

ОРГАНИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНО- ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.О. Бутко¹, П.М. Кузнецов¹, Л.Л. Хорошко¹

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

Аннотация: Современное машиностроительное производство во все больших объемах требует поступления черных металлов. Для их производства необходимо сырье в виде руды, обогащение которой происходит на горно-обогатительных комбинатах. Уникальность оборудования комбинатов обусловлена их большими массогабаритными характеристиками, поэтому ремонтно-восстановительные работы подобного оборудования проводятся непосредственно на месте его установки. Ремонтные организации проектируют и устанавливают технологическое оборудование на месте будущих работ. Сложность организации подобных работ заключается в информационной разобщенности данных о технологических возможностях имеющегося оборудования производственных систем отдельных предприятий и их подразделений, низкий уровень автоматизации проектирования и оптимизации проектных решений. Выходом из сложившейся ситуации является построение цифрового двойника производственных процессов ремонтно-восстановительных работ, обеспечивающего комплексный подход к решению производственных задач для надежного функционирования оборудования горно-обогатительного комбината. Цифровой двойник позволяет организовать обобщенную производственную систему на базе производственных систем отдельных ремонтных организации. В ней процессы ремонтно-восстановительных работ представлены виде совокупности математических моделей, адекватно описывающих их протекание во времени. Цифровой двойник позволяет обеспечить получение информации о состоянии производственной системы в любой момент времени с учетом различных событий происходящих в ней. Поскольку при моделировании используется машинный масштаб времени, эта информация может быть получена практически мгновенно. Это позволяет моделировать различные варианты организации ремонтно-восстановительных работ без задержек на нахождение оптимального варианта. Помимо построения математических моделей необходима разработка соответствующего программного обеспечения. Для управления работами и контроля над ходом их выполнения были использованы существующие системы планирования и управления проектами, в предлагаемом решении данные в систему поступают в автоматизированном режиме из САПР, что позволяет заметно снизить трудоемкость формирования проекта работ.

Ключевые слова: цифровой двойник, горно-обогатительный комбинат, ремонтно-восстановительные работы, технологическое оборудование, производственная система, математическая модель, оптимизация, база данных.

Для цитирования: Бутко А. О., Кузнецов П. М., Хорошко Л. Л. Организация цифрового двойника процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 8. – С. 130–144. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144.

Creating a digital twin of crushing and milling equipment reconditioning process

A.O. Butko¹, P.M. Kuznetsov¹, L.L. Khoroshko¹

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

Abstract: Modern machine building requires increasingly much supply of ferrous metals. The ferrous metal production needs raw materials in the form ore prepared at mining and processing plants. The uniqueness of mining and processing equipment is stipulated by its large size and weight; for this reason, maintenance and repair of such equipment is undertaken directly at installation sites. For the repair implementation, the process equipment is designed and installed at the future operation sites. It is important to ensure optimal arrangement of repair operations. The complexity of such work lies in the informational disconnect of data on technological capabilities of the available equipment of production systems at separate plants and their divisions, as well as in the low-level automation of design engineering and optimization of design solutions. The way out is creation of a digital twin of maintenance and repair processes, ensuring an integrated approach to production problem solution toward reliable functioning of equipment of a mining and processing plant. The digital twin makes it possible to shape a general production system based on production systems of separate repair organizations. The maintenance and repair processes are presented as a set of mathematical models which adequately describe how the processes run in the course of time. The digital twin provides information on a production system at any moment of time with regard to various events. The modeling uses the machine-scale time; thus, the information is obtained on an instantaneous basis. This allows modeling various scenarios of maintenance and repair without delays for finding an optimal alternative. Alongside with mathematical modeling, it is required to develop relevant software programs. The supervision and control of maintenance and repair used the existing systems of project planning and management. In the proposed approach, the data are automatically fed from the computer-aided design system, which noticeably reduces workload of project development.

Key words: digital clone, mining and processing plant, maintenance and repair, process equipment, production system, mathematical model, optimization, data base.

For citation: Butko A. O., Kuznetsov P. M., Khoroshko L. L. Creating a digital twin of crushing and milling equipment reconditioning process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):130-144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144.

Введение

Бурное развитие машиностроительного производства требует постоянно увеличивающихся объемов поступления черных металлов, составляющих основу конструкционных материалов для производства современных машин. Объемы потребления черных металлов составляют порядка 90% от общего потребления всех металлов на общемировом уровне. Актуальной задачей является снижение

затрат при получении черных металлов, что обеспечивает снижение себестоимости изделий машиностроения. Важнейшим этапом технологического процесса получения руды в качестве необходимого сырья для производства черных металлов является процесс ее измельчения мельницами и дробилками, удаления шлама с помощью дешламаторов (например, МД-9000), обогащение с помощью вакуум-фильтров (например,

ДШ-100), сепараторов (например, ПБМ 1200×3000) и т. д., составляющих основу парка технологического оборудования горно-обогатительных комбинатов.

Указанное оборудование работает в тяжелом режиме, выражающемся, с одной стороны, в высоких нагрузках (достигающих, например, для дробилок порядка сотен тонн), с другой стороны, в практически безостановочной работе, что продиктовано условиями технологического процесса получения обогащенной руды. Тяжелые условия работы оборудования приводят к снижению надежности его работоспособного состояния и, как следствие, выхода его из строя. Учитывая масштабность объемов получения обогащенной руды (порядка 20 000 м³ массы руды), простои оборудования периодом в одну смену приводят к огромным потерям, до 8.5% суточного объема поставки руды в России.

Ремонтно-восстановительные работы уникального по своим массогабаритным показателям оборудования горно-обогатительного комбината проводятся непосредственно на месте его установки при его полной или частичной разборке. Организация проведения подобных работ ставит своей целью:

- мониторинг состояния элементов и всего оборудования в целом;
- снижение времени проведения ремонтно-восстановительных работ;
- минимизацию трудоемкости и себестоимости проведения таких работ.

Актуальность задачи организации технологического процесса ремонтно-восстановительных работ заключается в оперативном определении оптимального варианта его реализации.

Обзор

Под технологическим процессом понимается часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) опреде-

лению состояния предмета труда (ГОСТ 3.1109-82). Под предметом труда в данном случае будем понимать изделия и их элементы. З.Т. Акашев [1] описывает методологию совершенствования и выбора структуры технологических процессов горнодобывающих предприятий. Утверждается, что их эффективность во многом зависит от надежного функционирования оборудования горнодобывающих предприятий. В работах [2, 3] отмечается важность создания технологической стратегии предприятия, определяющей эффективность его работы, рассматриваются пути ее формирования. Производственный потенциал промышленного предприятия определяется в значительной мере уровнем информатизации на основе современных средств вычислительной техники. В работе [4] рассматриваются вопросы применения современных систем числового программного управления крупногабаритным технологическим оборудованием, в частности, системы АхiОМА, позволяющей снизить трудоемкость и повысить производительность обработки в автоматическом режиме сложных профильных элементов конструкций. В работе [5] рассматриваются вопросы реализации процессов моделирования поведения системы управления рабочими органами технологического оборудования для обеспечения точности.

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. Перспективным является организация проектно-операционного управления [6], позволяющего интегрировать в единый процесс этапы подготовки и реализации производственных процессов на

предприятия. Рассматриваются методы организации для этих целей информационных баз данных в среде проектно-операционного управления [7].

Особое значение в этой связи приобретает формирование структуры маршрутной технологии. В.В. Борзенков в работе [8] предлагает формирование структуры на основе топологических свойств макроэлементов, структуры деталей в САПР ТП. В работе [9] Д.Е. Максимовского рассматриваются способы выбора технологических баз для корпусных деталей в автоматизированном производстве с использованием САПР ТП.

В исследовании [10] предлагается система автоматизированной конструкторско-технологической параметризации процессов изготовления деталей типа тел вращения. Использование предложенной системы позволяет проектировать процессы технологической подготовки для производства деталей указанного класса.

В статье [11] представлена методика выбора комплектов технологических баз на операциях механической обработки машиностроительных деталей. Для решения вопросов цифровизации технологических процессов в работе [12] 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. Вопросы определения величины геометрических погрешностей обработки на современном металлорежущем оборудовании поднимаются в работе [13]. Анализ проблем моделирования процессов обработки с точки зрения точности применяемого металлорежущего оборудования произведен в исследовании [14]. Работа [15] содержит анализ построения

моделей состояния производственной системы предприятий горнодобывающей промышленности. Вопросам программного обеспечения разработок, связанных с операционным управлением предприятиям, посвящены работы [16, 17], в них определены основные направления для эффективной переработки проектной информации.

Перечисленные работы являются основой для формирования совокупности математических моделей, позволяющих моделировать поведение производственной системы во времени с целью получения необходимой информации о ее перспективном состоянии. Такая совокупность моделей представляет собой цифровую копию производственной системы или цифровой двойник производства.

Таким образом, является актуальной задача построения цифрового двойника производственной системы с возможностями вариативного структурного моделирования для определения в любое время оптимального варианта ее структуры. В горной промышленности такой подход даст возможность обеспечить рациональную загрузку технологических систем ремонтных организаций за счет рационального распределения их технологических ресурсов, производственных заявок на проведение ремонтных работ, упорядочивания планово-предупредительных работ. Решение поставленной задачи позволит снизить простои оборудования горно-обогачительных комбинатов и повысить их производительность.

Материалы и методы

Ремонтные организации, осуществляющие ремонтно-восстановительные работы оборудования горно-обогачительных комбинатов, имеют в составе своих производственных систем определенные наборы технологического обо-

рудования. Каждая единица технологического оборудования обладает определенным объемом своих технологических возможностей, которые можно представить в виде некоторого массива данных. Массивы данных могут иметь общие области пересечения с той или иной мощностью пересечения или не иметь их вообще. Наличие областей пересечения означает возможность использования различного оборудования для выполнения одних и тех же работ. Одновременно каждое из них обладает возможностью выполнения объема работ, не доступных для выполнения другим видом оборудования.

При эксплуатации технологического оборудования ремонтных организаций оборудование подбирается исходя из видов выполняемых работ. Различия видов работ приводят к неизбежным простоям части оборудования. Еще одной из причин простоя является наличие необходимого запаса технологического оборудования для однозначного обеспечения количеством и технологическими возможностями любых сочетаний регламентных и непредвиденно возникших ремонтных работ. Вместе с тем наличие избыточного объема технологического оборудования требует от ремонтных организаций ощутимых экономических затрат.

Обычно отдельные ремонтные организации ориентированы на выполнение каких-то работ определенного вида, но реально технологические возможности одних организаций пересекаются с технологическими возможностями других. Это означает, что существуют работы, которые могут выполняться разными организациями. Тем не менее экономические затраты при выполнении этих работ будут отличаться по своей величине.

Здесь имеет значение целый ряд факторов, таких как удаленность организа-

ции от места проведения работ, наличие средств доставки оборудования, ориентированность организации на проведение именно этих работ и ряд других.

Предположим, что в i -й ремонтной организации ($1 \leq i \leq n$) выполняется m_i видов ремонтно-восстановительных работ. Тогда технологическая гибкость VS_i i -й ремонтной организации характеризуется объемом технически допустимых возможностей переналадки технологической системы и выражается следующей зависимостью:

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

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 технологических возможностей единицы оборудования.

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

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

где $h_{i,j}$ — количество требуемых технологических операций для выполнения j -го 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:

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

Для случая, когда объем технологических возможностей ремонтной организации позволяет выполнить некоторую

часть всего объема задания на ремонтные работы, выражение принимает вид:

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

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

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

Однако, как показывает практика, даже для двух последних случаев (формулы (4) и (5)) оперативно начать работы по восстановлению оказывается невозможным вследствие занятости части производственных ресурсов уже начатыми, но еще не законченными работами. Заимствование недостающих ресурсов из других подразделений или организаций принципиально затруднено по причине информационной разобщенности.

С другой стороны, массив ресурсов производственных систем различных ремонтных организаций хорошо формализован, и это позволяет создать обобщенный массив их возможностей как единой производственной системы.

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

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

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

Полный объем производственных возможностей является постоянной величиной и меняется лишь при модернизации ремонтного оборудования, его утилизации или приобретении нового. Таким образом, оказывается возможным создание цифрового двойника обобщенной производственной системы совокупно-

сти ремонтных организаций с более широкими возможностями, чем всех организаций, рассматриваемых отдельно.

Цифровой двойник обобщенной производственной системы, представленный в виде совокупности математических моделей, фактически представляет собой хорошо формализованную виртуальную производственную систему, адекватно отражающую производственную ситуацию в интересующие моменты времени. Такой подход раскрывает широкие возможности по прогнозированию состояния производственной системы в перспективе. Ядром цифрового двойника производственной системы является имитационная модель, на различных этапах функционирования которой, в зависимости от конкретных складывающихся условий, осуществляется оптимизация на основе методов полного перебора, динамического, линейного и других. С этой точки зрения предлагаемая система имеет открытый характер, позволяющий при необходимости добавить другие методы оптимизации.

Обобщенная производственная система ориентирована на выполнение преимущественно плановых работ, поэтому оказывается возможным планирование использования обобщенных ресурсов с лучшим экономическим эффектом по сравнению с независимым планированием работ на отдельных ремонтных организациях. Кроме того, снижается отрицательный эффект от возникновения необходимости проведения внеплановых работ, вызванных, например, внезапным выходом оборудования из строя.

Период функционирования обобщенной производственной системы может быть представлен в виде совокупности отдельных событий, разделенных отрезками времени: $t_i - t_{i+1}$, где t_i — время появления предыдущего события, а t_{i+1} — время наступления последующего события. Под событием понимается скач-

кообразное изменение условий функционирования производственной системы. Это может быть завершение выполнения очередных заявок на выполнение ремонтно-восстановительных работ, запуск на выполнение очередной заявки, выход из строя или ввод в эксплуатацию оборудования в одной из ремонтных организаций и т.п.

Информация о наступающем событии поступает в модель цифрового двойника производственной системы и моделируется реакция на него. Таким образом можно однозначно спрогнозировать состояние производственной системы в последующие моменты времени. Данные о перспективном состоянии производственной системы позволяют осуществлять планирование последующей 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

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

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

Разработанный подход к созданию цифрового двойника производственной системы реализован в виде системы программного обеспечения.

Созданы комплексные информационные модели в интегрированных системах с формированием единой среды моделирования с охватом максимального количества этапов проектирования и подготовки производства технических

изделий. Особенностью такого подхода является консолидация всех результатов и полученной документации в общей базе данных, что позволяет добиться повышения эффективности работы конструкторов и инженеров-технологов. Подобные решения могут базироваться на нескольких разных системах.

Система охватывает несколько ключевых этапов жизненного цикла обеспечивающих эффективное функционирование технологических систем ремонтных предприятий. Созданная универсальная среда моделирования содержит пакет программных продуктов, включающих продукты Siemens PLM, Oracle и Microsoft (тут использованы варианты конфигурации системы для построения базы данных либо на основе Microsoft SQL, либо на базе Oracle по согласованию с требованиями конечного пользователя). Основная идея процесса заключается в последовательном выполнении следующих этапов:

- проектирование и инженерные расчеты конфигурации ремонтной установки;
- разработка технологических процессов и управляющих программ для управления восстановительными работами;
- формирование конструкторской и технологической документации;
- составление производственного плана;
- отслеживание и расчет экономических показателей;
- интеграция результатов, документации и заполнение базы данных новыми решениями.

Существенное значение при выполнении перечисленных процедур приобретает перенос данных между различными средами проектирования и их взаимодействие. Особенно это проявляется на этапе перехода от проектирования к планированию производства. Выходом

из создавшегося положения явилась разработка интеграционного обеспечения, выполненная в виде нескольких программных модулей, которые были написаны в языковой среде C++, C#. Это позволило получить инвариантную среду моделирования, реализующую алгоритмы построения комплексных моделей, оперирующих данными, необходимыми для планирования производства.

Полученный программный продукт положен в основу комплекса структурно-параметрического моделирования (СПМ). В нем заложено лингвистическое представление проектируемых объектов с последующей интерпретацией в визуальной форме, одновременно в модель интегрируются инженерные расчеты и технико-экономические характеристики.

Поиск оптимальной конфигурации оборудования для проведения ремонтно-восстановительных работ связан с моделированием технологических процессов и при наличии больших объемов информации требует либо использование высокопроизводительных машинных ресурсов, либо значительных затрат машинного времени.

Выходом явилась дифференциация видов обрабатываемых моделей. Если текущая модель относительно проста, а время моделирования не лимитировано, то поиск оптимального решения осуществляется путем необходимого для нахождения лучшего варианта числа итераций. При обработке сложных моделей и наличия ограничения времени проведения моделирования производится поиск подходящего метода оптимизации из числа доступных для работы с данной моделью, например, метод линейного программирования, метод целочисленного программирования и др.

Для выполнения необходимого объема моделирования был разработан программно-методический комплекс структурно-параметрического моделирования

(ПМК СПМ), позволяющий осуществлять моделирование различных вариантов организации ремонтно-восстановительных работ по конкретным объектам. Использование разработанного комплекса позволяет существенно снизить время, затрачиваемое на процессы моделирования при снижении требуемого объема машинных ресурсов, а следовательно, снижение вероятности сбоя при обработке информационных файлов. Построенная структурно-параметрическая модель позволяет проводить описание достаточно сложных инженерных расчетов.

В основе разработанного модуля заложена укрупненная модель, воспроизводящая имеющиеся структурные и геометрические характеристики объекта и необходимые расчеты его параметров. В ходе моделирования осуществляется варьирование конфигурации моделируемого объекта путем изменения его параметров в соответствии с выбранной стратегией. Модель является цифровым двойником создаваемого варианта объекта и подключается к модулю непосредственно перед передачей очередных значений параметров. Здесь реализуются полученные инженерные расчеты, результаты которых обработаны модулем и переданы в структурно-параметрическую модель. В результате моделирования цифровой двойник объекта постепенно приобретает значения параметров, соответствующих оптимальному варианту.

Весь процесс функционирования цифрового двойника заключается в формировании на первом этапе задания по проектированию и планированию работ с учетом требуемых ремонтно-восстановительных работ оборудования. На этом этапе происходит анализ уже имеющихся наработок при проведении аналогичных работ в прошлом. Здесь принимаются во внимание выводы, заме-

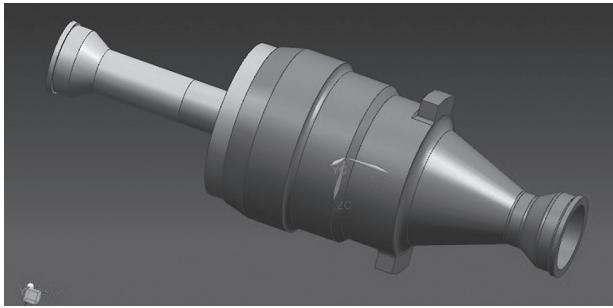


Рис. 1. Модель элемента ремонтной технологической установки, выполненная в среде Siemens NX
Fig. 1. The model element repair technological installation, made in the environment of Siemens NX

чания и пожелания, полученные в ходе уже проведенных работ. При возможности производится попытка улучшения конечного продукта проектирования исходя их накопленного опыта и с учетом изменившихся условий, например, изменение состава технологического оборудования ремонтной организации и т.п.

При невозможности изменения условий предстоящих работ за основу берется лучший из имеющихся в базе данных вариант. Одновременно производится попытка создания нового варианта с учетом совокупности возможностей организаций-партнеров. Работа в разработанной среде может выполняться как внутри одной организации, так и дистанционно с подключением проектировщиков дистанционно организаций-партнеров при объединении их информационных ресурсов.

Конечным продуктом этого этапа является техническое описание и набор чертежей, эскизов, сопроводительной документации и 3D моделей для моделирования всего объекта в целом. Обязательным условием является параметризация модели на основе проведения инженерных расчетов (например, конечно-элементный анализ в САЕ). Предварительные расчеты проводятся непосредственно в среде СПМ. Необходимые для этого методики выбираются из библиотеки, сформированной на основе справочных данных и адаптированных

в ходе предшествующего проектирования. При этом работы могут проводиться с использованием различных сред САД. Необходимым условием является информационная согласованность при обмене данными между ними и СПМ. На рис. 1 представлена 3D модель элемента ремонтной технологической установки, выполненная в среде NX. Совокупность 3D моделей деталей формируют модель общей сборки объекта.

Коллектив проектировщиков создает единую параметризованную модель, причем обмен данными между программными средами организован таким образом, чтобы результаты модификации параметров инженерного расчета сразу отражались в единую САД-систему. Это достигается использованием специального программного модуля, который через стандартную среду, например таблицы Excel, осуществляет обмен данными между средами проектирования.

После построения компоновочной модели объекта инженерная группа проверяет функциональные возможности и соответствие заданному проекту. Результаты в виде диаграмм и таблиц характеристик представляются в виде HTML-отчетов, которые в дальнейшем можно использовать для их оценки или демонстрации. На рис. 2 показана модель фрагмента спроектированного объекта в NX после проведения прочностного анализа с помощью MasterFEM+.

Выполнение второго этапа заключается в проверке и сравнении функциональных возможностей альтернативных спроектированных вариантов объектов. Одним из проверяемых показателей является функциональная избыточность спроектированных объектов. Как уже указывалось выше, оптимальным вариантом является совпадение областей реальных технологических возможностей и технологически необходимых возможностей для решения поставленной задачи. На практике объем реальных возможностей оказывается выше. В случае сведения этой разности к минимальной величине, используемые технологические ресурсы уменьшаются, оставляя в реальной производственной системе больше возможностей, что уменьшает объем требуемого запаса технологического оборудования.

При необходимости инженер-проектировщик получает задание на доработку наиболее удачного варианта, если в нем обнаруживаются возможности для использования в последующих ремонтно-восстановительных работах на этом же оборудовании комбината, для сокращения времени и трудоемкости налад-

ки. Функционирование принятого варианта проверяют с использованием модуля технологического проектирования PRTECH. Результатом выполнения второго этапа является готовая документация на проектируемый объект.

Третий этап предусматривает планирование сроков выполнения ремонтно-восстановительных работ при применении готового варианта объекта, на котором они будут выполняться. Для этого сформированная модель загружается в модуль системы планирования. Интерфейс разработанного модуля представлен на рис. 3. Здесь фактически решается задача автоматизированного ввода информации для получения данных о сроках проведения ремонтно-восстановительных работ и составляется план загрузки технологического оборудования ремонтных организаций.

На этом же этапе по результатам моделирования в базу данных заносится информация об удачных решениях по проектированию объекта исходя их текущих условий. Эта информация анализируется, и формируются выводы и заключения. Программный модуль в виде приложения ПМК СПМ запускается

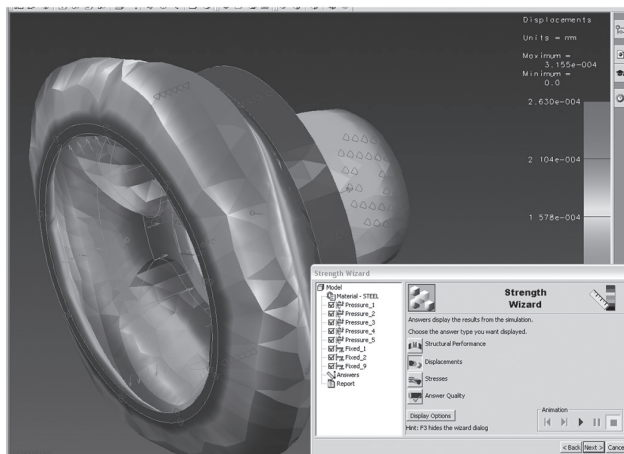


Рис. 2. Модель фрагмента спроектированного объекта в NX после проведения прочностного анализа в среде в Siemens NX

Fig. 2. A model fragment of a designed object in NX after conducting a strength analysis in a medium in Siemens NX

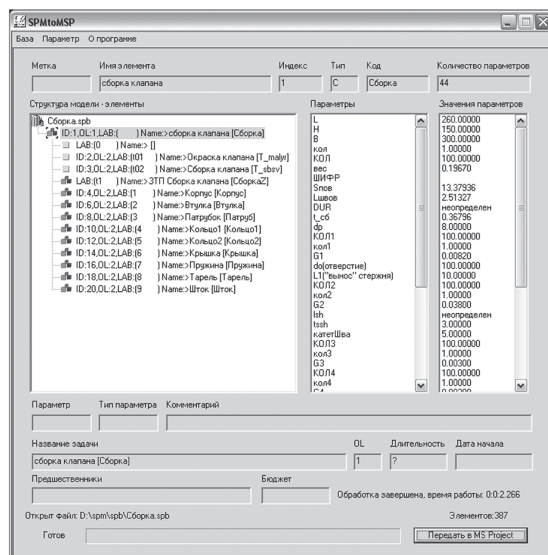


Рис. 3. Модуль интерфейса для системы планирования
 Fig. 3. Interface module for planning system

после формирования структурно-параметрической базы модели объекта. Результатом работы модуля является формирование файла обмена в виде данных, необходимых для открытия в Microsoft Project [16].

Разработанный модуль ориентирован на автоматизацию процесса формирования модели проекта создания (модернизации или ремонта) объекта в системе Microsoft Project [17]. Модуль дает возможность визуализированного представления и управления проектами в плане подготовки доставки и сборки объекта для проведения ремонтно-восстановительных работ в условиях горно-обогатительного комбината.

На пятом этапе формируется требуемая документация в виде отчетов, выполненных по типовым формам предприятия:

- итоговые отчеты о сроках выполнения работ согласно имеющемуся заданию;
- отчеты о сроках начала проведения ремонтно-восстановительных работ в рамках имеющихся заказов и планов;

- последовательность доставки и сборки объекта на месте проведения ремонтно-восстановительных работ;
- диаграммы Ганта, отражающие ход одновременно выполняемых ремонтно-восстановительных работ;
- диаграммы загрузки оборудования ремонтных предприятий во времени, позволяющие оценить состояние ресурсной базы ремонтных предприятий.

Здесь следует отметить в качестве перспективы совершенствование инструментов планирования таким образом, чтобы планировщик имел возможность работы с данными на более ранних этапах формирования моделей объекта. Такой подход позволил бы исключать неудачные варианты проектирования на ранних этапах. Более ранняя работа по оптимизации позволяет в первом приближении получать информацию о возможных перегрузках элементов оснащения ремонтных предприятий, стоимости и длительности выполнения работ.

На последнем этапе выполняется консолидация полученных результатов проектирования в единой среде модели-

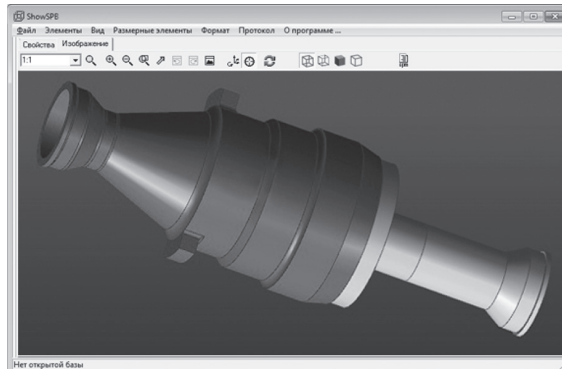


Рис. 4. Исходная модель в СПМ
 Fig. 4. The original model in the JMP

рования СПМ в виде лингвистической информационной модели. Такая модель позволяет интегрировать всю информацию об объектах в единую базу, что упрощает управления ею при модернизации или модификации уже спроектированных объектах. На рис. 4 представлена 3D модель элемента объекта, полученная на основе интегрированной в единую базу данных информации.

Открытие файла данных модели позволяет получить доступ к относящейся к ней документации, просмотреть ее 3D-модели, характеризующие результаты проектирования на различных этапах

ее создания непосредственно из главного диалога модуля просмотра визуализации (рис. 5). Состав модели включает описание реальных деталей и узлов, входящих в состав объекта. Здесь же доступны такие данные проекта, как бюджет и длительность задач, что дает необходимую информацию о конкретных проектных решениях.

Таким образом, путем выполнения указанной выше последовательности этапов, разработка реализуется в рамках единой информационной среды, причем проектирование и планирование выполняемых ремонтно-восстановительных

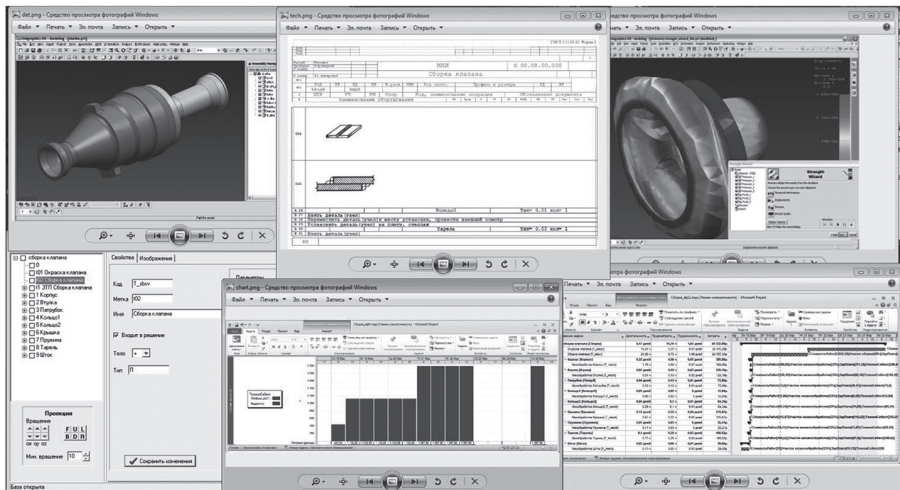


Рис. 5. Информационная модель и результаты проектирования
 Fig. 5. Information model and design results

работ осуществляется с использованием эффективных средств моделирования и программирования.

Заключение

Предложенный подход к поиску оптимального варианта организации ремонтно-восстановительных работ с использованием цифрового двойника позволяет осуществлять поиск на начальных этапах без сложных процессов перепроектирования в принципиально короткие сроки. Элементы системы моделирования и планирования производственных и ремонтных процессов были опробованы в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева в рамках работ по разработке единой системы управления предприятием.

Разработанная методика и предложенный комплекс программных средств позволяют существенно снизить время простоя оборудования горно-обогатительных комбинатов (в отдельных случаях в 1,2 – 1,4 раза).

Снижение длительности процессов проектирования достигается построе-

нием единой среды моделирования, что уменьшает потери времени на оптимизацию конфигурации объекта и оперативную передачу информации между коллективами проектировщиков при отправке результатов на следующий этап разработки.

Использование информационного поля описаний появляющегося на рынке современного оборудования и анализа его возможного применения позволяет осуществлять выбор нового оборудования, максимально отвечающего требованиям проводимых работ.

Дальнейшим перспективным направлением использования цифрового двойника является автоматизация планирования профилактических ремонтных работ. Например, на основе статистических данных и контроля состояния оборудования можно осуществлять превентивные ремонтные работы производственного оборудования комбината, 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. Yeleneva J. Y., Kharin A. A., Yelenev K. S., Andreev V. N., Kharina O. S., Kruchkova E. V. Corporate knowledge management in Ramp-up conditions: the stakeholder interests account, the responsibility centers allocation // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2018. Vol. 20. Pp. 207 – 216.
3. Андреев В. Н., Еленева Ю. А., Еленева Ю. Я. Технологический капитал промышленного предприятия: структура, эффективность использования. Монография. — М.: МГТУ «Станкин», 2012. — 78 с.
4. Martinov G. M., Kozak N. V. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA control system // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. No 7. Pp. 534 – 538.
5. Ginette Wei Get Tseng Digital twin feed drive identification for virtual process planning. University of Waterloo, 2018. P. 89.
6. Кузнецов П. М., Цырков Г. А. Целеустремленная среда проектно-операционного управления // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2017. — № 4. — С. 10 – 14.
7. 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.

8. Борзенков В. В. Топологические свойства макроэлементов, описывающих структуру деталей в САПР ТП механической обработки / Сотрудничество в области машиностроительных производств, реинжиниринга и образования. Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием. – Смоленск, 2013. – С. 18–21.

9. Maksimovskii D. E. Automation of process design by design-technological parameterization // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. No 9. Pp. 870–872. DOI: 10.3103/S1068798X1109019X.

10. Kalyakulin S. Y., Kuz'min V. V., Mitin E. V., Sul'din S. P. Informational relational models for calculating the cutting conditions in automatic control systems // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No 12. Pp. 1049–1052. DOI: 10.3103/S1068798X18120250.

11. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В. и др. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза // Вестник мордовского университета. – 2018. – Т. 28. – № 1. – С. 77–84.

12. Астапов В. Ю., Хорошко Л. Л., Афшари Паям, Хорошко А. Л. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2016. – № 87. – С. 7.

13. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal cutting theory and practice. Third edition. CRC Press. London–N.Y.: Taylor & Francis Group, 2016. 932 p.

14. Bernd X. Weis. From idea to innovation. A handbook for inventors, decision makers and organizations. Springer-Verlag Berlin: Heidelberg. 2015. 262 p.

15. 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.

16. Butko A. O., Briukhovetskii A. P., Grigoriev D. E., Kalashnikov K. S. Algorithms, mechanisms and procedures for the computer-aided project generation system // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, No 24. Pp. 14199–14207.

17. Бутко А. О., Колесников Д. А. Алгоритмы подсистемы автоматизации построения проектов в составе комплекса анализа организационно-технических решений // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018. – № 3(171). – С. 3–9. **ГИАБ**

REFERENCES

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

2. Yeleneva J. Y., Kharin A. A., Yelenev K. S., Andreev V. N., Kharina O. S., Kruchkova E. V. Corporate knowledge management in Ramp-up conditions: the stakeholder interests account, the responsibility centers allocation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018. Vol. 20. Pp. 207–216.

3. Andreev V. N., Eleneva Yu. A., Eleneva Yu. Ya. *Tekhnologicheskii kapital promyshlennogo predpriyatiya: struktura, effektivnost' ispol'zovaniya*. Monografiya [Technological capital of an industrial plant: structure and utilization efficiency. Monograph], Moscow, MGTU «Stankin», 2012, 78 p.

4. Martinov G. M., Kozak N. V. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA control system. *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35. No 7. Pp. 534–538.

5. Ginette Wei Get Tseng *Digital twin feed drive identification for virtual process planning*. University of Waterloo, 2018. P. 89.

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

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

8. Borzenkov V.V. Topological properties of macro-elements describing structure of parts in computer-aided design of process flow charts in machine work. *Sotrudnichestvo v oblasti mashinostroitel'nykh proizvodstv, reinzhiniringa i obrazovaniya*. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Cooperation in the field of mechanical engineering, reengineering and education. Collection of materials of a scientific and practical conference with international participation], Smolensk, 2013, pp. 18–21. [In Russ].

9. Maksimovskii D.E. Automation of process design by design-technological parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31. No 9. Pp. 870–872. DOI: 10.3103/S1068798X1109019X.

10. Kalyakulin S. Y., Kuz'min V. V., Mitin E. V., Sul'din S. P. Informational relational models for calculating the cutting conditions in automatic control systems. *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No 12. Pp. 1049–1052. DOI: 10.3103/S1068798X18120250.

11. Kalyakulin S. Yu., Kuz'min V. V., Mitin E. V. Designing of structure of process flow carts based on synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2018. Vol. 28, no 1, pp. 77–84. [In Russ].

12. Astapov V. Yu., Khoroshko L. L., Afshari Payam, Khoroshko A. L. Computer-aided design in modeling modes of process flow charts in manufacturing of aircraft components. *Trudy MAI*. 2016, no 87, pp. 7. [In Russ].

13. Stephenson D.A., Agapiou J.S. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. CRC Press. London–N.Y.: Taylor & Francis Group, 2016. 932 p.

14. Bernd X. Weis. *From idea to innovation. A handbook for inventors, decision makers and organizations*. Springer-Verlag Berlin: Heidelberg. 2015. 262 p.

15. 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.

16. Butko A. O., Briukhovetskii A. P., Grigoriev D. E., Kalashnikov K. S. Algorithms, mechanisms and procedures for the computer-aided project generation system. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12, No 24. Pp. 14199–14207.

17. Butko A. O., Kolesnikov D.A. Algorithms of project development automation subsystem within the integrated analysis of administration and engineering solutions. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovani i proizvodstve*. 2018, no 3(171), pp. 3–9. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бутко Антон Олегович¹ — канд. техн. наук, доцент,

Кузнецов Павел Михайлович¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: profpol@rambler.ru,

Хорошко Леонид Леонидович¹ — 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

A.O. Butko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

P.M. Kuznetsov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: profpol@rambler.ru,

L.L. Khoroshko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chair,

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),

125993 Moscow, Russia.

Corresponding author: P.M. Kuznetsov, e-mail: profpol@rambler.ru.

Получена редакцией 17.02.2020; получена после рецензии 16.03.2020; принята к печати 20.07.2020.

Received by the editors 17.02.2020; received after the review 16.03.2020; accepted for printing 20.07.2020.