

# Система управления аддитивным технологическим оборудованием для интеграции в гибкую производственную систему

Мартинов Г.М.  
МГТУ «СТАНКИН»  
г. Москва, Россия  
martinov@ncsystems.ru

Ковалеко А.В.  
ОАО НИИТ  
г. Москва, Россия  
avk@niat.ru

**Abstract** — The paper considers the general scheme of the additive flexible production system: the main and auxiliary technological equipment is selected, process routes of various part classes are determined, the management features of both individual technological processes and the additive flexible production system as a whole are indicated. The paper substantiates the necessity of bringing control systems to a single standard for the effective integration of such equipment into the production line in order to promote further organization of additive workshops and additive plants. We suggest a block diagram of a unified CNC system to control various types of additive technological processes, such as selective laser melting, electron beam melting, fused deposition modeling, fused filament fabrication, direct metal disposition, laminated object manufacturing, etc. The paper outlines the features of managing various sources of technological influences: energy (laser sources, electron beam generators), chemical (inkjet print heads) - their main parameters are analyzed and summarized. The possible hardware and software platforms for the implementation of the proposed scheme of a unified CNC system are listed. The paper considers the option of implementing a specialized control system for additive manufacturing equipment basing on a common control platform.

**Ключевые слова** — аддитивные технологии, классификация, гибкая производственная система, система ЧПУ.

## I. ВВЕДЕНИЕ

По классификации Клауса Шваба очередным этапом развития технического и технологического оснащения современного общества станет четвёртая промышленная революция, в части производства именуемая как «Индустрия 4.0» [1]. «Индустрия 4.0» включает 9 направлений [2], в числе которых 3D-печать – единый подход к созданию физических объектов по цифровым моделям с использованием аддитивных технологий.

Одной из основных задач «Индустрии 4.0» является интеграция всех этапов жизненного цикла изделия в единое информационное пространство. Другой её задачей является организация взаимодействия машин без участия человека – создание так называемых «умных производств». Таким образом, перспективным направлением в рамках «Индустрии 4.0» является создание гибких производственных систем на базе аддитивного технологического оборудования – аддитивных гибких производственных систем, а также

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (№ 2.1237.2017/4.6). При выполнении работы использовалось оборудование Федерального центра коллективного использования «Государственный инженеринговый центр» МГТУ «СТАНКИН».

их дальнейшее развитие до аддитивных производств, построенных по концепции «завода-автомата» [3].

Новизна предлагаемого подхода заключается в расширении функциональных возможностей коммерческих систем ЧПУ для управления аддитивными технологическими процессами.

## II. СТРУКТУРА АДДИТИВНОЙ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Типовая аддитивная гибкая производственная система (рис. 1) состоит из семи основных компонентов:

- производственно-технологической службы подготовки и организации производства, осуществляющей постановку изделий на производство и последующую координацию работ остальных подразделений. Функционирование данной службы обеспечивается сетевым сервером и набором рабочих станций;
- заготовительного производства, осуществляющего подготовку исходного материала и изготовление оснастки, необходимой для остальных производств. В зависимости от профиля аддитивной гибкой производственной системы, данное производство может оснащаться бункерами для сушки и просева порошковых материалов, различными системами подготовки проволоки и листового материала, а также металлообрабатывающим технологическим оборудованием;
- аддитивного производства, являющегося ядром аддитивной гибкой производственной системы, собственно изготавливающего детали на технологическом оборудовании, реализующем, в зависимости от профиля аддитивной гибкой производственной системы, различные аддитивные технологии: SLM, EBM, DMD, SLA, LOM и ряда других;
- производственного подразделения предварительной обработки, которое в зависимости от специфики производственной системы выполняет: отделение деталей от подложек, удаление вспомогательных площадок и поддерживающих элементов, очистку деталей от остатков порошкового материала, черновую механическую обработку, термообработку и т.п. Также подразделение комплектуется металлообрабатывающим технологическим

оборудованием, установками гидроабразивной резки, электроэрозионной и лазерной обработки, сушильными шкафами и печами;

- производственного подразделения финишной обработки, которое также зависит от используемых в аддитивном производстве технологий и при необходимости выполняет: чистовую механическую обработку, лазерную и механическую полировку, нанесение покрытий, маркировку и т.п. Операции в данном подразделении могут выполняться на прецизионном металлообрабатывающем технологическом оборудовании, установках виброударной обработки, лазерной и механической гравировки, лазерной полировки;
- подразделения контроля качества исходного материала и деталей, осуществляющего с помощью соответствующего оборудования входной контроль и исследование исходного материала, выходной контроль изделий (рентгеноструктурные и физико-механические исследования, контроль размеров, отклонений форм и качества поверхности), а также промежуточный контроль на всех этапах производства;
- склада, хранящего исходный материал и готовую продукцию. Склад также может быть автоматизирован.

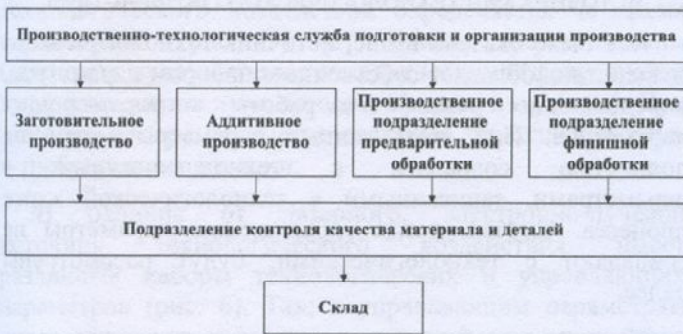


Рис. 1. Структура типовой аддитивной гибкой производственной системы

Цикл изготовления детали в аддитивной гибкой производственной системе проходит под контролем производственно-технологической службы подготовки и организации производства и состоит из семи основных этапов (рис. 2). Взятый со склада 1 исходный материал проходит необходимую подготовку на заготовительном производстве 2, после чего передается в аддитивное производство 3, где из него изготавливаются детали. При этом неиспользованный материал возвращается в заготовительное производство 2 для повторной подготовки. Далее, в зависимости от технологий, используемых в аддитивном производстве 3, детали проходят соответствующую обработку в производственных подразделениях предварительной 4 и финишной обработки 5. Готовые детали проходят выходной контроль 6 и, в случае признания их годными, передаются на склад 7 для дальнейшей реализации.

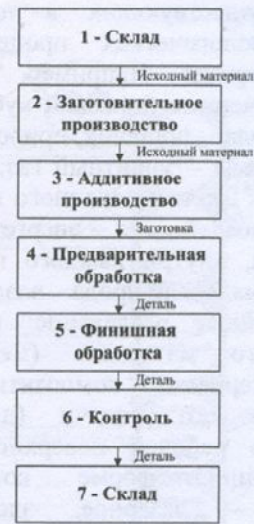


Рис. 2. Цикл изготовления детали в аддитивной гибкой производственной системе

Построенная по такой схеме аддитивная гибкая производственная система позволяет максимально автоматизировать все выполняемые операции на любом из перечисленных этапов и при этом может быть оперативно перенастроена под выпуск новой номенклатуры деталей. Очевидно, что аддитивное технологическое оборудование, применяемое в составе такой гибкой производственной системы, должно быть укомплектовано системой управления, поддерживающей интеграцию в цеховую производственную сеть. При этом в зависимости от профиля аддитивной гибкой производственной системы, применяемое в ней аддитивное технологическое оборудование может иметь различные конфигурации.

### III. КЛАССИФИКАЦИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РЕАЛИЗУЮЩЕГО ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аддитивные технологические процессы и реализующее их технологическое оборудование можно сгруппировать по следующим показателям: тип исходного материала, природа воздействия, среда – тогда классификация аддитивного технологического оборудования образует трёхмерную матрицу (рис. 3).

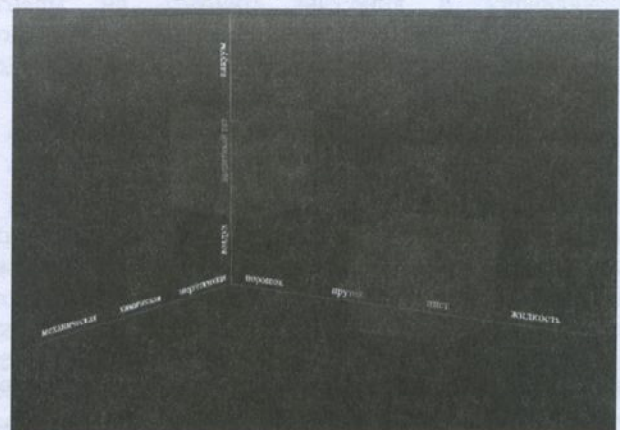


Рис. 3. Классификация аддитивных технологических процессов и реализующего их технологического оборудования. В качестве примера показаны: красным – SLM-технология, синим – SLA-технология

Любой из существующих в настоящее время аддитивных технологических процессов находится внутри этой матрицы. Например, SLM-технология образована пересечением (красный куб на рис. 3): тип исходного материала – порошок, природа воздействия – энергетическая, среда – защитный газ; SLA-технология (синий куб на рис. 3): тип исходного материала – лист (рулон), природа воздействия – энергетическая, среда – воздух. При этом, внутри каждого пересечения (тип исходного материала, природа воздействия, среда) возможно дальнейшее разделение: по химическому составу исходного материала (металл, керамика, полимерные материалы, композитные материалы, бумага), способу его подачи (для порошка – распределение по рабочей поверхности платформы, прямое осаждение), форме воздействия (для энергетического – лазерное, электронно-лучевое, дуговое).

При появлении новых решений (например, при использовании в качестве среды жидкости или активного газа), данная классификация может быть дополнена соответствующим образом.

Возможно создание некоторой обобщённой системы управления, полностью или частично учитывающей особенности всех аддитивных технологических процессов.

#### IV. ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

С позиции системы управления любое аддитивное технологическое оборудование формально можно представить в виде следующих компонентов (рис. 4): источник технологического воздействия, станочный комплекс и периферийное оборудование.

Источником технологического воздействия является устройство, оказывающее на исходный материал такое воздействие, которое приводит к локальному изменению состояния исходного материала с последующим формированием изготавливаемой детали. Так, в SLM-технологии в качестве источника технологического воздействия используется лазерный источник.

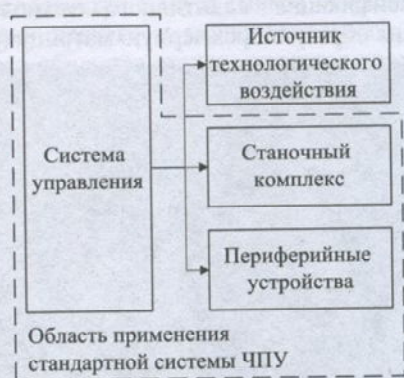


Рис. 4. Схема системы управления аддитивным технологическим оборудованием

Станочный комплекс также как и источник технологического воздействия участвует в формообразовании изготавливаемой детали. Функцией станочного комплекса является взаимное позиционирование источника технологического

воздействия и изготавливаемой детали относительно друг друга.

К периферийным устройствам относятся все остальные узлы и агрегаты технологического оборудования, не участвующие непосредственно в процессе формообразования детали. Например, к числу периферийных устройств относятся: станция подготовки и подачи защитного газа, устройство подачи исходного материала, система охлаждения и т.п.

Стоит отметить, что в части управления работой станочного комплекса и периферийных устройств система управления аддитивным технологическим оборудованием полностью аналогична стандартной системе числового программного управления (ЧПУ), широко применяемой в механообрабатывающем технологическом оборудовании [4]. Одной из возможных схем реализации системы управления аддитивным технологическим оборудованием является её построение на базе коммерческой системы ЧПУ [5], использующей хорошо изученные механизмы управления станочным комплексом и периферийными устройствами [6].

Особенностью является источник технологического воздействия, обладающий собственным набором параметров и требующий специфичных алгоритмов управления.

#### V. СПЕЦИФИКА УПРАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Как было сказано выше, источник технологического воздействия обладает собственным набором параметров, определяющих режим его работы – управляющих параметров. При этом данные параметры могут не полностью совпадать с технологическими – параметрами, записанными в технологической карте процесса. Случаи, когда управляющие параметры не совпадают с технологическими, будут рассмотрены далее.

По режиму работы управляющие параметры делятся на:

- интерполируемые – значение которых изменяется по заданному закону между кадрами управляющей программы [7];
- фиксированные – значение которых поддерживается постоянным на протяжении обработки.

По специфике управляющие параметры делятся на:

- геометрические – определяющие размеры и форму технологического воздействия;
- энергетические – определяющие количество энергии, подводимой в зону обработки за единицу времени.

При этом наличие всех вышеперечисленных типов параметров не является обязательных для каждого вида аддитивной обработки, однако её точность может косвенно характеризоваться количеством управляющих интерполируемых параметров (в первую очередь – геометрических).

### А. Источник энергетического технологического воздействия

Основными источниками энергетического технологического воздействия, применяемыми в настоящее время в различных аддитивных технологиях, являются: лазерный луч, электронный луч и электрический дуговой разряд.

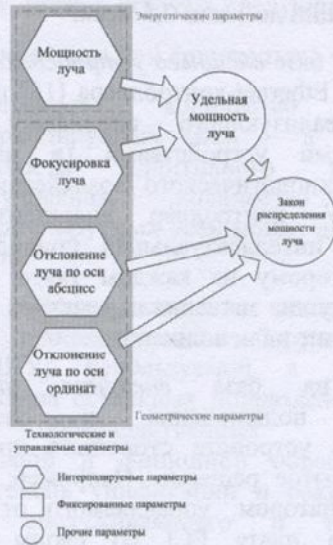


Рис. 5. Взаимосвязь параметров лазерного источника технологического воздействия

В частности, режим работы лазерного источника технологического воздействия определяется четырьмя параметрами (рис. 5) [8]: одним энергетическим (мощность луча) и тремя геометрическими (фокусировка луча, отклонение луча по осям абсцисс и ординат). При этом все четыре параметра являются технологическими и требуют интерполяции.

В отличие от лазерного, электронно-лучевой источник технологического воздействия имеет различные наборы технологических и управляющих параметров (рис. 6). Так, к управляющим параметрам относятся шесть параметров: три энергетических (сила тока нагрева катода, ускоряющее напряжение и управляющее напряжение) и три геометрических (сила тока фокусировки и две силы токов отклонения по осям абсцисс и ординат). Количество технологических параметров на единицу меньше: два энергетических (ускоряющее напряжение и сила тока) и три геометрических, повторяющих аналогичные управляющие. При этом сила тока луча имеет степенную зависимость от ускоряющего и управляющего напряжений [9].

Электродуговой источник технологического воздействия имеет всего один параметр, являющийся одновременно технологическим и управляющим интерполируемым параметром – силу тока дуги.

С позиции системы ЧПУ интерполируемые параметры источника технологического воздействия могут быть представлены в виде виртуальных осей, аналогичных осям станочного комплекса. Задание значений фиксированных параметров может быть реализовано при помощи M-команд или глобальных переменных системы ЧПУ.

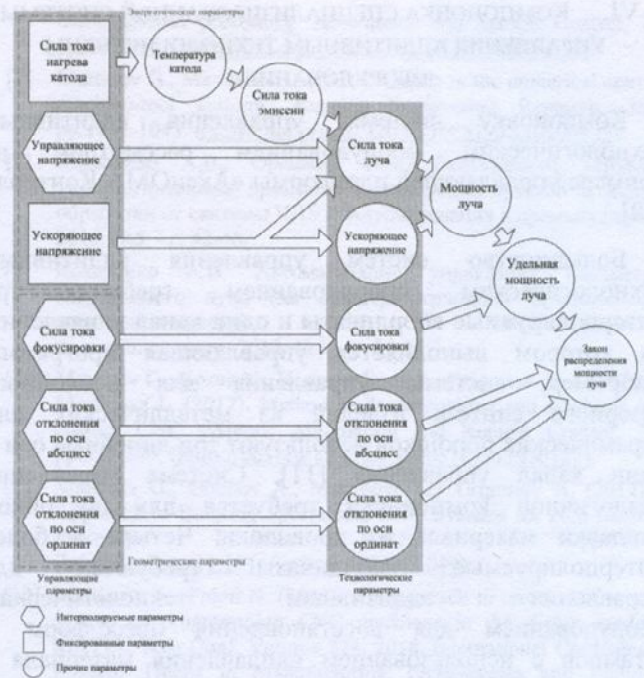


Рис. 6. Взаимосвязь параметров электронно-лучевого источника технологического воздействия

### В. Источник химического технологического воздействия

В качестве источника химического технологического воздействия обычно используется печатающая головка с одним или упорядоченным набором из нескольких сопел, обеспечивающих дозированную дискретную подачу жидкого вещества. В зависимости от конкретной технологии, подаваемое вещество может использоваться в качестве рабочего материала, из которого производится построение детали, или в качестве реагента, вступающего в химическую реакцию с рабочим материалом (как правило, порошком) с последующим формированием детали.

В связи с тем, что дозировка в таких головках обеспечивается аппаратно, управление подачей жидкого вещества осуществляется при помощи дискретных разрешающих сигналов, синхронизированных с перемещением самой печатающей головки. Такие сигналы не требуют внесения в управляющую программу дополнительных команд и реализуются средствами системы ЧПУ.

### С. Источник механического технологического воздействия

Поскольку источником механического технологического воздействия является лезвийный режущий инструмент, с позиции системы управления данный тип источника технологического воздействия может быть включён в станочный комплекс. Такое аддитивное технологическое оборудование в настоящее время практически не используется, его можно рассматривать как частный случай механообрабатывающего технологического оборудования.

## VI. КОМПОНОВКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Компоновку системы управления аддитивным технологическим оборудованием рассмотрим на примере управляющей платформы «АксиОМА Контрол» [10].

Большинство систем управления аддитивным технологическим оборудованием требуют три интерполируемые координаты и один канал управления, на котором выполняется управляющая программа. Например, системы управления для послойного лазерного синтеза изделий из металлических или керамических порошков используют три линейные оси и один канал управления [11]. Система управления аналогичной компоновки требуется для послойной наплавки материала из проволоки. Четыре и более интерполируемые координаты требуются для управления аддитивным технологическим оборудованием для восстановления пресс-форм и штампов с использованием наплавления материала в виде проволоки. Для управления таким оборудованием используют, как правило, три линейные и две круговые оси. Два канала управления могут быть использованы для технологического оборудования, реализующего совместно аддитивную технологию и механическую обработку. На одном канале управления выполняется управляющая программа для получения заготовки по аддитивной технологии, а на втором - управляющая программа для механической обработки этой заготовки и получения изделия.

Более сложной задачей является управление источником технологического воздействия. Управление параметрами источника воздействия решается на уровне программы программируемого логического контроллера (ПЛК). Вызов ПЛК программы в управляющую программу системы ЧПУ осуществляется с использованием вспомогательных M-функций [12], или через прямое управление входами/выходами электроавтоматики с вызовом подготовительных функций G110/G111 [13]. Конфигурация вспомогательных M-функций, как и привязка адресов входов/выходов электроавтоматики осуществляется производителем аддитивного технологического оборудования.

Управление интерполируемыми параметрами источника технологического воздействия предполагает их синхронизацию с параметрами интерполяции движения при формообразовании. Например, управление мощностью лазера в зависимости от текущей контурной скорости (подачи). Возможно несколько решений при использовании управляющей платформы «АксиОМА Контрол»:

- с использованием интерфейса ЧПУ-ПЛК;
- с использованием внешнего устройства;
- с использованием внешнего интерполятора.

Вариант создания нового типа интерполяции в ядре системы ЧПУ не рассматривается, так как требует полностью открытого кода ядра системы ЧПУ.

Решение на базе *интерфейса ЧПУ-ПЛК* предполагает передачу в ПЛК [14] параметра интерполяции движения на каждом такте интерполяции. ПЛК программа реализует управление интерполируемыми параметрами источника технологического воздействия. Следует учитывать, что управление будет запаздывать на один такт интерполяции, но ошибку можно снизить, уменьшив такт интерполяции до 1 или 0,5 мсек.

Решение на базе *внешнего устройства* предполагает использование Ethernet-контроллера [15] периферийных устройств, реализующего специфику управления исполнительными устройствами (в нашем случае источником технологического воздействия). Для ядра системы ЧПУ контроллер внешнего устройства выглядит как интеллектуальный привод (или набор приводов), которому на каждом такте интерполяции передаются текущие значения параметров интерполяции и текущее задание на исполнение.

Решение на базе *внешнего интерполятора* предполагает подключения к системе ЧПУ проприетарных устройств сторонних производителей, имеющих закрытое решение. Например, подключение лазера со сканатором, управляемого от автономного контроллера на плате PCI со своим собственным интерполятором. Синхронизация интерполятора системы ЧПУ с интерполятором автономного контроллера на плате PCI происходит по интервалу выполнения заданий. По схеме внешнего интерполятора реализована рассмотренная ниже установка послойного лазерного синтеза.

В рамках совместного проекта ОАО НИАТ и МГТУ «СТАНКИН» разработан опытный образец установки послойного лазерного синтеза с системы управления «АксиОМА Контрол» с рабочей областью 350x350x300 мм. Экспериментальные образцы (рис. 7 а)), получены послойным спеканием в атмосфере аргона с примесью воздуха, при толщине слоя 100 мкм, при разной скорости и шаге штриховки. Экспериментальные образцы по горизонтали соответствуют скоростям перемещения луча в 80 и 120 мм/сек, а по вертикали – шагу штриховки в 75 и 100 мкм. Мощность излучения лазера составляет 170 Вт, а диаметр луча - 150 мкм.

Выращивание готового изделия (рис. 7 б)), осуществлялось в атмосфере практически чистого аргона при спекании слоев толщиной 100 мкм, при скорости луча 80 мм/сек и мощности излучения 170 Вт [16].

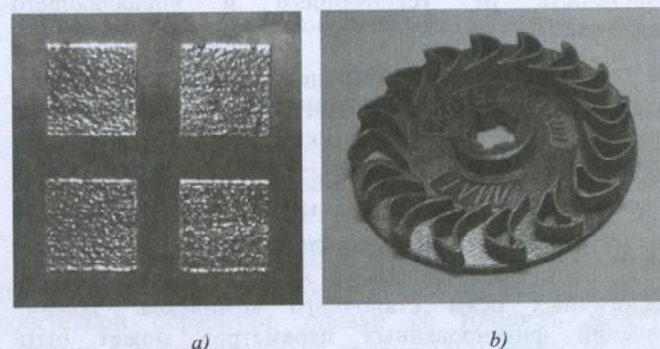


Рис. 7. Экспериментальные образцы слоёв и готовые изделия, полученные методом послойного синтеза

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже было сказано, функционально большая часть системы управления аддитивным технологическим оборудованием аналогична стандартной системе ЧПУ, в связи с чем одним из вариантов реализации такой системы управления является её построение на базе коммерческой системы ЧПУ [17]. Для этого базовая система ЧПУ должна отвечать следующим требованиям:

- наличие открытой архитектуры ядра;
- достаточное количество одновременно интерполируемых осей – в зависимости от сложности аддитивного технологического оборудования, количество одновременно интерполируемых осей может достигать 10 штук и более.

Помимо прочего, создание системы управления аддитивным технологическим оборудованием на базе системы ЧПУ, используемой в технологическом оборудовании на остальных подразделениях (в первую очередь, производственных подразделениях предварительной и финишной обработки) позволит повысить степень унификации и сократить сроки на подготовку обслуживающего и технологического персонала.

Перспективным выглядит использование в качестве базовой системы ЧПУ отечественной разработки «АксиОМА Контрол», отвечающей вышеперечисленным требованиям и обладающей широким потенциалом для дальнейшего развития и модернизации [18].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шваб К. Четвёртая промышленная революция. - М: Эксмо, 2016. - 138 с.
- [2] Bondar K. What is in reality Industry 4.0? ([www.innovacima.com/en/2017/11/09/what-is-industry-4-0](http://www.innovacima.com/en/2017/11/09/what-is-industry-4-0)).
- [3] Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*, 2015. №2. - с. 22–25.
- [4] Martinova L., Martinov G. (2018). Automation of Machine-Building Production According to Industry 4.0. In: 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Vladivostok, pp.1-4. (<https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482165>).
- [5] Коваленко А.В. Концепция универсальной системы ЧПУ для современного технологического оборудования // *Авиационная промышленность*, 2011. №4. - с. 36-41.
- [6] Nezhmetdinov R., Sokolov S., Obukhov A., Grigor'ev A. (2014). Extending the functional capabilities of NC systems for control over

- mechano-laser processing. *Automation and Remote Control*, 75(5), pp.945-952. (<https://doi.org/10.1134/S0005117914050129>).
- [7] Martinov G., Martinova L. (2010). Trends in the numerical control of machine-tool systems. *Russian Engineering Research*, 30(10), pp.1041-1045. (<https://doi.org/10.3103/S1068798X10100175>).
  - [8] Коваленко А.В., Орешкин О.М. Особенности управления технологическими процессами электронно-лучевой и лазерной обработки от системы ЧПУ // *Автоматизация в промышленности*, 2015. №5. - с. 42-46.
  - [9] Коваленко А.В. Автоматизация управления параметрами электронного луча (на примере триодной прямонакальной электронно-лучевой пушки) // *Автоматизация в промышленности*, 2012. №5. - с. 34-35.
  - [10] Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R., Grigoriev A., Obukhov A., Martinova L. (2017). Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems. *Automation and Remote Control*, 78(3), pp.525-536. (<https://doi.org/10.1134/S0005117917030122>).
  - [11] Martinov G., Obuhov A., Martinova L., Grigoriev A. (2014). An Approach to Building Specialized CNC Systems for Non-traditional Processes. *Procedia CIRP*, 14, pp.511-516. (<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.049>).
  - [12] Martinova L., Fokin N. (2018). An approach to creation of a unified system of programming CNC machines in the dialog mode. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. pp.1-5. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401101>).
  - [13] Pushkov R., Salamatin E., Evstafieva S. (2018). Method of developing parametric machine cycles for modern CNC systems using high-level language. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. pp.1-7. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401116>).
  - [14] Kovalev I., Nikishechkin P., Grigoriev A. (2017) Approach to Programmable Controller Building by its Main Modules Synthesizing Based on Requirements Specification for Industrial Automation. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp.1-4. (<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076121>).
  - [15] Elmar W., Marcel M., Marc R. (2015) Integration of real-time Ethernet in Linux CNC. *Int J Adv Manuf Technol* 78:1837–1846. (<https://doi.org/10.1007/s00170-015-6786-y>).
  - [16] Hauser C, Childs THC, Dalgarno KW, Eane RB. Atmospheric control during direct selective laser sintering of stainless steel 314S powder. *SOLID FREEFORM FABRICATION PROCEEDINGS* 1999;8:265-272.
  - [17] Yingxue Y., Miao L., Jianjun D., Liang Z. Design of a machine tool control system for function reconfiguration and reuse in network environment, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;56:117-126. (<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.09.005>).
  - [18] Martinova L., Kozak N., Nezhmetdinov R., Pushkov R., Obukhov A. (2015). The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application. *Automation and Remote Control*, 76(1), pp.179-186. (<https://doi.org/10.1134/S000511791501018X>).