



## Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники

Л. Л. Хорошко\*, П. М. Кузнецов  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»  
(г. Москва, Российская Федерация)

\*khoroshko@mati.ru

*Введение.* Целью работы является разработка основных положений цифровизации процессов организации диагностики и ремонта сельскохозяйственной техники.

*Материалы и методы.* Спецификой функционирования сельскохозяйственной техники является работа в крайне неблагоприятных условиях, таких как значительное загрязнение абразивом (элементами грунта, пылью и др.), работа в условиях незащищенности от природных условий, напряженная работа в течение смены и др. Вследствие перечисленных факторов регулярно возникает необходимость в организации профилактических и ремонтных работ. Эти факторы в значительной степени удлиняют сроки проведения ремонтно-восстановительных работ, что негативно отражается на эффективности. Проведенный обзор состояния формирования информационной среды для планирования и распределения сельскохозяйственной техники по ремонтным предприятиям показал, что этот вопрос недостаточно проработан. Авторы предлагают свой вариант решения задачи рационального распределения сельскохозяйственной техники для проведения ремонтно-восстановительных работ.

*Результаты исследования.* В данной статье установлены основные положения формирования структурных связей баз данных, используемых при нахождении рациональных решений организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники. В связи с тем, что решение подобной задачи является трудоемким и осуществляется в условиях, динамически меняющихся во времени, предложена математическая модель производственной среды ремонтных организаций, которая реализуется средствами вычислительной техники. Определены требования к моделям, описывающим состояние производственной системы ремонтных организаций. Предложена модель обобщенной производственной системы.

*Обсуждение и заключение.* Разработка, представленная в данной статье, позволяет повысить уровень автоматизации процессов распределения сельскохозяйственной техники по рабочим местам производственной системы ремонтных предприятий. Реализация подхода к планированию и распределению ремонтируемой сельскохозяйственной техники по рабочим местам ремонтных предприятий позволит повысить эффективность ремонтных работ, их качественные параметры, сократить время, оптимизировать структуру технологического оборудования ремонтных предприятий.

**Ключевые слова:** ремонтные работы, технологический процесс, автоматизация, математическая модель, база данных, трудоемкость, производительность

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



*Для цитирования:* Хорошко, Л. Л. Цифровизация процессов восстановления сельскохозяйственной техники / Л. Л. Хорошко, П. М. Кузнецов. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.711-722](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 711–722.

Original article

## Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation

L. L. Khoroshko\*, P. M. Kuznetsov

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

\*[khoroshko@mati.ru](mailto:khoroshko@mati.ru)

*Introduction.* The aim of the study is to develop the basic principles for digitalization of the processes of providing the diagnostics and repair of agricultural machinery.

*Materials and Methods.* The specifics of agricultural machinery functioning are work in worst-on-worst operating conditions, such as significant abrasive contamination (soil particles, dust and other substances), operation in the conditions of exposure to natural climatic conditions, intensive use during the work shift and other factors that result in a regular need for testing and repairing. These factors significantly extend the time of maintenance and repair works. The study of the information environment for planning the distribution of agricultural machinery by repair enterprises has showed that the methods of this activity are not sufficiently developed. The authors propose a solution to the problem of rational distribution of agricultural machinery for repair and rehabilitation.

*Results.* This article describes the main principles for developing structural relationships of databases used to find rational solutions for organizing repair and rehabilitation of agricultural machinery. Due to the fact that the solution of such a problem is time-consuming and is carried out under conditions that dynamically change over time, a mathematical model for the production environment of repair organizations is proposed, which is implemented by means of computer technology. The requirements for models describing the state of the production system of repair organizations are defined. A model of a generalized production system is proposed.

*Discussion and Conclusion.* The model developed by the authors allows increasing the automation level of processes of distributing agricultural machinery by repair enterprises. The implementation of a new approach to planning repair works and distributing repairable agricultural machinery by repair enterprises will increase the efficiency of repair works, improve their quality parameters, reduce time, and optimize the structure of technological equipment of repair enterprises.

**Keywords:** repair works, technological process, automation, mathematical model, database, labor input, productivity

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Khoroshko L.L., Kuznetsov P.M. Digitalization of Agricultural Machinery Rehabilitation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):711-722. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.711-722>

### Введение

При организации ремонтных работ сельскохозяйственной техники (комбайны, тракторы, навесное оборудование, стационарное оборудова-

ние и т. д.) в современных условиях особенно остро стоит вопрос ускорения процессов восстановления работоспособности и возвращения в эксплуатацию. Особенно важна оперативность

возврата в период страды. В этот период на первое место выходит быстрая подготовка и проведение ремонтно-восстановительных работ.

Сельскохозяйственная техника эксплуатируется в тяжелых условиях. Она подвергается действиям атмосферных осадков, на механизмы воздействуют агрессивные и абразивные среды и т. д. Вследствие специфики конструкций в большинстве случаев от их воздействия невозможно защитить подвижные части механизмов. Все это приводит к частому выходу из строя отдельных узлов и агрегатов, что в свою очередь вызывает простой сельскохозяйственной техники.

Для решения задачи увеличения периода работоспособного состояния сельскохозяйственной техники необходимо организовать работу ремонтных предприятий таким образом, чтобы заявки на проведение работ выполнялись с максимальной производительностью и с минимальной себестоимостью. Кроме того, необходимо рационально загружать оборудование ремонтных предприятий с расчетом их готовности для приема максимального количества обращений. Обобщение статистики требуемого оборудования является основополагающим условием получения информации о необходимом объеме и структуре производственных мощностей ремонтных предприятий.

### Обзор литературы

Технологический процесс является частью производственного процесса, содержащего целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда<sup>1</sup>. З. Т. Акашев описывает разработку, направленную на назначение структуры технологических процессов предприятий, их анализ и совершенство-

вание [1]. В своей работе он делает важный вывод о первостепенном значении надежности функционирования оборудования предприятий как залога эффективности их реализации. В ряде работ приводятся рекомендации по повышению эффективности предприятия с помощью созданной технологической стратегии на основе предлагаемых путей ее формирования [2; 3]. В качестве инструмента предлагается всестороннее внедрение вычислительной техники как средства повышения уровня информатизации для развития производственного потенциала промышленного предприятия. Автоматизация всех этапов жизненного цикла изделия является необходимым условием достижения высокого индустриального уровня, особенно актуальными являются этапы технического сопровождения, сервисного обслуживания и ремонта [4]. Актуальность приобретают современные средства автоматизации на основе микропроцессорной техники, например, числовое программное управление (ЧПУ) станками «АксиОМА», позволяющее обеспечить повышение производительности и снижение трудоемкости реализуемых технологических процессов [5]. Особую роль приобретает математическое моделирование систем управления технологическим оборудованием, его элементами для обеспечения заданных параметров обработки<sup>2</sup>.

Проектирование технологических процессов последовательно реализует две однозначно связанные процедуры: структурный и параметрический синтезы. Структурный синтез является трудно формализуемой процедурой, что вызывает большие сложности при автоматизации. Для преодоления возникающих трудностей в настоящее время необходимо освоение основ-

<sup>1</sup> ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определение основных понятий (с Изменением № 1).

<sup>2</sup> Tseng G. W. G. Digital Twin Feed Drive Identification for Virtual Process Planning. Ontario: University of Waterloo, 2018. 101 p. URL: [https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13970/Tseng\\_Ginette.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/13970/Tseng_Ginette.pdf?sequence=5&isAllowed=y) (дата обращения: 18.11.2020).

ных положений проектно-операционного управления производством, что позволит объединить в единый комплекс работы по подготовке, внедрению и сопровождению реализуемых технологических процессов на предприятии [6]. Другая работа посвящена рассмотрению вопросов, связанных с формированием информационного обеспечения системы проектно-операционного управления [7].

На этом этапе большую роль играют вопросы разработки маршрутной технологии в автоматизированном режиме. Здесь необходимо отметить такие работы, как статья В. В. Борзенкова, который описал подход к формированию структур технологических процессов, опираясь на топологические свойства макроэлементов [8]. Д. Е. Максимовский предлагает формировать структуры технологических процессов для деталей класса «корпус» путем автоматизированного выбора технологических баз [9]. Работа коллектива авторов, посвященная проектированию технологических процессов изготовления деталей класса «тело вращения», дает представление о принципе автоматизированной конструкторско-технологической параметризации, что резко снижает трудоемкость проектирования [10]. Все это расширяет сферу использования автоматизации при проектировании технологических процессов.

Взятый за основу принцип выбора комплекта баз при проектировании технологических процессов механической обработки позволяет автоматизировать процессы структурного синтеза широкого диапазона класса деталей [11].

Приведена методика расчета технологического резания в автоматизированном режиме, которая и реализуется в виде подсистемы проектирования технологических процессов [12]. Предлагаемая подсистема может быть полезной при моделировании различных структурных вариантов формирования технологических процессов ремонтно-восстановительных работ.

Рассматриваются вопросы определения величины геометрических погрешностей, образующихся при обработке на металлорежущем оборудовании с ЧПУ, рассматриваются различные расчетные схемы [13].

Изучены проблемы моделирования процессов обработки с целью прогнозирования точности при использовании конкретного металлорежущего оборудования [14].

Другая работа посвящена вопросам моделирования состояния производственной системы машиностроительных предприятий, в частности ремонтных [15].

Созданию программного обеспечения подсистем операционного управления предприятиями посвящены статьи, в которых описываются основные положения работы с проектной информацией при использовании средств вычислительной техники [16; 17]. Рассмотрена оценка качества результатов конструкторско-технологического проектирования при проведении необходимых контрольных проверок [18; 19].

Перечисленные работы подтверждают необходимость решения задачи наращивания информационного обеспечения процессов производства и ремонтно-восстановительных работ, в частности сельскохозяйственных машин. Основой этих процессов является разработка математических моделей, позволяющих в режиме машинного времени обеспечить моделирование, анализ и поиск рациональной конфигурации и загрузки предприятий, включая ремонтно-восстановительные, для сельскохозяйственных машин.

Подытоживая проведенный анализ литературных источников, можно сделать вывод, что существует обширная база научных исследований, посвященных ремонтно-восстановительным работам сельскохозяйственной техники. Ее использование обеспечит снижение трудоемкости восстановительных работ и сократит простой оборудования.

### Материалы и методы

Эффективность функционирования производственной системы любого промышленного предприятия, включая ремонтно-восстановительные, определяется степенью загрузки технологического оборудования, входящего в его состав. С учетом возможного выхода из эксплуатации части технологического оборудования вследствие необходимых регламентных работ, внезапных поломок и т. д. в производственной системе ремонтного предприятия их количество выбирается с некоторым запасом.

С одной стороны, в системе присутствует избыточность производственных ресурсов, с другой, часто возникает ситуация, при которой очередная заявка оказывается отложенной ввиду отсутствия необходимого свободного оборудования. Возникает необходимость рационального распределения производственных ресурсов. Необходим обоснованный состав парка технологического оборудования. При малой загрузке производственной системы выполнение поступающих заявок происходит независимо друг от друга. Однако с увеличением их числа появляется трудность их выполнения вследствие ограниченных возможностей производственной системы предприятия. Отдельно взятое  $i$ -е ремонтное предприятие обладает объемом технологических возможностей  $VR_i$ , который определяется как:

$$VR_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} (vr_{i,j}),$$

где  $m_i$  – количество единиц технологического оборудования в  $i$ -й ремонтной организации;  $vr_{i,j}$  – количество вариантов использования технологических возможностей  $j$ -й единицы технологического оборудования  $i$ -й ремонтной организации.

Полный объем технологических возможностей  $VD_i$  производственной системы  $i$ -го предприятия, требующийся для выполнения плановых работ:

$$VD_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} (\bigcup_{k=1}^{h_{i,j}} vd_{i,j,k}),$$

где  $m_i$  – количество заявок, выполняемых  $i$ -м ремонтным предприятием;  $h_{i,j}$  – количество операций, необходимых для выполнения  $j$ -й заявки;  $vd_{i,j,k}$  – объем технологических возможностей для выполнения  $k$ -й операции  $m_i$  ремонтной заявки.

Если производственные возможности ремонтной организации не обеспечивают даже частичного выполнения заявки, это означает несовпадение множества технологических операций, выполняемых предприятием, и операций, требуемых согласно заявке:

$$VS_i \not\subset VD_i.$$

При частичном совпадении множеств заявка может быть выполнена также частично:

$$VS_i \cap VD_i.$$

В этом случае полное выполнение заявки возможно при использовании возможностей другого ремонтного предприятия. Объединение технологических возможностей нескольких ремонтных организаций позволяет выполнить необходимый объем требуемых работ.

В идеальном случае ремонтная организация способна выполнить весь объем работ заявки при условии совпадения требуемого объема работ и возможностей производственной системы предприятия:

$$VS_i \supset VD_i.$$

Однако и в этом случае возникают ограничения, связанные с занятостью оборудования, выполняющего работы по другим заявкам. На основании сказанного можно сделать вывод о целесообразности объединения в организационное целое свободных частей производственных систем различных ремонтных предприятий. Для реализации такого подхода

необходим оперативный информационный обмен данными между отдельными ремонтными организациями. Как показывает практика, даже внутри одной организации часто отсутствуют в достаточном объеме информационные связи и механизмы их поддержания между отдельными подразделениями.

Производственная система обладает ресурсной базой, которая представляет собой массив технологических возможностей. Совокупность оборудования, незанятая в текущий момент времени по всем ремонтным предприятиям, может рассматриваться как обобщенная производственная система. С учетом текущего планирования работ в производственной системе предприятия объем обобщенной производственной системы в каждый момент времени достаточно хорошо прогнозируется [15].

Множество технологических элементов производственной системы образует массив, характеризующий ее способность выполнять работы по ремонту сельскохозяйственной техники:

$$WO = f\left(\bigcup_{i=1}^n VD_i; K_{vs1}, K_{vs2}, \dots, K_{vsi}, \dots, K_{vsn}\right),$$

где  $K_{vsi}$  – количество одинаковых единиц технологического оборудования  $i$ -го типа.

Из этого выражения следует, что первая составляющая определяет объем разнородных типов технологических операций, тогда как вторая определяет пропускную способность по повторяющимся технологическим операциям.

Состояние обобщенной производственной системы определяется конфигурацией ее структуры и значений параметров составляющих ее элементов и изменяется скачкообразно в момент наступления очередного события. В периоды времени между наступлениями отдельных событий значения параметров могут меняться плавно и описываться аналитическими выражениями в виде их зависимостей от времени.

Событиями могут быть остановка технологического оборудования для проведения регламентных работ, поломка, поступление новой заявки.

Система мониторинга отслеживает поступление очередного события и загружает его в виде соответствующего параметра в математическую модель. В математической модели инициируется перерасчет состояния производственной системы и определяется объем и состав ее свободной части.

### Результаты исследования

При поиске рационального варианта распределения работ согласно поступающим заявкам цифровая модель позволяет верифицировать формируемые варианты загрузки. Может оказаться рациональным использование для выполнения требуемых операций технологического оборудования, непредназначенного напрямую для их проведения. В условиях, когда требуемое по разработанному технологическому процессу оборудование занято другими работами оказывается целесообразным использование оборудования, свободного в текущий период времени. Такой подход, с одной стороны, увеличивает пропускную способность производственной системы, с другой, повышает степень загрузки оборудования. Дополнительные затраты, возникающие при этом, могут оказаться ниже экономических потерь, вызванных ожиданием требуемого технологического оборудования. Общий объем затрачиваемых ресурсов в этом случае:

$$Q_1 = \sum q_{\text{баз}} + \sum q_{\text{доп}},$$

где  $q_{\text{баз}}$  – ресурсы, затрачиваемые на переналадку оборудования базового технологического процесса;  $q_{\text{доп}}$  – ресурсы, затрачиваемые на переналадку оборудования, используемого вне базового технологического процесса.

Целевая функция, описывающая затраты на выполнение ремонтно-восстановительных работ, в обобщенной



системе должна стремиться к минимальной величине:

$$Q_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n K_{1i} Q_{1i} + \sum_{j=1}^m K_{2j} Q_{2j} \min,$$

где  $Q_{\text{сум}}$  – сумма затрат на выполнение ремонтно-восстановительных работ в обобщенной производственной системе;  $Q_1$  – себестоимость проведенных в рамках поступивших заявок на проведение ремонтно-восстановительных работ;  $Q_2$  – дополнительные затраты, обусловленные невыполнением работ по поступившим заявкам в срок;  $K_1, K_2$ , – коэффициенты, отражающие степень значимости соответствующих затрат.

На следующем этапе задачей цифровой математической модели является поиск рациональной структуры производственной системы. Математическая модель построена в виде имитационной модели, структура которой варьируется в зависимости от результатов программирования ее реакции на возмущающие воздействия. Такими воздействиями являются, прежде всего, получение заявок на выполнение ремонтно-восстановительных работ, которые можно отнести к внешним, и внутренние, указанные выше. Так как варьирование параметров схемы носит нематериальный характер и осуществляется в машинном масштабе времени, то результаты моделирования получаются в короткие сроки, что позволяет организовать итерационный процесс нахождения рационального решения. Количество итераций, которые можно осуществить в установленные сроки, достаточно, чтобы получить достоверный результат.

Для обеспечения адекватности цифровой математической модели в реальной системе необходим постоянный мониторинг ключевых точек производственной системы. Для этого необходима организация автоматизированных рабочих мест административного аппарата предприятия, начиная с мастеров участков, начальников цехов и выше. Величины затрат времени на перена-

ладку технологического оборудования определяются статистическими данными или рассчитываются по нормативам. Попутно проводится обследование и совершенствование технологической оснастки для снижения трудоемкости и временных затрат. Назначение технологического оборудования проводится с учетом минимального превышения необходимого объема технологических возможностей.

Цифровая математическая модель обобщенной производственной системы обладает свойствами прогнозируемости, устойчивости, живучести, управляемости и наблюдаемости. Прогнозирование состояния производственной системы на протяжении некоторого перспективного периода времени рассматривается в одной из работ [14]. Под живучестью системы понимается ее свойство сохранять работоспособность при возникновении сценариев, при которых система теряет работоспособность в рамках допустимых условий. Такая ситуация может возникнуть в случае принятия неправильных производственных решений. Обеспечение живучести системы в данном случае достигается последовательной фиксацией промежуточных значений параметров, осуществляемой по факту наступления очередного события. Использование значения параметров предыдущих этапов позволяет вернуть систему в предшествующее состояние, из которого путем выполнения скорректированного производственного решения возможно получение рационального результата. Состояние системы до осуществления процесса управления (предшествующий момент времени) представлено в виде матрицы-столбца:

$$H^- = \begin{pmatrix} h_1^- \\ h_2^- \\ \dots \\ h_n^- \end{pmatrix},$$

где  $h_i^-$  – значение  $i$ -го параметра системы в предшествующий момент времени, на что указывает индекс «-».

Управляемость состоянием производственной системы достигается наличием информационных связей между структурными подразделениями как внутри, так и между отдельными предприятиями. Моделирование информационных связей позволяет оценить степень управляемости и обеспечивает нахождение лучшей структуры.

Если при управлении производственной системой можно сформировать управляющее воздействие  $G(t)$ , переводящее ее из текущего состояния  $H$  в желаемое состояние  $H^+$  в течение заданного интервала времени  $t_0 \leq t \leq t_1$ , такая система рассматривается как управляемая. Параметр  $G(t)$  определяется исходя из накопленного опыта и на основе итерационного подхода при имитационном моделировании.

Для обеспечения наблюдаемости протекания производственных процессов в системе предусмотрена информационная выборка из ее ключевых точек. Выборка осуществляется как в автоматическом режиме, так и через оператора, для чего он снабжен расширенным интерфейсом, позволяющим не только отражать текущее состояние параметров, но и преобразовывать информацию в виде статистических данных, представленных в виде графиков, схем и т. д. Оператор может варьировать локальные параметры части производственной системы, находящейся в его ведении, с целью выбора лучших локальных параметров без нарушения общей стратегии управления.

Значения выходных параметров  $H^+$  последующего состояния системы могут быть получены на основе имеющихся текущих значений параметров  $H$  и информационных преобразующих связей:

$$H^+ = WH.$$

Внутренние информационные связи системы могут быть представлены в виде матрицы  $W$ :

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1i} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2i} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{nq} & w_{n2} & \dots & w_{ni} & \dots & w_{nn} \end{pmatrix}.$$

При отсутствии в матрице  $W$  столбцов, содержащих элементы, равные нулю, система является наблюдаемой. Целевая функция, используемая при нахождении рационального варианта структуры информационных связей производственной системы, описывается формулой:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i(t) = \sum_{i=1}^n (G_i(t) - H_i(t)),$$

где  $\delta_i(t)$  – величина отклонения параметров состояния производственной системы в результате осуществления процесса управления на  $i$ -м этапе;  $G_i(t)$ ,  $H_i(t)$  – заданные и реально полученные параметры системы после завершения процесса управления на  $i$ -м этапе.

Критерием успешного завершения процесса управления на  $i$ -м этапе является величина отклонения параметра целевой функции от нулевого значения. Целевая функция для  $i$ -го выходного параметра с учетом наличия обратных информационных связей имеет вид:

$$H_i(P) = G_i(P) \frac{\sum_{m=1}^j K_m W_i(P)}{W_i(P) \sum_{m=1}^j K_m + 1} \sum_{n=1}^l K_n,$$

где  $W_i(P)$  – передаточная функция изменения  $i$ -го параметра при отсутствии обратной информационной связи;  $K_m$  – показатель степени достоверности информации получаемого от  $m$ -го элемента, охваченного обратной связью;



$K_n$  – показатель степени достоверности информации от  $n$ -го элемента, не охватывающего обратной связи.

Согласно теореме о конечном значении полученное выражение можно представить как:

$$H_i(P) = G_i(P) \lim_{P \rightarrow 0} \left[ \frac{\sum_{m=1}^i K_m W_i(P)}{W_i(P) \sum_{m=1}^i K_m + 1} \sum_{n=1}^L K_n \right] = G_i(P) \sum_{n=1}^L K_n.$$

Отсюда следует, что основным путем повышения эффективности управления является развитие информационных обратных связей в совокупности с итерационным подходом при цифровом математическом моделировании. С увеличением числа итераций эффективность вырабатываемых решений управления увеличивается за счет формирования корректирующих воздействий:

$$\delta_i = G_i(P) \left[ 1 - \sum_{n=1}^L K_n \right] \rightarrow \min.$$

Эффективность управления объектом производственной системой ремонтных предприятий повышается при охватывании итерационным процессом максимального числа элементов производственной системы. Внедрение цифровой математической модели для принятия эффективных процессов управления позволяет осуществлять оптимизационные процессы

при распределении заявок на ремонтно-восстановительные работы сельскохозяйственной техники, упорядочивать их и снижать сроки выполнения.

Разработанная цифровая модель производственной системы описывает ее состояние во времени, благодаря чему появляется возможность прогнозирования ее состояния на интересующий перспективный период времени. Сравнение результатов моделирования, получаемых на различных итерационных этапах, позволяет находить и аккумулировать наиболее удачные варианты производственных решений, а также выработать предложения по обновлению парка технологического оборудования производственных систем ремонтных предприятий.

### Обсуждение и заключение

Предложенный метод является шагом к формированию комплексного подхода к организации ремонтно-восстановительных работ сельскохозяйственной техники. При таком подходе ремонтные предприятия совместно с потребителями этой техники получают возможность формирования графика регламентных работ, исходя из фактического состояния конкретных элементов техники. Одновременно накопление знаний в области удачных производственных решений позволяет упорядочить парк ремонтно-восстановительной техники ремонтных предприятий за счет более полной загрузки технологического оборудования, повышения производительности и снижения трудоемкости проводимых работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Акашев, З. Т.** Методология совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий / З. Т. Акашев // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 17–19. – Рез. англ.
2. Corporate Knowledge Management in Ramp-Up Conditions: the Stakeholder Interests Account, the Responsibility Centers Allocation / J. Y. Yeleneva, A. A. Kharin, K. S. Yelenev [et al.]. – DOI [10.1016/j.cirpj.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.12.002) // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2018. – Vol. 23. – Pp. 207–216. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175558171730072X> (дата обращения: 18.11.2020).

3. **Андреев, В. Н.** Оценка качества производственного менеджмента как инструмент формирования системы управления созданием и развитием конкурентоспособных машиностроительных предприятий / В. Н. Андреев, М. Е. Провирина // Главный механик. – 2010. – № 8. – С. 27–31. – Рез. англ.
4. **Ягопольский, А. Г.** Проблемы инновационного развития машиностроения России / А. Г. Ягопольский, А. А. Домнышев, Е. А. Воронцов // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 2. – С. 7–9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemny-innovatsionnogo-razvitiya-mashinostroeniya-rossii> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
5. **Martinov, G. M.** Numerical Control of Large Precision Machining Centers by the AxIOMA Control System / G. M. Martinov, N. V. Kozak. – DOI 10.3103/S1068798X15070114 // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, Issue 7. – Pp. 534–538. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2F1068798X15070114> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
6. **Кузнецов, П. М.** Целеустремленная среда проектно-операционного управления / П. М. Кузнецов, Г. А. Цыркoв // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2017. – № 4. – С. 10–14. – Рез. англ.
7. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве / А. В. Цыркoв, П. М. Кузнецов, Г. А. Цыркoв [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.511-522 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 511–522. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/75-18-4/565-10-15507-0236-2910-028-201804-3> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
8. **Борзенков, В. В.** Автоматизированное проектирование технологического процесса обработки деталей на основе их макроэлементной структуры / В. В. Борзенков, Н. П. Дьяконова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 1. – С. 18–21. – URL: <http://vkit.ru/index.php/archive-rus/102-01> (дата обращения: 18.11.2020).
9. **Maksimovskii, D. E.** Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization / D. E. Maksimovskii. – DOI 10.3103/S1068798X1109019X // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, Issue 9. – Pp. 870–872. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X1109019X#citeas> (дата обращения: 18.11.2020).
10. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems / S. Yu. Kalyakulin, V. V. Kuzmin, E. V. Mitin, S. P. Suldin. – DOI 10.3103/S1068798X18120250 // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, Issue 12. – Pp. 1049–1052. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2F1068798X18120250#citeas> (дата обращения: 18.11.2020).
11. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза / С. Ю. Калякулин, В. В. Кузьмин, Э. В. Митин [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201801.077-084 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 77–84. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/58-18-1/385-10-15507-0236-2910-028-201801-06> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
12. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов / В. Ю. Астапов, Л. Л. Хорошко, П. Афшари, А. Л. Хорошко // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 87. – 20 с. – URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov\\_khoroshko\\_afshari-payam\\_khoroshko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=87](http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov_khoroshko_afshari-payam_khoroshko_rus.pdf?lang=ru&issue=87) (дата обращения: 18.11.2020).
13. **Stephenson, D. A.** Metal Cutting Theory and Practice / D. A. Stephenson, J. S. Agapiou. – DOI 10.1201/9781315373119. – 3<sup>rd</sup> ed. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 969 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315373119> (дата обращения: 18.11.2020).
14. **Weis, B. X.** From Idea to Innovation. A Handbook for Inventors, Decision Makers and Organizations / B. X. Weis. – DOI 10.1007/978-3-642-54171-1. – Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2015. – 263 p. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-54171-1> (дата обращения: 18.11.2020).
15. **Кузнецов, П. М.** Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования / П. М. Кузнецов, Л. Л. Хорошко. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 195–205. – URL: <http://giab-online.ru/catalog/12886> (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.
16. Algorithms, Mechanisms and Procedures for the Computer-Aided Project Generation System / A. O. Butko, A. P. Briukhovetskii, D. E. Grigoriev, K. S. Kalashnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, Issue 24. – Pp. 14199–14207. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/329683563\\_Algorithms\\_mechanisms\\_and\\_procedures\\_for\\_the\\_computer-aided\\_project\\_generation\\_system](https://www.researchgate.net/publication/329683563_Algorithms_mechanisms_and_procedures_for_the_computer-aided_project_generation_system) (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.

17. Бутко, А. О. Алгоритмы подсистемы автоматизации построения проектов в составе комплекса анализа организационно-технических решений / А. О. Бутко, Д. А. Колесников // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018. – № 3. – С. 3–9. – URL: [http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine\\_news/detail.php?ELEMENT\\_ID=23671&SECTION\\_ID=159&ID=174](http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine_news/detail.php?ELEMENT_ID=23671&SECTION_ID=159&ID=174) (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.

18. Дмитриев, Б. М. Диагностика технического состояния гибкой производственной системы / Б. М. Дмитриев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 1. – С. 10–14. – URL: [http://www.nait.ru/journals/number.php?p\\_number\\_id=2724](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724) (дата обращения: 18.11.2020). – Рез. англ.

19. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes / V. A. Timiryazev, M. Z. Khostikoev, V. N. Konoplev, A. V. Vetyugov. – DOI 10.3103/S1068798X19020114 // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39. – Pp. 154–157. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068798X19020114#citeas> (дата обращения: 18.11.2020).

*Поступила 02.07.2020; принята к публикации 16.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020*

*Об авторах:*

**Хорошко Леонид Леонидович**, заведующий кафедрой системного моделирования и автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), кандидат технических наук, профессор, Researcher ID: P-2951-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Scopus ID: 14039206400, [khoroshko@mati.ru](mailto:khoroshko@mati.ru)

**Кузнецов Павел Михайлович**, профессор кафедры системного моделирования и автоматизированного проектирования ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), доктор технических наук, Researcher ID: K-8831-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, [profpol@ Rambler.ru](mailto:profpol@ Rambler.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Л. Л. Хорошко – научное руководство, постановка задачи исследования, анализ литературных данных; П. М. Кузнецов – разработка математического аппарата моделей проектирования.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Akashev Z.T. Methodology of Improvement and Selection of the Structure of Mining Enterprises Technological Processes. *Tyazheloye mashinostroeniye* = Heavy Engineering. 2005; (12):17-19. (In Russ.)

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. Andreev V.N., Prosvirina M.Ye. Evaluation of Production Management Quality as a Tool for Management System Formation and Development of Competitive Machine-Building Enterprises. *Glavnyy mekhanik* = Chief Mechanical Engineer. 2010; (8):27-31. (In Russ.)

4. Yagopolskiy A.G., Domnyshev A.A., Vorontsov Ye.A. Problems of Innovative Development of Mechanical Engineering in Russia. *Innovatsii i investitsii* = Innovation and Investment. 2019; (2):7-9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-innovatsionnogo-razvitiya-mashinostroeniya-rossii> (accessed 18.11.2020). (In Russ.)

5. 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>

6. Kuznetsov P.M., Tsyrov G.A. The Purposeful Environment of Project and Operational Management. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies of CAD/CAM/CAE. 2017; (4):10-14. (In Russ.)

7. Tsyrov A.V., Kuznetsov P.M., Tsyrov 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.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.511-522>

8. Borzenkov V.V., Dyakonova N.P. [Automated Design of Technological Process of Parts Processing on the Basis of Their Macroelement Structure]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = Bulletin of Computer and Information Technologies. 2005; (1):18-21. Available at: <http://vkit.ru/index.php/archive-rus/102-01> (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
9. 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/S1068798X1109019X>
10. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. 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>
11. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Designing the Structure of Technological Processes Based on Synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):77-84. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>
12. Astapov V.Yu., Khoroshko L.L., Afshari P., et al. [CAD at Modeling of Modes of Technological Processes of Manufacture of Elements of Aircraft Constructions]. *Trudy MAI* = Works of MAI. 2016; 87. 20 p. Available at: [http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov\\_khoroshko\\_afshari-payam\\_khoroshko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=87](http://trudymai.ru/upload/iblock/207/astapov_khoroshko_afshari-payam_khoroshko_rus.pdf?lang=ru&issue=87) (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
13. Stephenson D.A., Agapiou J.S. Metal Cutting Theory and Practice. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press; 2016. 969 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315373119>
14. Weis B.X. From Idea to Innovation. A Handbook for Inventors, Decision Makers and Organizations. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin; 2015. 263 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54171-1>
15. Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Digitization of Crushing and Milling Equipment Reconditioning. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* = Mining Informational and Analytical Bulletin. 2019; (10):195-205. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205>
16. Butko A.O., Briukhovetskii A.P., Grigoriev D.E., et al. Algorithms, Mechanisms and Procedures for the Computer-Aided Project Generation System. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017; 12(24):14199-14207. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/329683563\\_Algorithms\\_mechanisms\\_and\\_procedures\\_for\\_the\\_computer-aided\\_project\\_generation\\_system](https://www.researchgate.net/publication/329683563_Algorithms_mechanisms_and_procedures_for_the_computer-aided_project_generation_system) (accessed 18.11.2020). (In Eng.)
17. Butko A.O., Kolesnikov D.A. [Algorithms of the Subsystem of Project Construction Automation as Part of the Complex Analysis of Organizational and Technical Solutions]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* = Information Technologies in Design and Manufacturing. 2018; (3):3-9. Available at: [http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine\\_news/detail.php?ELEMENT\\_ID=23671&SECTION\\_ID=159&ID=174](http://izdat.ntckompas.ru/editions/magazine_news/detail.php?ELEMENT_ID=23671&SECTION_ID=159&ID=174) (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
18. 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](http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=2724) (accessed 18.11.2020). (In Russ.)
19. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Konoplev V.N., et al. Self-Programming of the Tool Trajectory in CNC Lathes. *Russian Engineering Research*. 2019; 39:154-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19020114>

Received 02.07.2020; revised 16.09.2020; published online 30.12.2020

*About the authors:*

**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.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: P-2951-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7487-8997>, Scopus ID: 14039206400, [khoroshko@mati.ru](mailto: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), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: K-8831-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9237-3848>, [profpol@rambler.ru](mailto:profpol@rambler.ru)

*Contribution of the authors:*

L. L. Khoroshko – scientific guidance, formulation of research task, literature data analysis;  
P. M. Kuznetsov – mathematical apparatus development of design models.

*All authors have read and approved the final manuscript.*