

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.91.01
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

Поступило в редакцию 17.04.2019
Received 17.04.2019

Б. М. Базров¹, М. Л. Хейфец²

¹*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация*

²*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

МЕТОД ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ КАК ОБЪЕКТА ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРУКТУРИРОВАННЫМ МНОЖЕСТВОМ МОДУЛЕЙ

(Представлено академиком А. П. Ласковневым)

Аннотация. Показаны недостатки традиционного описания изделия машиностроения, в основу которых положены технологические признаки, ориентированные на единичные, типовые и групповые операции технологического процесса. Предложено представлять конструкцию изделия и его деталей структурированным множеством соответствующих технологических модулей, в форме графа иерархической структуры. Рассмотрены численные характеристики структуры графа изделия, его уровней, узлов, ветвей. Описание конструкций изделий иерархическим графом на первом уровне позволяет выявить функциональные технологические модули изделий и на их основе построить единую классификацию и предложить кодирование изделий как объектов производства, так и эксплуатации. Представление деталей совокупностями модулей позволяет выявить модули поверхностей, базирующие, рабочие и связующие, и на их основе построить единую классификацию деталей, ориентированную на различные этапы жизненного цикла изделия. Наличие единой методической базы позволяет управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления.

Ключевые слова: изделие, деталь, конструкция, объект, предмет, операция, структура, модуль, граф, уровень

Для цитирования: Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

Boris M. Bazrov¹, Mikhail L. Kheifetz²

¹*Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic Belarus*

METHOD OF PRESENTING A PRODUCT AS AN OBJECT OF DIGITALIZATION OF MANUFACTURING BY A STRUCTURED SET OF MODULES

(Communicated by Academician Alexander P. Laskovnev)

Abstract. The shortcomings of the traditional description of mechanical engineering product are shown, which are based on technological features oriented to single, typical and group operations of the technological process. It was proposed to represent the design of product and its parts with a structured set of relevant technological modules, in the form of a graph of hierarchical structure. The numerical characteristics of the structure of the graph of product, its levels, nodes, branches are considered. The description of the structures of products by a hierarchical graph at the first level makes it possible to identify the functional technological modules of products and, on their basis, to construct a unified classification and to suggest coding products, both for production objects and operation. Representation of parts by a set of modules allows identifying surface modules, working and binding, and on their basis to build a single classification of parts focused on different stages of the product life cycle. The presence of a unified methodological base allows managing the development of constructively complex products, minimizing duplication in the creation of new designs and effectively developing resource-saving technologies for their manufacture.

Keywords: product, detail, construction, object, thing, operation, structure, module, graph, level

For citation: Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

Введение. Современный уровень цифровизации промышленного производства [1] обеспечивает переход к использованию информационных технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продук-

ции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, т. е. к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) [2]. Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным частям производственного комплекса в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования компьютерной поддержки этапов жизненного цикла продукции [3].

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) [4]. 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) [5]. 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 [6].

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 [7]. Совместное действие различных цифровых технологий за счет синергетических эффектов позволяет резко повысить эффективность производства, дает возможность полностью реструктуризировать предприятия и создавать на них продукцию, которой до этого не было [8].

Продукция машиностроительного производства отличается огромным, непрерывно растущим разнообразием, поэтому целью работы является построение единой базы данных конструкций изделий и их комплектующих деталей на основе разработки предельно формализованного метода представления изделия как объекта производства, так и эксплуатации [9]. Наличие единой базы позволяет управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления [10].

Анализ описания по технологическим признакам изделия машиностроения. Эффективность производства машин в первую очередь зависит от уровня технологической подготовки производства, основу которой составляют технологии [11]. В процессе эволюционного развития машиностроения сформировались три 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, но требует повторяемости выпуска изделий, что существенно сужает область ее эффективного применения. Кроме того, все три вида технологии не обладают гибкостью, так как не позволяют в случае необходимости изменять маршрут [9].

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 двух типов: либо предметы, либо операции. Если объект анализа – предмет, то операции образуют его внешнюю среду [12].

В случае анализа производственных систем в качестве предметов рассматриваются производственные данные, а в качестве операции – преобразования над производственными данными [13]. 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 [14].

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 [13; 15].

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 [9; 11].

Представление изделия структурированным множеством модулей. В качестве модулей КИ примем 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, так как на разных этапах 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.

В результате получим граф, пример которого представлен на рис. 1.

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 и др. Целесообразно характеристики узлов отражать в табличной форме.

В зависимости от степени детализации описания КИ строятся графы трех уровней: МД и деталей не вошедших в их состав (первый уровень); деталей (второй уровень); МП (третий уровень).

На графе первого уровня в качестве узлов графа выступают МД и детали, не вошедшие в их состав. У графа второго уровня в качестве узлов выступают детали. У графа третьего уровня в качестве узлов выступают МП. Граф второго уровня строится замещением каждого МД в графе первого уровня графами их деталей. Граф третьего уровня строится посредством замещения в графе второго уровня каждой детали графами их МП.

Графы в обобщенной 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.

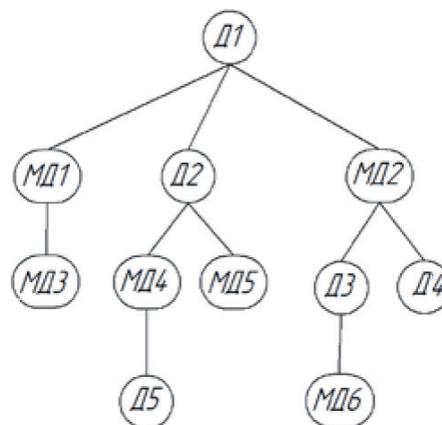


Рис. 1. Граф изделия

Fig. 1. Product graph

Аналогично и поверхности детали тоже предназначены выполнять, соответственно, 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.

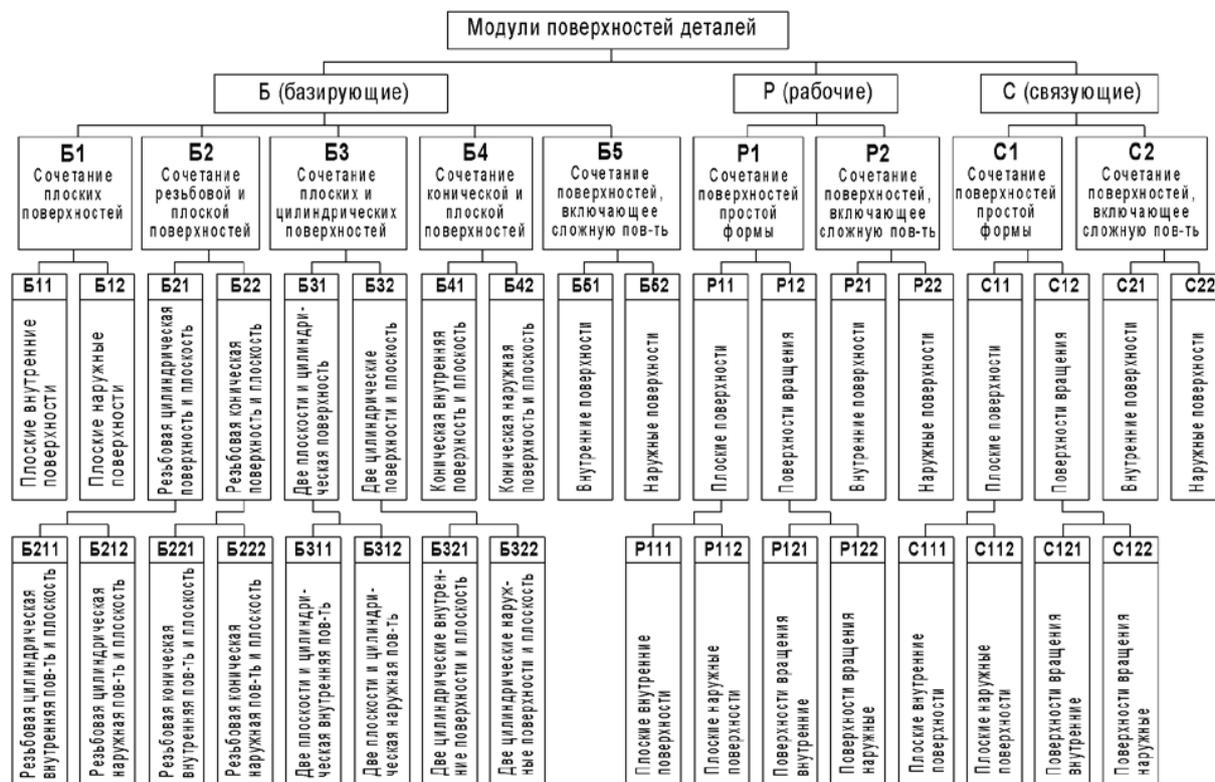


Рис. 2. Классификация и кодирование модулей функциональных поверхностей (МПФ)

Fig. 2. Classification and coding modules of functional surfaces (MFS)

Кодирование при описании функциональных технологических модулей. Для представления детали совокупностью МПФ предлагаются следующие классификация и кодирование.

По служебному признаку все МПФ делятся на три класса: базисные (МПБ), рабочие (МНР), 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 конструктивному и геометрическому признакам.

На рис. 2 приведена классификация и кодирование видов МПФ, из которой следует, что она содержит 26 видов МПФ, из них 14 – МПБ и по шесть видов МНР и МПС. Их примеры приведены на рис. 3.

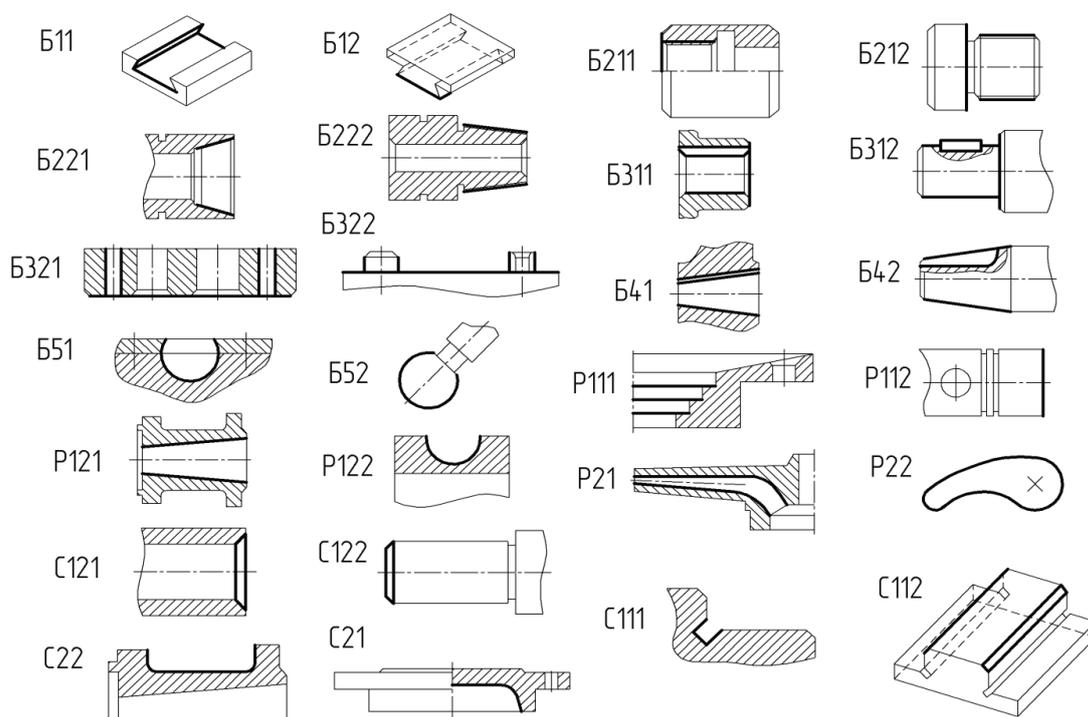


Рис. 3. Примеры конструктивного оформления видов модулей функциональных поверхностей (МПФ)

Fig. 3. Examples of constructive design types of modules of functional surfaces (MFS)

На рис. 4, *a* показан чертеж детали в модульном исполнении, где все ее поверхности закодированы, объединены в группы и соответствующие модули.

Граф МПФ детали строится следующим образом (рис. 4, *b*). За вершину графа принимаем МПБ, выступающий в роли комплекта основных баз детали. На втором уровне располагаются МПФ, конструкторской базой которых является МПФ первого 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), где приведены МПФ, их координирующие размеры, допуски и конструкторские базы. Замещая детали графиками их МПФ, получим граф изделия 3 уровня в виде структурированного множества МПФ.

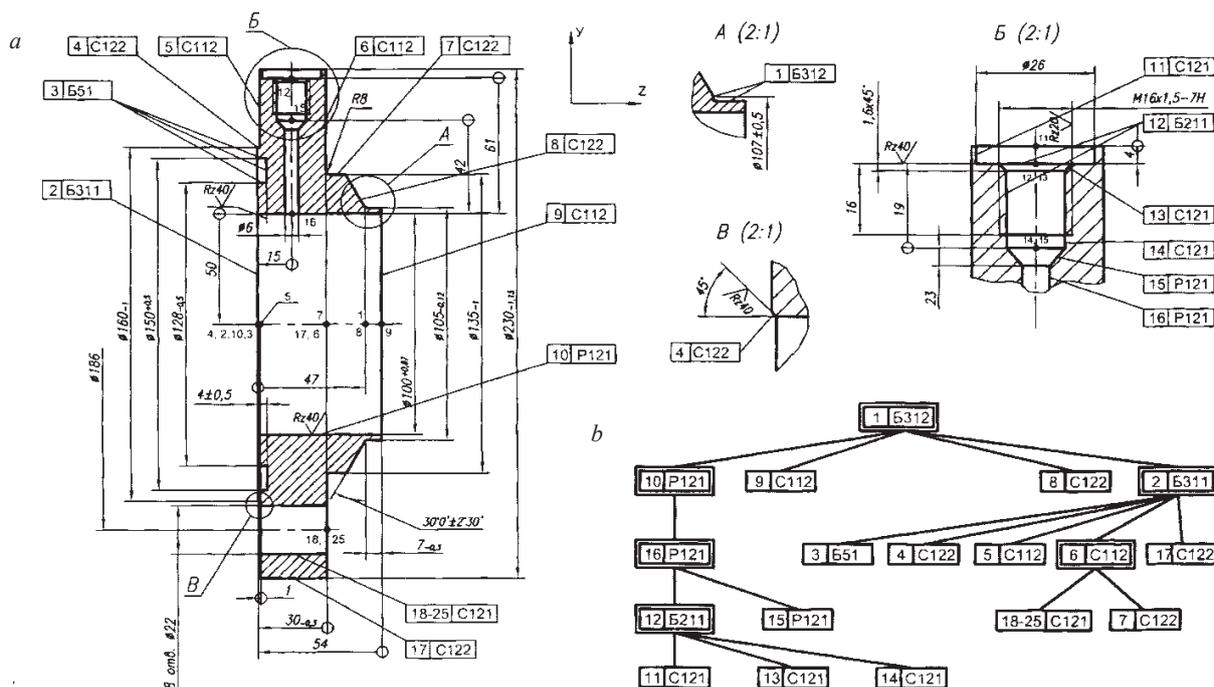


Рис. 4. Чертеж детали «Крышка» в модульном исполнении (а) и граф модулей функциональных поверхностей (МПФ) детали (б)

Fig. 4. The drawing of the part “Cover” in modular design (a) and the graph of modules of functional surfaces (MTF) of the part (b)

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

Обозначения на рис. 4 Notations in Fig. 4	Модуль поверхности Surface module	Базовые модули поверхности Basic surface modules	Параметры относительного положения модуля поверхности Parameters of relative position of the surface module					
			X, мм	Y, мм	Z, мм	ϕ°	ψ°	θ°
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

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.

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, ориентированные на различные этапы жизненного цикла изделия.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (проект T18P-183).

Acknowledgements. Their research is supported by the Belorussian Republican Fond Fundamental Research and Russian Fond Fundamental Research (Project T18P-183).

Список использованных источников

1. Hannam, R. *Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realization* / R. Hannam. – Harlow, 1977. – 258 p.
2. CALS в авиастроении / А. Г. Братухин [и др.]. – М., 2000. – 304 с.
3. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / под ред. Б. И. Черпакова. – М., 1999. – 512 с.
4. 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 // *Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* – 2017. – № 2. – С. 54–72.
5. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под ред. М. Л. Хейфеца, Б. П. Чемисова. – Новополоцк, 2002. – 268 с.
6. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* / ed. by F. Fores and R. Boyer. – Cambridge, 2019. – 465 p. <https://doi.org/10.1016/c2017-0-00712-7>
7. Gibson, I. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N. Y., 2015. – 498 p.
8. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / под ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2012. – 239 с.
9. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М., 2001. – 368 с.
10. Конструирование и оснащение технологических комплексов / под ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 316 с.
11. Базров, Б. М. Модульный принцип построения станочного оборудования / Б. М. Базров // *Вестн. машиностроения.* – 2011. – № 11. – С. 51–53.
12. Ross, D. T. Structured analysis for requirements definition / D. T. Ross, R. E. Schoman // *IEEE Transaction on SE.* – 1977. – Vol. SE-3, N 1. – P. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
13. 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.
14. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А. С. Васильев [и др.]. – М.; Тула, 2003. – 271 с.
15. Дружинин, В. В. Проблемы системологии / В. В. Дружинин, Д. С. Конторов. – М., 1976. – 296 с.

References

1. Hannam R. *Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realization*. Harlow, 1977. 258 p.
2. Bratukhin A. G., Davydov Yu. V., Eliseev Yu. S., Pavlov Yu. B., Surov V. I. *CALS in aircraft construction*. Moscow, 2000. 304 p. (in Russian).
3. Cherpakov B. I., ed. *Computerized integrated production and CALS-technologies in mechanical engineering*. Moscow, 1999. 512 p. (in Russian).
4. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. «Industry 4.0»: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).
5. Kheifets M. L., Chemisov B. P. (eds.). *Intellectual production: state and prospects*. Novopolotsk, 2002. 268 p. (in Russian).
6. Fores F., Boyer R., eds. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Cambridge, 2019. 465 p. <https://doi.org/10.1016/c2017-0-00712-7>
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. N. Y., 2015. 498 p.
8. Rusetskii A. M., ed. *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, 2012. 239 p. (in Russian).

9. Bazrov B. M. *Modular technology in mechanical engineering*. Moscow, 2001. 368 p. (in Russian).
10. Rusetskii A. M., ed. *Design and equipment of technological systems*. Minsk, 2014. 316 p. (in Russian).
11. Bazrov B. M. The modular principle of building machinery. *Vestnik Mashinostroenia [Engineering Proceedings]*, 2011, no. 2, pp. 51–53 (in Russian).
12. Ross D. T., Schoman R. E. Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1977, vol. SE-3, no. 1, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
13. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Koreshkov V. N., Alekseeva T. A., Liakhovich A. K. Management of quality parameters of manufacturing processes using the statistical and structural analysis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 111–116 (in Russian).
14. Vasil'ev A. S., Vasin S. A., Dal'sky A. M., Kondakov A. I. *Technological aspects of the conversion of engineering production in mechanical engineering*. Moscow, Toula, 2003. 271 p. (in Russian).
15. Druzhinin V. V., Kontorov D. S. *Problems of Systemology*. Moscow, 1976. 296 p. (in Russian).

Информация об авторах

Базров Борис Мухтарбекович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (Малый Харитоньевский пер., 4, 101990, Москва, Российская Федерация). E-mail: modul_lab@mail.ru.

Хейфец Михаил Львович – д-р техн. наук, профессор, заместитель академика-секретаря. Президиум НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

Information about the authors

Bazrov Boris Moukhtarbekovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences (4, M. Kharitonievsky Per., 101990, Moscow, Russian Federation). E-mail: modul_lab@mail.ru.

Kheifetz Mikhail Lvovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Academic Secretary. Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.