

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.91.01
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-229-236>

Поступило в редакцию 18.02.2022
Received 18.02.2022

Б. М. Базров¹, М. Л. Хейфец²

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

²*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**КОМПОНОВочный синтез на основе модульного принципа
элементной базы мехатронных технологических комплексов**

(Представлено академиком П. А. Витязем)

Аннотация. Показаны основные недостатки современных технологических станочных комплексов, к которым относятся: отсутствие учета индивидуальных запросов потребителей и их недостаточная гибкость, не учитывающих тенденцию быстрого изменения производственной программы. Предложена концепция развития металлорежущих станков, базирующаяся на принципах модульной технологии. Создаваемые станочные комплексы призваны удовлетворить индивидуальные запросы потребителей, при этом гибкость производственного оборудования должна обеспечивать переход на изготовление новых деталей и смену технологической схемы обработки посредством изменения режимов обработки, переналадки и переконфигурации станков, а развитие станочного оборудования должно осуществляться одновременно с совершенствованием технологии обработки деталей. Технологические комплексы следует создавать компоновочным синтезом с помощью элементной базы, которая должна содержать две группы функциональных модулей технологических и обслуживающих, а служебное назначение станка должно включать номенклатуру изготавливаемых модулей поверхностей с их характеристиками и модулями средств технологического обеспечения.

Ключевые слова: проектирование комплексов, технологическое оборудование, служебное назначение, конструкция, деталь, модуль, инструмент, элементная база

Для цитирования. Базров, Б. М. Компоновочный синтез на основе модульного принципа элементной базы мехатронных технологических комплексов / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 229–236. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-229-236>

Boris M. Bazrov¹, Mikhail L. Kheifetz²

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

²*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**LAYOUT SYNTHESIS BASED ON THE MODULAR PRINCIPLE OF THE ELEMENT BASE
OF MECHATRONIC TECHNOLOGICAL COMPLEXES**

(Communicated by Academician Petr A. Vityaz)

Abstract. The main shortcomings of modern technological machine-tool complexes are shown. They are: the lack of consideration of individual consumer needs and their insufficient flexibility that do not take into account the trend of rapid changes in the production program. A concept for the development of metal-cutting machine tools based on the principles of the modular technology is proposed. The created machine tool complexes are designed to satisfy the individual needs of consumers, while the flexibility of production equipment should ensure the transition to the manufacture of new parts and the replacement of the technological processing scheme by changing the processing modes, readjustment and reconfiguration of machines; the development of machine tools should be carried out simultaneously with the improvement of the technology of processing parts. Technological complexes should be created by the layout synthesis using the element base that should

contain two groups of functional modules, technological and service, and the service purpose of the machine should include the range of both the manufactured surface modules with their characteristics and the modules of technological support.

Keywords: design of complexes, technological equipment, service use, construction, detail, module, tool, element base

For citation. Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Layout synthesis based on the modular principle of the element base of mechatronic technological complexes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 2, pp. 229–236 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-2-229-236>

Введение. В связи с развитием производства и широким применением комплексов технологического оборудования [1], особенно традиционных станкоинструментальных обрабатывающих систем [2], актуальным становится определение понятия «конкурентоспособный станок».

Анализ перспектив развития комплексов технологического оборудования, в частности металлорежущих станков, показывает [3], что они в основном направлены на техническое совершенствование оборудования, создание станков под новые технологические методы обработки и их комбинации, которые имеют локальные области применения [4]. Недостатком отмеченных тенденций развития станкостроения является слабый учет индивидуальных запросов потребителя. Поэтому для того, чтобы станок стал конкурентоспособным, он должен отвечать быстроизменяющимся запросам потребителей оборудования.

На производстве потребитель под станком понимает технологический комплекс или обрабатывающую систему, включающую собственно станок, приспособление, инструмент и заготовку [5]. К характеристикам станка, которые в первую очередь интересуют потребителя, относятся: *служебное назначение* (включающее данные об исходных материалах и готовых изделиях); *производительность* оборудования; тип (серийность) и характер производства (включающий *точность* и другие параметры качества); *гибкость* (определяемую уровнем *автоматизации* и *встраиваемостью* в современное производство) [6; 7].

По уровню технологических и технических возможностей станки делятся на: универсальные (токарные, сверлильные, фрезерные и др.); специализированные (резьбонарезные, зубообрабатывающие и др.) и специальные (операционные) [5; 6].

Принципиальным отличием универсальных, специализированных и операционных станков является различие в реализуемых на них технологических схемах обработки поверхностей деталей, которые делятся на последовательную, последовательно-параллельную и параллельную обработку и применяются соответственно в такой же последовательности на универсальных, специализированных и операционных станках [8]. Самой низкой по производительности является последовательная схема обработки, применяемая на универсальных станках.

Таким образом, главной характеристикой станка для потребителя является его служебное назначение, показывающее какие поверхности детали, с какой производительностью и точностью или другими параметрами качества можно на нем обрабатывать, а также какими методами осуществляется обработка и на какой уровень автоматизации переналаживаемого гибкого производства рассчитан этот станок.

Анализ потребительских характеристик мехатронных технологических комплексов. Станок предназначен для изготовления определенных поверхностей деталей с диапазонами значений их характеристик качества при соответствующих методах обработки [7; 9].

Анализ *служебного назначения* универсальных, специализированных и операционных станков показывает, что наиболее полно в формулировках служебного назначения отражается назначение операционных станков, где указываются изготавливаемые поверхности со значениями их характеристик и технология их обработки.

Наибольшая неопределенность описания назначения станка отмечается в формулировках служебного назначения универсальных станков.

Например, формулировка назначения вертикального консольно-фрезерного станка 6ДМ12 имеет следующий вид [10] – «станок обеспечивает возможность обширного предела регулирования фрезерных и сверлильных операций: фрезерования плоскостей горизонтальных, наклонных и вертикальных; фрезерования криволинейных поверхностей линейчатого типа профилированными и концевыми фрезами; обработка отверстий и шпоночных пазов; фрезерная обработка с делительными и поворотными столами; с подключением механических подач и вручную».

Как следует из приведенной формулировки [10] служебного назначения, сначала указываются методы обработки, реализуемые станком, и только потом поверхности, которые можно изготовить на станке, а затем указываются некоторые конструктивные особенности станка, используемые инструменты и средства автоматизации. В формулировке не показаны все поверхности, которые можно изготовить на станке.

Неопределенность служебного назначения универсальных станков объясняется тем, что они применяются в единичном и мелкосерийном производствах, отличающихся широкой номенклатурой изготавливаемых деталей, низкой их повторяемостью и непредсказуемостью последовательности их изготовления.

В результате на универсальных станках изготавливаются наборы поверхностей, обеспечивающие наибольшую *производительность* обработки. Такие наборы поверхностей носят зачастую случайный характер, так как зависят от субъективного мнения технолога и отличаются большим разнообразием. Это и является причиной неопределенности служебного назначения универсальных станков.

Если в условиях единичного и мелкосерийного производств применять специализированные или операционные станки с более производительными технологическими схемами обработки, то они будут длительное время простаивать в ожидании поступления деталей с поверхностями, для изготовления которых они предназначены. Кроме того, они разрабатывались для изготовления узкой номенклатуры поверхностей, что при освоении новой продукции потребует расширения станочного парка.

В этих условиях эффективно применение универсальных станков, несмотря на их самую низкую по производительности технологическую схему обработки. При этом неопределенность служебного назначения универсальных станков создает проблемы как у потребителя, так и у производителя.

Для своего производства потребителю не нужны станки с такими широкими техническими и технологическими возможностями, которые имеются у выпускаемых универсальных станков и обрабатывающих центров. В результате потребитель вынужден приобретать станки с избыточными технологическими и техническими возможностями, в том числе и по обеспечению не требуемых параметров качества и *точности*, а следовательно более дорогие и сложные в эксплуатации.

Проблема у производителя заключается в отсутствии научного обоснования рациональной номенклатуры выпускаемых универсальных станков. Не ясно, под какие методы обработки или их комбинации надо создавать станки и какие станкостроительные производства организовывать.

На практике можно наблюдать создание станков для отдельных технологических операций, например, создание токарно-фрезерного станка или технологического комплекса для послейного синтеза заготовки с ее последующей обработкой [1; 2]. К недостаткам таких решений относится узкая область применения оборудования и отсутствие потребности в нем при изменении производственной программы выпуска деталей. Эти недостатки приводят к большому снижению эффективности производства деталей.

Важнейшей характеристикой станков является их *гибкость*, которая должна обеспечиваться по-разному, в зависимости от серийности производства и уровня его *автоматизации* [11; 12].

Гибкость станочного оборудования – способность к быстрому переналаживанию при переходе на изготовление других (новых) деталей. Чем чаще происходит смена изготавливаемых деталей и чем большее число различных деталей требует обработки, тем большей гибкостью должен обладать станок. Гибкость характеризуют двумя показателями – универсальностью и переналаживаемостью. В таком понимании гибкости станков не учитывается изменяющийся объем выпуска деталей, который тоже предъявляет требования к гибкости станков.

В условиях единичного, мелкосерийного и частично среднесерийного производства происходит значительное изменение номенклатуры изготавливаемых деталей и объемов их выпуска. Гибкость станка в этих условиях должна обеспечиваться за счет широких диапазонов изменения элементов режима обработки, возможностей переналадки и перекомпоновки станков. В условиях массового и крупносерийного производства гибкость станка должна обеспечиваться его компоновкой или перекомпоновкой.

Проблема обеспечения гибкости станков в этих условиях возникает, когда в конструкциях изготавливаемых деталей вносятся изменения, требующие замены станков на некоторых технологических операциях, а так же, когда создаются новые крупносерийные и массовые производства других изделий. Тогда гибкость станка в первом случае должна обеспечиваться посредством перекомпоновки станков, а во втором случае посредством их компоновки.

Формирование элементной базы для компоновочного синтеза технологических комплексов. Применение метода компоновки используется при создании агрегатных станков [13]. Реализация такого синтеза требует наличия их элементной базы.

Недостаток элементной базы агрегатных станков, тормозящий развитие их конструкций, заключается в том, что в качестве элементов выступают типовые узлы, определяемые по результатам *статистических исследований их повторяемости* [14].

Статистика использования узлов анализируется как с позиций стандартизации для составления ограничительных перечней на их типоразмеры и исполнения, так и с позиций унификации с оценками возможностей перехода на новые типовые технологические процессы для формирования регламентов обработки отобранных типов деталей.

Процедуры формирования ограничительных перечней элементной базы станков, а также создания регламентов технологических и метрологических операций в наибольшей степени зависят от специфики конкретного производства. Для ряда предприятий, выпускающих большую номенклатуру продукции и оказывающих широкий спектр услуг по запросам заказчиков, использовались различные методы формирования ограничительных перечней [14; 15].

При наличии обширной информации об унифицируемых объектах (обычно для большой номенклатуры изделий) анализировались все моды – локальные максимумы на кривых распределения вероятностных характеристик.

Рассматривалась характеризующая статистические данные выборки частота p_i (или продолжительность) использования элемента i , соответствующая одному из параметров x_i (размеру, точности и т. д.) элемента.

По частоте p_i вычислялись [14]:

$$x_B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} - \text{выборочная средняя характеристика;}$$

$\Delta_B = x_i - x_B$ – отклонение от общей средней;

$$\sigma_B^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_B)^2 p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} - \text{выборочная дисперсия;}$$

$\sigma_B = \sqrt{\sigma_B^2}$ – выборочное среднеквадратичное отклонение.

Изучение рассеяния параметров в окрестностях моды проводилось в сопоставлении с нормальным законом распределения, а при нестабильности рассматриваемых параметров законом распределения случайных величин Лапласа.

Плотность распределения вероятности на рассматриваемом интервале f^*

$$\text{для нормального закона: } f^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[-t^2 / 2] \Delta t;$$

$$\text{для закона Лапласа: } f^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[-\sqrt{2}t] \Delta t;$$

в которых:

$$t = \frac{x - x_B}{\sigma_B} - \text{нормированное отклонение;}$$

$$\Delta t = \frac{x_{i+1} - x_i}{\sigma_B} - \text{приращение нормированного отклонения на рассматриваемом интервале.}$$

В соответствии с плотностью вероятности пересчитывались частотные характеристики на каждом интервале:

$$p_i^* = f^* \sum_{i=1}^n p_i.$$

По частотным характеристикам рассчитывался критерий Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(p_i - p_i^*)^2}{p_i^*},$$

по которому определялась степень соответствия распределения на интервале принятому закону. Степень соответствия распределения случайных величин принятому закону определялась по соотношению Романовского [14]:

$$Q = \frac{\chi^2 - f}{\sqrt{2f}},$$

где f – число степеней свободы, т. е. число групп в изучаемом ряду рассчитанных статистических характеристик и используемых при вычислении теоретического распределения.

Для принятых законов распределения существует две характеристики – это x_B и σ_B . Тогда число степеней свободы $f = N - 2$, где N – число интервалов разбиения рассматриваемого участка распределения случайных величин. При отношении Романовского $Q \leq 3$ был сделан вывод о соответствии рассматриваемых участков принятому закону распределения.

При удовлетворительном, согласно соотношению Романовского, соответствии полученного распределения теоретическому, моду на изученном интервале принимали в качестве позиции для ограничительного перечня, а все остальные позиции в ее окрестности убрали по возможности для того, чтобы пользоваться единой.

В случае, когда при описании объектов (чаще всего типовых) имеются сведения о предпочтительных интервалах использования параметров (элементов), эти интервалы на полигоне распределения разбиваются на участки размером меньше, чем другие. На каждом участке определяются моды распределения вероятностных характеристик, причем шаг разбиения участка для поиска абсолютного максимума также может быть уменьшен.

Когда отсутствует достаточная информация об унифицируемых объектах, рационально использовать наиболее простой метод разбиения статистического распределения параметров на равные интервалы в соответствии с числом позиций, которые целесообразно оставить после унификации. Последующий поиск абсолютных максимумов распределения на всех интервалах разбиения позволяет предложить позиции для начального варианта ограничительного перечня.

Наивысшим приоритетом обладают наиболее часто встречающиеся объекты производства, а также объекты, длительность использования которых в производственных процессах максимальна. В первую очередь сокращается номенклатура объектов и устраняются процессы, редко используемые в производстве и которым может быть достаточно эффективно предоставлена замена.

Проведенные статистические исследования показали [14; 15]: проблема создания элементной базы станков заключается в том, что в их конструкциях содержится значительное число оригинальных элементов, которые не удастся унифицировать. Это приводит в результате к значительному увеличению материальных, трудовых и временных затрат при изготовлении станков.

Таким образом, чтобы станки были конкурентоспособны, они должны удовлетворять индивидуальным запросам потребителя по своему назначению, реализовывать наиболее производительную технологическую схему обработки и быть способными быстро и надежно перестраиваться при изменении производственной программы выпуска деталей. Эффективное решение поставленной проблемы будет только в том случае, если она будет решаться одновременно с совершенствованием технологии изготовления деталей [4].

Функциональные модули и элементная база технологических комплексов. Традиционная технология изготовления деталей предполагает представление детали совокупностями поверхностей при отсутствии указаний на их функциональные связи. В результате с целью достижения наибольшей эффективности на технологических операциях изготавливаются совокупности поверхностей без учета их функциональных связей.

Например, поверхности, образующие комплект баз – торец, отверстие, шпоночный паз могут изготавливаться на разных операциях, что приводит к накоплению погрешностей их относительного положения. В результате потребуется дополнительная технологическая операция для устранения погрешностей.

Принимая во внимание эти недостатки традиционной технологии, предлагается воспользоваться модульной технологией, развивающей подходы, используемые как в единичной, так и в типовой, а также групповой технологии [15].

В основе модульной технологии лежит представление детали не совокупностью отдельных поверхностей, как это делается на традиционных чертежах деталей, а совокупностью модулей поверхностей (МП), где под МП понимается сочетание поверхностей, объединенных по функциональному признаку.

Все разновидности МП содержат 26 видов, которые можно свести к трем классам: базисные, рабочие и связующие [15; 16]. В свою очередь, каждый вид МП различается несколькими конструктивными решениями, которые характеризуются набором поверхностей, их относительным расположением, размерами и характеристиками качества.

Главное преимущество МП заключается в их конечном числе, что позволяет представлять любую деталь совокупностью МП из этого ограниченного множества. Поэтому станочное оборудование и технологические комплексы в целом надо создавать не под методы обработки или случайные наборы поверхностей, а под изготовление МП.

Под каждый МП разрабатываются средства их технологического обеспечения, включающие модули технологического процесса (МТО) изготовления МП и соответственно: станочного оборудования (МО), инструментальной наладки (МИ), приспособления (МПр) и контрольно-измерительного устройства (МКИ).

Наличие элементной базы данных на модульном уровне позволяет включать в служебное назначение станка не только перечень изготавливаемых МП, но и модули средств составляющих их технологического обеспечения: МТО, МО, МИ, МПр и МКИ.

Таким образом, служебное назначение станка должно включать, в первую очередь, перечень наименований МП с их характеристиками, а также технологии их изготовления.

В итоге потребитель приобретает станок с технологическим сопровождением, что существенно снижает трудоемкость технологической подготовки производства. В результате он может заказывать станок под изготовление требуемой номенклатуры МП. Такие станки должны создаваться методом компоновочного синтеза и иметь возможность переконфигурации в процессе их эксплуатации.

Для решения этой проблемы должна быть сформирована элементная база технологических комплексов.

Общая элементная база станков в настоящее время практически отсутствует, но каждое станкостроительное предприятие имеет свою локальную элементную базу.

Элементная база станков должна строиться с использованием принципов модульной технологии.

Любое машиностроительное изделие, в том числе и станки, можно представить совокупностью модулей *функциональных технологических* (МФТ) и *функциональных обслуживающих* (МФО). МФТ – модуль, с помощью которого изделие как объект эксплуатации выполняет непосредственно свое служебное назначение. Для того чтобы МФТ могли выполнять свои функции, необходимы функциональные обслуживающие модули – МФО.

Например, у токарного винторезного станка в качестве МФТ выступают трехкулачковый патрон для установки заготовки и резцедержатель для установки инструмента, а в качестве МФО выступают коробка скоростей со шпинделем, служащая для установки патрона и придания ему

вращательного движения, суппорт для установки резцедержателя и коробка подач с ходовым винтом, служащая для передачи поступательного движения резцедержателю с инструментом и др.

Отсюда элементная база станков должна состоять из двух частей: элементной базы МФТ и элементной базы МФО.

В результате применение модульного принципа при создании технологических комплексов позволит более эффективно организовать производство станков и средств их оснащения, создавая специализированные производства МФТ и МФО и сборочные производства в станкоинструментальной отрасли.

Заключение. Таким образом, предложена концепция развития металлорежущих станков, базирующаяся на основных положениях:

1. Создаваемые технологические станочные комплексы призваны удовлетворить индивидуальные запросы потребителей, при этом гибкость производственного оборудования должна обеспечивать переход на изготовление новых деталей и смену технологической схемы обработки посредством изменения режимов обработки, переналадки и перекомпоновки станков, а развитие станочного оборудования должно осуществляться одновременно с совершенствованием технологии обработки деталей.

2. Технологические станочные комплексы следует создавать компоновочным синтезом с помощью элементной базы, которая должна содержать две группы модулей функциональных технологических (МФТ) и функциональных обслуживающих (МФО), а служебное назначение станка должно включать номенклатуру изготавливаемых модулей поверхностей (МП) с их характеристиками и модулями средств технологического обеспечения: технологического процесса (МТО), станочного оборудования (МО), инструментальной наладки (МИ), приспособления (МПр) и контрольно-измерительного устройства (МКИ).

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам институтов Министерства промышленности Республики Беларусь ОАО «ЦНИИТУ» (генеральный директор С. С. Соколовский) и ОАО «Белоргстанкинпром» (директор П. И. Бычик), а также генеральному директору ОАО «МЗОР» Л. В. Иванько за участие в обсуждении и поддержке предложенной концепции развития металлорежущих станков.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the employees of the institutes of the Ministry of Industry of the Republic of Belarus JSC “TsNIITU” (General Director S. S. Sokolovsky) and JSC “Belorgstankinprom” (Director P. I. Bychik), as well as the General Director of JSC “MZOR” L. V. Ivanko for participation in the discussion and support of the proposed concept for the development of metal-cutting machine tools.

Список использованных источников

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2012. – 239 с.
2. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 316 с.
3. 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 // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
4. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. – М., 2005. – 272 с.
5. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник / А. С. Проников [и др.]; под ред. А. С. Проникова. – М., 1994. – Т. I: Проектирование станков. – 444 с.
6. Машиностроение: энцикл. / ред. совет: К. В. Фролов (пред.). – М., 2002. – Т. IV-7: Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование / Б. И. Черпаков [и др.]; под ред. Б. И. Черпакова. – 864 с.
7. Хейфец, М. Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 739–746. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>
8. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М., 2005. – 736 с.
9. Хейфец, М. Л. Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии на основе анализа критериев подобия / М. Л. Хейфец, В. С. Крутько, Н. Л. Грецкий // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 628–635. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635>
10. Сахаров, А. В. Определение технологических возможностей токарного станка 16A20Ф3 / А. В. Сахаров, Э. З. Насиров // Инженерный журнал. – 2013. – № 12. – С. 29–35.
11. Базров, Б. М. Гибкость технологической обрабатывающей системы / Б. М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 81–84.

12. Чуб, О. П. Концепция бережливого производства для гибких производственных систем, понятие гибкости / О. П. Чуб // Евразийское Научное Объединение. – 2019. – № 3-2 (49). – С. 135–141.
13. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компонетики / Ю. Д. Врагов. – М., 1978. – 208 с.
14. Кусакин, Н. А. Менеджмент качества автотракторного ремонтного предприятия / Н. А. Кусакин, В. С. Точило, М. Л. Хейфец. – Новополоцк, 2009. – 180 с.
15. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М., 2001. – 368 с.
16. 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>

References

1. Rusetsky A. M., ed. *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, 2012. 239 p. (in Russian).
2. Rusetsky A. M., ed. *Design and equipment of technological systems*. Minsk, 2014. 316 p. (in Russian).
3. 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. *Vesti Natsyonal'noi 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).
4. Kheifetz M. L. *Design process of combined processing*. Moscow, 2005. 272 p. (in Russian).
5. Pronikov A. S., ed. *Design of metal-cutting machine tools and machine-tool systems: Handbook-textbook. Vol. 1. Machine tools design*. Moscow, 1994. 444 p. (in Russian).
6. Cherpakov B. I., ed. *Mechanical engineering: Encyclopedia*. Moscow, 2002. 864 p. (in Russian).
7. Kheifetz M. L. Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 739–746 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>
8. Bazrov B. M. *Fundamentals of Engineering Technique*. Moscow, 2005. 736 p. (in Russian).
9. Kheifetz M. L., Krutko V. S., Gretskiy N. L. Design of technological process and equipment using fields and energy flows based on analysis of similarity criteria. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 628–635 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635>
10. Sakharov A. V., Nasirov E. Z. Determination of the technological capabilities of the lathe 16A20F3. *Inzhenernyi zhurnal [Engineering Journal]*, 2013, no. 12, pp. 29–35 (in Russian).
11. Bazrov B. M. Flexibility of the technological processing system. *Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of mechanical engineering]*, 2021, no. 5, pp. 81–84 (in Russian). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-5-81-84>
12. Chub O. P. The concept of lean production for flexible production systems, the concept of flexibility. *Evrasiiskoe Nauchnoe Ob'edinenie [Eurasian Scientific Association]*, 2019, no. 3–2 (49), pp. 135–141 (in Russian).
13. Vragov Yu. D. *Analysis of configurations of metal-cutting machines: Komponetika bases*. Moscow, 1978. 208 p. (in Russian).
14. Kusakina N. A., Tochilo V. S., Kheifetz M. L. *Quality management of an autotractor repair enterprise*. Novopolotsk, 2009. 180 p. (in Russian).
15. Bazrov B. M. *Modular technology in mechanical engineering*. Moscow, 2001. 368 p. (in Russian).
16. 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>

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, директор. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

Information about the authors

Bazrov Boris M. – 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 L. – D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.