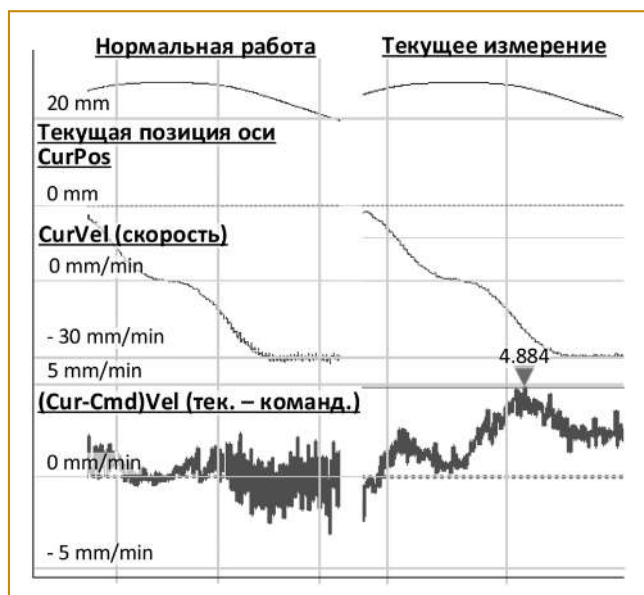


Рис. 7 Данные проверки программы движения с заданной скоростью

(от 0 до 20 и обратно). Показано что при нормальном случае движения (слева) значение ошибки на данном участке траектории не превышает 2.5 мм/мин. Но для текущего случая испытания максимальное значение составляет 4,88 мм/мин.

Анализ рассчитанных значений ошибок может производиться с учетом зависимости от значений других измерений, например, положения оси на участке траектории. При движении по окружности проблемной областью являются стыки квадрантов: отклонения от траектории в этих местах являются наибольшими и зависят от состояния механизмов координатного стола (люфтов, таблицы компенсаций в системе ЧПУ, смазки направляющих и др.).

Выявление подобных проблем в ручном режиме на основании данных измерений требует не только дополнительного времени (простоя оборудования), но и более высокой квалификации оператора, и зависит от человеческого фактора. Автоматизация таких измерений и анализ их результатов с применением развитых средств хранения и аналитики исключает эксплуатацию станков в плохом состоянии здоровья и негативные последствия от этого.

Заключение

Предложенная структура компонентов, механизм и алгоритмы сбора данных измерений реализуют возможность предоставления данных для задач мониторинга и определения состояния здоровья станка. В структуре организации удаленного мониторинга выделены основные компоненты в виде специализи-

рованных шлюзов сбора данных и облачных сервисов для хранения данных и результатов анализа.

Анализ данных, полученных в процессе испытаний (или в режиме самотестирования), позволяет выявить наличие ошибок в управлении станком, возникновение которых спорадическое либо может быть спрогнозировано. При этом, выявление проблем происходит автоматически, что не допускает использование в производстве станка с плохими показателями здоровья.

Список литературы

1. *Martinoва, L., Sokolov, S. and Babin, M.* (2020). Organization of Process Equipment Monitoring. In: 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE.
2. *Martinov, G. M., Pushkov, R. L. and Evstafieva, S. V.* (2020). Collecting diagnostic operational data from CNC machines during operation process. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 709, No. 3, p. 033051). IOP Publishing.
3. *Martinov, G., Martinoва, L. and Ljubimov, A.* (2020). From classic CNC systems to cloud-based technology and back // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, Vol. 63, June.
4. *Martinov, G., Kozak, N. and Nezhmetdinov, R.* (2018). Approach in Implementing of Logical Task for Numerical Control on Basis of Concept "Industry 4.0". 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).
5. *Martinov, G., Lyubimov, A. and Khoury, A.* (2019). Development of Motion Controller Based on ARM Microcomputers by Supporting Different Strategies of Controlling CAN Servo Drives. In: 2019 International 696.
6. *Никишечкин П.А., Григорьев А.С.* Практические аспекты разработки модуля диагностики и контроля режущего инструмента в системе ЧПУ // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2013. № 4 (27). С. 65-70.
7. *Martinov G. M., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. and Chervonnova N. Yu.* (2019). Organizing Interaction of Basic Components in the CNC System AxiOMA Control for Integrating New Technologies and Solutions // Automation and Remote Control, 2019, Vol. 80, No. 3, pp. 584-591.
8. *Martinov, G. M., Kovalev, I. A. and Chervonnova, N. Y.* (2020). Development of a platform for collecting information on the operation of technological equipment with the use of Industrial Internet of Things. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 709, No. 4, p. 044063). IOP Publishing.
9. *Martinov, G. and Kovalenko, A.* (2020). Additive Process Equipment Control System for Integration into a Flexible Manufacturing System. In: 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE.
10. *Sokolov S, Pushkov P, Evstafieva S.* General-purpose Control System Adaptation for Gear Milling Tasks. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. p. 1-5.

Мартинова Лилия Ивановна — канд. техн. наук, доцент,
Козак Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент,

Ковалев Илья Александрович — канд. техн. наук, доцент, **Любимов Александр Борисович** — вед. инженер кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Контактный телефон (499) 972-94-40.

E-mail: kozak@ncsystems.ru