

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

УДК 631.3:004

doi: 10.15507/2658-4123.031.202104.530-543

Научная статья



Цифровой двойник процессов восстановления сельскохозяйственной техники

Ю. Г. Следков, Л. Л. Хорошко, П. М. Кузнецов*,
А. О. Бутко

Московский авиационный институт (г. Москва,
Российская Федерация)

* profpol@rambler.ru

Аннотация

Введение. Эффективность сельскохозяйственной деятельности обусловлена прежде всего степенью механизации труда, которая обеспечивается наличием необходимого объема сельскохозяйственной техники. Абразив в виде песка, грязь, работа под открытым небом резко ускоряют износ механизмов. Нерационально составленный план работ, отсутствие полной информации о состоянии конкретных единиц техники увеличивают сроки выполнения ремонтно-восстановительных работ. Цель исследования – разработка модели цифрового двойника ремонтно-восстановительной системы предприятий. Модель позволит сократить материальные затраты и найти наилучшие решения для организации требуемых работ.

Материалы и методы. Разработанная модель построена на основе имитационного моделирования. Авторы использовали методику, основанную на дискретно-событийном моделировании с использованием логико-математического аппарата описания событий, происходящих в реальном объекте.

Результаты исследования. Информационное обеспечение формируется на основе параметров производственных систем отдельных ремонтных предприятий и консолидированной с ним математической модели, являющейся цифровым двойником обобщенной производственной системы. Подобный подход позволил автоматизировать поиск оптимальных планов организации ремонтных работ отдельными ремонтными предприятиями с учетом их взаимосвязей.

Обсуждение и заключение. Цифровой двойник обобщенной производственной системы ремонтных организаций позволяет генерировать в короткие сроки возможные варианты распределения ресурсов и оперативно производить их верификацию, выбирая лучшие варианты, аккумулируя информацию об удачных решениях с целью сокращения времени проведения подобных поисков в будущем. Это позволит сократить время проведения ремонтно-восстановительных работ, повысить их качество и снизить трудоемкость.

© Следков Ю. Г., Хорошко Л. Л., Кузнецов П. М., Бутко А. О., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: ремонтные работы, технологический процесс, автоматизация, математическая модель, база данных, программная среда, производительность

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Цифровой двойник процессов восстановления сельскохозяйственной техники / Ю. Г. Следков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 530–543. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.530-543>

Original article

The Digital Twin for Agricultural Machinery Restoration Processes

**Yu. G. Sledkov, L. L. Khoroshko, P. M. Kuznetsov*,
A. O. Butko**

*Moscow Aviation Institute (National Research University)
(Moscow, Russian Federation)*

**profpol@rambler.ru*

Abstract

Introduction. Agricultural machinery provides the required level of mechanization. Sand abrasive, dirt, and open-air operations considerably accelerate the wear of mechanisms. An improper work plan and lack of complete information about the state of specific equipment units increase the time for repair and maintenance operations. The purpose of the study is to develop a digital twin model for the repair and restoration system of enterprises. The model will reduce material costs and allow for the best solutions to organize the work.

Materials and Methods. The model is developed on the basis of simulation modeling. The authors used the approach based on discrete-event modeling with the logical-mathematical apparatus for describing events occurring in a real object.

Results. Information support is formed taking into account the parameters of the production systems of repair enterprises and a mathematical model, which is a digital twin of the production system. This approach made it possible to automate the development of optimal plans for organizing repair work by repair enterprises, taking into account their interrelationships.

Discussion and Conclusion. The digital twin for the generalized production system of repair organizations allows developing options for the resource allocation and verifying them promptly to choose the best options through accumulating information about the most successful solutions. This will reduce the time for repair and restoration works, improve their quality and save labor.

Keywords: repair work, technological process, automation, mathematical model, database, software environment, productivity

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Sledkov Yu.G., Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M., Butko A.O. The Digital Twin for Agricultural Machinery Restoration Processes. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(4):530-543. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.530-543>

Введение

Ремонтно-восстановительные работы сельскохозяйственной техники относятся к работам, которые во многих случаях приходится проводить в полевых

условиях. Сформированные бригады технического персонала выезжают на место дислокации техники, где и производят необходимый ремонт. Здесь следует выделить несколько факторов,

существенно влияющих на длительность и качество ремонта. Во-первых, важно сразу определить возможность выполнения работ на месте. Это позволит существенно сократить время начала контакта бригады и техники. Во-вторых, необходимо определить состав бригады и технического вооружения. В-третьих, важно оперативно разработать и оформить объем сопроводительной документации, включая технологическую, на проведение работ.

Для достижения этого необходима организация проектных работ, от качества и скорости выполнения которых существенно зависит время простоя ремонтируемой техники. Качество выполнения указанных работ определяется средствами автоматизации и прежде всего объемом использования средств вычислительной техники. Наличие программной среды с использованием статистических данных и информационного обеспечения в области технологии ремонтных работ является залогом успешного функционирования сельскохозяйственных машин и механизмов.

Цель исследования – разработка модели цифрового двойника ремонтно-восстановительной системы предприятий. Модель позволит оперативно без материальных затрат находить наилучшие решения организации проведения требуемых работ.

Обзор литературы

Сельскохозяйственная техника является основой механизации труда. Низкая защищенность от нежелательных воздействий внешней среды и частый выход из строя являются особенностью функционирования сельскохозяйственной техники. Вопросам развития предприятий и организаций, занимающихся ремонтом и восстановлением техники, посвящен ряд работ [1–3]. Указывается, что важной составляющей успешной организации предприятий является правильное планирование

и проектирование технологических процессов.

В основе любого технологического процесса лежит маршрутная технология, от правильного выбора которой зависит эффективность проводимых работ [4]. Поэтому вопросам проектирования маршрутной технологии посвящены исследования, в которых рассматриваются подходы к осуществлению проектирования и автоматизации [5]. Автоматизация проектирования предусматривает всестороннее использование средств вычислительной техники не только в качестве инструмента проектировщика, но и обеспечения процессов управления технологическим оборудованием, что особенно важно на этапе жизненного цикла, связанного с техническим сопровождением и сервисным обслуживанием [6–8].

Качество проектирования ремонтно-восстановительных работ определяет их производительность и себестоимость. В одной из работ особое внимание уделено вопросам определения структуры технологических процессов, выполняемых на предприятиях. Отмечается, что их структура зависит от организации производства и может отличаться от оптимальной [9]. При разработке технологических процессов реализуются две процедуры: структурный и параметрический синтез. Процедура структурного синтеза технологических процессов является трудно формализуемой, что вызывает большие сложности при ее автоматизации [10–12].

Математическое моделирование процессов распределения технологических операций, в частности ремонтно-восстановительных задач по рабочим местам ремонтных организаций, приобретает особое значение в этих условиях [13; 14]. Разработка математических моделей позволяет использовать основные положения проектно-операционного управления [15–17].

Проектно-операционное управление позволяет объединять в организационное целое технологическую подготовку производства и поддерживать производственные процессы на протяжении их жизненного цикла на основе формирования информационного обеспечения [18; 19]. В последнее время получило развитие проектно-операционное управление, позволяющее моделировать производственные процессы с позиции прогнозного моделирования [20; 21].

Большое значение имеет создание новых подходов для автоматизации расчетов параметров технологических процессов [22; 23]. Создание моделей для параметрического синтеза режимов технологических процессов [24], теория и практика обработки металлов резанием [25], оперативная диагностика технологического оборудования [26] позволяют оперативно получать данные о режимах обработки, обеспечиваемой точности, требуемой технологической оснастке и т. д. Все это является необходимым при моделировании различных структурных вариантов построения технологических процессов ремонтно-восстановительных работ.

Анализ литературных источников показывает, что существует репрезентативная база научных исследований, позволяющая разработать программную среду для поиска рациональной организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники, минимизировать трудоемкость выполняемых работ и сократить время простоя оборудования.

Материалы и методы

Основным критерием эффективности функционирования производственной системы является степень загрузки ее технологических составляющих при одновременном отсутствии очереди на проведение ремонтных работ. С одной стороны, должна быть минимальная

избыточность производственных мощностей, а с другой – отсутствие очередей. Заявки поступают в производственную систему в различной последовательности, что вызывает противоречие описанных требований. Они начинают влиять на планирование. Для выполнения требований необходимо рационально распределить задачи по рабочим местам и времени. Это можно сделать с помощью цифрового двойника ремонтной производственной системы. В основе цифрового двойника лежит математическая модель, позволяющая описать состояние производственной системы в текущий момент времени и получить информацию о ее состоянии в будущем с учетом происходящих событий.

Матричное описание параметров производственной системы предлагается как основа математической модели. Матрица представляет собой двумерную матрицу Mt вида

$$Mt = \begin{vmatrix} t_{11} & \dots & t_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \dots & t_{mn} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где t_{ij} – период времени переналадки технологического оборудования (рабочего места) при переходе от выполнения одной работы к другой. Как правило, при равенстве индексов i и j (диагональ) соответствующие компоненты обращаются в ноль.

Таким образом, предлагаемая матрица (1) характеризует каждую единицу технологического оборудования или одно рабочее место. Время выполнения технологических операций описывается массивом значений

$$T_{on} = | t_{on1}, \dots, t_{oni}, \dots, t_{onn} |, \quad (2)$$

где t_{oni} – время выполнения i -й операции.

Весь объем технологических операций, который может быть выполнен

в производственной системе, можно представить как бинарную матрицу вида

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь каждый компонент матрицы представляет собой значение либо логического нуля (операция не выполняется), либо логической единицы (операция выполняется).

Таким образом, произведение матриц

$$Q = Mt \cdot B + T_{\text{оп}} \quad (4)$$

определяет трудоемкость в единицах времени выполнения всего технологического процесса ремонтно-восстановительных работ. Совокупное значение величины $T_{\text{оп}}$ (2) определяется путем сложения соответствующих компонент $t_{\text{оп}i}$, исходя из их значений бинарной матрицы B (3). Для поиска рациональных решений рассматриваются различные варианты маршрутов (3), а по критерию трудоемкости (4) из них выявляются рациональные.

Результаты исследования

Реализация цифрового двойника процессов восстановления сельскохозяйственной техники на основе описанной модели выполнена в виде разработанной программной среды, позволяющей автоматизировать поиск рациональных решений. С целью отслеживания ремонтных и восстановительных работ и задач, а также контроля процесса их выполнения допускается возможность применения имеющихся на рынке систем управления проектами типа Microsoft Project. Данные в них будут поступать непосредственно из системы автоматизированного проектирования (САПР) в автоматизированном режиме. Это даст заметное сокращение трудоемкости задачи по формированию проекта.

Процессы предлагаемого комплексного решения покрывают несколько важнейших этапов жизненного цикла, способствующих эффективной работе технологических систем ремонтных и восстановительных предприятий.

Рассматриваемая интегрированная среда моделирования включает комплект программ и приложений, содержащий такие продукты, как Siemens PLM, Oracle и Microsoft (тут могут предлагаться варианты конфигурации решения для поддержки базы данных средствами Microsoft SQL либо средствами Oracle в зависимости от требований конечного заказчика).

Базовый алгоритм системы включает последовательное выполнение следующих этапов:

1. Проектирование и инженерные расчеты параметров и структуры ремонтной установки.
2. Создание технологических процессов и программ для управления ремонтными и восстановительными работами.
3. Составление конструкторской документации (КД) и технологической документации (ТД).
4. Формирование производственного плана.
5. Анализ и расчет экономических характеристик.
6. Консолидация результатов, документации и построение базы новых решений [27].

Ключевым моментом при реализации вышеперечисленных этапов является обмен данными между независимыми средствами проектирования, управления, моделирования и организация их совместной работы. Эта проблема наиболее заметна при переходе от проектирования к планированию производства, что может потребовать дополнительных решений путем реализации специального программного обеспечения, которое и было

предложено авторами в виде нескольких модулей, созданных инструментальными средствами современного программирования С#. Это привело к образованию инвариантной среды моделирования, включающей алгоритмы создания информационных моделей, консолидирующих данные, в том числе и требуемые для планирования производственных работ.

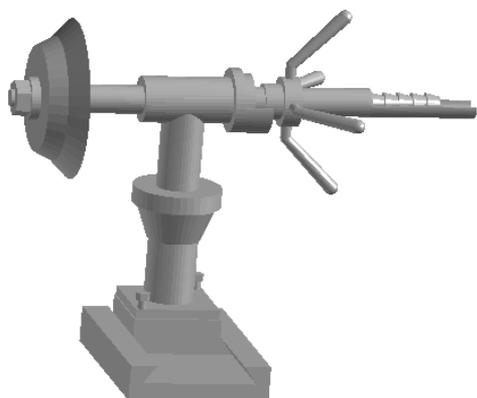
Представленное решение легло в основу системы структурно-параметрического моделирования (СПМ), функционирующей на базе лингвистической интерпретации проектируемых изделий с дальнейшей визуализацией программными средствами. Параллельно в модели реализуются необходимые инженерные расчеты и проектные характеристики объектов и задач. Помимо этого, комплекс дает возможность автоматизировать поиск оптимальной конфигурации оборудования для ремонтно-восстановительных работ, который зачастую требует значительных машинных ресурсов и высокопроизводительных вычислительных систем, а иногда и очень высоких временных затрат, особенно при моделировании многочисленных вариантов технологических процессов. Решением в данном случае стала дифференциация видов рабочих моделей в зависимости от простоты и объема данных. В случае незначительного размера модели и имеющегося свободного ресурса времени поиск может проводиться обычным способом путем перебора необходимого числа итераций. В противном случае, если время ограничено, а модель велика или содержит большой объем данных, лучшим вариантом становится предварительный подбор адекватного метода оптимизации из набора уже имеющихся (например, методы линейного или целочисленного программирования).

Для решения задачи моделирования различных вариантов организа-

ции ремонтно-восстановительных работ по конкретным объектам предложен программно-методический комплекс (ПМК) СПМ, представляющий инвариантную среду моделирования.

На первом этапе работы системы формируется задание на проектирование и планирование задач на основе списков требуемых ремонтных или восстановительных работ оборудования. Проводится анализ существующих результатов по аналогичным работам, ранее выполненным предприятием. Здесь же учитываются пожелания, корректировки и замечания, сделанные на различных этапах в прошлом с учетом возникших более благоприятных условий: обновление за этот период времени технологического оборудования, улучшение используемой оснастки и т. п. Если нет возможности скорректировать условия планируемых работ, в качестве основы принимается лучший вариант из присутствующих в базе. Параллельно ведется попытка построения обновленного варианта на базе реальных возможностей партнеров. Все процессы, проводимые в рамках предложенной среды, могут идти как локально в одной организации, так и распределенно с участием внешних проектировщиков удаленных предприятий. Итоговым результатом этапа служат комплект чертежей, технических описаний, дополнительной документации и наборы моделей по всему объекту. Параметризация является необходимой для модели. Она может включать заданные инженерные расчеты, в том числе и прочностные по методу конечных элементов. Инженеры готовят единую параметризованную модель со сквозной системой параметризации (рис. 1, табл. 1) таким образом, чтобы обмен данными по модернизации или модификации транслировался на все системы проектирования, включенные в комплекс. Это реализуется с помощью дополнительного программного модуля, через стандартный формат,

например таблицы Excel, путем обмена параметрами между САПР. По завершении формирования компоновочной модели проектировщики проверяют соответствие заданию и функциональные возможности.



Р и с. 1. Упрощенная модель ремонтного приспособления в СПМ

Fig. 1. Simplified model of a repair group in structural-parametric modeling

Второй этап включает сравнение и проверку всех альтернативных вариантов по нескольким показателям, включая функциональную избыточность. Оптимальным вариантом будет перекрытие областей необходимых и реальных технологических возможностей по решению поставленных задач. В практическом опыте реальные возможности оказываются выше и при приближении разности к минимальной применяемые технологические ресурсы снижаются, оставляя в реальной системе больше возможностей, что снижает объем необходимого запаса технологического оборудования. По мере надобности инженер получает задание по дальнейшей доработке самого удачного варианта, если он реализуется в аналогичных ремонтных работах на том же оборудовании. Цель – сократить время и снизить трудоемкость. Функционирование принятого варианта проверяют средствами программного технологического моделиера PRTECH.

Т а б л и ц а 1
Table 1

**Представление параметров модели в ПМК СПМ
Representation of model parameters in the software-methodological complex
of structural-parametric modeling**

Свойства / Properties	Изображение / Image	Параметры / Parameters	Значения / Values
Код / Code	ц_основ	кол / quantity КОЛ / QUANTITY	1 100
Метка / Label	1	Угол (поворот) / Angle (rotation) ШИФР / CIPHER	10 1.1.1.1
Имя / Name	Основание / Base	Вес / Weight Sok	0,9 0,3
V	Входит в решение / Included in solution	dx t (трудоемкость обработки) / t (labor intensity)	350 1,245
Тело / Body	+	B H	165 245
Тип / Type	Д	L	700

Итогом этого этапа служит полностью готовая документация на проектируемое изделие.

Третий этап включает планирование сроков проведения ремонтно-восстановительных работ при использовании готового варианта объекта, на котором они будут выполняться. Модель вводится в специальный модуль обмена, что решает задачу автоматизированной передачи информации для получения данных о сроках проведения ремонтно-восстановительных работ, и составляется план загрузки оборудования ремонтных организаций. В рамках данного этапа по итогам построения модели в базу вносятся информация о наиболее удачных решениях в заданных условиях. В дальнейшем эти данные подвергаются анализу, составляется заключение.

Для автоматизации процесса формирования проекта с целью управления и планирования работ может быть предложен специальный модуль, который работает в комплексе с ПМК СПМ

и создает промежуточные базы данных, готовые для загрузки в систему Microsoft Project.

Созданный коллективом авторов модуль рассчитан на автоматизацию работ по формированию проекта, представляющего процесс создания, модификации, ремонта или восстановления объекта в системе Microsoft Project. Данный модуль позволяет обеспечить визуальное представление (рис. 2, табл. 2) и управление проектами в ходе подготовки объекта для проведения ремонтно-восстановительных работ в условиях сельскохозяйственного комбината.

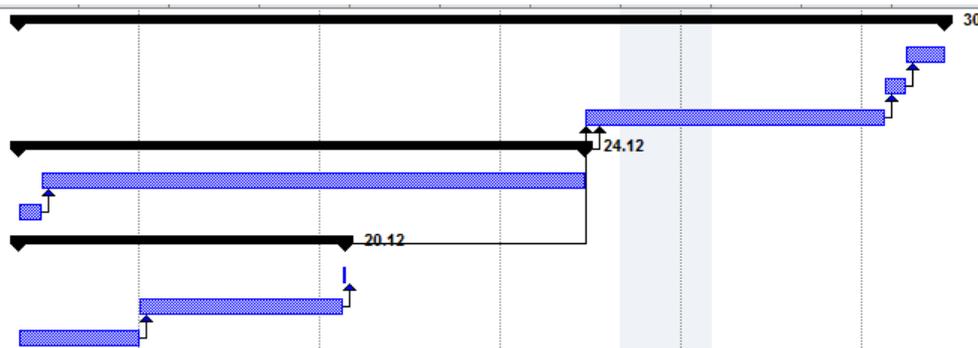
На завершающем этапе составляется необходимая документация, включающая следующие отчеты в типовой форме: отчеты о датах начала проведения ремонтно-восстановительных работ в рамках имеющихся заказов и планов; отчеты о поставке и сборке объекта на месте проведения ремонтно-восстановительных работ; диаграммы Ганта, иллюстрирующие ход одновременно

Т а б л и ц а 2

Table 2

**Представление списка задач в проекте
Representing the tasks of the project**

Название задачи / Task name	Длительность / Duration
Производственная специфика узла «Опора» [Узел-ПС], д / Production specifics of the "Support" [Uzel-PS], days	11,07
Контроль выборочный (20) [T_kontr], ч / Selective control (20) [T_kontr], h	0,67
Окраска узла [T_malyr], ч / Painting works [T_malyr], h	7,53
Сборка узла [T_sbsv_uzel], ч / Assembly works [T_sbsv_uzel], h	23,33
«Штырь» [Деталь1-ПС], д / "Pin" [Detal1-PS], days	7,12
Механическая обработка детали «Штырь» [T_mech_Detal1], ч / Machining of the "Pin" [T_mech_Detal1], h	56,97
Ресурсы для «Штыря» [Detal1-PS], ч / Resources for "Pin" [Detal1-PS], h	0,02
Основание [Деталь2-ПС], д / Base [Detal2-PS], days	3,16
Острые кромки притупить [T_sles], ч / Sharp edges blunt [T_sles], h	1,26
Механическая обработка детали «Основание» [T_mech_Detal2], ч / Machining of the "Base" [T_mech_Detal2], h	8,03
Заготовка-швеллер (отрезка) [T_shv], ч / Blank-channel (cut) [T_shv], h	16,00



Р и с. 2. Фрагмент диаграммы проекта на сборку изделия в MS Project
 F i g. 2. Project diagram fragment for assembling a product in MS Project

проводимых ремонтно-восстановительных работ; графики загрузки ремонтных агрегатов и установок во времени.

Здесь важно заметить возможность перспективы в виде усовершенствования средств планирования так, чтобы оператор мог работать с информацией на более ранних этапах построения модели изделия. Это дало бы возможность устранить или обойти ошибочные варианты моделирования на более ранней стадии проектирования. Такое смещение процессов оптимизации способствует своевременному получению информации о стоимости, продолжительности и предполагаемых перегрузках ремонтного оснащения.

На завершающей итерации производится интеграция имеющихся результатов моделирования в унитарной среде СПМ в форме комплексной информационной модели, представленной лингвистическими средствами (это могут быть графические файлы с таблицами и графиками, диаграммы Microsoft Project, отчеты в Word или Excel, результаты инженерных анализов в формате HTML-отчетов с изображениями и эпюрами, визуальные представления сборки, сборочные чертежи в различных форматах, в том числе из AutoCAD, спецификации и технические характеристики, результаты

испытаний и технологическая документация в стандартных форматах).

Разработанный подход сделал возможным консолидировать все данные об изделиях сельскохозяйственной техники в единую базу, что заметно облегчает работу с ней при организации ремонтно-восстановительных работ. Работа проводится в области единой интегрированной системы, при этом планирование, отслеживание и организация восстановительных и ремонтных работ выполняется с применением высокоэффективных инструментов автоматизированного проектирования. Использование имитационной модели, в основе которой заложен дискретно-событийный аппарат в виде логико-математического описания элементов модели, позволило исключить аналитическое описание реального объекта, что существенно упростило работу пользователя с моделью.

Обсуждение и заключение

Предложенное решение задачи поиска рациональной организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники направлено на более глубокую степень автоматизации процессов планирования работ. Предлагаемые решения позволяют поддерживать разработанную модель в состоянии открытости для дальнейшего ее обогащения и использования систем

автоматизации проектирования. Это позволяет реализовать интеграцию отдельных ремонтных организаций и их подразделений в единую информационную систему, что значительно повышает эффективность их работы. Обмен данными о полученных удачных решениях, аккумулированных в единую базу, позволяет ускорить принятие рациональных решений. Накопленный статистический материал открывает возможность для оптимизации состава ремонтного технологического оборудования, избегая его дублирования и ошибочного

приобретения оборудования с характеристиками, не соответствующими специфике проводимых ремонтных работ.

В качестве дальнейшего развития данного направления исследований можно предположить расширение возможностей модели путем использования агентного подхода к построению имитационной модели. Такой подход основан на децентрализованном описании реальной системы, а следовательно, требует разработки правил поведения элементов системы индивидуально под каждый из них.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Просвирина М. Е., Червенкова С. Г., Андреев В. Н. Подход к разработке методического обеспечения системы управления знаниями предприятия // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2019. № 3. С. 108–111. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/2183> (дата обращения: 07.12.2020).
2. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: The Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation / J. Y. Yeleneva [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2018. Vol. 23. P. 207–216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002>
3. Еленева Ю. Я., Андреев В. Н., Чжиюй Л. Разработка подхода к управлению инвестиционными проектами на промышленных предприятиях на основе оценки рисков // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9, № 2. С. 489–500. doi: <https://doi.org/10.18334/vinec.9.2.40781>
4. Ягопольский А. Г., Домнышев А. А., Воронцов Е. А. Проблемы инновационного развития машиностроения России // Инновации и инвестиции. 2019. № 2. С. 7–9. URL: http://innovazia.ru/upload/iblock/c9d/№2_2019_ИИИ.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
5. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems / S. Y. Kalyakulin [et al.] // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, Issue 12. P. 1049–1052. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120250>
6. Improving the Performance of Multipurpose Machine Tools / M. Z. Khostikoev [et al.] // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, Issue 1. P. 66–68. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19010052>
7. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes / V. A. Timiryazev [et al.] // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, Issue 2. P. 154–157. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19020114>
8. Хорошко Л. Л., Кузнецов П. М. Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 4. С. 711–722. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722>
9. Кондаков А. И. Количественное оценивание подобия технологических операций и его приложения к задачам технологического проектирования // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 7. С. 22–27. doi: <https://doi.org/10.14489/ИВ.2019.07.РР.022-027>
10. Кондаков А. И., Гемба И. Н. Многосвязность предметно-специализированных производственных систем // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 10. С. 34–38. doi: <https://doi.org/10.14489/ИВ.2019.10.РР.034-038>
11. Постановка задач автоматизированного проектирования в САПР ТП / С. Ю. Калякулин [и др.] // СТИН. 2020. № 1. С. 2–5. URL: <http://stinjournal.ru/soderzhanie-stin-2020/> (дата обращения: 07.12.2020).
12. Hole Restoration in situ Using a Mobile Machine Tool, without Disassembly / P. F. Boiko [et al.] // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, Issue 4. P. 345–348. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040038>

13. Kuznetsov P. M., Khoroshko L. L. Digitalization of Multi-Object Technological Projecting in Terms of Small Batch Production // *Inventions*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 38–48. doi: <https://doi.org/10.3390/inventions5030038>
14. Improving Precision in Selective Assembly / V. A. Timiryazev [et al.] // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. P. 499–502. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19060182>
15. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А. В. Цырков [и др.] // *Вестник Мордовского университета*. 2018. Т. 28, № 4. С. 511–522. doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>
16. Бутко А. О., Кузнецов П. М., Хорощко Л. Л. Организация цифрового двойника процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 8. С. 130–144. doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144>
17. Automated Design of Information Processing in Preproduction / S. Y. Kalyakulin [et al.] // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40, Issue 5. P. 413–415. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2005010X>
18. Khostikoev M. Z., Timiryazev V. A., Orlov E. M. Control of the Machining Precision in Thread Cutting // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, Issue 12. P. 1022–1025. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120109>
19. Хаба Э., Тимирязев В. А. Использование аддитивных технологий для изготовления деталей машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 11. С. 136–144. URL: https://www.giab-online.ru/files/Data/2018/11/136_144_11_2018.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
20. Управление жизненным циклом продукции с позиций нового уклада организации производственных систем / А. В. Цырков [и др.] // *Качество и жизнь*. 2019. № 2. С. 28–34. URL: https://www.qj-journal.ru/arc/2019_2_22.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
21. Хаба Э., Тимирязев В. А. Технологические возможности эффективного применения аддитивных технологий для изготовления деталей машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 8. С. 156–162. doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-156-162>
22. Martinov G. M., Kozak N. V. Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AxiOMA Control System // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35, Issue. 7. P. 534–538. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114>
23. Maksimovskii D. E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization // *Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31, Issue 9. P. 870–872. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
24. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов [Электронный ресурс] / В. Ю. Астапов [и др.] // *Труды МАИ*. 2016. Вып. 87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26293291> (дата обращения: 07.12.2020).
25. Кузьмин В. В., Калякулин С. Ю. Этапы преобразования информации при автоматизированном расчете параметров технологических процессов // *Автоматизация. Современные технологии*. 2015. № 9. С. 13–16. URL: https://www.mashin.ru/files/2015/ao_915_web.pdf (дата обращения: 07.12.2020).
26. Дмитриев Б. М. Диагностика технического состояния гибкой производственной системы // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2018. № 1. С. 10–14. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724 (дата обращения: 07.12.2020).
27. Бутко А. О., Кузнецов П. М. Построение информационных моделей в интегрированных системах // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2019. № 3. С. 20–25. URL: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=24794 (дата обращения: 07.12.2020).

Поступила 20.12.2020; одобрена после рецензирования 10.02.2021; принята к публикации 01.03.2021

Об авторах:

Следков Юрий Германович, директор Института № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика» Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6626-7283>, ygs@mai.ru

Хорошко Леонид Леонидович, заведующий кафедрой системного моделирования и автоматизированного проектирования Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Researcher ID: P-2951-2014, khoroshko@mati.ru

Кузнецов Павел Михайлович, профессор кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, Researcher ID: K-8831-2018, profpol@ Rambler.ru

Бутко Антон Олегович, доцент кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования Московского авиационного института (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7933-3582>, Researcher ID: J-8953-2018, mati-tias@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Ю. Г. Следков – научное руководство.

Л. Л. Хорошко – постановка задачи исследования, анализ литературных данных.

П. М. Кузнецов – разработка математического аппарата моделей проектирования.

А. О. Бутко – разработка и описание программных модулей и обеспечения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Prosvirina M.E., Chervenкова S.G., Andreev V.N. Approach to the Development of Methodological Support of the Enterprise Knowledge Management System. *Vestnik MGTU "STANKIN" = Vestnik MSTU "STANKIN"*. 2019; (3):108-111. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/2183> (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Yeleneva J.Y., Kharin A.A., Yelenev K.S., et al. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: The Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018; 23:207-216. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002>
3. Eleneva Yu.Ya., Andreev V.N., Zhiyu L. Development of an Approach to the Management of Investment Projects in Industrial Enterprises on the Basis of Risk Assessment. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki = Russian Journal of Innovation Economics*. 2019; 9(2):489-500. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18334/vinec.9.2.40781>
4. Yagopolskiy A.G., Domnyshev A.A., Vorontsov Ye.A. [Problems of Innovative Development of Mechanic Engineering Industry in Russia]. *Innovatsii i investitsii = Innovation and Investment*. 2019; (2):7-9. Available at: http://innovazia.ru/upload/iblock/c9d/№2_2019_ИИИ.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ.)
5. Kalyakulin S.Y., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems. *Russian Engineering Research*. 2018; 38(12):1049-1052. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120250>
6. Khostikoev M.Z., Danilov I.K., Nabatnikov Yu.F., Timiryazev V.A. Improving the Performance of Multipurpose Machine Tools. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(1):66-68. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19010052>

7. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Konoplev V.N., Vetyugov A.V. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(2):154-157. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19020114>
8. Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M. Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):711-722. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722>
9. Kondakov A.I. Quantitative Evaluation of the Similarity of Technological Operations and Its Application to the Tasks of Technological Design. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* = Handbook. An Engineering Journal with Appendix. 2019; (7):22-27. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.14489/HB.2019.07.PP.022-027>
10. Kondakov A.I., Gemba I.N. Multiconnectivity of Specialized Production Systems. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* = Handbook. An Engineering Journal with Appendix. 2019; (10):34-38. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2019.10.pp.034-038>
11. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Sul'din S.P. [Formulationn of Automated Process-Design Problems in CNC Systems]. *STIN* = Russian Engineering Research. 2020; (1):2-5. Available at: <http://stinyournal.ru/soderzhanie-stin-2020/> (accessed 07.12.2020). (In Russ.)
12. Boiko P.F., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I.K. Hole Restoration in situ Using a Mobile Machine Tool, without Disassembly. *Russian Engineering Research*. 2019; 39(4):345-348. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19040038>
13. Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Digitalization of Multi-Object Technological Projecting in Terms of Small Batch Production. *Inventions*. 2020; 5(3):38-48. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3390/inventions5030038>
14. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Konoplev V.N., et al. Improving Precision in Selective Assembly. *Russian Engineering Research*. 2019; 39:499-502. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19060182>
15. Tsyrvkov A.V., Kuznetsov P.M., Tsyrvkov G.A., et al. Project and Operations Management of Machine-Building Production. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):511-522. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>
16. Butko A.O., Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Creating a Digital Twin of Crushing and Milling Equipment Reconditioning Process. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2020; (8):130-144. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144>
17. Kalyakulin S.Yu., Kuz'min V.V., Mitin E.V., Sul'din S.P. Automated Design of Information Processing in Preproduction. *Russian Engineering Research*. 2020; 40(5):413-415. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X2005010X>
18. Khostikoev M.Z., Timiryazev V.A., Orlov E.M. Control of the Machining Precision in Thread Cutting. *Russian Engineering Research*. 2018; 38(12):1022-1025. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120109>
19. Haba E., Timiryazev V.A. Application of Additive Technologies in Manufacture of Machine Parts. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018; (11):136-144. Available at: https://www.giab-online.ru/files/Data/2018/11/136_144_11_2018.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Tsyrvkov A.V., Yurtsev E.S., Ragutkin A.V., et al. Product Life Cycle Management from the Position of the New Owning of the Organization of Production Systems. *Kachestvo i zhizn* = Quality and Life. 2019; (2):28-34. Available at: https://www.ql-journal.ru/arc/2019_2_22.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Haba E., Timiryazev V.A. Technological Capabilities of Efficient Use of Additive Technologies in Manufacture of Machine Parts. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018; (8):156-162. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-156-162>

22. Martinov G.M., Kozak N.V. Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AxiOMA Control System. *Russian Engineering Research*. 2015; 35(7):534-538. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114>
23. Maksimovskii D.E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870-872. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110082>
24. Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Afshari P., Khoroshko A. Computer Aided Design in the Modeling Mode of Technological Processes Producing the Elements of the Flying Apparatus Constructions. *Trudy MAI = Works of MAI*. 2016; 87. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26293291> (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Kuzmin V.V., Kalyakulin S.Yu. [Stages of Data Conversation for Automated Determination of Technological Process Parameters]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation of Modern Technologies*. 2015; (9):13-16. Available at: https://www.mashin.ru/files/2015/ao_915_web.pdf (accessed 07.12.2020). (In Russ.)
26. Dmitriyev B.M. Diagnosis of Technical State of Flex Production System. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair, Reconditioning, Modernization*. 2018; (1):10-14. Available at: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724 (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Butko A.O., Kuznetsov P.M. Creating of Information Models in Integrated Systems. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*. 2019; (3):20-25. Available at: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=24794 (accessed 07.12.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 20.12.2020; approved after reviewing 10.02.2021; accepted for publication 01.03.2021

About the authors:

Yuriy G. Sledkov, Director of Institute No. 3 “Control Systems, Informatics, and Electric Power Engineering”, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6626-7283>, ygs@mai.ru

Leonid L. Khoroshko, Head of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Researcher ID: P-2951-2014, khoroshko@mati.ru

Pavel M. Kuznetsov, Professor of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, Researcher ID: K-8831-2018, profpol@rambler.ru

Anton O. Butko, Associate Professor of the Chair of System Modeling and Computer-Aided Design, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7933-3582>, Researcher ID: J-8953-2018, mati-tias@yandex.ru

Contribution of the authors:

Yu. G. Sledkov – academic advising.

L. L. Khoroshko – setting study problem, analyzing the literature data.

P. M. Kuznetsov – developing mathematical apparatus for a design model.

A. O. Butko – developing and describing program units and software.

All authors have read and approved the final manuscript.