ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(10):195-205

УДК 621.914 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

П.М. Кузнецов[1], Л.Л. Хорошко[1]

[1] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, e-mail: profpol@rambler.ru

Аннотация: Черные металлы и их сплавы — основа машиностроительного производства. Основой технологической цепочки получения сырья являются горно-обогатительные комбинаты. Условия работы оборудования комбинатов, связанные с их большими массогабаритными характеристиками, высокими нагрузками на агрегаты и узлы приводят к необходимости их регулярного ремонта и обслуживания. Проведение ремонтно-восстановительных работ осуществляется технологическим оборудованием, монтируемым непосредственно возле восстанавливаемого оборудования. Сокращение сроков монтажа и демонтажа технологического оборудования может быть достигнуто выбором его рациональной конфигурации. Рассмотрено решение этой задачи путем цифровизации проводимых ремонтно-восстановительных работ. Ремонтно-восстановительное оборудование распределено по различным обслуживающим организациям, что тормозит согласованность проектных работ выбора рациональной конфигурации устанавливаемого оборудования. Большое число возможных вариантов компоновки требует поиска наилучшего из них. Выбор рационального технологического маршрута позволяет снизить объем операций разналадки-наладки. Процесс цифровизации предусматривает формирование математической модели обобщенной производственной системы, что позволяет осуществлять постоянный контроль последующих производственных решений. Положительный эффект достигается за счет оптимизации структуры технологического процесса, состава монтируемого технологического оборудования, снижения трудоемкости выполнения наладочных работ, ускорения их проведения, снижения их себестоимости. Рассмотрены вопросы организации информационных обратных связей в математической модели обобщенной производственной системы, позволяющих за счет многократных итераций находить рациональные варианты конфигурации монтируемого оборудования.

Ключевые слова: горно-обогатительный комбинат, ремонтно-восстановительные работы, технологическое оборудование, производственная система, цифровизация, математическая модель, информационная обратная связь, оптимизация.

Для цитирования: *Кузнецов П.М., Хорошко Л.Л.* Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 195–205. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205.

Digitization of crushing and milling equipment reconditioning

Kuznetsov P.M.[1], Khoroshko L.L.[1]

[1] Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: profpol@rambler.ru

© П.М. Кузнецов, Л.Л. Хорошко. 2019.

Abstract: Ferrous metals and alloys are the foundation of the modern machine building industry and enjoy an ever increasing demand. The production chain starts with mining and processing plants. Heavy-duty service of heavy and large mining and processing machines under high loads requires that assemblies and units of the equipment undergo regular maintenance and repair. Repair and renewal operations are implemented using technological equipment assembled directly nearby the machinery to be reconditioned. It is possible to shorten the time of assembling and disassembling of technological equipment by selecting its rational configuration. This article discusses this problem solving through digitization of repair and renewal operations. The repair and renewal equipment is distributed between various services, which worsens coordination in selection of rational configuration of the equipment. It is necessary to pick the best of the numerous alternative arrangements. Furthermore, the rational operation-routing sequence selected will cut down imbalance–debugging operations, which may be rather efficient considering high labor content of these operations. Digitization includes mathematical modeling of generalized production system to enable permanent control over further production solutions. The positive effect is reached owing to optimization of process flow structure and configuration of technological equipment, reduced labor content and acceleration of debugging operations, as well as cost saving of the latter. Arrangement of the information feedback in the mathematical model of the generalized production system is considered. These feedbacks, by means of multiple iterations, will make it possible to find rational variants of configuration of technological equipment.

Key words: mining and processing plant, repair and renewal operations, technological equipment, production systems, digitization, mathematical model, information feedback, optimization.

For citation: Kuznetsov P.M., Khoroshko L.L. Digitization of crushing and milling equipment reconditioning. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):195-205. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-195-205.

Введение

В современном машиностроительном производстве потребление черных металлов постоянно возрастает, т.к. черные металлы являются основным конструкционным материалом. Они составляют до 90% общемирового производства всех металлов, поэтому уменьшение производственных затрат на выпуск черных металлов существенно снизит себестоимость машиностроительного производства изделий. Одним из важнейших этапов процессов получения руды является ее измельчение на дробилках и мельницах на горно-обогатительных комбинатах. Здесь используется и другое оборудование, например, дешламаторы МД-9000, вакуум-фильтры ДШ-100 сепараторы ПБМ 1200х3000 и др.

При работе конусных дробилок броня работает под большими нагрузками. Циклические нагрузки достигают величин порядка 100—190 т, что является основной причиной отказов узлов и агрегатов, приводящих к простоям оборудования горно-обогатительных комбинатов. Одна смена простоя оборудования крупного дробления означает прекращение работ всей технологической цепочки и недопоставку на металлургический комбинат более 20 000 м^3 массы руды, что составляет 8,5% суточного объема поставки руды в России.

Особенностью проведения ремонтно-восстановительных работ оборудования горно-обогатительного комбината является невозможность перемещения отдельных элементов оборудования в ремонтные организации. Вследствие их больших габаритов и массы, ремонтно-восстановительные работы приходится проводить непосредственно на месте установки оборудования при его частичной разборке.

Возникает актуальная задача организации технологического процесса, при

котором трудоемкость осуществления ремонтно-восстановительных работ была бы минимальной, а время простоя оборудования было бы сокращено.

Обзор

Под технологическим процессом будем понимать (ГОСТ 3.1109-73) часть производственного процесса, непосредственно связанную с последовательным изменением состояния объекта производства. З.Т. Акашев [1] описывает методологию совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий. Отмечается, что их эффективность во многом зависит от надежного функционирования оборудования горнодобывающих предприятий.

В работе [2] отмечается важность создания технологической стратегии предприятия, определяющей эффективность работы промышленного предприятия, рассматривается модель ее формирования. Производственный потенциал промышленного предприятия определяется в частности уровнем используемого автоматического оборудования. В работе [3] рассматриваются вопросы применения современных систем числового программного управления крупногабаритным технологическим оборудованием, в частности, системы AxiOMA, позволяющей снизить трудоемкость и повысить производительность обработки в автоматическом режиме сложно профильных элементов конструкций.

В основе проектирования технологического процесса лежат две неразрывно связанные процедуры — процедуры структурного и параметрического синтеза. С учетом сложности формализации решений задач структурного синтеза предлагаются частные подходы, применимые к конкретным случаям [4]. Для оперативного управления производством в ряде работ рассматриваются методы получения необходимой для этого информации [5]. Перспективным является организация проектно-операционного управления [6], позволяющего интегрировать в единый процесс этапы подготовки и реализации производственных процессов на предприятии. Рассматриваются методы организации для этих целей информационных баз данных в среде проектно-операционного управления [7—11].

Особое значение в этой связи приобретает формирование структуры маршрутной технологии. В.В. Борзенков в работе [12] предлагает формирование структуры на основе топологических свойств макроэлементов, структуры деталей в САПР ТП. Д.Е. Максимовский в работе [13] рассматривает способы выбора технологических баз для корпусных деталей в автоматизированном производстве с использованием САПР ТП.

С.Ю. Калякулин [14] предлагает систему автоматизированной конструкторско-технологической параметризации процессов изготовления деталей типа тел вращения. Использование предложенной системы позволяет проектировать процессы технологической подготовки для производства деталей указанного класса.

С.В. Байбаков [15] разработал методику выбора комплектов технологических баз на операциях механической обработки машиностроительных деталей.

Для решения вопросов цифровизации технологических процессов в работе [16] рассматриваются вопросы построения подсистемы автоматизированного проектирования для расчета технологических режимов резания. Такая подсистема позволяет моделировать процессы ремонтно-восстановительных работ при различных структурных вариантах построения технологического процесса.

Таким образом, актуальной оказывается задача построения цифровой модели производственной системы с воз-

можностями вариативного структурного моделирования с целью нахождения оптимального варианта построения ее структуры. Это позволит снизить простои оборудования горно-обогатительных комбинатов и повысить их производительность.

Материалы и методы

Функционирование отдельных производственных систем ремонтных организаций характеризуется, в частности, степенью их загрузки. В реальных условиях при выполнении ремонтно-восстановительных работ машин и агрегатов горно-обогатительных комбинатов неизбежен простой технологического оборудования. Это объясняется неритмичностью прохождения плановых ремонтно-восстановительных работ, некоторым неизбежным запасом по количеству и технологическим возможностям технологического оборудования однозначно, обеспечивающего поступающие заявки на обслуживание и др. Все это приводит к появлению определенного объема избыточности производственных ресурсов. Объем и состав ресурсов, а также характер их изменения (например, модернизация) легко отслеживаются во времени.

При выполнении работ, связанных с очередными заказами, производственные процессы протекают независимо друг от друга. Следовательно, объем технологического оборудования для выполнения каждого заказа должен обладать необходимыми технологическими возможностями. В *i*-й ремонтной организации ($1 \le i \le n$) выполняется m_i видов ремонтно-восстановительных работ. Для выполнения такого объема работ организация должна обладать технологической гибкостью, позволяющей реализовать соответствующие технологические процессы.

Технологическая гибкость VS_i *i*-й ремонтной организации характеризуется объемом технически допустимых возможностей переналадки технологической системы и выражается следующей зависимостью:

$$VS_i = \bigcup_{j=1}^{n_{moi}} \left(\bigcup_{k=1}^{q_{i,j}} vs_{i,j,k} \right), \qquad (1)$$

где n_{moi} — количество единиц технологического оборудования в *i*-й ремонтной организации; $q_{i,j}$ — множество значений технологических возможностей *j*-й единицы оборудования, достижимых при его переналадке; $vs_{i,j,k}$ — значение параметра технологической возможности единицы оборудования.

Технологически необходимая гибкость VD_i технологической системы характеризуется значениями требуемых параметров, необходимых для выполнения объема заданных работ.

$$VD_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} \left(\bigcup_{k=1}^{h_{i,j}} vd_{i,j,k} \right), \qquad (2)$$

где $h_{i,j}$ — количество требуемых технологических операций для выполнения j-того задания; $vd_{i,j,k}$ — множество необходимых технологических операций для выполнения m_i ремонтных заданий.

Соответственно, для случая, когда объем технологических возможностей ремонтной организации не позволяет выполнить даже частично объем задания на ремонтные работы, можно записать следующее выражение:

$$VS_i \not\subset VD_i \qquad (3)$$

Для случая, когда объем технологических возможностей ремонтной организации позволяет выполнить некоторую часть всего объема задания на ремонтные работы, выражение принимает вид:

$$VS_i \cap VD_i \qquad (4)$$

Для случая, когда объем технологических возможностей ремонтной организации позволяет выполнить весь объем задания на ремонтные работы, выражение имеет вид:

$$VS_i \supset VD_i \qquad (5)$$

Обычно отдельные ремонтные организации обладают возможностями, относящимися ко второму и третьему случаям. Тем не менее, как показывает практика, нередко оказывается невозможным оперативно начать работы по восстановлению вследствие занятости части производственных ресурсов уже начатыми, но не законченными работами. В этих условиях оказывается возможным заимствование не достающих ресурсов из других подразделений или организаций. Однако реализация такого подхода затруднена по организационным причинам, в основе которой лежит информационная разобщенность указанных организаций.

Каждую производственную систему ремонтной организации можно представить в виде массива ресурсов, определяющих ее технологические возможности. В каждый момент времени определенная часть ресурсов оказывается занятой выполнением заданий на проведение текущих ремонтно-восстановительных работ оборудования, при том оставшаяся часть ресурсов оказывается незагруженной. С течением времени соотношение указанных ресурсов меняется, причем эти изменения прогнозируются [17].

Следовательно, в каждый момент времени свободные ресурсы в совокупности представляют собой технологическую систему, способную выполнять поступающие заявки на проведение ремонтно-восстановительных работ. Информация о составе и технологических возможностях этой части представляется в виде совокупности математических моделей представляющих цифровую модель свободных ресурсов производственной системы ремонтной организации.

Таким образом, при объединении свободных ресурсов различных подразделений одной ремонтной организации и даже разных ремонтных организаций оказывается возможной цифровая компоновка обобщенной производственной системы с широким набором технологических возможностей. Такая производственная система позволяет решать практически любые задачи обслуживания и ремонта элементов горного оборудования.

Объединенная производственная система выполняет плановые работы, преимущественно профилактического характера, которые заранее определены. Одновременно возникает потребность в выполнении внеплановых работ, связанных с внезапным выходом элементов горного оборудования из строя.

Производственные возможности объединенной производственной системы:

$$WO = f\left(\bigcup_{i=1}^{n} VD_i; K_{vs1}, K_{vs2}, \cdots, K_{vsi}, \cdots, K_{vsn}\right), \quad (6)$$

где K_{vsi} — объем схожих по технологии выполнения работ, которые можно совместить ($1 \le i \le n$).

Добавление в обобщенную производственную систему элементов, имеющих разнотипные технологические возможности, увеличивает первую составляющую производственной мощности, а добавление элементов с однотипными — вторую.

Полный объем производственных возможностей является постоянной величиной и меняется лишь при модернизации ремонтного оборудования, его утилизации или приобретении нового. Текущие свободные производственные возможности обобщенной системы представляют собой массив переменной мощности. Мощность массива зависит от общего объема производственных возможностей за исключением объема, занятого плановыми работами, и объема, занятого внеплановыми работами.

Весь период времени функционирования производственной системы можно представить в виде совокупности отдельных отрезков времени $t_i - t_{i+1}$, где t_i —

время появления предыдущего события, а t_{i+1} — время наступления последующего события. Под событием будем понимать момент поступления очередной заявки на проведение ремонтно-восстановительных работ или завершения выполнения предыдущей. Изменение мощности происходит в момент наступления очередного события и носит скачкообразный характер.

Информация об очередном наступающем событии учитывается цифровой моделью, в которой осуществляется пересчет текущего объема свободной производственной мощности и временных затрат. Эти данные позволяют осуществлять перспективное планирование возможной загрузки ремонтно-восстановительного оборудования.

Основной задачей модели производственной системы является рациональное распределение заявок в масштабах свободной части обобщенной производственной системы. Если последовательность выполнения ремонтно-восстановительных работ предполагает монтаж нового оборудования, то это влечет дополнительные затраты ресурсов

$$Q_1 = \sum q_{устан.} + \sum q_{неустан.} \qquad (7)$$

где $q_{устан.}$ — ресурсы, затрачиваемые на переналадку уже установленного оборудования; $q_{неустан.}$ — ресурсы, затрачиваемые на установку и наладку другого оборудования.

Затрата суммарных ресурсов по всей обобщенной производственной системе представляет собой некую величину, которую необходимо минимизировать:

$$Q_{сум.} = K_1 Q_1 + K_2 Q_2 \to \min \ , \qquad (8)$$

где $Q_{сум.}$ — суммарные затраты на проведение всех ремонтно-восстановительных работ; Q_1 — затраты при проведении ремонтно-восстановительных работ установленного оборудования; Q_2 — потери, вызванные нарушением сроков выполнения работ; K_1, K_2 — коэффициенты значимости соответствующих затрат.

Следующей задачей оказывается задача формирования рациональной структуры обобщенной производственной системы. Информация о структуре производственной системы содержится в памяти ЭВМ и представляет собой виртуальную производственную систему. Так при формировании наборов производственных ресурсов для выполнения конкретных ремонтно-восстановительных работ информация о них носит нематериальный характер, появляется возможность находить рациональные решения в короткие сроки, используя методы оптимизации, в частности, итерационные.

Используя формулу (8), можно осуществить поиск рациональных вариантов по критерию минимизации затрат. Для этого используется имитационное моделирование, т.к. процессы, происходящие в производственной системе, как указывалось выше, носят нелинейный характер, кроме того, система является нестационарной вследствие трудно предсказуемого возникновения неисправностей ремонтно-восстановительного оборудования.

Для получения достоверных данных процесса моделирования функционирования системы осуществляется регулярный мониторинг текущего состояния производственной системы и информации о последующих событиях. Информация о затратах времени на переналадку оборудования формируется статистическими данными о предшествующих подобных работах. Одновременно проводится обследование и совершенствование технологической оснастки с целью снижения трудоемкости работы с ней.

При проектировании производственного процесса выполнения конкретной работы важным является выбор оборудования с минимальным объемом технологических возможностей, удовлетворяю-

щих требованиям поступившей конкретной заявки. Невыполнение этого условия приводит к ограничению возможностей свободной части обобщенной системы, необходимой для выполнения последующих работ.

При проектировании процессов ремонтно-восстановительных работ формируется массив типовых решений, который существенно ускоряет и облегчает проектирования. На базе этих решений формируется таблица применяемости, что позволяет формировать проектную документацию в автоматическом режиме. Принятие окончательного решения осуществляется на основе анализа результатов применения нескольких схожих по структуре процессов по критерию минимизации производственных и временных ресурсов.

Модель функционирования обобщенной производственной системы должна обладать прогнозируемостью, устойчивостью, живучестью, управляемостью и наблюдаемостью. Набор представленных характеристик обеспечивает надежное функционирование системы в течение заданного периода времени. Прогнозирование результатов работы математической модели в течение заданного периода времени было рассмотрено в работе [15].

Под устойчивостью функционирования математической модели понимается ее способность формировать рабочие варианты производственных процессов при различных сочетаниях возникающих в системе событий. Устойчивость системы обеспечивается информационной насыщенностью различными вариантами решений, успешно использованными при проведении предыдущих работ.

Свойство живучести математической модели выражается в способности математической модели формировать практически реализуемые варианты производственных процессов при значительном сокращении объема доступных свободных ресурсов обобщенной производственной системы. Система активно противодействует любым дестабилизирующим факторам, продолжая успешно функционировать в этих условиях. При отсутствии возможности использования лучшего варианта производственного оборудования система предполагает использование альтернативного, при этом время выполнения работ увеличивается.

Если по какой-либо причине дальнейшее развитие процесса моделирования оказывается невозможным, в ней предусмотрена возможность отката на несколько шагов назад. Для реализации этой возможности организовано резервное копирование параметров промежуточных этапов, т.е. фиксация состояния системы в соответствующие моменты времени. Обычно их назначают во время наступления очередного события.

Предшествующее состояние системы описывается матрицей:

$$H^{-} = \begin{vmatrix} h_1^{-} \\ h_2^{-} \\ \dots \\ h_n^{-} \end{vmatrix}, \qquad (9)$$

где h_i^{-} — i-й параметр, характеризующий состояние системы в предшествующий момент времени (на что указывает верхний индекс).

Управляемость процессами моделирования определяется наличием адекватного реагирования на любые виды возмущений, происходящих в реальной производственной системе. К ним относятся: выход отдельных единиц оборудования из строя, проведение регламентных работ, поступление в различных сочетаниях заявок на проведение работ и др.

Рассматриваемая система обладает свойством управляемости так как существует значение управляющего параметра $G(t)$ на интервале времени $t_0 \le t \le t_1$, переводящий ее из состояния

$$Z(t_0) = z_0$$

в состояние

$$Z(t_1) = z_1$$

за конечное время.

Параметр $G(t)$ изначально определен, т.к. формирование обобщенной производственной системы происходит исходя из возможности управления состоянием любой единицы производственной системы.

Наблюдаемость процессов моделирования определяется, прежде всего, наличием расширенных интерфейсов вывода ситуационных параметров в ключевых точках производственной системы. При необходимости просмотра результатов локальных вариативных процессов в них оператор может инициировать просмотр группы необходимых параметров с целью нахождения локального рационального решения.

Машинный масштаб времени функционирования математической модели, принципиально меньший по своей величине реального масштаба, дает возможность практически сразу получать готовые решения, что позволяет осуществлять итерационные процессы генерации альтернативных вариантов решений. Выбор рационального варианта может осуществляться как в автоматизированном, так и в автоматическом режимах.

С учетом текущего состояния системы, характеризуемого набором параметров z_i, можно определить значения выходных параметров h_i, характеризующих выход системы

$$H = WZ. \qquad (10)$$

Матрица W характеризует совокупность внутренних связей системы:

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

Система наблюдаема, если матрица W не содержит столбцов с элементами, равными нулю.

Результативность функционирования модели определяется следующими факторами:

1. Допустимая глубина прогноза, при которой достоверность информации находится в допустимых пределах;

2. Величина периода жизненного цикла выполняемой работы;

3. Технические характеристики каждой единицы оборудования;

4. Продолжительность периода доступа свободных единиц оборудования и начало периода доступа занятых в текущий период;

5. Приоритет поступивших заявок на проведение ремонтно-восстановительных работ.

Под периодом жизненного цикла выполняемой работы понимается период времени от момента начала монтажа ремонтного оборудования, используемого в этой работе, до его полного демонтажа, после которого оно может быть использовано для выполнения следующих работ.

Работы, выполняемые ремонтными предприятиями, можно условно разделить на две группы: зависимые друг от друга и независимые. К первым относятся работы на предпроектных этапах, которые взаимосвязаны получаемыми результатами. В этом случае предпроектная подготовка должна осуществляться с учетом возможных вариантов структур технологических последовательностей проведения работ, при которых в разное время задействуется то или иное оборудование.

Сложность автоматизации решения задач структурного синтеза, вызванная трудностью ее формализации, обходится путем применения ручного (эвристического) проектирования и накопления информации о рабочих вариантах структур в базах данных. В качестве критерия оценки вариантов структур используется формула:

$$\sum_{i=1}^{n}\delta_i(t)=\sum_{i=1}^{n}\left(G_i(t)-H(t)\right), \quad (12)$$

где $\delta_i(t)$ — отклонение результатов проектирования от ожидаемых для *i*-й работы; $G_i(t)$, $H_i(t)$ — ожидаемые результаты проектирования и реально полученные после завершения процесса проектирования.

При проектировании оптимальных процессов ремонтно-восстановительных работ значение функции (12) стремится к нулю. Целевая функция для *i*-го выходного параметра имеет вид:

$$H_i(P)=G_i(P)\frac{\sum_{m=1}^{j}K_mW_i(P)}{W_i(P)\sum_{m=1}^{j}K_m+1}\sum_{n=1}^{L}K_n, \quad (13)$$

где $W_i(P)$ — функция преобразования текущей информации по *i*-му параметру без учета действия обратной информационной связи; K_m — достоверность информации от элементов, охваченных обратной связью; K_n — достоверность информации от элементов, не охваченных обратной связью.

Применяя теорему о конечном значении, можно записать:

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

$$=G_i(P)\sum_{n=1}^{L}K_n \quad (14)$$

Из полученного выражения следует, что основным механизмом повышения качества проектирования является итерационность процесса моделирования функционирования производственной системы. С увеличением числа итераций качество проектных работ увеличивается за счет коррекционных воздействий:

$$\delta_i=G_i(P)\left[1-\sum_{n=1}^{L}K_m\right]\to\min, \quad (15)$$

Отсюда следует, что качество функционирования обобщенной производственной системы ремонтных предприятий повышается, если итерационный процесс при математическом моделировании охватывает максимальное число элементов производственной системы.

При внедрении цифровизации в процессы проектно-операционного управления производственной системой существенно расширяются возможности производственных систем предприятий ремонтно-восстановительного назначения. Процессы оптимизации загрузки элементов производственной системы упорядочивают выполнение ремонтно-восстановительных работ, во многих случаях снижают трудоемкость их выполнения и сокращают сроки выполнения.

Использование математической модели функционирования производственной системы позволяет оперативно прогнозировать результаты ее работы на длительный перспективный период. Анализ результатов моделирования позволяет не только создавать базы данных удачных производственных решений для последующего использования, но и сформулировать рекомендации для модернизации и обновления парка оборудования производственных систем ремонтных предприятий.

Дальнейшим перспективным направлением развития цифровизации проектно-операционного управления является информационная интеграция производственных систем ремонтно-восстановительных предприятий с производственными системами горно-обогатительных комбинатов. Тогда открываются возможности для автоматизации планирования профилактических работ. Это позволит, например, зная график интенсивности загрузки производственного оборудования комбината, проводить необходимые работы, не дожидаясь выхода его из строя, обеспечивая минимальные потери от его вынужденного простоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акашев З.Т.* Методология совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий // Тяжелое машиностроение. — 2005. — № 12. — С. 17—19.

2. *Grigorev S.N.*, *Eleneva Yu.Ya.*, *Andreev V.N.* Technological capital: a criterion of innovative development and an object of transfer in the modern economy // Procedia CIRP, 2014, vol. 20, pp. 56—61.

3. *Martinov G.M.*, *Kozak N.V.* Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA contol system // Russian Engineering Research, 2015, vol. 35, is. 7, pp. 534—538.

4. *Кузнецов П.М.* Поддержка стадии изготовления изделия в условиях мелкосерийного и единичного производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2014. — № 1. — С 40—44.

5. *Кузнецов П.М.*, *Цырков Г.А.* Целеустремленная среда проектно-операционного управления // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2017. — № 4. — С. 10—14.

6. *Lopota A.V.*, *Tsyrkov A.V.*, *Tsyrkov G.A.* Methods and Tools of Project-Operational Management of an Machine-Building Enterprise / 2017 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS 2017 7751937, pp. 536—539.

7. *Tsyrkov A.V.*, *Tsyrkov G.A.* Intelligent components to support workflow in the design and production activities / 2017 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS 2017 7751937, pp. 764—768. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085942 (дата обращения: 11.05.2017).

8. *Dean A.L.* Data Privacy and Integrity Requirements for Online Data Management Systems. Sigfidet Workshop, 1971, pp. 279—298.

9. *Date C.J., Hopewell P.* File Definition and Logical Data Independence. Sigfidet Workshop, 1971, pp. 117—138.

10. *Date C.J., Hopewell P.* Storage Structure and Physical Data Independence. Sigfidet Workshop, 1971, pp.139—168.

11. *ISO 10303: Industrial automation system and integration: Product data representation and exchange: Integrated generic resources. Part 42. Geometric and topological representation*. G.: ISO, 1998, 451 p.

12. *Борзенков В.В.* Топологические свойства макроэлементов, описывающих структуру деталей в САПР ТП механической обработки / Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием. — Смоленск, 2013. — С. 18—21.

13. *Maksimovskii D.E.* Automation of process design by design-technological parameterization // Russian Engineering Research. 2011, vol. 31, no 9. pp. 870—872. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24009566.

14. Kalyakulin S.Y. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No 11. pp. 713 — 715. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24009566.

15. *Байбаков С.В.* Система комплексной автоматизации технологической подготовки производства // Программные продукты и системы. — 2010. — № 1. — С. 28—32.

16. *Астапов В.Ю.*, *Хорошко Л.Л.*, Афшари Паям, *Хорошко А.Л.* САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. — Выпуск № 87. — С. 7.

17. *Цырков А.В.*, *Кузнецов П.М.*, *Цырков Г.А.*, *Ермохин Е.А.*, *Москвин В.К.* Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве // Вестник Мордовского университета. — 2018. — Т. 28. — № 4. — С. 511—522. МАБ

REFERENCES

1. Akashev Z.T. Methodology of improving and selecting structure of process flows in mines. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2005, no 12, pp. 17—19. [In Russ].

2. Grigorev S.N., Eleneva Yu.Ya., Andreev V.N. Technological capital: a criterion of innovative development and an object of transfer in the modern economy. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 20, pp. 56—61.

3. Martinov G. M., Kozak N. V. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA contol system. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, is. 7, pp. 534—538.

4. Kuznetsov P. M. Manufacturing stage support under conditions of small-batch and individual production. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*. 2014, no 1, pp. 40—44. [In Russ].

5. Kuznetsov P. M., Tsyrkov G. A. Purposeful environment of project–operational management. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*. 2017, no 4, pp. 10—14. [In Russ].

6. Lopota A. V., Tsyrkov A. V., Tsyrkov G. A. Methods and Tools of Project-Operational Management of an Machine-Building Enterprise. 2017 I*EEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS* 2017 7751937, pp. 536—539.

7. Tsyrkov A. V., Tsyrkov G. A. Intelligent components to support workflow in the design and production activities. 2017 *IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS* 2017 7751937, pp. 764—768. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085942 (дата обращения: 11.05.2017).

8. Dean A. L. Data Privacy and Integrity Requirements for Online Data Management Systems. Sigfidet Workshop, 1971, pp. 279—298.

9. Date C. J., Hopewell P. *File Definition and Logical Data Independence*. Sigfidet Workshop, 1971, pp. 117—138.

10. Date C. J., Hopewell P. *Storage Structure and Physical Data Independence*. Sigfidet Workshop, 1971, pp.139—168.

11. *ISO 10303: Industrial automation system and integration: Product data representation and exchange: Integrated generic resources. Part 42. Geometric and topological representation*. G.: ISO, 1998, 451 p.

12. Borzenkov V. V. Topological properties of macroelements describing structure of parts in automatic design of process flows of machine conversion. *Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Smolensk, 2013, pp. 18—21. [In Russ].

13. Maksimovskii D. E. Automation of process design by design-technological parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011, vol. 31, no 9. pp. 870—872. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24009566.

14. Kalyakulin S. Y. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system. *Russian Engineering Research*. 2014. Vol. 34. No 11. pp. 713 — 715. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24009566.

15. Baybakov S. V. Integrated automation of process design. Programmnye produkty i sistemy. 2010, no 1, pp. 28—32. [In Russ].

16. Astapov V. Yu., Khoroshko L. L., Afshari Payam, Khoroshko A. L. Automatic design system in modeling modes of process flows in manufacture of structural elements of airborn vehicles. *Trudy MAI*. No 87, pp. 7. [In Russ].

17. Tsyrkov A. V., Kuznetsov P. M., Tsyrkov G. A., Ermokhin E. A., Moskvin V. K. Project–operational management in machine building industry. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2018. Vol. 28, no 4, pp. 511—522. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Павел Михайлович[1] — д-р техн. наук, профессор,
e-mail: profpol@rambler.ru,
Хорошко Леонид Леонидович[1] — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой,
[1] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).
Для контактов: Кузнецов П.М., e-mail: profpol@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.M. Kuznetsov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: profpol@rambler.ru,
L.L. Khoroshko[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
[1] Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993, Moscow, Russia.
Corresponding author: P.M. Kuznetsov, e-mail: profpol@rambler.ru.