

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ / COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.24>

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ АДДИТИВНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Научная статья

Аветисян Т.В.^{1,*}, Преображенский Ю.П.², Преображенский А.П.³, Кривенко Н.Н.⁴

¹ORCID : 0000-0003-3559-6070;

³ORCID : 0000-0002-6911-8053;

^{1, 2, 3, 4} Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vtatyana_avetisyan[at]mail.ru)

Аннотация

В работе рассматриваются возможности управления процессом создания объектов при реализации аддитивных технологий. Приведен алгоритм идентификации структуры и параметров модели агрегирования аддитивных систем. Используется имитационное моделирование. В нем происходит применение вычислительной процедуры, позволяющей создавать последовательности анализируемых компонентов. Параметры будут определяться с привлечением процедур идентификации. Происходит рассмотрение случайной среды. На множестве последовательностей ведется процесс экспертного оценивания. Для каждого альтернативного варианта определяются номера уровней прочности материалов, которые входят в анализируемую конструкцию, приведена схема идентификации адаптивной структуры анализируемого объекта. Приведены алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при формировании структуры объекта.

Ключевые слова: аддитивные технологии, моделирование, рандомизация, алгоритм, экспертный подход.

MODELLING AND OPTIMIZATION OF ADDITIVE SYSTEMS BASED ON INTELLIGENT DECISION-MAKING SUPPORT

Research article

Avetisyan T.V.^{1,*}, Preobrazhenskii Y.P.², Preobrazhenskii A.P.³, Krivenko N.N.⁴

¹ORCID : 0000-0003-3559-6070;

³ORCID : 0000-0002-6911-8053;

^{1, 2, 3, 4} Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation

* Corresponding author (vtatyana_avetisyan[at]mail.ru)

Abstract

The work examines the possibilities of controlling the process of object creation in the implementation of additive technologies. The algorithm of identification of structure and parameters of additive systems aggregation model is presented. Simulation modelling is used. It involves the application of a computational procedure that allows to create sequences of analysed components. The parameters will be determined with the involvement of identification procedures. A random environment is analysed. On the set of sequences, the process of expert evaluation is carried out. For each alternative variant the numbers of strength levels of materials which are included in the analysed structure are determined, the scheme of identification of the adaptive structure of the analysed object is given. The algorithms of intellectual support of decision-making in the formation of the structure of the object are described.

Keywords: additive technologies, modelling, randomization, algorithm, expert approach.

Введение

При аддитивных технологиях создание объектов осуществляется путем последовательного формирования один слой за другим. Существуют классификации аддитивных технологий относительно материалов, которые используются, по источникам и методам подвода энергии. Разные варианты технологий определяют соответствующую совокупность дефектов получаемых объектов.

Например, прямое лазерное выращивание осуществляется при помощи того, что отдельные дорожки наносятся последовательным способом. Существует неоднородность в пространственных распределениях потоков порошков и лазерном излучении. Например, профиль сначала сходится, а затем расходится.

В этой связи есть необходимость в оптимизации технологических параметров лазерного выращивания.

В ходе моделирования возникают возможности для уменьшения веса деталей, для осуществления топологической оптимизации, для обеспечения внутренних воздушных каналов.

В связи с тем, что скорости охлаждения являются достаточно большими, в деталях будет наблюдаться возникновение мелкозернистых структур. Чтобы предотвращать появление микроразрушений, необходимо понимать, каким образом будет строиться вся конструкция, где будет прогнозироваться наименьшее сопротивление. Алгоритмы такого поиска приводятся в этой работе.

Подходы к внедрению аддитивных технологий в процессы производственных предприятий требуют дополнительного анализа. Прежде всего, к таким вопросам относятся аспекты интеграции аддитивных технологий в бизнес-архитектуру и архитектуру информационных систем предприятия. Для внедрения аддитивного производства

требуется комплексный подход, затрагивающий различные аспекты управления предприятием. Фактор сложности влияния технологии аддитивного производства на предприятия в целом обуславливает необходимость разработки проектного подхода к их внедрению.

В работе представлена модель модернизации технологического процесса аддитивного производства на основе технологий промышленного интернета вещей, аппаратной реализацией которого является одноплатный компьютер Raspberry Pi, программной реализацией является MTConnect – промышленный стандарт обмена данными станков с числовым программным управлением. Использование Raspberry Pi, подключенных к нему датчиков и программного обеспечения OctoPrint реализует контроль и удаленное управление технологическим оборудованием аддитивного производства (3D-принтером) в режиме реального времени.

Изменение подхода к организации аддитивного производства в рамках таких концепций, как Industry 4.0, Smart Manufacturing, Manufacturing Cloud, Society 5.0 заключается в создании виртуальной модели производственной системы, прогнозирующей поведение реального объекта с высокой степенью точности.

Происходят изменения подходов к управлению глобальными цепочками стоимости в процессе разворачивающейся новой промышленной революции в части такого ее компонента, как аддитивное производство или 3D-принтинг.

Анализ современных литературных источников показывает, что аддитивное производство характеризуется большим числом неопределенных параметров, что требует использования интеллектуальных подходов в управлении.

Целью работы является разработка подхода, позволяющего осуществлять моделирование и оптимизацию аддитивных процессов на основе интеллектуальной поддержки принятия решений.

Алгоритм идентификации структуры и параметров модели агрегирования аддитивных систем

Проведем рассмотрение адаптивного подхода, когда формируется аддитивная структуры. При этом будут определяться параметров модели агрегирования параметров тех объектов, которые в нее входят. При этом необходима процедура имитационного эксперимента.

В имитационном эксперименте применяется вычислительная процедура создания последовательностей анализируемых компонентов. При этом применяется информация о значениях рассматриваемых показателей $f_{ijg}, i = \overline{1, I}, j_g = \overline{1, I_g}, g = \overline{1, G}$. В качестве показателей могут быть прочность, а индексы температуры нагрева скорости подачи и скорости охлаждения материала. С точки зрения определенного критерия осуществляется поиск наилучшей структуры и параметров модели взаимодействия. На основе идентификации модели есть возможности для определения структуры. Параметры определяются на основе реализации процедур идентификации. Рассматривается случайная среда. На множестве последовательностей происходит процесс экспертного оценивания. Параметры связаны с прочностью объекта.

Необходимо сформировать данные, чтобы был реализован эксперимент. Они будут следующими.

1. Происходит согласование со стороны экспертов обучающего нумерационного множества уровней прочности материалов (r_i). При этом опираемся на мнение о характеристиках объекта. Он входит в аддитивную систему. Тот объект, который наиболее значимый, имеет $r_i^0 = 1$. Для наименее значимого объекта – $r_i^0 = I$. Происходит перевод каждого из значений прочности r_i^0 в двоичную систему счисления $\overline{r_i^0}$.

2. Значения показателей, которые входят в обучающую выборку, будут подготовлены $f_{ijg}, i = \overline{1, I}, j_g = \overline{1, I_g}, g = \overline{1, G}$.

3. Важно указать набор альтернативных вариантов для моделей интегрального оценивания $F_i = \Psi(f_{ijg})$.

4. Показателей определяются тремя способами f_{ijg} с точки зрения их нормирования.

Первый связан с обучающей выборкой. По каждому из показателей формируем множество уровней прочности $i'_{jg}(i)$. К единой безразмерной шкале $[0, A]$ осуществляется перевод дискретных значений i'_{jg} . При этом опираемся на преобразование

$$\hat{f}_{ijg} = \theta(i'_{jg}) \quad (1)$$

где преобразующая функция – это θ .

Линейное преобразование искоемых показателей используется для их нормирования. Применяется безразмерная шкала $[0, A]$. Проводится расчет прочности. При этом рассматриваются максимальные f_{jg}^{\max} и минимальные f_{jg}^{\min} значения

$$\hat{f}_{ijg} = \frac{f_{ijg} - f_{jg}^{\min}}{f_{jg}^{\max} - f_{jg}^{\min}} * A. \quad (2)$$

При помощи статистических характеристик ведется нормировка показателей. Тогда оцениваются математические ожидания $m(f_{jg})$. Также ведется оценка среднеквадратичных отклонений $\sigma(f_{jg})$. Обучающая выборка применяется для вычислений. К единой безразмерной шкале $[0, A]$ мы приходим на базе соответствующей функции.

Для каждого альтернативного варианта определяются номера уровней прочности. При этом используем обучающую выборку. Рассматриваются заданные значения λ_g^1 , они соответствуют имитационному эксперименту r_i^e . Затем их переводим в двоичную систему счисления - \hat{r}_i^e .

Вводится критерий оптимизации. В ходе рассмотрения интегрального оценивания выбирается его соответствующая структура, а также характеристики моделей. Критерий оптимизации рассматривается в виде расстояния Хемминга. Проводится его оценка с точки зрения того, какой номер в размещении объекта, который

относится к обучающей выборке (\hat{r}_i^0) и какой номер в размещении такого же объекта, который будет соответствовать имитационному эксперименту $\hat{r}_i^e(i)$:

$$\sum_{i=1}^I \chi(\hat{r}_i^0 - \hat{r}_i^e) \rightarrow \min. \quad (3)$$

В представленном выражении расстояния Хемминга – это χ . Существует их связь с соответствующими позициями, для которых существует различие по двоичным кодам $(\hat{r}_i^0 - \hat{r}_i^e)$.

В функции (1) происходит определение варианта структуры. Для критерия (3) проводится рассмотрение способа нормирования. Происходит это при полном переборе по всем сочетаниям $w = \overline{1, W}$. Осуществление параметрической идентификации осуществляется в виде внутреннего цикла перебора. Тогда происходит использование рандомизированной схемы, связанной с тем, что проводится численная оптимизация. Реализуется рассмотрение вектора параметров $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_g, \dots, \lambda_G)$:

$$\varphi(\lambda) = \sum_{i=1}^I \chi(\hat{r}_i - \hat{r}_{iw}^e(\lambda)) \rightarrow \min_{\lambda}, w = \overline{1, W}. \quad (4)$$

Почему выбирается рандомизированная схема? На это влияет неопределенный характер поведения ступенчатой целевой функции (4). За счет нее параметры вектора $\lambda_g, g = \overline{1, G}$ будут найдены соответствующим образом. Неопределенность уходит за счет того, что применяется адаптивная процедура. Опираемся на исходную информацию.

В рассматриваемой ситуации в k -й ($k=1,2,\dots$) точке каждый параметр при итерационном поиске $\lambda_g, g = \overline{1, G}$ анализируется в виде случайной величины. Ей соответствует определенная функция плотности распределения $\omega^c(\tilde{\lambda}_g)$. При этом $(\tilde{\lambda}_g)$ - показывает случайную реализацию параметра λ_g . Исходим из неизменности функциональной зависимости, когда переходим от k -й к $k+1$ итерации поиска. Происходит изменение лишь в математическом ожидании случайной величины $\tilde{\lambda}_g$

$$m^{k+1}(\tilde{\lambda}_g) = \lambda_g^k, \quad (5)$$

в указанном выражении λ^{k+1} - значение параметра, которое относится к $(k+1)$ -й итерации. Оно определяется на основе адаптивного алгоритма при помощи процедуры Кифера-Вольфовица

$$\lambda_g^{k+1} = \lambda_g^k + \alpha_g^{k+1} \frac{\varphi \lambda_g^k + \gamma_g^{k+1} - \varphi \lambda_g^k - \gamma_g^{k+1}}{2\gamma_g^{k+1}}. \quad (6)$$

При этом шаги α_g^k, γ_g^k связаны с условиями сходимости

$$\sum_{k+1}^{\infty} \frac{\alpha_g^k}{\gamma_g^k} \rightarrow \infty, \sum_{k+1}^{\infty} (\alpha_g^k)^2 < \infty, (\alpha_g^k = \frac{a_g}{k^2}, \gamma_g^k = \frac{\gamma_g}{k}), \quad (7)$$

значения плотности распределения $\omega^{(k+1)}(\tilde{\lambda}_g)$ соотносятся с плотностью равномерного закона распределения

$$\omega^{k+1}(\tilde{\lambda}_g) = \frac{1}{2} \left[\delta(\lambda_g^k + \gamma_g^{k+1}) - \delta(\lambda_g^k - \gamma_g^{k+1}) \right], \quad (8)$$

где δ - это δ функция.

Требуется выполнение условия $m^{k+1}(\tilde{\lambda}_g) = \lambda_g^k$.

Наблюдается завершение поиска, когда k будет равно K .

На рисунке 1 приведена схема идентификации адаптивной структуры.

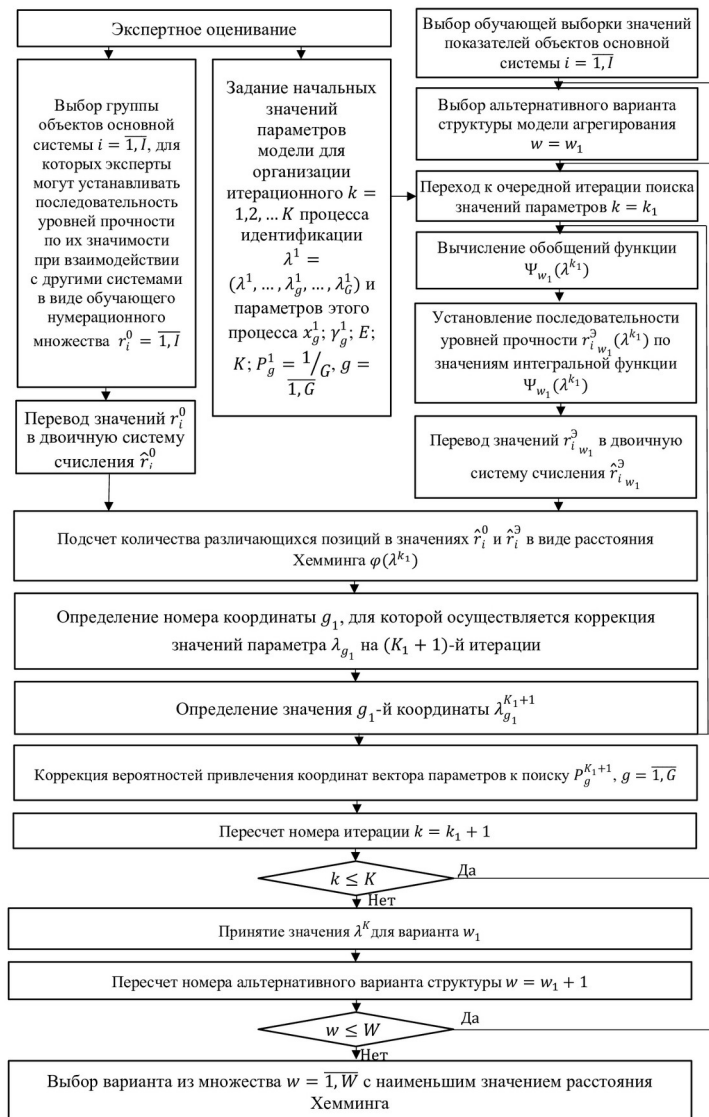


Рисунок 1 - Схема идентификации адаптивной структуры
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.24.1>

Алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при формировании структуры объекта

Основными компонентами являются алгоритма поддержки принятия решений:

1. Проведение создания оптимизационной модели.

2. Осуществление выделения уровней $j_g = \overline{1, J_g}$, входящих в каждый из g -х $g = \overline{1, G}$ видов материалов. Также есть вероятностная интерпретация прочности объекта.

3. Проведение интеграции вероятностной интерпретации прочности и процедуры решения оптимизационной задачи на базе рандомизированного поиска.

4. Создание множества доминирующих вариантов совокупности тех показателей, которые наибольшим образом будут оказывать влияние $m = \overline{1, M}$. Осуществление экспертного выбора по окончательному варианту.

Оптимизационная модель создается, когда применяются булевы переменные. Они подвергаются оптимизации

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если показатель } f_{jg} \text{ включается в набор влиятельных показателей } m = \overline{1, M}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad j_g = \overline{1, J_g}, \quad g = \overline{1, G}. \quad (9)$$

Задача состоит в минимизации числа показателей. Они входят в набор $m = \overline{1, M}$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{j_g=1}^{J_g} x_{ig} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Можно говорить о том, что формируется соответствующее условие, которое связано с тем, что для любого анализируемому типу из материалов в число показателей, которые влияют, будет входить не менее, чем один показатель

$$\sum_{j_g=1}^{J_g} c_{jg} x_{jg} \geq 1, \quad g = \overline{1, G}. \quad (11)$$

В указанном выражении $c_{jg} = \begin{cases} 1, & \text{если в показатель } f_{jg} \text{ относится к } g\text{-му типу материала,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

Проводим объединение критерия оптимизации (10), ограничений (11) и требования относительно оптимизируемых переменных (9). Тогда получается оптимизационную модель:

$$\sum_{g=1}^G \sum_{j_g=1}^{J_g} x_{jg} \rightarrow \min. \sum_{j_g=1}^{J_g} c_{jg} x_{jg} \geq 1, x_{ig} = \begin{cases} 1, & j_g = \overline{1, J_g}, g = \overline{1, G}. \\ 0, & \end{cases} \quad (12)$$

Виды материалов $g = \overline{1, G}$ подлежат экспертному априорному распределению. Они соотносятся с анализируемыми показателями f_{ig} . Они разным образом влияют на возможности улучшения характеристик прочности i -го объекта аддитивной системы. В ходе решения задачи приходим к значениям a_g . Принимать они будут значения от 1 до G . Помимо этого, будем получать значения a_{ig} , принимающие значения от 1 до J_g . Осуществляем вероятностную интерпретацию уровней прочности материала, которые представляются в виде вероятностей. Применяться они будут для первого шаге $k=1$, когда реализуется случайный поиск в ходе решения задачи (12):

$$p_g^1 = \frac{\frac{1}{a_g}}{\sum_{g=1}^G \frac{1}{a_g}}, \sum_{g=1}^G p_g^1 = 1; p_{xjg}^1 = \frac{\frac{1}{a_{jg}}}{\sum_{j_g=1}^{J_g} \frac{1}{a_{jg}}}, \sum_{j_g=1}^{J_g} p_{xjg}^1 = 1. \quad (13)$$

Исходя из того, что значения (13) влияют на характеристики эффективности в поиске [] происходит интеграция их в случайную схему. При этом определяются вероятностные параметры по $k=2,3,\dots$ итерациям

$$p_{xjg}^{k+1} = p_{xjg}^k + ae_1 (\Delta_{jg} \Psi (\tilde{x}_{jg})), \quad (14)$$

$$p_g^{k+1} = p_g^k + ae_2 (\Delta_{jg} \Psi (\tilde{x}_{jg})). \quad (15)$$

Здесь $ae_1(\cdot), ae_2(\cdot)$ являются функциями преобразования вариаций для эквивалентной задачи оптимизации $\Delta_{jg} \Psi$. Анализ осуществляется для случайных значений переменных \tilde{x}_{jg} .

Как результат по заданному числу итераций K можно получить множество при значениях $x_{jg}^K = 1$ или 0 . На их базе, учитывая (14), (15) происходит выбор 5-7 доминирующих вариантов.

Экспертное ранжирование применяется для того, чтобы осуществлять окончательным образом выбор варианта. Помимо этого, происходит определение варианта, относящегося к наименьшей прочности материала. Для значений $x_{jg}^K = 1$ будут определены такие показатели, которые связаны с набором влияющих показателей для объекта $O_i, \bar{i} = \overline{1, I}, m_i = 1, \bar{M}_i$.

Результаты

Проведение обработки результатов топологической оптимизации первичным образом было осуществлено в ANSYS SpaceClaim. Получена фасеточная модель конструкции. После этого проводили ее ручное редактирование. При этом необходимо было удалять полости, углубления, тонкие тоннели. Проводилось сглаживание модели и преобразование в твердотельную геометрическую модель. Этот процесс реализовывался при помощи того, что накладывались NURBS поверхностей к каркасной модели. Необходимо было использовать программу Geomagic Studio.

На основе Geomagic Studio есть возможности для того, чтобы полным образом автоматически вести формирование NURBS поверхностей. Ту CAD модель, которую мы получили, доработали при помощи системы Solid Works. При этом учитывались технологические ограничения. Это определялось за счет того, что удалялись области с дефектами. Помимо этого осуществлялся процесс добавления областей при построении на основе граничных профилей и траекторий.

Происходила реализация процедур восстановления необходимой симметрии конструкции, было осуществлено преобразование ребер жесткости, были организованы места креплений компонентов конструкции, в согласовании с ответными частями соединяемых тел. Осуществлено добавление необходимых конструктивных компонентов кронштейнов – крепежные отверстия, площадки и произведены необходимые скругления. Та CAD-модель, которая была сформирована, применялась для поверочных расчетов напряженно-деформированного состояния внутри системы ANSYS Workbench.

Среди важных параметров в ходе реализации печати мы можем отметить: диаметр сопла печатающей головки и высота слоя, определяющиеся из геометрических параметров модели и необходимой точности изготовления, скорость и температура экструзии, в основном определяющиеся материалом и требованиям по качеству печати.

С учетом того, какие наименьшие размеры внутри кронштейна мы осуществили выбор сопла, которое характеризовалось диаметром 0,45 мм. Для него качество в ходе реализации печати будет наилучшим, когда наблюдается высота слоя в 0,08 мм. Чтобы осуществлять повышение адгезии, применяли подогрев печатного стола до

135 С. При этом значение температуры экструдера печатающей головки мы создавали 325 С. Значение максимальной скорости движения печатающей головки при печати – 3450 мм/мин.

Стоит отметить, что фактическая скорость может отличаться от максимальной в меньшую сторону на участках, требующих большее количество времени на остывание слоя, чем время печати слоя на максимальной скорости. Данный параметр в Simplify 3D контролируется автоматическим образом.

Заключение

Таким образом, на основе алгоритма идентификации структуры и параметров агрегационной модели аддитивных систем осуществляется оптимизация объекта, создаваемого при аддитивном производстве. Приведена схема идентификации адаптивной структуры. Рассмотрены алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при формировании структуры объекта. Применялось экспертное ранжирование в ходе окончательного выбора варианта аддитивной структуры. Результаты подтвердили возможность использования предлагаемых алгоритмов на практике.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Бикмуллина И.И., доцент кафедры АСОИУ, КНИТУ-КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.24.2>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Bikmullina I.I., associate of professor, KNRTU-KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.24.2>

Список литературы / References

1. Sokolov A.A. Multi-level architecture of the intellectual support system for management decisions in resource supporting systems of industrial productions / A.A. Sokolov, A.P. Tyukov, M.V. Shcherbakov [et al.] // Modeling, Optimization and Information Technology. — 2019. — № 7(1). — P. 352-362. — DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.027.
2. Salnikov V.V. The Energy Analysis Nc Programm For Machining Center / V.V. Salnikov, Y.V. Franzuzova // Modeling, Optimization and Information Technology. — 2019. — № 7(2). — P. 275-286. — DOI: 10.26102 / 2310-6018 / 2019.25.2.019.
3. Odu G.O. Review of Multi-criteria Optimization Methods / G.O. Odu, O.E. Charles-Owaba // Theory and Applications. — 2013. — № 3(10). — P. 1-14.
4. Lopota A.V. Methods and tools of project-operational management of a machine-building enterprise / A.V. Lopota, A.V. Tsyrvkov, G.A. Tsyrvkov // 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), St. Petersburg, Russia. — 2017. — № 1. — P. 544-547. — DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085882.
5. Преображенский А.П. Применение аддитивных технологий в порошковой металлургии / А.П. Преображенский, Н.М. Токарева // Вестник Воронежского института высоких технологий. — 2018. — № 1 (24). — С. 81-84.
6. Lvovich I.Y. Production Process Control Subsystem for Manufacture of Integrated Circuits / I.Y. Lvovich, Y.E. Lvovich, A.P. Preobrazhenskiy [et al.] // Measurement Techniques. — 2017. — № 60 (6). — P. 529-533. — DOI: 10.1007/s11018-017-1227-y.
7. Преображенский А.П. Аддитивные технологии: история, методы, материалы / А.П. Преображенский, Н.М. Токарева // Вестник Воронежского института высоких технологий. — 2018. — № 1 (24). — С. 75-77.
8. Преображенский А.П. Основные характеристики аддитивных технологий / А.П. Преображенский, Н.М. Токарева // Вестник Воронежского института высоких технологий. — 2018. — № 2 (25). — С. 40-42.
9. Tsyrvkov A.V. Intelligent components to support workflow in the design and production activities / A.V. Tsyrvkov, G.A. Tsyrvkov // 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), St. Petersburg, Russia. — 2017. — № 1. — P. 780-784. — DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085942.
10. Groefsema H. Design-Time Compliance of Service Compositions in Dynamic Service Environments / H. Groefsema, N. van Beest // 015 IEEE 8th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), Rome, Italy. — 2015. — № 1. — P. 108-115. — DOI: 10.1109/SOCA.2015.14.
11. Нефедова Л.А. Организация и проведение проектов внедрения архитектурных решений по управлению аддитивными производствами / Л.А. Нефедова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2019. — № 2. — С. 184-189.
12. Добрынин С.Л. Проблематика управления аддитивным производством на основе технологий промышленного интернета вещей / С.Л. Добрынин, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2021. — № 17 (2). — С. 7-13.
13. Соколов Ю.А. Производственные системы с цифровым двойником / Ю.А. Соколов, С.А. Гусев // Металлообработка. — 2020. — № 5-6. — С. 53-67.
14. Москвитина Е.И. Формирование новых контуров управления глобальными цепочками стоимости под воздействием аддитивных технологий / Е.И. Москвитина, С.А. Толкачев // Управленческие науки. — 2016. — № 6 (4). — С. 85-94.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sokolov A.A. Multi-level architecture of the intellectual support system for management decisions in resource supporting systems of industrial productions / A.A. Sokolov, A.P. Tyukov, M.V. Shcherbakov [et al.] // *Modeling, Optimization and Information Technology*. — 2019. — № 7(1). — P. 352-362. — DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.027.
2. Salnikov V.V. The Energy Analysis Nc Programm For Machining Center / V.V. Salnikov, Y.V. Franzuzova // *Modeling, Optimization and Information Technology*. — 2019. — № 7(2). — P. 275-286. — DOI: 10.26102 / 2310-6018 / 2019.25.2.019.
3. Odu G.O. Review of Multi-criteria Optimization Methods / G.O. Odu, O.E. Charles-Owaba // *Theory and Applications*. — 2013. — № 3(10). — P. 1-14.
4. Lopota A.V. Methods and tools of project-operational management of a machine-building enterprise / A.V. Lopota, A.V. Tsyrvkov, G.A. Tsyrvkov // 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), St. Petersburg, Russia. — 2017. — № 1. — P. 544-547. — DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085882.
5. Preobrazhenskij A.P. Primenenie additivnyh tehnologij v poroshkovej metallurgii [Application of additive technologies in powder metallurgy] / A.P. Preobrazhenskij, N.M. Tokareva // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tehnologij [Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies]*. — 2018. — № 1 (24). — P. 81-84. [in Russian]
6. Lvovich I.Y. Production Process Control Subsystem for Manufacture of Integrated Circuits / I.Y. Lvovich, Y.E. Lvovich, A.P. Preobrazhenskij [et al.] // *Measurement Techniques*. — 2017. — № 60 (6). — P. 529-533. — DOI: 10.1107/s11018-017-1227-y.
7. Preobrazhenskij A.P. Additivnye tehnologii: istorija, metody, materialy [Additive technologies: history, methods, materials] / A.P. Preobrazhenskij, N.M. Tokareva // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tehnologij [Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies]*. — 2018. — № 1 (24). — P. 75-77. [in Russian]
8. Preobrazhenskij A.P. Osnovnye harakteristiki additivnyh tehnologij [The main characteristics of additive technologies] / A.P. Preobrazhenskij, N.M. Tokareva // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tehnologij [Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies]*. — 2018. — № (25). — P. 40-42. [in Russian]
9. Tsyrvkov A.V. Intelligent components to support workflow in the design and production activities / A.V. Tsyrvkov, G.A. Tsyrvkov // 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), St. Petersburg, Russia. — 2017. — № 1. — P. 780-784. — DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085942.
10. Groefsema H. Design-Time Compliance of Service Compositions in Dynamic Service Environments / H. Groefsema, N. van Beest // 015 IEEE 8th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), Rome, Italy. — 2015. — № 1. — P. 108-115. — DOI: 10.1109/SOCA.2015.14.
11. Nefedova L.A. Organizatsija i provedenie proektov vnedrenija arhitekturnyh reshenij po upravleniju additivnymi proizvodstvami [Organization and implementation of projects for the implementation of architectural solutions for the management of additive manufacturing] / L.A. Nefedova // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija: Jekonomika i jekologicheskij menedzhment [Scientific Journal of the ITMO Research Institute. Series: Economics and Environmental Management]*. — 2019. — № 2. — P. 184-189. [in Russian]
12. Dobrynin S.L. Problematika upravlenija additivnym proizvodstvom na osnove tehnologij promyshlennogo interneta veshej [Problems of additive manufacturing management based on industrial Internet of Things technologies] / S.L. Dobrynin, V.L. Burkovskij // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Voronezh State Technical University]*. — 2021. — № 17 (2). — P. 7-13. [in Russian]
13. Sokolov Ju.A. Proizvodstvennye sistemy s tsifrovym dvojnikom [Digital Twin Production Systems] / Ju.A. Sokolov, S.A. Gusev // *Metalloobrabotka [Metalworking]*. — 2020. — № 5-6. — P. 53-67. [in Russian]
14. Moskvitina E.I. Formirovanie novyh konturov upravlenija global'nymi tsepochkami stoimosti pod vozdejstviem additivnyh tehnologij [Formation of new contours of global value chain management under the influence of additive technologies] / E.I. Moskvitina, S.A. Tolkachev // *Upravlencheskie nauki [Management Sciences]*. — 2016. — № 6 (4). — P. 85-94. [in Russian]