

УДК 621.9.06+536.75

Б.М. БАЗРОВ, д-р техн. наук, проф.  
заведующий лабораторией<sup>1</sup>  
E-mail: mod\_lab@mail.ru

А.С. ВАСИЛЬЕВ, д-р техн. наук, проф.  
заведующий кафедрой<sup>2</sup>  
E-mail: vas@bmstu.ru

В.Л. ГУРЕВИЧ, канд. техн. наук, доц.  
директор<sup>3</sup>  
E-mail: hurevich@belgim.by

Н.Н. ПОПОК, д-р техн. наук, проф.  
заведующий кафедрой<sup>4</sup>  
E-mail: n.popok@psu.by

И.М. ХЕЙФЕЦ  
магистрант<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Белорусский государственный институт метрологии, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Республика Беларусь

<sup>5</sup>Институт подготовки научных кадров НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22.10.2020.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ КАК ОБЪЕКТА ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРУКТУРИРОВАННЫМ МНОЖЕСТВОМ МОДУЛЕЙ

*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. 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. Обоснован выбор метода оценки технологичности конструкции изделия по трудоемкости процессов на этапах его жизненного цикла и формирования комплекса критериев, обобщающих оценку конструкторско-технологических решений коэффициентами, учитывающими их степень влияния на технико-экономические показатели процессов. На основе технико-экономического анализа сформирован метод интегральной оценки производственной технологичности в жизненном цикле изделия. Метод объединяет различные коэффициенты технологичности, учитывающие степень их влияния на трудоемкость производства и обслуживания, ремонта и утилизации конструкции изделия. По результатам технико-экономической оценки предложено под производственной технологичностью понимать технологичность конструкции изделия на этапах его производства и утилизации.*

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

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-62-70>

**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 продукции: 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 раз-

личных 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, 6]. 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 [7, 8].

Определение и оценка изменений показателей качества машин и стоимостных показателей с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий в формирующемся и трансформирующемся изделии при проектировании, в технологических и эксплуатационных процессах и при их утилизации [9, 10]. Для разработки математического аппарата анализа технико-экономической эффективности показателей качества и стоимости изделий необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [9, 11].

Корректному решению такой задачи описания способствует замена множества объектов, взаимодействующих с изделием, одним объектом — технологической или эксплуатационной средой при возможной тождественности результатов замены [10, 11]. Определение характеристик многосвязной среды позволяет при известных результатах ее взаимодействия с изделием находить рациональные значения показателей качества изделия и осуществлять направленное формирование технологической среды [11, 12].

Производство 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 [13]. Наличие единой базы позволяет управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления [14]. Для этого

требуется обосновать выбор метода оценки технологичности конструкции изделия по трудоемкости процессов на этапах его жизненного цикла и сформировать комплекс критериев, обобщающих оценку конструкторско-технологических решений коэффициентами, учитывающими их степень влияния на технико-экономические показатели процессов [15–18].

**Анализ описания по конструкторско-технологическим признакам изделия машиностроения.** Для формализации условий целенаправленного создания технологических сред каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество конструкторско-технологических решений (КТР) [5, 11]. Такой подход позволяет любую среду представить в виде кортежа, каждый элемент которого является элементом соответствующего множества КТР [12].

Вследствие избыточности технологической среды по структурному составу целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора (определяемых численными коэффициентами) использовать комплексные критерии процессов, обобщающие оценку конструкторско-технологических решений коэффициентами, учитывающими их степень влияния на технико-экономические показатели процессов, их трудоемкость [12].

Полагая, что если два любых компонента системы обладают хотя бы одним общим свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор КТР по эквивалентности и предпочтению [10]. По эквивалентности выбираются разноименные решения, которые по совокупности своих свойств должны соответствовать друг другу. По предпочтению выбираются решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств.

Такой подход позволяет формализовать условия выбора КТР по конкретному значению установленного критерия выбора и дает возможность выбирать решение по нескольким критериям, соответствующим различным свойствам КТР.

Принятие КТР в системах проектирования традиционно основывается на анализе эквивалентности ( $x \equiv y$ ) и предпочтения (нестромого  $x \leq y$  или строгого  $x < y$ ) решений, заложенных в базу знаний. Это предполагает использование свойств [9, 19]:

- *рефлексивности* ( $x \equiv x$ ,  $x \leq x$  — истинно;  $x < x$  — ложно);
- *симметричности* ( $x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$  — истинно;  $x \leq y$  и  $y \leq x \Rightarrow x = y$  — антисимметрично;  $x < y$  и  $y < x \Rightarrow$  взаимоисключение — несимметрично);
- *транзитивности* ( $x \equiv y$  и  $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$ ,  $x \leq y$  и  $y \leq z \Rightarrow x \leq z$ ,  $x < y$  и  $y < z \Rightarrow x < z$  — истинно).

В результате, используя свойство транзитивности, наиболее предпочтительное из предыдущих решений сравнивается с новым предложен-

ным или выбранным из базы знаний по свойствам симметрии параметров качества.

Однако в общем случае разные неэквивалентные КТР наиболее предпочтительны для различных параметров качества из требуемого комплекса свойств. В этом случае необходимо использовать доминирующее КТР ( $x \ll y$ ), характеризующееся свойствами [9, 19]:

- *антирефлексивности* ( $x \ll x$  — ложно);
- *несимметричности* ( $x \ll y$  и  $y \ll x \Rightarrow$  взаимоисключение);
- *нетранзитивности* (из  $x \ll y$  и  $y \ll z$  не следует  $x \ll z$ ).

При отсутствии симметричности и транзитивности для определения доминирования параметра целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды непрерывной случайной величины, под которой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [5, 10].

Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и в результате могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров — степеней свободы технической системы. Оставшиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих производственные процессы [9, 20].

Распределения изучаемых величин, на фоне которых проявляются моды, в основном описываются законами [21]:

- равномерным  $f(x) = 1/(\mu_1 - \mu_0)$  при  $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$ ;
  - экспоненциальным  $f(x) = (1/\mu) \exp(-x/\mu)$  при  $\mu > 0, x > 0$ ;
  - нормальным  $f(x) = (1/(\sigma\sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2))$  при  $\sigma > 0, -\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty$ ,
- где  $\mu$  — математическое ожидание;  $\mu_0$  и  $\mu_1$  — ограничения;  $\sigma^2$  — дисперсия случайных величин  $x$ .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, а следовательно о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k},$$

где  $\lambda_p^2$  — критерий Пирсона;  $k$  — число степеней свободы, т. е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных ( $\mu$ ,  $\sigma$  и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ характеристик производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий, оборудования и средств оснащения позволяет ограничить номенклатуру рассматриваемых объектов и процессов. При выборе количества ограничений для объектов и процессов целесообразно рассмотреть взаимозависимость противоречивых требований по надежности и гибкости производственной си-

стемы. В результате соотношение надежности—устойчивости и гибкости—адаптивности может служить критерием, позволяющим принять КТР о рациональной структуре производственной системы [22].

В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [23]. Каждая подсистема имеет детерминированный — строго определенный и флуктуирующий — с рассеянными характеристиками выходы.

При аддитивности полного выхода, согласно предельной центральной теореме, он растет пропорционально числу подсистем  $n$ , в то время как величина рассеяния растет пропорционально квадратному корню  $\sqrt{n}$ .

Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик [22, 23].

Кроме того, при обосновании выбора КТР необходимо учитывать стоимость формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления технологическим процессом [10, 12].

Эффективность производства машин в первую очередь зависит от уровня технологической подготовки производства, основу которой составляют технологии [24]. 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 [13].

Поэтому с учетом необходимости адаптивирования 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 [25].

В случае анализа производственных систем в качестве предметов рассматриваются производственные данные, а в качестве операции — преобразования над производственными данными [26]. 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 [27].

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 [26, 28].

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* [13, 24].

**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, т. к. 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 заменить 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 рисунке 1.

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

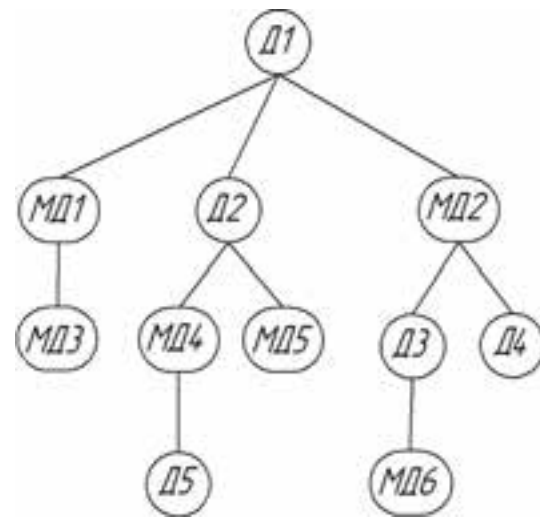


Рисунок 1 — Граф изделия  
Figure 1 — Product graph

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 обозримой концентрированной форме представляют информацию о строении КИ: составе элементов, ее структуре, размерных, точностных, прочностных, жесткостных и других связях между элементами КИ, влияющими на обзорование 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 соответственно. 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 являются 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.

**Технологичность конструкции и этапы жизненного цикла изделия.** Технологичность конструкции изделия (ТКИ) оказывает большое влияние на эффективность этапов жизненного цикла изделия — проектирования, изготовления, эксплуатации, утилизации [15–18]. ТКИ должна показывать, насколько изделие приспособлено к эксплуатации, изготовлению и утилизации [29–31].

В основе разделения ТКИ на эксплуатационную и производственную технологичность лежит разделение характера производимых работ на этих этапах. Если сравнивать виды работ, производимых на этапах производства и утилизации, то можно отметить, что используются одни и те

же технологии. Например, при разрезке заготовок и утилизации деталей применяются одинаковые технологические методы; при изготовлении конструкции изделия в ряде случаев производится частичная разборка собранного изделия, как и при утилизации изделия. Поэтому производственная технологичность должна учитывать процессы производства и утилизации КИ.

Эксплуатационная ТКИ должна учитывать не только работы, связанные с эксплуатацией КИ, но также монтаж и ремонт КИ.

Все это должно найти отражение в формулировках понятия эксплуатационной и производственной технологичности КИ.

Согласно стандартам [17, 18] под ТКИ понимается совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Как видно из этой формулировки, она не соответствует требованиям производственной технологичности. Она должна учитывать, во-первых, этап утилизации и, во-вторых, из формулировки следует исключить «объем выпуска», т. к. ТКИ зависит от технологии, а не от объема выпуска изделия, и, в-третьих, следует исключить техническое обслуживание и ремонт, относящиеся к этапу эксплуатации изделия.

В связи с этим предлагается следующая формулировка производственной технологичности: *под производственной ТКИ понимается совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве и утилизации для заданных показателей качества и условий выполнения работ.*

Отработка КИ на технологичность осуществляется на всех этапах ее создания и утилизации.

Эффективность процесса отработки КИ на технологичность во многом зависит от достоверности оценки ТКИ. Оценка уровня производственной ТКИ осуществляется на этапах ее проектирования, технологической подготовки производства, изготовления и утилизации.

Наиболее сложно оценить ТКИ, когда неизвестны технологии ее изготовления и утилизации. Поэтому на этом этапе оценка уровня ТКИ должна производиться, во-первых, не в абсолютных, а в относительных величинах, т. е. определяться степенью влияния характеристик КИ на трудоемкость и себестоимость изделия.

И, во-вторых, в качестве характеристик КИ должны учитываться только те, которые непосредственно не связаны с технологическими процессами изготовления и утилизации изделия. Например, к таким характеристикам относится разнообразие элементов, содержащихся в КИ, которые не связа-

ны непосредственно с технологическими процессами изготовления КИ, но в то же время влияют на трудоемкость ее изготовления. Например, чем больше разнообразие элементов в КИ, тем больше трудоемкость ее изготовления.

**Комплексная оценка трудоемкости на этапах жизненного цикла изделия.** При оценке ТКИ применяются два метода: оценка по показателям трудоемкости и себестоимости изделия и оценка с помощью коэффициентов технологичности КИ.

С помощью первого метода устанавливается, соответствуют ли значения трудоемкости и себестоимости нового изделия заданным или нет. Если значения трудоемкости и себестоимости нового изделия окажутся выше заданных, то требуется отработка КИ на технологичность. Оработка должна начинаться прежде всего с тех характеристик КИ, которые обуславливают трудоемкость изготовления и утилизации изделия.

К недостаткам метода оценки ТКИ следует отнести то, что он не дает информации о том, какие характеристики КИ и в какой степени влияют на трудоемкость и себестоимость изделия. Это приводит к увеличению трудоемкости процесса отработки КИ на технологичность и во многом зависит от субъективного (фактора в лице технолога).

В отличие от первого метода, второй потенциально позволяет установить, какие характеристики КИ и в какой степени влияют на трудоемкость изготовления и утилизации изделия. Это дает возможность определить, с каких характеристик КИ надо начинать совершенствование КИ с целью повышения ее технологичности и эффективности процессов изготовления и утилизации изделия.

В связи с изложенным рассматривалась оценка уровня производственной ТКИ вторым методом. Проведенный анализ коэффициентов технологичности показал, во-первых, что отсутствуют коэффициенты технологичности КИ на этапе ее утилизации, во-вторых, приведенные коэффициенты не разделены по этапам эксплуатации и изготовления изделия и, в-третьих, не охватывают все характеристики КИ, влияющие на трудоемкость производства и утилизации изделия и не отражают степени влияния характеристик КИ на трудоемкость производства и утилизации изделия.

Перечисленные недостатки не позволяют определить коэффициенты технологичности, оказывающие наибольшее влияние на трудоемкость изготовления КИ, и тем самым выявить характеристики КИ, с улучшения которых следует начинать отработку КИ на технологичность.

Таким образом, для полной оценки производственной ТКИ необходим комплексный подход, учитывающий трудоемкость производства и утилизации КИ.

Для решения этой задачи следует рассматривать трудоемкость КИ как сумму производственной трудоемкости и трудоемкости утилизации (рисунок 2), где  $T_1$  — трудоемкость конструкторской подготовки КИ;  $T_2$  — трудоемкость технологической подготовки производства КИ;  $T_3$  — трудоемкость изготовления КИ;  $T_4$  — трудоемкость технологической подготовки утилизации КИ;  $T_5$  — трудоемкость утилизации КИ.

Трудоемкости этапов как подготовки, так и собственно проектирования, производства и утилизации включают:

- $T_{11}$  — трудоемкость проектно-расчетных работ,  $T_{12}$  — трудоемкость разработки рабочей документации;
- $T_{21}$  — трудоемкость разработки процессов изготовления детали,  $T_{22}$  — трудоемкость разработки сборочного процесса,  $T_{23}$  — трудоемкость разработки и изготовления технологической оснастки;
- $T_{31}$  — трудоемкость подготовительно-заключительных работ изготовления деталей,  $T_{32}$  — трудоемкость технологических переходов изготовления деталей,  $T_{33}$  — трудоемкость вспомогательных переходов,  $T_{34}$  — трудоемкость подготовительно-заключительных сборочных работ,  $T_{35}$  — трудоемкость соединения деталей,  $T_{36}$  — трудоемкость вспомогательных переходов соединения деталей;
- $T_{41}$  — трудоемкость разработки технологических процессов утилизации,  $T_{42}$  — трудоемкость разработки и изготовления технологической оснастки;
- $T_{51}$  — трудоемкость подготовительно-заключительных работ,  $T_{52}$  — трудоемкость технологических переходов утилизации деталей,  $T_{53}$  — трудоемкость вспомогательных переходов утилизации деталей,  $T_{54}$  — трудоемкость разборки КИ.

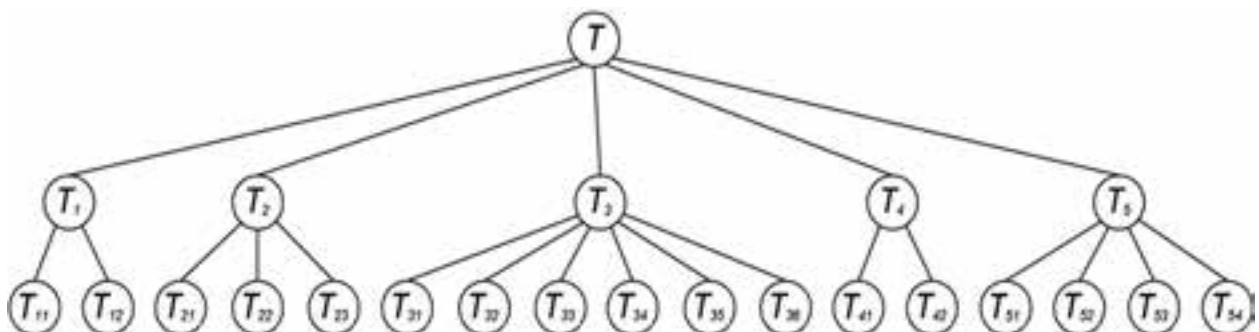


Рисунок 2 — Схема формирования полной трудоемкости проектирования, изготовления и утилизации изделия  
Figure 2 — Scheme of formation of the total labor intensity of design, manufacture and disposal of the product

Таблица — Влияние характеристик конструкции изделия на подвиды трудоемкости  
Table — Influence of product design characteristics on subtypes of labor intensity

№	Характеристика конструкции изделия	Вид трудоемкости ( $T_i$ )								
		$T_2$			$T_3$					
		$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{33}$	$T_{34}$	$T_{35}$	$T_{36}$
1	Количество покупных элементов	+		+	+	+	+			
2	Количество повторяемых деталей	+		+	+					
3	Количество повторяемых соединений		+	+				+		
4	Методы достижения точности		+						+	
5	Количество заимствованных элементов	+		+						
6	Количество типовых деталей	+								
7	Точность деталей					+				
8	Шероховатость поверхностей деталей					+				
9	Твердость материала деталей					+				
10	Масса элементов изделия						+			+
11	Количество видов соединений								+	

Примечание: + — влияние характеристики на подвид трудоемкости

Для установления коэффициентов производственной технологичности КИ на этапах производства и утилизации КИ необходимо установить характеристики КИ, влияющие на трудоемкости перечисленных видов, а затем установить и степени их влияния.

Для решения этой задачи сначала установим элементы КИ, характеристики которых влияют на трудоемкость производства и утилизацию КИ.

На этапе производства КИ в качестве элементов примем детали и их соединения, т. к. они определяют трудоемкость изготовления КИ. Они делятся на покупные, заимствованные и оригинальные. На этапе утилизации элементами КИ являются детали, сборочные единицы, соединения. Все детали и сборочные единицы делятся на дефектные, подлежащие утилизации и годные. Годные, в свою очередь, делятся на восстанавливаемые и не требующие восстановления.

После установления характеристик КИ определяется их влияние на полную трудоемкость КИ. Проанализировать это можно на примере влияния характеристик КИ на трудоемкость технологической подготовки и производства КИ (таблица).

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

Сформирован метод интегральной оценки производственной технологичности в жизненном цикле изделия, объединяющий различные коэффициенты технологичности, учитывающие степень их влияния

на трудоемкость производства и обслуживания, ремонта и утилизации конструкции изделия.

Предложено и обосновано по результатам процедуры выбора конструкторско-технологических решений и их технико-экономической оценки определять производственную технологичность как технологичность конструкции изделия на этапах его производства и утилизации в жизненном цикле изделия.

### Список литературы

- Hannam, R. Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realization / R. Hannam. — Harlow: Addison Wesley, 1977. — 258 p.
- CALS в авиастроении / А.Г. Братухин [и др.]; под ред. А.Г. Братухина. — М.: Моск. авиац. ин-т, 2000. — 304 с.
- Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. — М.: ВИМИ, 1999. — 512 с.
- 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 // Вест. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2017. — № 2. — С. 54–72.
- Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под общ. ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. — Новополоцк: ПГУ, 2002. — 268 с.
- Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 239 с.
- 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.
- Additive Manufacturing for the Aerospace Industry / ed. by F. Fores and R. Boyer. — Cambridge: Elsevier, 2019. — 465 p.
- Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. — Минск: Беларус. навука, 2019. — 248 с.
- Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. — М.: Машиностроение, 2003. — 256 с.
- Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский [и др.]. — М.: МАИ, 2000. — 364 с.
- Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец [и др.]. — Новополоцк: ПГУ, 2001. — 112 с.

13. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. — М.: Машиностроение, 2001. — 368 с.
14. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. — Минск: Беларуская навука, 2014. — 316 с.
15. Говердовская, Р.Г. Методика обработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения / Р.Г. Говердовская. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 56 с.
16. Амиров, Ю.Д. Технологичность конструкций изделий: справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков. — М.: Машиностроение, 1985. — 368 с.
17. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения: ГОСТ 14.205-83. — Взамен ГОСТ 18831-73; введ. 30.06.1983. — 22 с.
18. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования: ГОСТ 14.201-83. — Введ. 01.01.1984. — 18 с.
19. Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики / Ю.М. Коршунов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 496 с.
20. Эбелинг, В. Образование структур при необратимых процессах / В. Эбелинг. — М.: Мир, 1979. — 279 с.
21. Сигорский, В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский. — Киев: Техника, 1977. — 768 с.
22. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. — М.: Мир, 1980. — 404 с.
23. Bazrov, B.M. Unification of Design Decisions on the Basis of Average Distribution of Probabilities and Introduction of Isolated Areas for Elements of Products Described by Structured Multiple Modules / B.M. Bazrov, M.L. Kheifets, N.N. Popok // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. — 2019. — Vol. 22, no. 3. — Pp. 221–232. DOI: <https://doi.org/10.33581/1561-4085-2019-22-3-221-232>.
24. Базров, Б.М. Модульный принцип построения станочного оборудования / Б.М. Базров // Вестн. машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 51–53.
25. Ross, D.T. Structured analysis for requirements definition / D.T. Ross, R.E. Schoman // IEEE Transaction on SE. — 1997. — Vol. SE, no. 1. — Pp.6–15.
26. Построение детерминированных и стохастических моделей для анализа и управления технологическими процессами / В.Н. Корешков [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2015. — № 3. — С. 114–123.
27. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А.С. Васильев [и др.]. — М.–Тула: ТулГУ, 2003. — 271 с.
28. Дружинин, В.В. Проблемы системологии / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. — М.: Совет. радио, 1976. — 296 с.
29. Балабанов, А.Н. Технологичность конструкций деталей машин / А.Н. Балабанов. — М.: Машиностроение, 1987. — 336 с.
30. Бочкарев, П.Ю. Оценка производственной технологичности деталей / П.Ю. Бочкарев, Л.Г. Бокова. — М.: Лань, 2017. — 132 с.
31. Базров, Б.М. Анализ коэффициентов технологичности конструктивного исполнения изделия / Б.М. Базров, А.А. Троицкий // Научные технологии в машиностроении. — 2018. — № 7. — С. 23–26.

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

Head of the Laboratory<sup>1</sup>

E-mail: mod\_lab@mail.ru

VASILIEV Alexander S., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department<sup>2</sup>

E-mail: vas@bmstu.ru

HUREVICH Valeriy L., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Director<sup>3</sup>

E-mail: hurevich@belgim.by

POPOK Nikolay N., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department<sup>4</sup>

E-mail: n.popok@psu.by

KHEIFETS Ilya M.

Master's Student<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Belarusian State Institute of Metrology, Minsk, Republic of Belarus

<sup>4</sup>Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus

<sup>5</sup>Graduate School of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 22 October 2020.

## REPRESENTATION OF THE PRODUCT AS AN OBJECT OF DIGITALIZATION OF PRODUCTION WITH A STRUCTURED SET OF MODULES

*Disadvantages of the traditional description of a mechanical engineering product are shown, which are based on technological features oriented to single, typical and group operations of the technological process. It is proposed to represent the design of the product and its parts with a structured set of relevant technological modules, in the form of a graph of a hierarchical structure. The availability of a unified methodological base makes it possible to control the development of constructively complex products, minimize duplication in the creation of new designs and effectively develop resource-saving technologies for their manufacture. The choice of the method for assessing the manufacturability of the product design is substantiated by the labor intensity of the processes at the stages of its life cycle and the formation of a set*



of criteria that generalize the assessment of design and technological solutions by coefficients that take into account their degree of influence on the technical and economic indicators of the processes. On the basis of a technical and economic analysis, a method for the integral assessment of production manufacturability in the product life cycle has been formed. The method combines various coefficients of manufacturability, taking into account the degree of their influence on the labor intensity of production and maintenance, repair and disposal of the product structure. Based on the results of the feasibility study, it was proposed to understand the manufacturability of the product design at the stages of its production and disposal as production adaptability.

**Keywords:** product, part, construction, object, item, operation, structure, module, graph, level

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-1-54-62-70>

## References

- Hannam R. *Computer integrated manufacturing: from concepts to realization*. Harlow, Addison Wesley, 1977. 258 p.
- Bratukhin A.G., et al. *CALS v aviastronii* [CALS in aircraft construction]. Moscow, Moskovskiy aviationsnyy institut Publ., 2000. 304 p. (in Russ.).
- Cherpakov B.I., et al. *Kompyuterizirovannye integrirovannye proizvodstva i CALS-tehnologii v mashinostroenii* [Computerized integrated production and CALS-technologies in mechanical engineering]. Moscow, GUP "VIMI" Publ., 1999. 512 p. (in Russ.).
- Vityaz 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.).
- Intellektualnoe proizvodstvo: sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Intellectual production: state and prospects]. Novopolotsk, Polotskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2002. 268 p. (in Russ.).
- Rusetsky A.M., et al. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov* [Theoretical bases of technological systems designing]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 239 p. (in Russ.).
- Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, Springer, 2015. 498 p.
- Additive manufacturing for the aerospace industry*. Cambridge, Elsevier, 2019. 465 p.
- Chizhik S.A., Vityaz P.A., Kheifetz M.L., et al. *Obespechenie kachestva izdeliy v tekhnologicheskikh kompleksakh* [Quality assurance of products in technological complexes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 248 p. (in Russ.).
- Vasiliev A.S., Dalskiy A.M., Klimenko S.A., et al. *Tekhnologicheskie osnovy upravleniya kachestvom mashin* [Technological bases of machine quality management]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 256 p. (in Russ.).
- Dalskiy A.M., Bazrov B.M., Vasiliev A.S., et al. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitelnom proizvodstve* [Technological strain in mechanical engineering]. Moscow, Moskovskiy aviationsnyy institut Publ., 2000. 364 p. (in Russ.).
- Kheifetz M.L., Tochilo V.S., Semenov V.I., et al. *Statisticheskii analiz konstruktivnykh elementov i tekhnologicheskikh parametrov detaley mashin* [Statistical analysis of structural elements and technological parameters of machine parts]. Novopolotsk, Polotskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2001. 112 p. (in Russ.).
- Bazrov B.M. *Modulnaya tekhnologiya v mashinostroenii* [Module technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 368 p. (in Russ.).
- Rusetsky A.M., et al. *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov* [Designing and equipping of technological systems]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 316 p. (in Russ.).
- Goverdovskaya R.G. *Metodika otrabotki konstruktivnykh na tekhnologichnost i otsenki urovnya tekhnologichnosti izdeliy mashinostroeniya i priborostroeniya* [Method of testing structures for manufacturability and evaluating the level of manufacturability of mechanical engineering and instrument-making products]. Moscow, Standartov Publ., 1976. 56 p. (in Russ.).
- Amirov Yu.D., Alferova T.K., Volkov P.N. *Tekhnologichnost konstruktivnykh izdeliy* [Manufacturability of product designs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russ.).
- State Standard 14.205-83. *Tekhnologichnost konstruktivnykh izdeliy. Terminy i opredeleniya* [Technological efficiency of products design. Terms and definitions]. 1983. 22 p. (in Russ.).
- State Standard 14.201-83. *Obespecheniye tekhnologichnosti konstruktivnykh izdeliy. Obshchie trebovaniya* [Provision of technological efficiency of products design. General requirements]. 1984. 18 p. (in Russ.).
- Korshunov Yu.M. *Matematicheskie osnovy kibernetiki* [Mathematical foundations of cybernetics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 496 p. (in Russ.).
- Ebeling W. *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen*. Leipzig, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1976.
- Sigorskiy V.P. *Matematicheskii apparat inzhenera* [Engineer's mathematical apparatus]. Kiev, Tekhnika Publ., 1977. 768 p. (in Russ.).
- Haken H. *Synergetics*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1978.
- Bazrov B.M., Kheifetz M.L., Popok N.N. Unification of design decisions on the basis of average distribution of probabilities and introduction of isolated areas for elements of products described by structured multiple modules. *Nonlinear phenomena in complex systems*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 221–232. DOI: <https://doi.org/10.33581/1561-4085-2019-22-3-221-232>.
- Bazrov B.M. Modulnyy printsip postroyeniya stanochnogo oborudovaniya [Module principle of building machinery]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2011, no. 11, pp. 51–53 (in Russ.).
- Ross D.T., Schoman R.E. Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transaction on SE*, 1997, special edition, no. 1, pp. 6–15.
- Koreshkov V.N., Kusakin N.A., Ankuda S.N., Kheifetz I.M. Postroyeniye determinirovannykh i stokhasticheskikh modeley dlya analiza i upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Construction of deterministic and stochastic models for analysis and control of technological processes]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 3, pp. 114–123 (in Russ.).
- Vasiliev A.S., Vasin S.A., Dal'skiy A.M., Kondakov A.I. *Tekhnologicheskie aspekty konversii mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Technological aspects of the conversion of engineering production]. Moscow, Tula, Tula'skiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2003. 271 p. (in Russ.).
- Druzhinin V.V., Kontorov D.S. *Problemy sistemologii* [Problems of systemology]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976. 296 p. (in Russ.).
- Balabanov A.N. *Tekhnologichnost konstruktivnykh detaley mashin* [Manufacturability of structures of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 336 p. (in Russ.).
- Bochkarev P.Yu., Bokova L.G. *Otsenka proizvodstvennoy tekhnologichnosti detaley* [Assessment of production manufacturability of parts]. Moscow, Lan Publ., 2017. 132 p. (in Russ.).
- Bazrov B.M., Troitskiy A.A. Analiz koeffitsientov tekhnologichnosti konstruktivnogo ispolneniya izdeliya [Analysis of the coefficients of manufacturability of the design of the product]. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2018, no. 7, pp. 23–26 (in Russ.).