

Научная статья
УДК 621.01
DOI: 10.34759/vst-2023-1-198-207

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ 3D-МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Никодим Владимирович Подрез^{1✉}, Алексей Сергеевич Говорков²

^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
Иркутск, Россия

¹ podreznv@ex.istu.edu ✉

² govorkov_as@ex.istu.edu

Аннотация. Рассмотрена оценка технологичности конструкции изделия (ТКИ) традиционными методами. Выявлено, что на основе 3D-модели изделия можно ускорить процесс оценки ТКИ по сравнению с традиционными методами. Была проработана методика оценки ТКИ, разработана ее концепция, формализована необходимая информация для выполнения оценки (база данных и база знаний). Визуализированы выходные данные методики в виде примера технологических рекомендаций технологу по подготовке производства. Сформулированы выводы.

Ключевые слова: оценка технологичности конструкции изделия, электронная модель изделия, продукционно-фреймовая модель, качественная оценка ТКИ, количественная оценка ТКИ

Для цитирования: Подрез Н.В., Говорков А.С. Разработка методики оценки технологичности конструкции изделия на основе 3D-модели изделия машиностроения // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 198–207. DOI: 10.34759/vst-2023-1-198-207

Original article

DEVELOPING MANUFACTURABILITY ASSESSING TECHNIQUE OF THE PRODUCT STRUCTURE BASED ON THE 3D MODEL OF A MECHANICAL ENGINEERING PRODUCT

Nikodim V. Podrez^{1✉}, Alexey S. Govorkov²

^{1,2} Irkutsk National Research Technical University (INRTU),
Irkutsk, Russia

¹ podreznv@ex.istu.edu ✉

² govorkov_as@ex.istu.edu

Abstract. The purpose of the presented work consists in developing automated technique for the product structure manufacturability (PSM) assessment based on its 3D model. The following hypothesis was put forward for its solving: formalized PSM of the product may be realized employing initial data from the product design docu-

© Подрез Н.В., Говорков А.С., 2023

mentation (DD) in the form of the product electronic model (PEM). This will allow obtaining the output data in the form of technological recommendations on preproduction recommendations to the production engineer such as tools selection, typical technological process (TTP), as well as providing quantitative and qualitative indicators of the PSM analysis.

Based on the said hypothesis and purpose the following tasks were put forward:

1. Developing concept of the technique for the PSM analysis in the form of the flowchart.
2. Selecting the part and its definitely significant structural elements (SE).
3. Performing information formalization necessary for the part manufacturability assessment.
4. Developing aggregative concept of the PSM analysis technique in the form of the flowchart.

The study consisted in analysis of the conventional methods for the manufacturability assessment, i.e. how this assessment is being realized at the modern industry. In other words, to analyze the technique for analysis performing and reveal its problems. Based on the problem and industry and data digitalization (the product electronic model is a design document) the concept of the technique for the manufacturability assessment of the machine-building product structure base on its 3D model was put forward.

This result may be implemented at any state-of-the-art machine-building enterprise while preproduction of a new product.

The following inference can be drawn. Traditional method for the PSM assessment has become obsolete and does not match the digital industry criteria. Besides, qualified production engineer is required to perform the assessment of the part structure manufacturability. The need for such specialist would be eliminated with the application of the new method for the assessing the structure manufacturability of the part of the machine building production. The said method will significantly reduce preproduction period of a new product, minimizing human factor, as well as drastically simplify the work of the production engineer at decision-making on either manufacturability or non-manufacturability of the product at the given type of production.

Keywords: assessment of the manufacturability of the product design, electronic model of the product, production-frame model, qualitative assessment of MPD, quantitative assessment of MPD

For citation: Podrez N.V., Govorkov A.S. Developing Manufacturability Assessing Technique of the Product Structure Based on the 3D Model of a Mechanical Engineering Product. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 198–207. DOI: 10.34759/vst-2023-1-198-207

Введение

На производстве анализ технологичности конструкции изделия выполняется сегодня традиционными методами, и это выдвигает серьезные проблемы, так как почти все современное оборудование имеет наладку в цифровом формате.

Проанализировав литературу по данной тематике [1–13], можно сделать следующие выводы:

1) в традиционном производстве отсутствует системная связность между методиками оценки ТКИ;

2) в производстве не существует автоматизированной оценки ТКИ; на рынке представлены определенные продукты автоматизации, но они узконаправлены и не дают точную оценку ТКИ;

3) в традиционном производстве анализ ТКИ выполняют несколько отделов предприятия (расчет количественных коэффициентов анализа ТКИ — экономические отделы и отделы представительства разработчика; качественная оценка ТКИ — отдел подготовки производства), что сказывается на скорости подготовки производства к выпуску нового

изделия. К примеру, над проработкой вопроса в каждом отделе специалист работает в течение дня, и итоговая оценка ТКИ может затянуться на неделю. Имея исходные данные в цифровом форматизованном формате, можно автоматизировать методику оценки ТКИ и выполнить оценку ТКИ за несколько секунд, в зависимости от мощности вычислительной машины.

Таким образом, обозначена **проблема** анализа ТКИ. Традиционный анализ требует много времени на проработку и выполнение анализа ТКИ; в работе участвует много структур подготовки производства, что сказывается на времени запуска опытного изделия; для выполнения оценки качественной ТКИ нужен опытный технолог, знающий всю специфику производства, на котором будет изготавливаться опытное изделие; технологю следует знать большой объем информации, имеющейся в директивных документах, ОСТах, ГОСТах и т.д. Молодому и неопытному технологю придется тратить много времени на оценку качественной ТКИ, что будет сказываться также на запуске опытного

изделия. Кроме того, снижать качество выполнения оценки ТКИ традиционным методом может и человеческий фактор.

Выдвигается гипотеза о возможности с помощью исходных данных конструкторской документации (КД) изделия в виде электронной модели изделия (ЭМИ) выполнить формализованную оценку ТКИ для получения выходных данных в виде количественных и качественных показателей анализа ТКИ.

Задачи исследования:

1. Разработать концепцию методики анализа ТКИ.
2. Подобрать деталь, а также выбрать определенно значимые конструктивные элементы (КЭ) детали.
3. Выполнить формализацию информации, необходимой для выполнения оценки технологичности детали.
4. Разработать укрупненно концепцию методики анализа ТКИ в виде блок-схемы.

1. Анализ технологичности конструкции изделия на типовом производстве

На типовом авиационном производстве типовая схема анализа ТКИ, благодаря которой происходит подготовка производства к выпуску нового изделия, следующая: производится оценка ТКИ

по двум направлениям, а именно — качественная и количественная [16–20].

Качественная оценка ТКИ выполняется по параметрам «Технологично-нетехнологично», «допустимо-недопустимо» на основе опыта изготовления типовых изделий, а также опыта производства по изготовлению. На производстве эту работу выполняет технолог отдела подготовки. Его задача: проанализировать конструкции детали, узла, агрегата, изделия; понять — каким инструментом и оборудованием возможно изготовить изделие, какой цех сможет это выполнить. Технолог использует в своей работе директивные материалы по изготовлению, инструкции, ГОСТы, ОСТы, СТП. Этот довольно трудоемкий процесс требует большого опыта, а также обширных знаний по изготовлению и сборке изделия. В итоге технолог принимает решение о технологичности или нетехнологичности изделия. В случае нетехнологичности КД изделия передается в отдел разработчика с замечаниями отдела подготовки производства; в случае одобрения изготовления изделия технолог оформляет акт для дальнейшего принятия решения по оценке ТКИ комиссией.

Количественная оценка ТКИ выражается показателями, численное значение которых характеризует степень удовлетворения требований

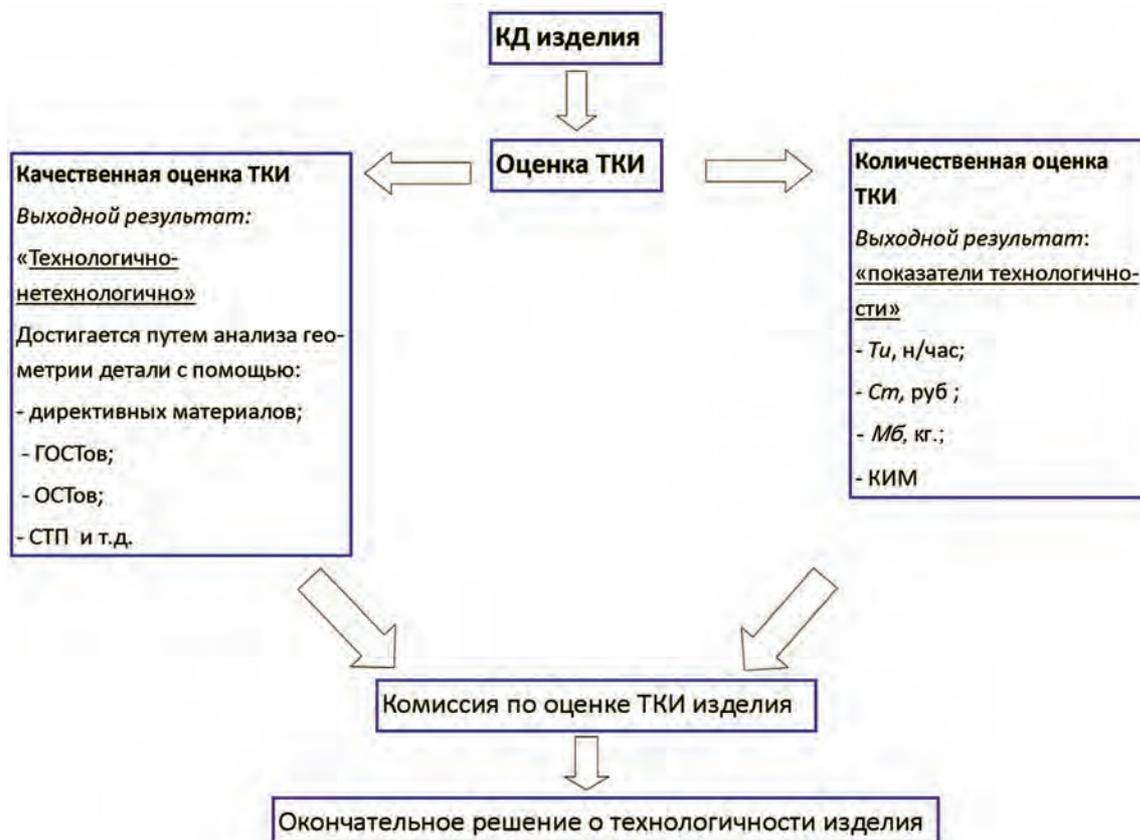


Рис. 1. Цикл типового анализа ТКИ на современном производстве

технологичности конструкции изделия [15]. Показатели уровня ТКИ определяются как отношения значения показателей технологичности разрабатываемого изделия к соответствующим показателям базовых показателей, которые берутся по идентичным изготовленным изделиям.

На производстве используются следующие показатели [15]:

- трудоемкость изготовления изделия $T_{и}$, н/ч;
- технологическая себестоимость изделия $C_{т}$, руб.;

- материалоемкость изделия M_6 , кг;
- коэффициент использования материалов КИМ.

Данные коэффициенты (кроме КИМ) рассчитываются несколькими экономическими отделами производства. Показатели общей трудоемкости и технологической себестоимости ($T_{и}$, $C_{т}$, M_6) определяются с целью оценки технологического процесса изготовления детали, оценки нагрузки работ на оборудование и инструмент. КИМ рассчитывается отделом главного технолога. В итоговом варианте формируется документ со всеми показателями.

На основе подготовленных документов по анализу качественной и количественной оценки ТКИ формируется производственная комиссия, которая анализирует выходные данные и принимает окон-

чательное решение о технологичности изделия на этом производстве.

Схематично цикл типового анализа ТКИ показан на рис. 1.

2. Разработка методики

Имея исходные данные изделия в виде 3D-модели, наиболее логично использовать экспертные системы в качестве математического аппарата выполнения оценки ТКИ. Экспертная система с помощью формализованной информации способна выполнить качественную и количественную оценку ТКИ, используя базу данных как источник информации, исходные данные — как объект, который требуется оценить, и базу знаний — как ядро принятия решений. На выходе экспертная система будет выдавать выходные данные в виде технологических рекомендаций технологу для принятия решения о технологичности или нетехнологичности изделия на данном виде производства. Упрощенная блок-схема методики показана на рис. 2.

3. Формализация информации для выполнения анализа ТКИ

Чтобы разработать методику, следует понимать, какие исходные данные необходимы от изделия

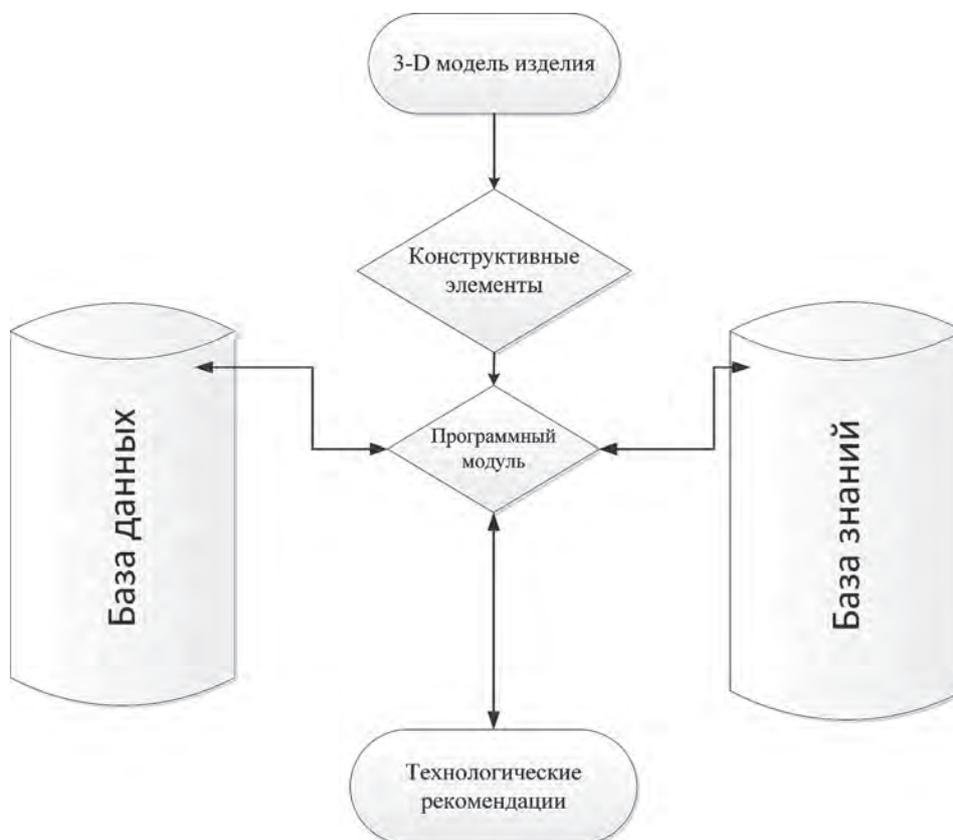


Рис. 2. Упрощенная блок-схема методики анализа ТКИ

программному модулю; какой информацией следует заполнять базу данных для выполнения анализа ТКИ на определенном виде производства. Было решено в качестве первого приближения подобрать фрезерованную деталь, взять у нее для эксперимента определенную часть конструкции и выделить значимые конструктивные элементы. На основе этих исходных данных следует формализовать данные, которые необходимы для выполнения анализа ТКИ именно этой части конструкции; эти формализованные данные будут храниться в базе данных программного модуля.

Была подобрана авиационная фрезерованная деталь «Балка тормозного щитка истребителя» (рис. 3).

Для примера возьмем карман детали и выделим у нее значимые конструктивные элементы для оценки (рис. 4, 5).

В качестве первого приближения выделим следующие конструктивные элементы (КЭ) в сечении А-А детали, указанные в табл. 1.

Таблица 1

КЭ детали для первого приближения

Параметр	Значение
Малка	Открытая (угол больше 90°)
Радиус	R4
Материал	Сплав 1933Т2 ОСТ 1 90026-80

Зная конструктивные значимые элементы детали, формализуем необходимые данные в базу

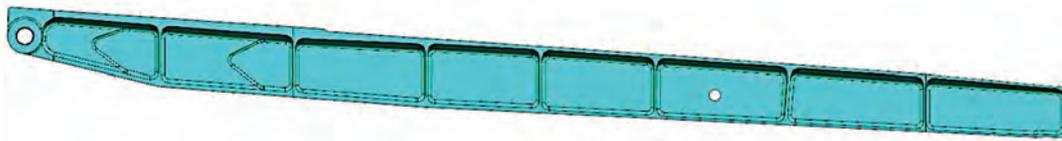


Рис. 3. Балка тормозного щитка истребителя

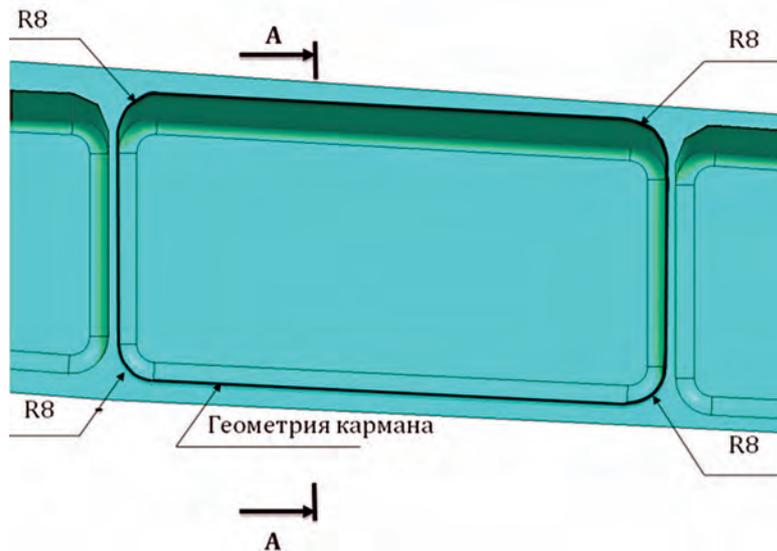


Рис. 4. Выбор конструктивных элементов у детали А-А

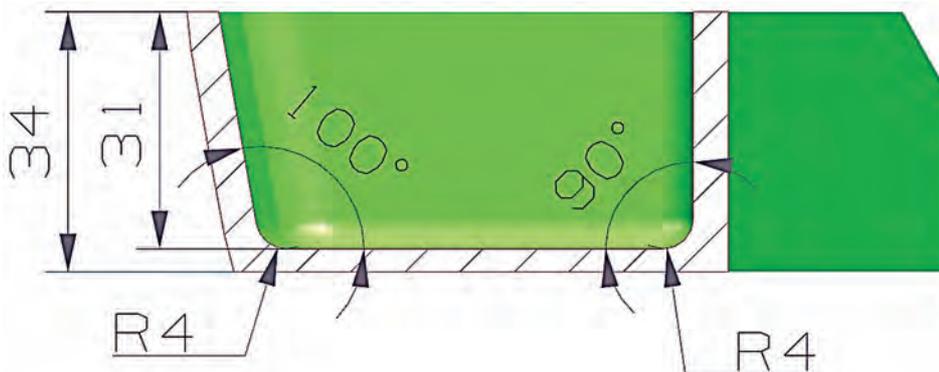


Рис. 5. Сечение А-А

данных программного модуля с целью выполнения оценки ТКИ в автоматизированном режиме.

Как и в традиционном варианте, анализ ТКИ будем выполнять двумя методами: качественной оценкой ТКИ и количественной.

Для выполнения качественной оценки ТКИ технолог использует определенные отраслевые стандарты, а также атласы, которые имеют в своей очереди технологические рекомендации по выполнению конструкций изделий с наибольшей технологичностью. Такие атласы или отраслевые стандарты имеют графическое изображение, в котором указана типовая конструкция детали и ее анализ, технологична она или нет, а также даны рекомендации, как выполнить определённые элементы конструкции с точки зрения технологичности. В нашем примере имеется фрезерованная деталь. Согласно отраслевому стандарту фрезерованные детали технологичны, если у них имеются типовые радиусные переходы для выполнения фрезерных работ одним инструментом, без его смены; а также деталь считается технологичной,

если у нее нет закрытых малок. Эту информацию следует формализовать в базу данных с помощью производственно-фреймовой модели формализации. Данный метод структурирует информацию в виде таблиц, информация заносится в базу данных — в табл. 2.

При подготовке производства, на этапе проектирования конструкции изделия, выполняется также количественная оценка ТКИ с помощью расчетных показателей технологичности. Данные показатели сравниваются с их базовыми аналогами по идентичным изделиям.

Расчетные количественные показатели, используемые при подготовке производства, были представлены выше, в разд. 1. Здесь они будут рассмотрены подробно.

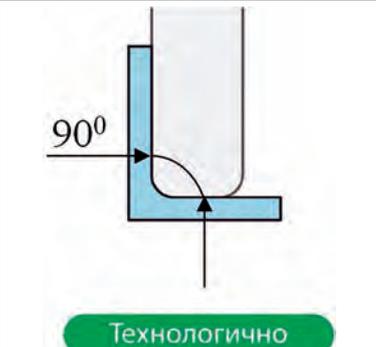
1. Трудоёмкость изготовления изделия рассчитывается по следующей формуле [14]:

$$T_{и} = T_{а} \cdot K_{м} \cdot K_{сл}, \tag{1}$$

где $T_{а}$ — известная трудоёмкость всего изделия-аналога; $K_{м}$ — коэффициент, учитывающий весовые

Таблица 2

Фрейм качественной оценки ТКИ для первого приближения

Имя слота	Значение слота	Способ получения значения	Присоединенная процедура
Типовые радиусы		$R_a=R_b...R_n=const$	Конструктивные элементы
Открытая малка		Угол _н >90°	Конструктивные элементы
Угол 90°		Угол _н =90°	Конструктивные элементы

различия сопоставляемых конструкций изделий; $K_{сл}$ — коэффициент сложности.

K_M можно найти по коэффициенту изменения исходного показателя, M_n/M_a согласно табл. 3 [14].

Таблица 3

Определение коэффициента M_n/M_a

M_n/M_a	K_M	M_n/M_a	K_M	M_n/M_a	K_M	M_n/M_a	K_M
0,2	0,34	1,2	1,13	2,2	1,69	3,2	2,13
0,3	0,45	1,3	1,19	2,3	1,74	3,3	2,22
0,4	0,54	1,4	1,25	2,4	1,82	3,4	2,26
0,5	0,63	1,5	1,31	2,5	1,86	3,5	2,31
0,6	0,71	1,6	1,37	2,6	1,91	3,6	2,35
0,7	0,78	1,7	1,42	2,7	1,96	3,7	2,39
0,8	0,86	1,8	1,48	2,8	2,01	3,8	2,43
0,9	0,93	1,9	1,53	2,9	2,06	3,9	2,46
1,0	1,0	2,0	1,58	3,0	2,08	4,0	2,52

$K_{сл}$ рассчитывается по следующей формуле [14]:

$$K_{сл} = K_{ш} \cdot K_T, \tag{2}$$

где $K_{ш}$ — коэффициент шероховатости; K_T — коэффициент точности.

Значения этих коэффициентов можно определить по табл. 4 [14].

2. **Материалоемкость** рассчитывается по следующей формуле [14]:

$$M_6 = \frac{M}{КИМ_a} = M \cdot K_p, \tag{3}$$

где M — номинальное значение массы материала в изделии; $КИМ_a$ — коэффициент использования материала изделия-аналога; $K_p = \frac{1}{КИМ_a}$ — расходный коэффициент — показатель, обратный КИМ.

3. **Технологическая себестоимость:**

$$C_T = C_M + C_3 + C_{ц,р}, \tag{4}$$

где C_M — стоимость материалов; C_3 — заработная плата производственных рабочих с начислениями; $C_{ц,р}$ — цеховые расходы.

4. **КИМ** рассчитывается по следующей формуле:

$$C_T = \frac{M}{N_i}, \tag{5}$$

где M — номинальное значение массы материала в изделии; N_i — норма расхода, данного (i -го) материала на изготовление изделия.

Данные являются знаниями для выполнения расчетов в программном модуле и должны быть формализованы в базу знаний. Данные знания тоже можно формализовать в виде фрейма (табл. 5).

Также в базу данных следует внести информацию по расчетным коэффициентам изделия-аналога для выполнения анализа сравнения этих показателей в относительных величинах.

4. **Концепция методики**

Имея всю необходимую информацию для выполнения оценки анализа ТКИ, можно спроектировать саму концепцию методики автоматизированной оценки ТКИ на производстве, используя исходные данные в виде цифровой информации из электронной модели изделия. Схема методики для первого приближения показана на рис. 6.

Алгоритм работы методики следующий: технологу поступает на проработку на технологичность КД изделия в виде ЭМИ. Технолог с помощью модуля передает исходные данные для расчета

Таблица 4

Определение коэффициентов $K_{ш}$ и K_T

Квалитет точности	6	7	8	11	12	13
Значение корректирующего коэффициента K_T	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
Характеристика шероховатости поверхности	Rz 80	Rz 40	Rz 20	Ra 2,5	Ra 1,25	Ra 0,63
Значение корректирующего коэффициента $K_{ш}$	0,95	0,95	1	1,1	1,2	1,4

Таблица 5

Заполнение базы знаний для первого приближения

Имя слота	Значение слота	Способ получения значения	Присоединенная процедура
Трудоемкость	$T_n = x$, н/ч	Мат. аппарат расчета	База данных с информацией о коэффициентах $T_a \cdot K_M \cdot K_{сл}$
Материалоемкость	$M_6 = y$	Мат. аппарат расчета	База данных с информацией номинальной массы изделия и КИМ аналога
Себестоимость	$C_T = z$, руб	Мат. аппарат расчета	База данных с информацией о коэффициентах $C_M + C_3 + C_{ц,р}$
КИМ	$КИМ = q$	Мат. аппарат расчета	База данных с информацией номинальной массы изделия и нормой расхода материала на изготовление изделия

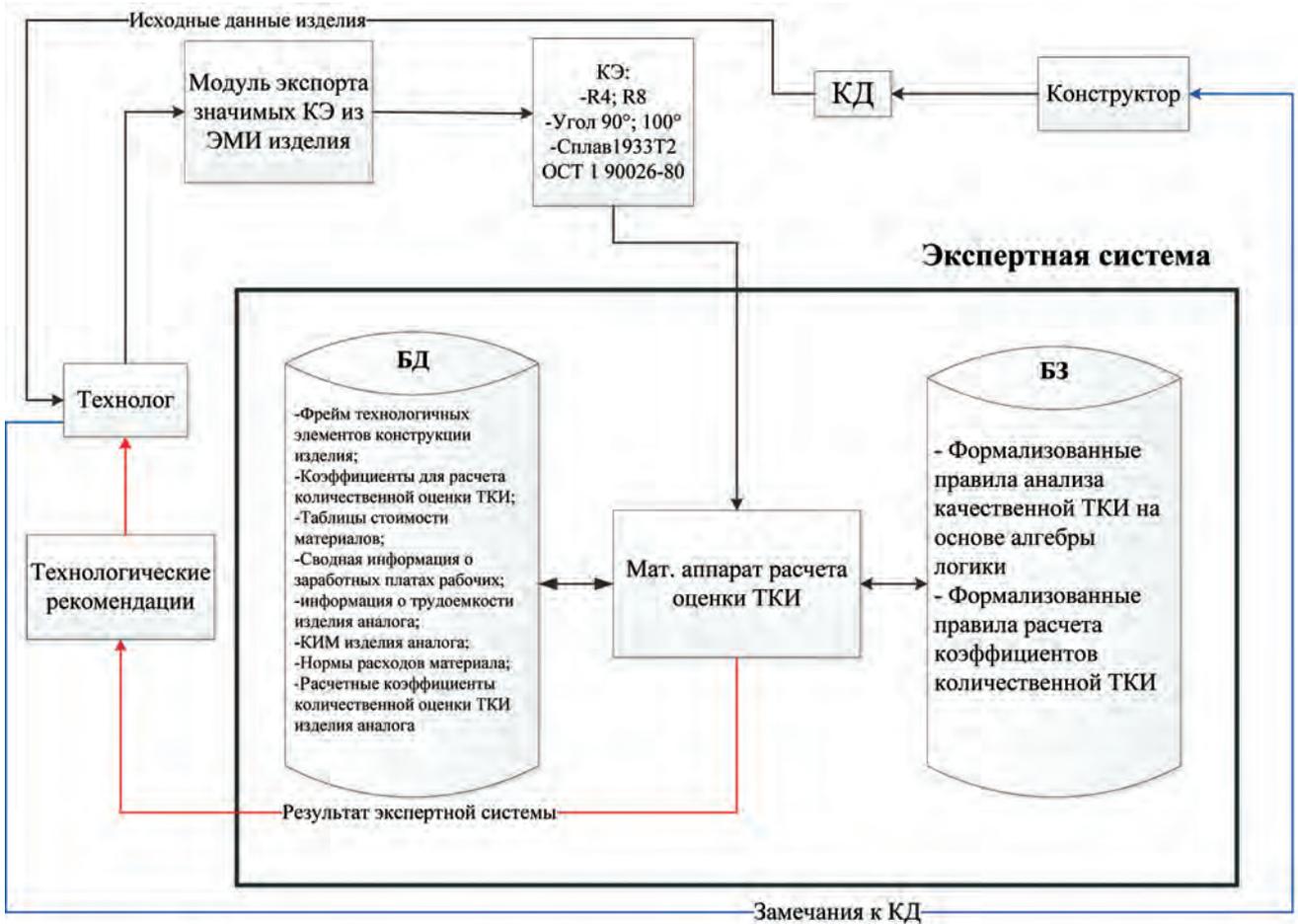


Рис. 6. Блок-схема методики оценки ТКИ в первом приближении



Рис. 7. Технологическая рекомендация

в экспертную систему. Экспертная система, на основе исходных данных, выполняет (с помощью базы знаний и базы данных) оценку ТКИ по количественному и качественному методам с помощью мат. аппарата. Мат. аппарат выдает результат экспертной системы технологу в виде технологических рекомендаций. Технолог анализирует полученную информацию и, при наличии замечаний к технологичности конструкции изделия, передает замечания конструктору для устранения. Далее, при необходимости, цикл повторяется до тех пор, пока технолог не решит, что изделие технологично на данном производстве.

Технологические рекомендации представляются технологу в виде анализа качественной ТКИ с информацией о технологичности либо нетехнологичности определенного вида конструкторского элемента, который был проанализирован. Результат показывается с помощью иллюстраций: если КЭ нетехнологичен, то будет дана иллюстрация с рекомендацией, как сделать его более технологичным. Также в рекомендации будут подобраны некоторые типовые технологические процессы (ТПП), которые можно реализовать на данном производстве: будет указан тип оборудования, необходимый инструмент, а также количество переходов с количественными параметрами ТКИ. К определенному виду ТКИ будут просчитаны количественные показатели ТКИ (рис. 7).

Выводы

Традиционный метод оценки ТКИ достаточно трудоемок. С одной стороны, для оценки ТКИ привлекаются многие службы и отделы производства для выполнения количественной оценки ТКИ, что сказывается на времени подготовки производства. С другой стороны, для выполнения качественной ТКИ требуется большой опыт технолога, знающего весь спектр цехов производства, оборудование и инструмент, и это тоже влияет на время подготовки производства, затрудняет подбор молодых кадров на эту должность. Также нельзя сбрасывать со счетов человеческий фактор для совершения ошибки при анализе. В данной работе спроектирована новая концепция методики оценки ТКИ с помощью ЭМИ изделия и программного аппарата. Предлагаемый метод существенно сократит подготовку производства к выпуску нового изделия, минимизируя человеческий фактор, а также значительно упростит работу технолога для принятия решения о технологичности или нетехнологичности изделия на данном производстве.

Список источников

1. Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г. Состояние и направления развития в области обеспечения технологичности конструкции изделий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2019. № 2(92). С. 37–42.
2. Артемов И.И., Зверовщиков А.Е., Нестеров С.А. Стратегия оценки технологичности конструкции изделий для высокотехнологичных наукоемких машиностроительных производств // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 1. С. 286–290.
3. Самаркин А.И., Самаркина Е.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Анализ технологичности конструкции изделия с использованием САПР // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: технические науки. 2016. № 3. С. 3–11.
4. Самаркин А.И., Самаркина Е.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Технологичность конструкции изделия и САПР // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 7. С. 3–6.
5. Говорков А.С. Методика количественной оценки технологичности конструкции изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 31–37.
6. Fokin I.V., Podrez N. V., Smirnov A.N., Govorkov A.S. Recognition of structural elements of mechanical engineering as a solution to data formalization problem // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (17th September 2020; Novosibirsk, Russia). DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012047
7. Podrez N.V., Govorkov A.S., Labuz Y.A. Development of a formalized system for analyzing the technological design of products in mechanical engineering // International Conference on Information Technology in Business and Industry (6–8 April 2020; Novosibirsk, Russia). DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012107
8. Подрез Н.В., Говорков А.С. Проблема и решение формализованного анализа технологичности конструкции изделий машиностроения // Наука. Технологии. Инновации: Краткий статистический сборник. — М.: НИУ ВШЭ, 2020. С. 420–428.
9. Ишенин Д.А., Говорков А.С. Проектирование технологических операций на основе параметров производственной технологичности конструкции изделия с использованием алгоритма автоматизированного проектирования // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 708–719. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-6-708-719
10. Sokolnikov R.A., Bozheeva T.V., Govorkov A.S. Development of methodology for formalized selection of technological operations when designing technological process manufacturing of machinery // High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing (28 February 2020; Siberia, Russia). DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012080
11. Ишенин Д.А., Говорков А.С. Алгоритм автоматизированного проектирования технологического процесса с учётом параметров производственной технологичности конструкции изделия // Наука. Технологии. Инновации: Краткий статистический сборник. — М.: НИУ ВШЭ, 2020. Ч. 3. С. 412–417.
12. Кривцов В.С., Павленко В.Н., Воронько В.В., Воробьев Ю.А., Шостак И.В. Комплексный подход к роботизации сборочных процессов в самолетостроении

- на основе нечеткой логики // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 32–39.
13. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Под ред. Ю.Д. Амирова. — 2-е изд.; перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 768 с.
 14. Гурьев И.А., Бочкарев С.В. Показатели технологичности конструкций при проектировании и постановке на производство новых изделий // Технические науки — от теории к практике. 2016. № 6(54). С. 62–68.
 15. Медведева С.А. Основы технической подготовки производства: Учебное пособие. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. — 69 с.
 16. Ирзаев Г.Х. Модель выбора конструкции по количественным критериям в системе обеспечения технологичности изделий // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2(22). С. 108–113.
 17. Ирзаев Г.Х. Экспертные методы управления технологичностью промышленных изделий. — М.: Инфра-Инженерия, 2010. — 192 с.
 18. ГОСТ 14.201-83 Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2009. — 9 с.
 19. ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкции изделия. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2009. — 5 с.
 20. ОСТ 1 41708-2003. Технологическое обеспечение разработки и постановки на производство летательных аппаратов. — М.: Стандартинформ, 2003. — 21 с.
- of products in mechanical engineering. *International Conference on Information Technology in Business and Industry (6–8 April 2020; Novosibirsk, Russia)*. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012107
8. Podrez N.V., Govorkov A.S. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Kratkii statisticheskii sbornik*, Moscow, NIU VShE, 2020, pp. 420–428.
 9. Ishenin D.A., Govorkov A.S. *iPolytech Journal*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 708–719. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-6-708-719
 10. Sokolnikov R.A., Bozheeva T.V., Govorkov A.S. Development of methodology for formalized selection of technological operations when designing technological process manufacturing of machinery. *High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing (28 February 2020; Siberia, Russia)*. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012080
 11. Ishenin D.A., Govorkov A.S. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Kratkii statisticheskii sbornik*, Moscow, NIU VShE, 2020. Part 3, pp. 412–417.
 12. Krivtsov V.S., Pavlenko V.N., Voronko V.V., Vorobjev Y.A., Shostak I.V. Complex approach to robotic automation of assembly processes in aircraft manufacturing based on fuzzy logic. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 32–39.
 13. Amirov Yu.D. (ed.) *Tekhnologichnost' konstruktssii izdeliya. Spravochnik* (Manufacturability of the product design. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 768 p.
 14. Gur'ev I.A., Bochkarev S.V. *Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike*, 2016, no. 6(54), pp. 62–68.
 15. Medvedeva S.A. *Osnovy tekhnicheskoi podgotovki proizvodstva* (Fundamentals of production technical preparation), St. Petersburg, SPbGU ITMO, 2010, 69 p.
 16. Irzaev G.Kh. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 2(22), pp. 108–113.
 17. Irzaev G.Kh. *Ekspertnye metody upravleniya tekhnologichnost'yu promyshlennykh izdelii* (Expert methods of the industrial products manufacturability managing), Moscow, Infra-Inzheneriya, 2010, 192 p.
 18. *Obespechenie tekhnologichnosti konstruktssii izdelii. Obshchie trebovaniya. GOST 14.201-83* (Ensuring technological efficiency of products design. General requirements. State Standard 14.201-83), Moscow, Standarty, 2009, 9 p.
 19. *Tekhnologichnost' konstruktssii izdeliya. Terminy i opredeleniya. GOST 14.205-83* (Technological efficiency of products design. Terms and definitions. State Standard 14.205-83), Moscow, Standartinform, 2009, 5 p.
 20. *Aviatsionnyi standart. Tekhnologicheskoe obespechenie razrabotki i postanovki na proizvodstvo letatel'nykh apparatov. OST 1 41708-2003* (Aviation standard. Technological support for the development and production of aircraft. Industry Standard OST 1 41708-2003), Moscow, Standartinform, 2003, 21 p.

References

1. Bochkarev P.Yu., Bokova L.G. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii*, 2019, no. 2(92), pp. 37–42.
2. Artemov I.I., Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva*, 2017, no. 1, pp. 286–290.
3. Samarkin A.I., Samarkina E.I., Dmitriev S.I., Evgen'eva E.A. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 3, pp. 3–11.
4. Samarkin A.I., Samarkina E.I., Dmitriev S.I., Evgen'eva E.A. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2016, no. 7, pp. 3–6.
5. Govorkov A.S. Method of quantitative assessment of the airframe element manufacturability. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 31–37.
6. Fokin I.V., Podrez N. V., Smirnov A.N., Govorkov A.S. Recognition of structural elements of mechanical engineering as a solution to data formalization problem. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (17th September 2020; Novosibirsk, Russia)*. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012047
7. Podrez N.V., Govorkov A.S., Labuz Y.A. Development of a formalized system for analyzing the technological design

Статья поступила в редакцию 15.11.2022; одобрена после рецензирования 09.12.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was submitted on 15.11.2022; approved after reviewing on 09.12.2022; accepted for publication on 15.12.2022.