



ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 621.91.01

Б.М. БАЗРОВ, д-р техн. наук, проф.
заведующий лабораторией теории модульной технологии¹
E-mail: modul_lab@mail.ru

Н.А. РОДИОНОВА, канд. техн. наук
научный сотрудник лаборатории теории модульной технологии¹
E-mail: n.rodionova@mail.ru

Ю.В. БУДКИН, д-р техн. наук, проф.
советник генерального директора²
E-mail: Budkin.gost@gmail.com

С.А. ЧИЖИК, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.
заведующий лабораторией нанопроцессов и технологий³
E-mail: info@nanosciencelab.info

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д-р техн. наук, проф.
директор⁴
E-mail: mlk-z@mail.ru

В.Л. ГУРЕВИЧ, канд. техн. наук, доц.
директор⁵
E-mail: hurevich@belgim.by

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Российская Федерация

²Российский институт стандартизации, г. Москва, Российская Федерация

³Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

⁴Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

⁵Белорусский государственный институт метрологии, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.04.2022.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКТУАЛИЗАЦИИ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ ПРЕДМЕТА БАЗИРОВАНИЯ

Рассмотрены недостатки традиционного описания изделия машиностроения, в основу которых положены признаки, ориентированные на единичные, типовые и групповые операции технологического процесса. Предложено проектирование и производство отдельных элементов деталей и изделия в целом проводить с позиций эксплуатации и мониторинга его состояния с использованием модульного принципа в технике и технологии. Представление деталей совокупностями модулей позволяет вывить модули поверхностей базирующие, рабочие и связующие и на их основе построить единую классификацию деталей, ориентированную на различные этапы жизненного цикла изделия. Актуализированы основы теории базирования с учетом пересмотра существующего описания из теоретической механики посредством положения 3 координатных точек; для перехода к новому описанию из теории машин и механизмов путем лишения предмета базирования степеней свободы (подвижности) в технической системе (конструкторской, технологической, измерительной). Показано, как проектирование технологии производства изделия и измерения его характеристик проводится в системе, включающей оборудование и средства оснащения в качестве механизмов, замыкающим звеном которых являются предметы базирования.

Ключевые слова: конструкция, изделие, предмет, модуль, комплект баз, базирование, опорная точка, точка контакта, схема базирования, погрешность базирования

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-77-87>

Введение. В настоящее время зарождается эпоха, которую связывают с новой парадигмой производства, называемой «Индустрия 4.0». Данный термин предложен для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей (*IIoT — Industrial Internet of Things*) [1]. В основе новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация Интернета, поэтому дальнейшее развитие производства связывают с машинным обучением (*ML — Machine Learning*) и искусственным интеллектом (*AI — Artificial Intelligence*) [2].

Теперь при кастомизации, адаптации продукции под определенного потребителя, с учетом его интересов и требований, сам потребитель может выступать в качестве дизайнера и инженера, а по его запросам будет контролироваться, управляться и изменяться производственный процесс [3]. Кастомизации способствует современный уровень цифровизации промышленного производства [2], обеспечивающий переход к информационным технологиям создания, поддержки и применения единого информационного пространства продукции во времени, на всех этапах жизненного цикла изделия: от его проектирования и изготовления до эксплуатации и утилизации [2, 3].

Сочетание в глобальной сети информационных технологий, традиционного и аддитивного производства с использованием робототехники на основе машинного обучения и искусственного интеллекта формирует предпосылки к созданию заводов с полной автоматизацией производственных этапов [3, 4]. В результате сочетание традиционного производства, робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные фабрики [1, 5].

Производство машиностроительного производства отличается огромным, непрерывно растущим разнообразием, поэтому необходимо построение единой базы данных конструкций изделий и их комплектующих деталей на основе разработки предельно формализованного метода представления изделия как объекта производства, так и эксплуатации [6]. Наличие единой базы позволяет управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления [7].

Анализ основных положений теории базирования применительно к конструкторским, технологическим и измерительным базам.

Анализ описания изделия по технологическим и метрологическим признакам. Эффективность производства машин в первую очередь зависит от уровня технологической подготовки производства, основу которой составляют технологии [8]. В процессе эволюционного развития машиностроения сформировались 3 вида технологий: единичная, типовая и групповая, имеющие свои преимущества и недостатки.

Применение единичной технологии позволяет строить оптимальный процесс, но приводит к большим затратам времени на его разработку. Типовая технология, снижая объем и сроки технологической подготовки производства, не обеспечивает оптимального процесса для каждой детали одного типа. Групповая технология, хотя и увеличивает размер партии, требует повторяемости выпуска изделий, что существенно сужает область ее эффективного применения. Кроме того, все 3 вида технологии не обладают гибкостью, так как не позволяют в случае необходимости изменять маршрут [6].

Поэтому, а также с учетом необходимости адаптации технологии к изделию и его функциональному назначению, возникает необходимость в разработке принципиально нового вида, предельно формализованной *модульной технологии*.

Одним из основных методов, используемых при исследовании и разработке технических систем, включая сложные производственные системы, является метод структурного анализа. Метод предполагает, что объекты анализа бывают 2 типов: либо предметы, либо операции. Если объект анализа — предмет, то операции образуют его внешнюю среду [6].

В случае анализа производственных систем в качестве предметов рассматриваются производственные данные, а в качестве операции — преобразования над производственными данными [9]. При этом объектом анализа могут быть данные в среде преобразования или преобразования в среде данных. Модель производственной системы представляет собой иерархический набор схем, каждая из которых является детализацией какого-либо объекта (предмета или операции) и окружающей среды из схемы предыдущего (более высокого) уровня [6, 9].

Поэтому построить единую классификацию изделий как объектов производства, так и эксплуатации на основе представления их предметами

или операциями над ними возможно, используя модульный подход при детализации конструкций изделий и их комплектующих деталей [9, 10].

Для решения поставленных задач необходимо, в первую очередь, получить информацию о характеристиках конструкций изделий (КИ). Традиционное описание КИ, в том числе и в электронной форме, включает сборочный чертеж, рабочие чертежи деталей, пояснительную записку, что не отвечает современным требованиям. На чертежах значительная часть многочисленных характеристик представлена в неявном, слабо формализованном виде. Так, на чертеже детали не указывается число поверхностей, их функциональное назначение и связи между ними. Для устранения отмеченных недостатков предлагается описание КИ *совокупностью модулей* [6, 8].

Анализ технологии и метрологии традиционного и аддитивного производства. Сущность быстро развивающегося аддитивного производства заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по цифровым моделям без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [1]. Различают две основные группы аддитивных методов: с «предварительным формированием слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим наличие определенной платформы (или ванны), на которой послойно «выращивается» материал и изделие; а также методы «непосредственного осаждения слоя» материала на сложнопрофильную поверхность изделия по технологиям *DD (Direct Deposition)* [3, 4].

Эти группы методов, в свою очередь, определяют расположение поверхностей, от которых ведется построение изделий, а также их последующий контроль посредством измерений пространственно сложной формы. Кроме того, для контроля формируемых полостей изделия теперь уже не достаточно обычного сканирования поверхностей, а требуется томография, для которой в процессе измерений зачастую меняются координатные системы отсчета [3, 4].

Вместе с тем даже у новейших напечатанных на 3D-принтере изделий сопряжения деталей в узлах требуют высокой точности, которая достигается только последовательностью финишных операций традиционного производства. Помимо этого, сервисное обслуживание изделия и замена в нем этих ответственных деталей при ремонте предполагают использование модульного подхода в технике для повышения ее надежности и долговечности [6].

Эффективность производства изделий в первую очередь зависит от уровня технической подготовки производства, включающей конструкторскую, тех-

нологическую, метрологическую и другие, основу которых составляют технологии [6, 11].

Поэтому, с учетом необходимости адаптации технологии к изделию и его функциональному назначению, возникает необходимость в принципиально новом виде предельно формализованной *модульной технологии* [6]. В свою очередь для унификации производства по модульной технологии требуются единые классификация и кодирование изделий как объектов производства, так и эксплуатации на основе представления их предметами или операциями над ними, используя модульный подход при детализации конструкций изделий, их комплектующих деталей и элементов [6].

Размерные связи играют большую роль как в создании изделия, так и в процессе его функционирования, а размерные цепи возникают при решении разнообразных конструкторских, технологических и метрологических задач в машиностроении. Поскольку размерные цепи возникают в результате выбора баз и базирования, то теории размерных цепей должен предшествовать теоретический анализ основ базирования [6, 11].

Следует подчеркнуть, что в машиностроении непрерывно растет разнообразие продукции, технологий и происходит широкая цифровизация производства. Поэтому требуется дальнейшее совершенствование основ теории базирования, включая введение новых понятий, их определений, уточнения известных с использованием модульного принципа в технике и технологиях, в условиях традиционного и аддитивного производств, их системной конструкторской, технологической и метрологической подготовки [1, 3, 6, 8].

Понятийный аппарат теории базирования на основании анализа степеней свободы предмета базирования.

Базирование, базы и опорные точки. Базирование находит широкое применение в машиностроении как при проектировании изделий, так и при их изготовлении, контроле и диагностике и оказывает большое влияние на их качество. В ГОСТ 21495–76 [12] приведены термины и определения, раскрывающие содержание процесса базирования.

Однако за прошедшие десятилетия в результате развития техники и технологии появилась необходимость в пересмотре некоторых понятий и введения новых, уточняющих описание процесса базирования [13–17].

Согласно [12], *базирование* — придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Во-первых, при таком определении, отсутствуют деталь и сборочная единица, которые тоже подвергаются базированию при сборке изделия.

Поэтому в понятие базирования вместо заготовки и изделия следует внести слово *предмет базирования*, под которым будет пониматься заготовка, изделие, деталь, сборочная единица.

Во-вторых, надо отметить, что фактически базирование выполняет две функции: *лишение предмета степеней свободы (подвижности) и придание ему требуемого положения* относительно заданной системы координат.

При этом возникают случаи, когда требуется выполнение только одной функции.

Например, при базировании диска в 3-кулачковом патроне при лишении его возможности поворота вокруг его оси не ставится задача обеспечения заданного углового положения, а требуется только лишить его степени свободы по этой координате.

Кроме того, в одних случаях требуется лишение предмета базирования всех степеней свободы, а в других случаях — предмет лишается одной или нескольких степеней свободы.

С учетом этого предлагается формулировка понятия базирования: *базирование* — лишение предмета степеней свободы (подвижности) и придание ему требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Следующим важным термином является база. Согласно [12], *база* — поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

Базы делятся на *явные* (материальные) и *скрытые* (нематериальные). К первым базам относятся поверхности, сочетание поверхностей, риски, а также ось и точка. К нематериальным базам относятся воображаемая точка, ось, линия, плоскость, являющиеся элементами симметрии, которые материализуются в виде точек, рисок [11, 16].

В связи с этим будем понимать под базой поверхность, или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, или элемент симметрии предмета базирования, и используемые для базирования.

Элементами симметрии базирования являются точка симметрии на линии, центр симметрии на плоскости, центр симметрии в пространстве, линия симметрии, плоскость симметрии, ось симметрии.

Следующим термином, требующим усовершенствования, является «скрытая база».

Согласно [12], *скрытая база* — база в виде воображаемой плоскости, оси или точки. Так как скрытая база — это нематериальная база, то запишем формулировку скрытой базы в следующем виде. *Скрытая база* — элемент симметрии предмета в виде точки симметрии на линии или центра симметрии на плоскости, или линии симметрии, или центра симметрии в пространстве, или плоскости симметрии, или оси симметрии.

Далее следует внести изменение в обозначения опорной точки [11, 16].

Согласно [12], *опорная точка* — точка, символизирующая одну из связей заготовки или изделия в выбранной системе координат. В связи с тем, что в известном понятии базирования (рисунок 1а) отражается только одна его функция — определение положения предмета базирования в выбранной системе координат, опорная точка обозначается знаком $\diamond \wedge$.

В новой формулировке понятия «базирование» одной из выполняемых им функций является лишение предмета базирования степеней свободы. Тогда опорная точка должна показывать лишение предмета одной степени свободы (подвижности), то есть перемещения по одной координате.

Однако в известном обозначении опорной точки это не находит отражения. Чтобы исключить это противоречие предлагается следующее обозначение опорной точки $\diamond \wedge$.

Ее определение: *опорная точка* — точка, символизирующая лишение возможности перемещения предмета по одной координате в выбранной системе координат. Такое обозначение опорной точки показывает, что предмет базирования может перемещаться по другим координатам (см. рисунок 1 б).

Применение аппарата теории базирования при проектировании изделий и средств технологического и метрологического обеспечения.

Представление изделия структурированным множеством модулей. В качестве модулей КИ принимается модуль группы деталей (МД) изделия и модуль группы поверхностей детали — модуль поверхностей (МП). Объединение деталей в МД и поверхностей детали в МП определяется этапом жизненного цикла изделия, т. к. на разных этапах

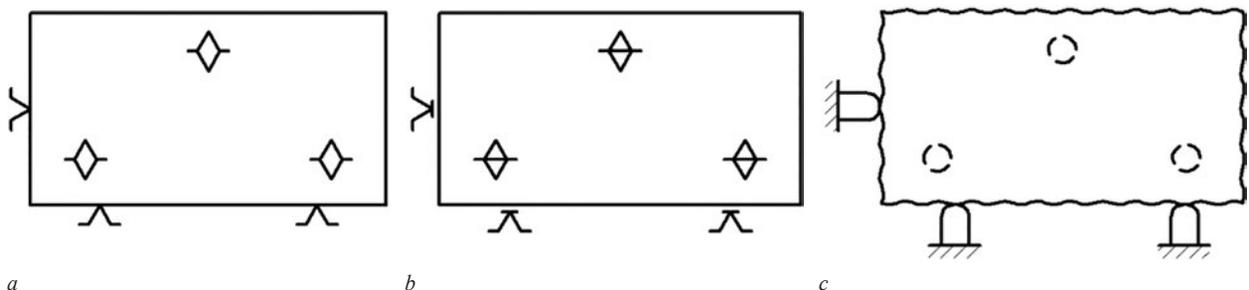


Рисунок 1 — Обозначение схемы базирования: а — опорных точек по [17]; б — предложенная проектная схема; с — конструкторская (технологическая и измерительная) схема
Figure 1 — Designation of the locating scheme: а — reference points according to [17]; б — proposed design scheme; с — design (technological and measuring) schemes

МД и МП выполняют разные роли и представляются разным составом, соответственно, деталей и поверхностей.

Таким образом, изделие может быть представлено совокупностью МД, а если все детали заместить совокупностями МП, то КИ можно представить множеством МП. Модульное строение КИ можно описать графом иерархической структуры, вершиной которого является базовая деталь. Например, у металлорежущего станка базовой деталью является станина.

Граф КИ строится следующим образом. Сначала определяется базовая деталь изделия, принимаемая за вершину графа, затем определяются элементы КИ (МД или детали), установленные на базовой детали, далее определяются элементы, установленные на элементах предыдущего уровня и т. д. до последнего элемента.

Теперь для описания КИ воспользуемся характеристиками графа — числами: элементов, уровней, узлов, узлов на каждом уровне, ветвей.

На ребрах графа указываются координирующие размеры, связывающие комплекты баз деталей, в качестве которых выступают основные вспомогательные базы.

Основными базирующими поверхностями являются поверхности, которыми деталь устанавливается в изделие, а вспомогательными базирующими поверхностями — поверхности, на которых устанавливаются на деталь другие детали.

Узел графа несет информацию о характеристиках элемента КИ. Например, если узел отражает деталь, то указывается ее масса, габаритные размеры, материал. Целесообразно характеристики узлов отражать в табличной форме.

В зависимости от степени детализации описания КИ строятся графы 3 уровней: МД и деталей, не вошедших в их состав (1-й уровень); деталей (2-й уровень); МП (3-й уровень).

На графе 1-го уровня в качестве узлов графа выступают МД и детали, не вошедшие в их состав. У графа 2-го уровня в качестве узлов выступают детали. У графа 3-го уровня в качестве узлов выступают МП. Граф 2-го уровня строится замещением каждого МД в графе 1-го уровня графами их деталей. Граф 3-го уровня строится посредством замещения в графе 2-го уровня каждой детали графами их МП.

Графы в обозримой концентрированной форме представляют информацию о строении КИ: составе элементов, ее структуре, размерных, точностных, прочностных, жесткостных и других связях между элементами КИ, влияющими на образование выходных показателей КИ.

Рассмотрим описание КИ как объект эксплуатации. Изделие предназначается для выполнения рабочего процесса, поэтому все модули КИ несут соответствующую функциональную нагрузку.

Аналогично и поверхности детали тоже предназначены выполнять служебные функции. Обозначим эти модули МДФ и МПФ.

По функциональному признаку МДФ и МПФ следует разделить на модули функциональные технологические (МФТ, МПТ) и модули функциональные обслуживающие (МФО, МПО).

МФТ — это часть КИ, с помощью которого КИ выполняет свое служебное назначение; МФО — это часть КИ, обеспечивающая выполнение МФТ своего назначения.

МПТ — это сочетание поверхностей детали, с помощью которого деталь выполняет соответствующую служебную функцию; МПО — это сочетание поверхностей, с помощью которого МПТ выполняет свое назначение.

Объединение деталей в МДФ и объединение поверхностей детали в МПФ по функциональному признаку обеспечивает однозначность их определений.

Например, у токарного станка в качестве МФТ выступают шпиндельный узел с патроном (МФТ1), предназначенный для установки заготовки, и резцедержатель (МФТ2) для установки инструмента.

Чтобы обеспечить закон относительного движения МФТ1 и МФТ2, в качестве МФО выступают коробка передач (МФО1), коробка скоростей (МФО2), двигатель (МФО3)

У автомобиля МФТ являются кузов для размещения груза (МФТ1) и шасси (МФТ2) для обеспечения движения автомобиля, а в качестве МФО выступают двигатель (МФО1), трансмиссия (МФО2) и другие устройства, обеспечивающие выполнение МФТ своих функций.

Что касается детали, то она в общем случае предназначена для выполнения изделием рабочего процесса и для установки на ней других деталей. Поэтому в качестве МПТ у детали выступают модули баз и модули рабочих поверхностей.

Например, у зубчатого колеса в качестве одного МПТ выступает набор боковых поверхностей зубьев для передачи крутящего момента и второго МПТ — набор баз: торец, отверстие и боковая поверхность шпоночного паза для установки зубчатого колеса в изделии.

Для выполнения своего служебного назначения перечисленные МПТ объединяются в деталь с помощью связующих поверхностей, объединенных в МПО.

Кодирование при описании функциональных технологических модулей. Для представления детали совокупностью МПФ предлагаются следующие классификация и кодирование. По служебному признаку все МПФ делятся на 3 класса: базирующие (МПБ), рабочие (МПР), связующие (МПС). Такое деление МПФ придает им однозначность в определении и является главным отличием и преимуществом данной классификации.

Следующим шагом в разработке классификации МПФ является деление каждого класса на подклассы, группы, подгруппы. Поэтому далее

каждый класс МПФ должен подразделяться по конструктивным и геометрическим признакам.

На рисунке 2 приведена классификация и кодирование видов МПФ, из которой следует, что она содержит 26 видов МПФ, из них 14 — МПБ и по 6 видов МПР и МПС. Их примеры приведены на рисунке 3. На рисунке 4 а показан чертеж детали в модульном исполнении, где все ее поверхности закодированы, объединены в группы и соответствующие модули.

Граф МПФ детали строится следующим образом (см. рисунок 4 б). За вершину графа принимаем МПБ, выступающий в роли комплекта основных баз детали. На 2-м уровне располагаются МПФ, конструкторской базой которых является МПФ 1-го уровня. На следующем уровне располагаются МПФ, конструкторской базой которых являются МПФ предыдущего уровня, и так продолжается до последнего МПФ детали.

Граф МПФ детали показывает ее структуру на модульном уровне, состав МПФ, уровень сложности конструкции. На ребрах графа могут быть указаны допуски на координирующие размеры МПФ.

Информацию о характеристиках конструкции детали удобно представлять в табличной форме (таблица). В ней в достаточно емкой форме приведены МПФ, их координирующие размеры, допуски и конструкторские базы. Замещающие детали,

представленные в графе графиками их МПФ, получим граф изделия 3-го уровня в виде структурированного множества МПФ.

Научно-методические основы актуализации базирования в машиностроении.

Схемы базирования, модули баз и погрешности базирования. Практика развития машиностроения требует введения дополнительных терминов для описания процесса базирования [16, 17].

В [12] приведен термин «схема базирования», под которой понимается схема расположения опорных точек на базах. Однако такое понятие схемы базирования не учитывает базирование предмета в реальных условиях на практике.

Схема базирования может быть теоретической, проектной, конструкторской.

Как известно, в основе теории базирования [11] лежит положение теоретической механики, согласно которому положение абсолютно твердого тела определяется координатами 3 его точек, не лежащих на одной прямой.

В соответствии с этим под *теоретической схемой базирования* будем понимать расположение проекции координат 3 точек предмета базирования на координатных плоскостях прямоугольной системы координат по схеме 3-2-1. Здесь 3 проекции координат образуют установочную (У) базу, 2 проекции — направляющую (Н) базу, и 1 проекция — опорную (О) базу.

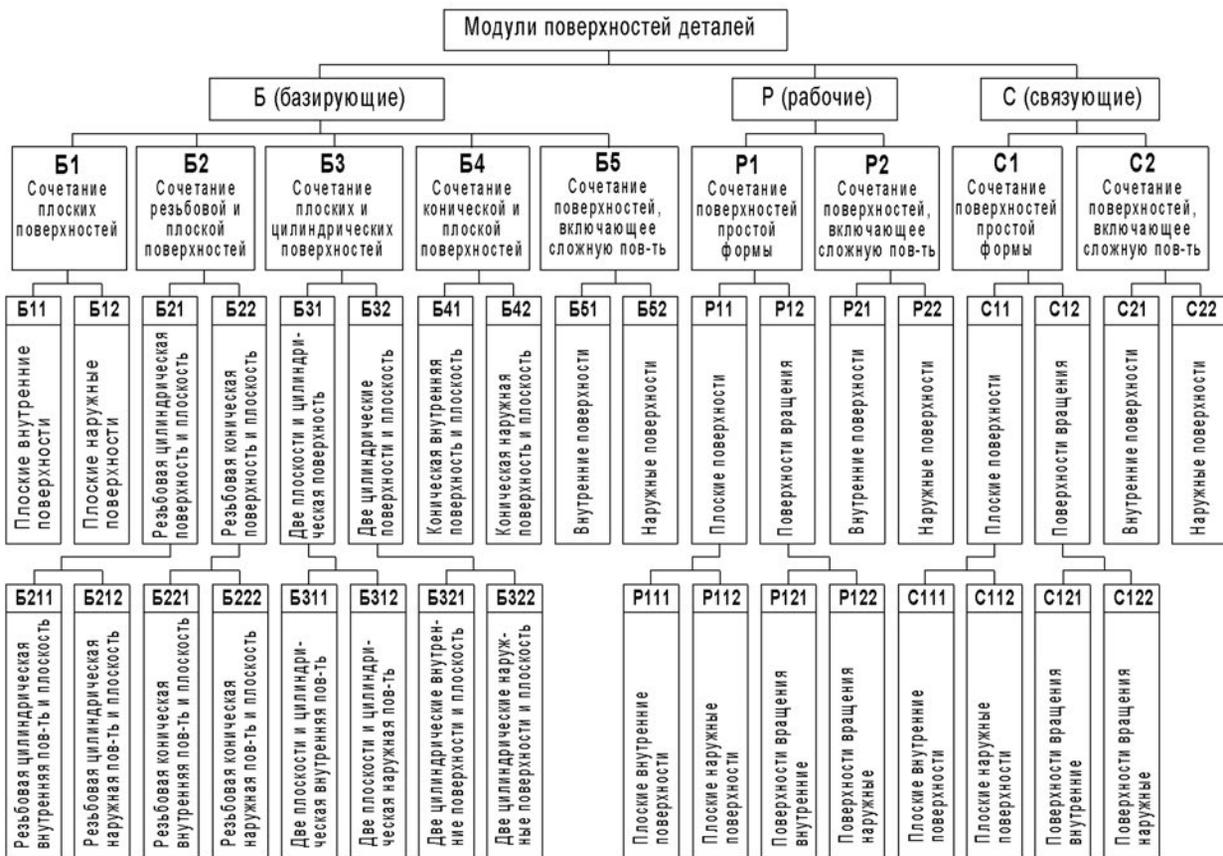


Рисунок 2 — Классификация и кодирование модулей функциональных поверхностей (МПФ)
Figure 2 — Classification and coding of functional surface modules (FSM)

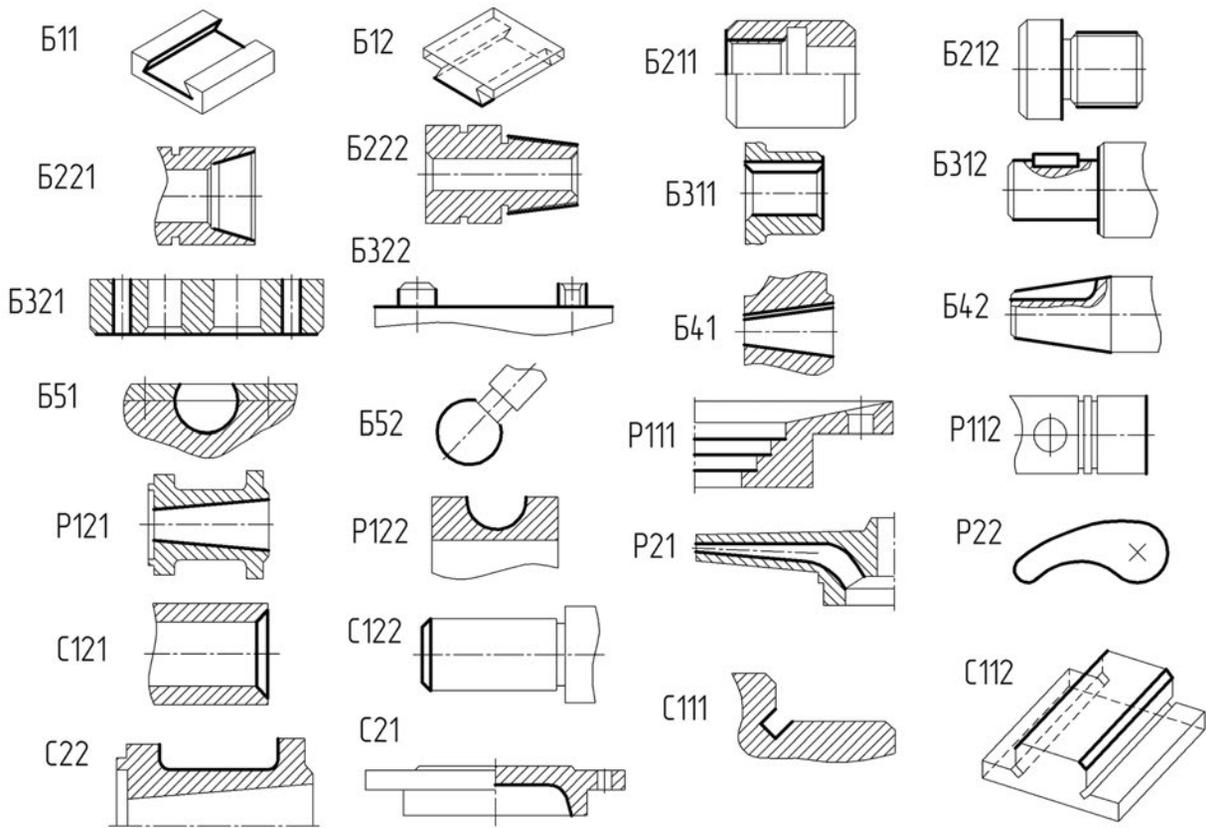


Рисунок 3 — Примеры конструктивного оформления видов модулей функциональных поверхностей (МПФ)
 Figure 3 — Examples of constructive design of FSM types

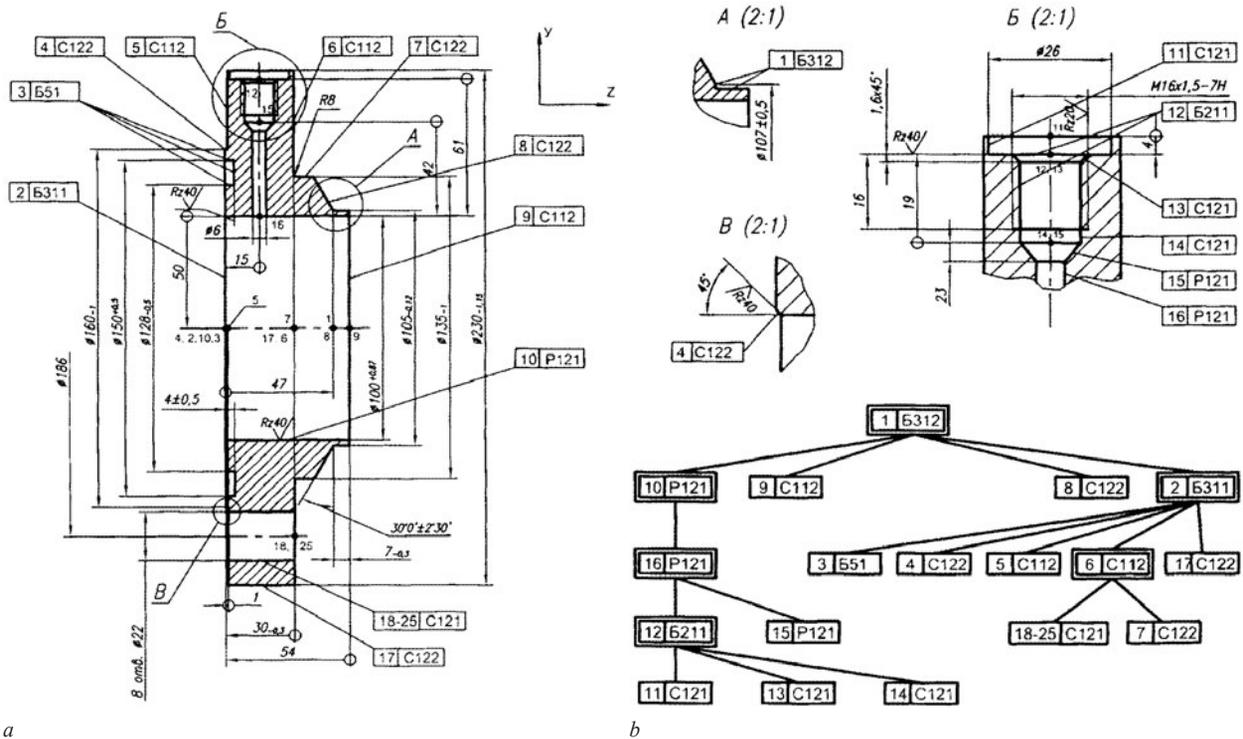


Рисунок 4 — Чертеж детали «Крышка» в модульном исполнении (а) и граф модулей функциональных поверхностей (МПФ) детали (б)

Figure 4 — Drawing of the part “Cover” in modular design (a) and FSM graph of the part (b)

В реальных условиях базирование предмета происходит не его точками, а поверхностями, на которых располагаются опорные точки.

Если в первом случае для базирования предмета было достаточно 3 баз: установочной, направляющей и опорной, то во втором случае

Таблица — Кодирование и характеристики конструкции детали
Table — Coding and design characteristics of the part

№ (см. рисунок 4)	МП	Базовые МП	Параметры относительного положения МП					
			$X, \text{ мм}$	$Y, \text{ мм}$	$Z, \text{ мм}$	$\varphi, ^\circ$	$\psi, ^\circ$	$\theta, ^\circ$
1	МПБ 312	—	0	0	0	0	0	0
2	МПБ 311	1 МПБ 312	0	0	-47	0	0	0
3	МПБ 51	2 МПБ 311	0	0	0	0	0	0
4	МПС 122	2 МПБ 311	0	0	0	0	0	0
5	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	1	0	0	0
6	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	$30_{-0,3}$	0	0	0
7	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	-8,7	0	0	0
8	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	0	0	0	0
9	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	54	0	0	0
10	МПР 121	1 МПБ 312	0	0	-47	0	0	0
11	МПС 121	12 МПБ 211	0	4	0	0	0	0
12	МПБ 211	12 МПР 121	0	61	0	0	0	0
13	МПС 121	12 МПБ 211	0	0	0	0	0	0
14	МПС 121	12 МПБ 211	0	-19	0	0	0	0
15	МПР 121	16 МПР 121	0	42	0	0	0	0
16	МПР 121	10 МПР 121	90	50	15	0	0	0
17	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	-17	0	0	0
18	МПБ 311	1 МПБ 312	-46,5	80,4	-17	0	0	0
19	МПБ 311	1 МПБ 312	-80,4	46,5	-17	0	0	0
20	МПБ 311	1 МПБ 312	-80,4	-46,5	-17	0	0	0
21	МПБ 311	1 МПБ 312	-46,5	-80,4	-17	0	0	0
22	МПБ 311	1 МПБ 312	46,5	-80,4	-17	0	0	0
23	МПБ 311	1 МПБ 312	80,4	-46,5	-17	0	0	0
24	МПБ 311	1 МПБ 312	80,4	46,5	-17	0	0	0
25	МПБ 311	1 МПБ 312	46,5	80,4	-17	0	0	0

вводятся дополнительные базы: двойная направляющая (ДН) и двойная опорная (ДО).

С помощью этих баз осуществляется базирование предмета скрытыми базами. Однако для полного охвата возможных вариантов конструкции предмета требуется введение *трехопорной базы* (ТО), являющейся скрытой базой, лишаящей предмет 3 перемещений по 3 координатным осям [6].

Трехопорная база — база, используемая для наложения на предмет базирования связей, лишаящих предмет 3 перемещений по 3 координатным осям [6, 16, 17].

В связи с введением дополнительных баз ДН, ДО, ТО число комплектов баз увеличивается до 4: У-Н-О, У-ДО-О, ДН-О-О, ТО-ДО-О.

Базы могут быть явными или скрытыми, что оказывает существенное влияние на процесс базирования предмета.

В связи с этим введем термин *модуль баз*, под которым будем понимать комплект баз, учитывающий характер базы (явный (я) или скрытый (с)) [16, 17].

Например, у комплекта баз У-Н-О может быть 4 модуля баз:

$$У_я-Н_я-О_я; У_с-Н_я-О_я; У_с-Н_с-О_я; У_с-Н_с-О_с.$$

При проектировании изделий, разработке технологических процессов используется проектная схема базирования, где базирование предмета осуществляется его поверхностями, а не точками.

Тогда *проектная схема базирования* — схема расположения опорных точек на поверхностях предмета базирования или его элементах симметрии.

В изделии проектная схема базирования превращается в конструкторскую схему базирования. *Конструкторская схема базирования* — проектная схема базирования с опорными точками, выполненными в виде опорных элементов (см. рисунок 1 с).

Соответственно также при обработке и сборке изделия, измерениях его характеристик и деталей в технологическом процессе и при эксплуатации определяются *технологическая и измерительная схемы базирования*.

Наличие конструкторской, технологической и измерительной схем базирования требует введения

термина «погрешность базирования». Это, в свою очередь, также предполагает использование положений теории машин и механизмов (в том числе пространственных) для определения погрешностей взаиморасположения различных частей системы (элементов механизма).

В существующем стандарте [12] *погрешность базирования* — это отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при базировании от требуемого. Данная формулировка погрешности базирования отражает только качественную сторону понятия и не показывает, как оценивать количественно погрешность базирования.

В связи с этим предлагается следующая формулировка понятия погрешности базирования.

Погрешность базирования — отклонения фактически достигнутого положения предмета базирования по координатам от требуемого.

При конструкторской (технологической и измерительной) реализации базирования предмета скрытой базой возникает необходимость в термине «точка контакта».

Базирование предмета скрытой базой осуществляется с помощью самоцентрирующего механизма.

Например, при базировании диска в самоцентрирующих тисках с плоскими губками посредством точек контакта 1, 2, образующими опорную скрытую базу (точка 3), лишаящую его одной степени свободы (рисунок 5).

В связи с этим под *точкой контакта* будем понимать точку контакта элемента самоцентрирующего механизма с предметом базирования. В результате при проектировании конструкции изделия, технологии его производства и измерения характеристик следует рассматривать системы, включающие оборудование и средства оснащения в качестве механизмов, замыкающим звеном которых являются предметы базирования.

Заключение. Предложена единая методическая база для представления изделия как объекта цифровизации производства на основе структурированного множеством модулей, позволяющая управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления.

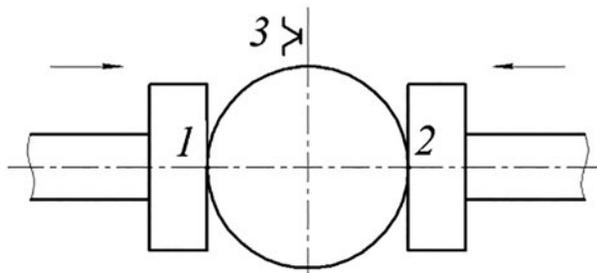


Рисунок 5 — Схема образования точек контакта в самоцентрирующем механизме
Figure 5 — Scheme of formation of contact points in a self-centering mechanism

1. Проектирование и производство как отдельных конструктивно-технологических элементов деталей, так и кастомизированного изделия в целом с позиций его эксплуатации по функциональному назначению и мониторинга состояния путем контроля и диагностики как в традиционном, так и в аддитивном производстве, а также при эксплуатации целесообразно строить на основе использования модульного принципа в технике и технологии.

2. Описание конструкций изделий иерархическим графом на первом уровне позволяет выявить их функциональные технологические модули, а на их основе построить единую классификацию и предложить кодирование изделий как объектов производства, так и эксплуатации. Представление деталей совокупностями модулей позволяет выявить модули поверхностей базирующих, рабочих и связующих и на их основе построить классификацию и кодирование деталей.

3. Унификация проектных решений как для конструкции самого изделия, так и оборудования и средств технологического и метрологического оснащения при его изготовлении обеспечивает вне зависимости от типа производства (единичное, серийное, массовое) переход от типовых и групповых к модульным технологиям.

4. Основы теории базирования при современном развитии производства следует актуализировать с учетом перехода от существующего описания из теоретической механики посредством положения 3 координатных точек; к новому описанию из теории машин и механизмов путем лишения предмета базирования степеней свободы (подвижности) в технической системе (конструкторской, технологической, измерительной).

5. Проектирование конструкции изделия, технологии его производства и измерения характеристик, его модулей групп деталей и поверхностей следует проводить, рассматривая системы, включающие станки и приспособления, измерительные машины и метрологическое оснащение в качестве механизмов, замыкающим звеном которых являются предметы базирования.

Список литературы

1. Витязь, П.А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П.А. Витязь, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2017. — № 2. — С. 54–72.
2. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. — М.: ГУП «ВИМИ», 1999. — 512 с.
3. Additive Manufacturing for the aerospace industry / ed. by F. Fores, R. Boyer. — Cambridge: Elsevier, 2019. — 465 p.
4. Gibson, I. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. — N.Y.: Springer, 2015. — 498 p. — DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
5. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 238 с.

6. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. — М.: Машиностроение, 2001. — 368 с.
7. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 316 с.
8. Базров, Б.М. Модульный принцип построения станочного оборудования / Б.М. Базров // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 51–53.
9. Управление параметрами качества многофакторных технологических процессов на основе статистического и структурного анализа / П.А. Витязь [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2010. — Т. 54, № 6. — С. 111–116.
10. Дружинин, В.В. Проблемы системологии / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. — М.: Совет. радио, 1976. — 296 с.
11. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения / И.М. Колесов. — М.: Высшая школа, 1999. — 591 с.
12. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения: ГОСТ 21495-76. — Введ. 01.01.1977. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 11 с.
13. Колыбенко, Е.Н. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е.Н. Колыбенко, Н.Ю. Богданова // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 75–78.
14. Абрамов, Ф.Н. Влияние погрешностей формы и взаимного расположения базовых поверхностей на точность базирования призматических заготовок с совмещением баз / Ф.Н. Абрамов // Вестник машиностроения. — 2007. — № 7. — С. 54–64.
15. Новоселов, Ю.А. Системный анализ логики базирования / Ю.А. Новоселов // Вестник машиностроения. — 2007. — № 3. — С. 62–67.
16. Базров, Б.М. Теория и практика базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Вестник машиностроения. — 2017. — № 4. — С. 5–10.
17. Базров, Б.М. Практическое приложение теории базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Вестник машиностроения. — 2017. — № 5. — С.6–11.

BAZROV Boris M., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Modular Technology Theory Laboratory¹
E-mail: modul_lab@mail.ru

RODIONOVA Nataliya A., Ph. D. in Eng.

Researcher of the Modular Technology Theory Laboratory¹
E-mail: n.rodionova@mail.ru

BUDKIN Yury V., D. Sc. in Eng., Prof.

Adviser to Director General²
E-mail: Budkin.gost@gmail.com

CHIZHIK Sergey A., Academician of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Nano-Processes and Technologies Laboratory³
E-mail: info@nanosciencelab.info

KHEIFETZ Mikhail L., D. Sc. in Eng., Prof.

Director⁴
E-mail: mlk-z@mail.ru

GUREVICH Valery L., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director⁵
E-mail: hurevich@belgim.by

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Federal State Budgetary Institution “Russian Standardization Institute”, Moscow, Russian Federation

³A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁴Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁵Belarusian State Institute of Metrology, Minsk, Republic of Belarus

Received 01 April 2022.

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE LOCATING THEORY ACTUALIZATION BASED ON THE DEGREES OF FREEDOM ANALYSIS OF THE LOCATING OBJECT

The disadvantages of the traditional description of a mechanical engineering product are considered, which are based on features focused on single, typical and group operations of the technological process. It is proposed to design and manufacture individual elements of parts and the product as a whole from the standpoint of operation and monitoring of its condition using the modular approach in engineering and technology. The representation of parts by sets of modules makes it possible to identify the locating, working and binding modules of the surfaces and on their basis to build a unified classification of parts

focused on various stages of the product life cycle. The fundamentals of the locating theory are updated, taking into account the revision of the existing description from theoretical mechanics by means of the position of 3 coordinate points; for the transition to a new description from the theory of machines and mechanisms by depriving of object of locating the degrees of freedom (mobility) in the technical system (design, technological, measuring one). It is shown how the design of the production technology of the product and the measurement of its characteristics is carried out in a system that includes equipment and facilities as mechanisms, the closing link of which are locating items.

Keywords: design, product, object, module, set of bases, locating, reference point, contact point, locating scheme, locating error

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-2-59-77-87>

References

- Vitiaz P.A., Kheifetz M.L., Chizhik S.A. "Industriya 4.0": ot informatsionno-kommunikatsionnykh i additivnykh tekhnologiy k samovosproizvedeniyu mashin i organizmov ["Industry 4.0": from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russ.).
- Cherpakov B.I., et al. *Kompyuterizirovannye intergrirovannye proizvodstva i CALS-tekhnologii v mashinostroyeni* [Computerized integrated production and CALS-technologies in mechanical engineering]. Moscow, GUP VIMI Publ., 1999. 512 p. (in Russ.).
- Additive manufacturing for the aerospace industry*. Cambridge, Elsevier, 2019. 465 p.
- Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, Springer, 2015. 498 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- Rusetsky A.M., et al. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov* [Theoretical bases of technological systems designing]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 238 p. (in Russ.).
- Bazrov B.M. *Modulnaya tekhnologiya v mashinostroyeni* [Module technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 368 p. (in Russ.).
- Rusetsky A.M., et al. *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov* [Designing and equipping of technological systems]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 316 p. (in Russ.).
- Bazrov B.M. Modulnyy printsip postroyeniya stanochnogo oborudovaniya [Module principle of building machinery]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2011, no. 11, pp. 51–53 (in Russ.).
- Vitiaz P.A., Kheifetz M.L., Koreshkov V.N., Alekseeva T.A., Liakhovich A.K. Upravleniye parametrami kachestva mnogofaktornykh tekhnologicheskikh protsessov na osnove statisticheskogo i strukturnogo analiza [Management of quality parameters of manufacturing processes using the statistical and structural analysis]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 111–116 (in Russ.).
- Druzhinin V.V., Kontorov D.S. *Problemy sistemologii* [Problems of systemology]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976. 296 p. (in Russ.).
- Kolesov I.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya* [Mechanical engineering technology fundamentals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999. 591 p. (in Russ.).
- State Standard 21495-76. *Bazirovaniye i bazy v mashinostroyeni*. *Terminy i opredeleniya* [Locating and bases in machine building industry. Terms and definitions]. Moscow, Standartov Publ., 1981. 11 p. (in Russ.).
- Kolybenko E.N., Bogdanova N.Yu. Sistemnyye znaniya teorii bazirovaniya v mashinostroyeni [System knowledge of basing theory in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2005, no. 9, pp. 75–78 (in Russ.).
- Abramov F.N. Vliyaniye pogreshnostey formy i vzaimnogo raspolozheniya bazovykh poverkhnostey na tochnost bazirovaniya prizmaticheskikh zagotovok s sovmeshcheniem baz [Influence of shape errors and relative position of base surfaces on the accuracy of basing prismatic workpieces with alignment of bases]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2007, no. 7, pp. 54–64 (in Russ.).
- Novoselov Yu.A. Sistemnyy analiz logiki bazirovaniya [System analysis of basing logic]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2007, no. 3, pp. 62–67 (in Russ.).
- Bazrov B.M. Teoriya i praktika bazirovaniya v mashinostroyeni [Theory and practice of referencing in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2017, no. 4, pp. 5–10 (in Russ.).
- Bazrov B.M. Prakticheskoye prilozheniye teorii bazirovaniya v mashinostroyeni [Practical application of referencing theory in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2017, no. 5, pp. 6–11 (in Russ.).