

На правах рукописи
УДК 621.9.06

Троицкий Александр Андреевич

**МЕТОД ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ
ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЯ СУММИРОВАНИЕМ
КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



МОСКВА 2022

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель:

Базров Борис Мухтарбекович, доктор технических наук, профессор, заведующий лаборатории теории модульной технологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), г. Москва

Официальные оппоненты:

Вартанов Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технология машиностроения имени Ф. С. Демьянюка федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский Политех), г. Москва

Бочкарёв Пётр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения и прикладная механика» Камышинского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» г. Камышин.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева" (РГАТУ им. П. А. Соловьёва), г. Рыбинск

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря Диссертационного Совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

Актуальность работы.

Обеспечение технологичности конструкции изделия (ТКИ) позволяет существенно снизить трудоёмкость и себестоимость его изготовления. В связи с этим важна отработка конструкции изделия на технологичность на всех стадиях создания изделия: техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая конструкторская документация опытного образца и серийного изделия и разработка технологической документации.

Отработка изделия на технологичность – сложная задача, при решении которой конструктор должен не только обеспечить высокий технический уровень и эксплуатационные качества создаваемого изделия, но и в полной мере учесть требования производства, то есть обеспечить его производственную технологичность. Повышение уровня производственной технологичности позволяет существенно сократить затраты на производство.

При этом особенно важна отработка конструкции изделия на технологичность, когда разработана рабочая конструкторская документация на изделие, но еще не проведена технологическая подготовка производства.

Задача обеспечения производственной ТКИ начинается с оценки её уровня, принимая во внимание условия производства.

При этом оценка должна определять не только уровень ТКИ, но и показывать какие характеристики конструкции изделия (КИ) и в какой степени влияют на трудоёмкость изготовления изделия. Это позволяет существенно повысить эффективность процесса отработки КИ на технологичность.

Ошибки в оценке уровня ТКИ приводят к неправильному установлению степени влияния характеристик КИ на трудоёмкость. Это приводит к росту трудоёмкости процесса отработки КИ на технологичность, так как не позволяет выявить характеристики КИ, оказывающие доминирующее влияние на процесс отработки, последовательности их улучшения и момента, когда должен прекращаться процесс отработки КИ на технологичность.

Изложенное показывает актуальность повышения точности оценки уровня ТКИ.

Цель работы:

Повышение уровня технологичности конструкции изделия на этапе разработки его рабочей конструкторской документации.

Основные задачи исследования:

- анализ основных методов современной оценки уровня ТКИ;
- выбор метода оценки уровня ТКИ;
- исследование метода оценки уровня ТКИ коэффициентами технологичности, включая исследование связей между известными коэффициентами технологичности и трудоёмкостью изготовления КИ, и их расчетными формулами;
- определение перечня коэффициентов технологичности и разработка их расчетных формул;
- разработка методики оценки уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности;

- разработка программного обеспечения для расчета уровня производственной ТКИ;

- разработка методики определения точности уровня оценки производственной ТКИ методом суммирования коэффициентов технологичности.

Предмет исследования – связи между коэффициентами технологичности, характеристиками конструкции изделия и трудоёмкостью его изготовления.

Объект исследования – методы оценки уровня технологичности конструкции изделия.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Перечень коэффициентов технологичности, расчетные формулы коэффициентов технологичности, отражающие степень их влияния на трудоёмкость изготовления КИ.
2. Методика расчета уровня производственной ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности.
3. Методика оценки уровня точности суммированием коэффициентов технологичности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что причиной невозможности получения оценки уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности является отсутствие учета в их расчетных формулах степени влияния характеристик конструкции изделия на полную трудоёмкость его изготовления.
2. На основе анализа характеристик КИ, влияющих на трудоёмкость его изготовления, определен перечень коэффициентов технологичности.
3. Разработана методика определения влияния характеристик КИ на полную трудоёмкость.
4. Разработаны расчетные формулы коэффициентов технологичности, учитывающие факторы влияния характеристики КИ и степень их влияния на полную трудоёмкость его изготовления.
5. Разработана методика определения точности расчета уровня ТКИ, заключающаяся в сопоставлении отношения трудоёмкостей изготовления двух изделий, изготовленных в идентичных условиях, и отношения их уровней технологичности.

Практическая значимость:

1. Разработана методика расчета уровня производственной ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности на стадии разработки рабочей конструкторской документации.
2. Определение ряда коэффициентов технологичности по степени их влияния на снижение трудоёмкости изготовления изделия. Это позволяет оптимизировать процесс отработки конструкции изделия на технологичность за счет установления с каких характеристик и в какой последовательности надо ее улучшать.
3. Разработано программное обеспечение для автоматизированного расчета уровня технологичности конструкции изделия, включая построение ряда

коэффициентов технологичности по степени снижения их влияния на трудоёмкость КИ.

Методы исследования:

В работе использовались основные положения технологии машиностроения, методы анализа и синтеза при исследовании связей между коэффициентами технологичности, характеристиками КИ, трудоёмкостью изготовления КИ при выводе аналитических зависимостей между коэффициентами технологичности и трудоёмкостью изготовления КИ.

Достоверность результатов расчета уровня ТКИ предложенным методом суммирования разработанных коэффициентов технологичности проводилась методом определения разницы между отношением трудоёмкостей двух изделий, изготавливаемых в идентичных условиях на одном предприятии, и отношением уровней их ТКИ. Погрешность расчета уровней ТКИ составляет 13,1 %.

Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались на Всероссийской научно-технической конференции студентов (Москва, 2018); на Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященной 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, 2018); на Международной Инновационно-ориентированной Конференции Молодых Учёных и Студентов (Москва, 2018); на XXXI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (Москва, 2019); на VI Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии сборки» (Москва, 2019); на XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019); на Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского (Москва, 2020); на Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы студенческая научная весна: Машиностроительные технологии (Москва, 2018); на VII Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии сборки» (Москва, 2021).

Публикации.

По содержанию работы и основным результатам исследования опубликовано 8 научных работ, входящих в перечень ВАК РФ, общим объёмом 4.68 п. л.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объём работы составляет 106 страниц, список литературы содержит 52 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность решаемых научно-технических задач, формулируются цели, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость предлагаемых решений.

В главе 1 показана актуальность оценки уровня ТКИ и рассмотрены современные методы её оценки.

Производственная технологичность позволяет существенно снизить трудоёмкость и технологическую себестоимость изготовления изделия.

Анализ работ Адамова А.П., Амирова Ю.Д., Ананьева С.А., Балкашина Б.С., Бочкарева П.Ю., Безъязычного В.Ф., Вартанова М.В., Семенова А.Н., и др., посвященных оценке уровня ТКИ, показал, что при оценке уровня ТКИ можно выделить два подхода. Первый подход заключается в определении уровня ТКИ с помощью основных показателей эффективности производства, таких как трудоёмкость, технологическая себестоимость и др. Второй подход заключается в определении уровня ТКИ с помощью коэффициентов технологичности, таких как коэффициенты стандартизации, повторяемости, точности обработки и др.

Подавляющее число работ, среди которых можно выделить работы Амирова Ю.Д., Ананьева С.Л., Вартанова М.В., Балакшина Б.С., Михельсона-Ткача В.Л., Семенова А.Н. и др. посвящены оценке уровня производственной ТКИ с помощью основных показателей эффективности производства. Этот подход отвечает только на вопрос: соответствует ли уровень ТКИ нового изделия заданным значениям основных показателей эффективности производства, но не показывает факторы и их весовые значения, оказывающие влияние на уровень ТКИ. Последнее является существенным недостатком при отработке КИ на технологичность, так как не показывает с каких характеристик и в какой последовательности надо повышать технологичность КИ.

Второму подходу посвящены работы Адамова А.П. Амирова Ю.Д., Безъязычного В.Ф., Боковой Л. Г., Бочкарева П.Ю., Вартанова М.В., Кононенко В.Г., Курбанова М.М. и др.. Такая оценка уровня ТКИ позволяет не только ответить на вопрос, соответствует ли уровень ТКИ изделия его заданному значению, но и определить какие характеристики КИ и в какой степени влияют на трудоёмкость его изготовления, что позволяет снизить трудоёмкость отработки КИ на технологичность. В связи с преимуществами второго подхода в работе рассматривается оценка уровня ТКИ с помощью коэффициентов технологичности.

Реализуется второй подход посредством выбора группы коэффициентов технологичности и сравнением их значений с заданными. Такая оценка, как правило, производится технологом или методом экспертной оценки. В первом случае достоверность оценки во многом зависит от опыта и квалификации технолога, а во втором - от квалификации экспертов, в обоих случаях процесс оценки не поддается автоматизации. К другим недостаткам такой оценки относятся, во-первых, отсутствие установленного полного перечня коэффициентов технологичности, во-вторых, одни коэффициенты учитывают одну характеристику КИ, другие - несколько характеристик КИ, что приводит к неоднозначности оценки уровня ТКИ, в-третьих, выбор коэффициентов технологичности для оценки уровня ТКИ определяется технологом или конструктором, в результате чего точность оценки уровня ТКИ зависит от квалификации и опыта технолога и конструктора, в-четвёртых, расчетные формулы коэффициентов технологичности не отражают степени их влияния на трудоёмкость изготовления КИ. В итоге это не позволяет

определить уровень ТКИ путем суммирования коэффициентов технологичности, снижает точность оценки уровня ТКИ и не позволяет установить степени влияния характеристик КИ на трудоёмкость изготовления изделия. Последнее препятствует снижению трудоёмкости процесса отработки изделия на технологичность.

В результате были сформулированы цель работы и задачи исследования.

Глава 2 посвящена анализу коэффициентов технологичности, их расчетных формул и связей между коэффициентами технологичности и трудоёмкостью изготовления изделия. Были рассмотрены, нашедшие наиболее широкое распространение, следующие коэффициенты технологичности: стандартизации ($K_{СТ}$), унификации (K_U), повторяемости ($K_{ПОВ}$), типизации ($K_{ТИП}$), точности обработки ($K_{ТЧ}$), шероховатости поверхностей ($K_{Ш}$), эффективности взаимозаменяемости ($K_{ВЗ}$). В основу методики исследования указанных коэффициентов технологичности положена цепочка связей: коэффициент технологичности – характеристика КИ – трудоёмкость изготовления КИ. Следует отметить, что КИ рассматривается как совокупность деталей, где покупные сборочные единицы тоже рассматриваются как «детали», при этом следует различать виды деталей: собственные, заимствованные, покупные. Заимствованная деталь не требует затрат времени на ТПП её изготовления.

Тогда общая трудоёмкость T изготовления КИ представляется суммой трудоёмкостей: $T=T_1+T_2$, где T_1 – трудоёмкость технологической подготовки производства; T_2 – трудоёмкость технологических процессов изготовления конструкции изделия. В свою очередь T_1 представляется суммой видов трудоёмкостей технологической подготовки производства: $T_{1.1}$ – трудоёмкость разработки технологических процессов изготовления деталей; $T_{1.2}$ – трудоёмкость разработки технологических процессов соединения деталей; $T_{1.3}$ – трудоёмкость разработки и изготовления технологической оснастки. Трудоёмкость изготовления изделия T_2 представляется суммой видов трудоёмкостей: $T_{2.1}$ – трудоёмкость подготовительно-заключительных работ при обработке заготовок; $T_{2.2}$ – трудоёмкость технологических переходов обработки заготовок; $T_{2.3}$ – трудоёмкость вспомогательных переходов обработки заготовок; $T_{2.4}$ – трудоёмкость подготовительно-заключительных работ при соединении деталей; $T_{2.5}$ – трудоёмкость технологических переходов соединения деталей; $T_{2.6}$ – трудоёмкость вспомогательных переходов соединения деталей.

Далее устанавливались характеристики КИ, нашедшие отражение в расчетных формулах коэффициентов технологичности. и проводился анализ расчетных формул коэффициентов технологичности.

Анализ расчетных формул коэффициентов $K_{СТ}$, K_U , $K_{ПОВ}$, $K_{ТИП}$, они не учитывают различие в трудоёмкости изготовления разных видов деталей (собственная, заимствованная, покупная). Собственная деталь влияет на трудоёмкость изготовления КИ через виды трудоёмкостей: $T_{1.1}$, $T_{1.2}$, $T_{1.3}$, $T_{2.1}$, $T_{2.2}$, $T_{2.3}$; заимствованная деталь влияет на трудоёмкость КИ через виды трудоёмкостей: $T_{2.1}$, $T_{2.2}$, $T_{2.3}$; покупная деталь не влияет на трудоёмкость изготовления КИ.

Коэффициент $K_{\text{пов}}$ не учитывает то, что в изделии число деталей одного наименования может быть разным, а, следовательно, и разным может быть их влияние на трудоёмкость изготовления КИ.

Коэффициент $K_{\text{тип}}$ не учитывает количество деталей в группе одного типового представителя.

Анализ расчетных формул коэффициентов $K_{\text{тч}}$ и $K_{\text{ш}}$ показывает, что, во-первых, не учитывается влияние различия величин площадей обрабатываемых поверхностей деталей одного качества и параметра шероховатости на трудоёмкость процессов их изготовления, во-вторых, не учитывается нелинейный характер зависимости трудоёмкости процессов обработки поверхностей деталей от значений качества точности и параметра шероховатости.

Анализ формулы $K_{\text{вз}}$ показывает, что, во-первых, не учитываются методы полной взаимозаменяемости, неполной взаимозаменяемости и регулировки; во-вторых, не учитывается число составляющих звеньев в размерной цепи. В результате при разном числе составляющих звеньев изменяются величины допусков на размеры деталей, входящих в размерную цепь, что приводит к изменению трудоёмкости изготовления деталей. Таким образом, коэффициент $K_{\text{вз}}$ не учитывает влияние на трудоёмкость изготовления деталей.

При учете влияния массы детали на трудоёмкость её изготовления не учитывается нелинейный характер зависимости $T=f(M)$, имеющий точку перегиба. Наличие точки перегиба означает, что при изменении от малого значения массы детали в сторону её увеличения, трудоёмкость КИ сначала уменьшается до точки перегиба, а затем увеличивается.

В заключении следует отметить следующие недостатки коэффициентов технологичности. Во-первых, все коэффициенты технологичности не отражают степени их влияния на трудоёмкость изготовления КИ, что не позволяет определять уровень ТКИ посредством суммирования их значений. Во-вторых, коэффициенты технологичности не учитывают факторы, сказывающие на степень влияния характеристик КИ на трудоёмкость его изготовления. Например, как отмечалось выше, в формуле $K_{\text{тч}}$ не учитывается влияние на трудоёмкость КИ величины площадей поверхностей одного качества точности.

Глава 3 посвящена разработке метода определения уровня производственной технологичности конструкции изделия посредством суммирования коэффициентов технологичности. В качестве первой задачи определялся перечень коэффициентов технологичности, охватывающих характеристики КИ, влияющие на трудоёмкость его изготовления. В результате был определен следующий перечень коэффициентов технологичности: коэффициент покупаемости ($K_{\text{пок}}$); коэффициент заимствования (K_3); коэффициент повторяемости деталей ($K_{\text{повд}}$); коэффициент повторяемости соединений ($K_{\text{повс}}$); коэффициент типизации ($K_{\text{тип}}$); коэффициент точности ($K_{\text{тч}}$); коэффициент шероховатости ($K_{\text{ш}}$); коэффициент твёрдости ($K_{\text{тв}}$); коэффициент массы ($K_{\text{м}}$); коэффициент соединения ($K_{\text{с}}$); коэффициент методов достижения точности замыкающих звеньев размерной цепи ($K_{\text{мрц}}$).

Для вывода расчетных формул коэффициентов технологичности необходимо установить влияние характеристик КИ на полную трудоёмкость его изготовления.

В таблице 2 показаны виды трудоёмкости, которые оказывают влияние на полную трудоёмкость изготовления КИ. Принимая во внимание данные таблицы 2, были выведены расчетные формулы коэффициентов технологичности:

$$K_{\text{ПОК}} = a_1 a_{1.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_1 a_{1.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}, \quad (7)$$

где $D_{\text{ПОК}i}$ – i -ая покупная деталь; $b_{\text{СЛ}i}$ – коэффициент сложности конструкции i -ой $D_{\text{ПОК}}$; $a_1 = T_1/T$; $a_2 = T_2/T$; $a_{1.1} = T_{1.1}/T_1$; $a_{1.2} = T_{1.2}/T_1$; $a_{1.3} = T_{1.3}/T_1$; $a_{2.1} = T_{2.1}/T_2$; $a_{2.2} = T_{2.2}/T_2$; $a_{2.3} = T_{2.3}/T_2$; $a_{2.4} = T_{2.4}/T_2$.

$$K_3 = a_1 a_{1.1} \frac{\sum D_{3i} b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}} + a_1 a_{1.3} \frac{\sum D_{3i} b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}}, \quad (8)$$

где D_{3i} – i -ая заимствованная деталь; $b_{\text{СЛ}i}$ – коэффициент сложности конструкции i -ой D_3 .

Таблица 2

Влияние коэффициентов технологичности на трудоёмкость

№	Коэффициент технологичности	Вид трудоёмкости (T _i)								
		T								
		T ₁			T ₂					
		T _{1.1}	T _{1.2}	T _{1.3}	T _{2.1}	T _{2.2}	T _{2.3}	T _{2.4}	T _{2.5}	T _{2.6}
1	K _{ПОК}									
2	K _З									
3	K _{ПВД}									
4	K _{ПВС}									
5	K _{ТИП}									
6	K _{ТЧ}									
7	K _Ш									
8	K _{ТВ}									
9	K _М									
10	K _С									
11	K _{МРЦ}									

$$K_{\text{ПВД}} = a_1 a_{1.1} \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1) b_{\text{СЛ}i} - \sum (D_{\text{ПВД.3}j} - 1) b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}} - D_3} +$$

$$a_1 a_{1.3} \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i} - \sum (D_{\text{ПВД.З}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}} - D_3} + a_2 a_{2.1} \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}}, \quad (9)$$

где $D_{\text{ПВД}j}$ – j -ое число повторяемых деталей i -ой группы наименования.

$$K_{\text{ТИП}} = a_1 a_{1.1} \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}} + a_2 a_{2.1} \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}}, \quad (10)$$

где $D_{\text{ТИП}}$ – количество типовых деталей в КИ; $D_{\text{СОБ}}$ – количество собственных деталей КИ за исключением покупных, заимствованных и повторяемых; $b_{\text{СЛ.СР}}$ – коэффициент, показывающий средний уровень сложности типовых деталей.

$$K_{\text{ТЧ}} = a_2 a_{2.2} \left(1 - \frac{S}{\sum A_i b_{\text{ТЧ}i} S_i} \right), \quad (11)$$

где A_i – i -ый квалитет точности размера поверхности, к которому предъявляются наиболее высокие требования к точности; S – общая площадь всех поверхностей изготавливаемых деталей; S_i – i -ая площадь поверхностей A_i .

$$K_{\text{Ш}} = a_2 a_{2.2} \left(1 - \frac{S}{\sum B_i b_{\text{Ш}i} S_i} \right), \quad (12)$$

где B_i – значение i -ого параметра шероховатости поверхностей деталей в изделии; $b_{\text{Ш}i}$ – коэффициент, учитывающий трудоёмкость достижения параметра B_i при обработке детали, изменяющийся от нуля до единицы.

$$K_{\text{С}} = a_2 a_{2.5} \times \left(\frac{\sum l_{3i} b_{3i} + \sum l_{\text{Р}i} b_{\text{Р}i} + \sum l_{\text{Н}i} b_{\text{Н}i} + \sum l_{\text{СВ}i} b_{\text{СВ}i} + \sum l_{\text{К}i} b_{\text{К}i} + \sum l_{\text{КЛ}i} b_{\text{КЛ}i}}{L} \right), \quad (13)$$

где l_{3i} – длина i -ого соединения с зазором; $l_{\text{Р}i}$ – длина i -ого резьбового соединения; $l_{\text{Н}i}$ – длина i -ого соединения с натягом; $l_{\text{СВ}i}$ – длина i -ого сварного соединения; $l_{\text{К}i}$ – длина i -ого клеевого соединения; $l_{\text{КЛ}i}$ – длина i -ого клёпаного соединения; L – общая длина всех соединений деталей в изделии; b_{3i} – степень влияния i -ого вида соединения с зазором на трудоёмкость его соединения; $b_{\text{Р}i}$ – степень влияния i -ого вида резьбового соединения на трудоёмкость его соединения; $b_{\text{Н}i}$ – степень влияния i -ого вида соединения с зазором на трудоёмкость его соединения; $b_{\text{СВ}i}$ – степень влияния i -ого вида соединения с зазором на трудоёмкость его соединения; $b_{\text{К}i}$ – степень влияния i -ого вида соединения с зазором на трудоёмкость его соединения; $b_{\text{КЛ}i}$ – степень влияния i -ого вида соединения с зазором на трудоёмкость его соединения; $a_{2.5} = T_{2.1}/T_2$.

$$K_{\text{МРЦ}} = a_1 a_{1.2} \left(\frac{\text{ПВ} b_{\text{Р.ПВ}} + \text{НП} b_{\text{Р.НП}} + \text{ГВ} b_{\text{Р.ГВ}} + \text{РЕ} b_{\text{Р.РЕ}} + \text{ПР} b_{\text{Р.ПР}}}{n_{\text{МРЦ}}} \right) + a_2 a_{2.5} \left(\frac{\text{ПВ} b_{\text{ИЗ.ПВ}} + \text{НП} b_{\text{ИЗ.НП}} + \text{ГВ} b_{\text{ИЗ.ГВ}} + \text{РЕ} b_{\text{ИЗ.РЕ}} + \text{ПР} b_{\text{ИЗ.ПР}}}{n_{\text{МРЦ}}} \right), \quad (14)$$

где ПВ – число размерных цепей, собирающихся методом полной взаимозаменяемости; НП – число размерных цепей, собирающихся методом неполной взаимозаменяемости; ГВ – число размерных цепей, собирающихся

методом групповой взаимозаменяемости; РЕ — число размерных цепей, собирающихся методом регулировки; ПР — число размерных цепей, собирающихся методом пригонки; $n_{МРЦ}$ — общее число размерных цепей в КИ; $b_{Р.НП}$ — коэффициент, учитывающий влияние метода неполной взаимозаменяемости на снижение вида трудоёмкости $T_{1.2}$; $b_{Р.ГВ}$ — коэффициент, учитывающий влияние метода групповой взаимозаменяемости на снижение подвида трудоёмкости $T_{1.2}$; $b_{Р.РЕ}$ — коэффициент, учитывающий влияние метода регулировки на снижение подвида трудоёмкости $T_{1.2}$; $b_{Р.ПР}$ — коэффициент, учитывающий влияние метода пригонки на снижение подвида трудоёмкости $T_{1.2}$; $b_{ИЗ.ПВ}$ — коэффициент степени влияния метода полной взаимозаменяемости на трудоёмкость изготовления КИ; $b_{ИЗ.НП}$ — коэффициент степени влияния метода неполной взаимозаменяемости на трудоёмкость изготовления КИ; $b_{ИЗ.ГВ}$ — коэффициент степени влияния метода групповой взаимозаменяемости на трудоёмкость изготовления КИ; $b_{ИЗ.РЕ}$ — коэффициент степени влияния метода регулировки на трудоёмкость изготовления КИ; $b_{ИЗ.ПР}$ — коэффициент степени влияния метода пригонки на трудоёмкость изготовления КИ.

$$K_{ПВС} = a_1 a_{1.2} \frac{\sum (C_{ПВСj} - 1)_i b_{Ci}}{C} + a_1 a_{1.3} \frac{\sum (C_{ПВСj} - 1)_i b_{Ci}}{C} + a_2 a_{2.4} \frac{\sum (C_{ПВСj} - 1)_i b_{Ci}}{C}, \quad (15)$$

где $C_{ПВСj}$ — j -ое количество повторяемых соединений i -ой группы; i — группа повторяемых соединений одного наименования; C — общее количество соединений в изделии; b_{Ci} — коэффициент, учитывающий влияние вида соединения на трудоёмкость его изготовления; $a_{2.4} = T_{2.1} / T_2$.

$$K_M = a_2 a_{2.3} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right) + a_2 a_{2.6} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right), \quad (16)$$

где D_{Mi} — количество деталей и сборочных единиц в КИ i -ого значения массы; b_{Mi} — коэффициент, учитывающий степень влияния i -ого значения массы деталей и сборочной единицы в КИ на соответствующий подвид трудоёмкости изготовления КИ; D_M — количество деталей и сборочных единиц в КИ; $a_{2.6} = T_{2.1} / T_2$.

$$K_{ТВ} = a_2 a_{2.2} \left(\frac{\sum S_{ТВi} b_{ТВi}}{S} \right), \quad (17)$$

где $S_{ТВi}$ — площадь поверхности не покупных деталей i -ого значения твёрдости материала КИ; $b_{ТВi}$ — коэффициент, учитывающий степень влияния i -ого значения твёрдости материала КИ.

Далее была разработана методика определения уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности.

Надо отметить, что уровень ТКИ не может превышать единицы, так как при значении уровня ТКИ равно единицы достигается минимум трудоёмкости изготовления изделия. Анализ влияния коэффициентов технологичности на трудоёмкость изготовления изделия показал, что все коэффициенты технологичности можно разделить на семь групп, где каждый коэффициент технологичности в группе влияет на один и тот же вид трудоёмкости, как это

показано в таблице 3. Для определения влияния каждого коэффициента технологичности в группе на один и тот же вид трудоёмкости предлагается следующая методика.

Таблица 3

Группы коэффициентов технологичности, влияющие на вид трудоёмкости

	Вид трудоёмкости	Коэффициенты технологичности
1	$T_{1.1}$	$K_{\text{ПОК}}, K_3, K_{\text{ПВД}}, K_{\text{ТИП}}$
2	$T_{1.2}$	$K_{\text{ПВС}}, K_{\text{МРЦ}}$
3	$T_{1.3}$	$K_{\text{ПОК}}, K_3, K_{\text{ПВД}}, K_{\text{ПВС}}$
4	$T_{2.1}$	$K_{\text{ПОК}}, K_{\text{ПВД}}$
5	$T_{2.3}$	$K_{\text{ПОК}}, K_{\text{М}}$
6	$T_{2.5}$	$K_{\text{С}}, K_{\text{М.Р.Ц.}}$
7	$T_{2.2}$	$K_{\text{ПОК}}, K_{\text{ТЧ}}, K_{\text{Ш}}, K_{\text{ТВ}}$

В каждой из шести первых групп коэффициентов технологичности при расчете степени влияния каждого последующего КТ учитывается влияние на ту часть трудоёмкости, которая осталась после снижения трудоёмкости КИ от предыдущего КТ. Например, в первой группе коэффициентов технологичности $K_{\text{ПОК}}$ снижает трудоёмкость $T_{1.1}$ на 30%, тогда K_3 снижает $T_{1.1}$, например, на 20% оставшихся 70% $T_{1.1}$ и т.д.

Что касается седьмой группы коэффициентов технологичности, то три коэффициента технологичности $K_{\text{ТЧ}}, K_{\text{Ш}}, K_{\text{ТВ}}$ из четырех влияют одновременно на вид трудоёмкости через один и тот же фактор – режим обработки. Поэтому при определении их влияния на $T_{2.2}$ будем учитывать только тот КТ из трёх, который оказывает наименьшее влияние на снижение трудоёмкости изготовления КИ. Например, при достижении заданной точности, заданной шероховатости и твёрдости материала детали выбирается тот КТ, при котором обработка производится с самым низким режимом обработки. Таким образом, влияние коэффициентов технологичности седьмой группы на трудоёмкость изготовления изделия производится следующим образом. Сначала определяется влияние на трудоёмкость КИ коэффициента покупаемости, а затем определяется влияние на трудоёмкость изготовления оставшейся части трудоёмкости одного из трёх коэффициентов технологичности.

Чтобы учесть отмеченную специфику влияния КТ в группе на соответствующий вид трудоёмкости, необходимо внести коррективы в их расчетные формулы, которые находят отражения в значениях коэффициентов $a_{i,j}$. В результате были получены следующие расчетные формулы коэффициентов технологичности:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{ПОК}} = & a_1 a_{1.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_1 a_{1.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + \\
 & + a_2 a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}
 \end{aligned} \quad (18)$$

$$K_3 = a_1 a'_{1.1} \frac{\sum D_{3i} b_{cLi}}{D - D_{\text{ПОК}}} + a_1 a'_{1.3} \frac{\sum D_{3i} b_{cLi}}{D - D_{\text{ПОК}}}, \quad (19)$$

где $a'_{1.1} = a_{1.1} - a_{1.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{cLi}}{D}$; $a'_{1.3} = a_{1.3} - a_{1.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{cLi}}{D}$.

$$\begin{aligned} K_{\text{ПВД}} = & a_1 a''_{1.1} \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i} - \sum (D_{\text{ПВД.3}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}} - D_3} + \\ & + a_1 a''_{1.3} \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i} - \sum (D_{\text{ПВД.3}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}} - D_3} + \\ & + a_2 a'_{2.1} \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{ПВД.СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}}. \end{aligned} \quad (20)$$

где $a''_{1.1} = a'_{1.1} - a'_{1.1} \frac{\sum D_{3i} b_{cLi}}{D - D_{\text{ПОК}}}$; $a''_{1.3} = a'_{1.3} - a'_{1.3} \frac{\sum D_{3i} b_{3i}}{D - D_{\text{ПОК}}}$; $a'_{2.1} = a_{2.1} - a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{cLi}}{D}$.

$$K_{\text{ТИП}} = a_1 a'''_{1.1} \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}}. \quad (21)$$

где $a'''_{1.1} = a''_{1.1} - a''_{1.1} \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}}$.

$$\begin{aligned} K_{\text{ПВС}} = & a_1 a_{1.2} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{Ci}}{C} + a_1 a'''_{1.3} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{Ci}}{C} + \\ & + a_2 a_{2.4} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{Ci}}{C}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $a'_{1.1} = a_{1.1} - a_{1.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{cLi}}{D}$; $a'''_{1.3} = a''_{1.3} - a''_{1.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{cLi}}{D}$.

$$K_M = a_2 a'_{2.3} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right) + a_2 a_{2.6} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right), \quad (23)$$

где $a'_{2.3} = a_{2.3} - a_{2.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{cLi}}{D}$.

$$K_C = a_2 a_{2.5} \left(\frac{\sum l_{3i} b_{3i} + \sum l_{Hi} b_{3i} + \sum l_{cvi} b_{cvi} + \sum l_{Ki} b_{Ki} + \sum l_{кли} b_{кли}}{L} \right). \quad (24)$$

$$\begin{aligned} K_{\text{М.Р.Ц.}} = & a_1 a'_{1.2} \frac{\text{ПВ}b_{\text{Р.ПВ}} + \text{НП}b_{\text{Р.НП}} + \text{ГВ}b_{\text{Р.ГВ}} + \text{РЕ}b_{\text{Р.РЕ}} + \text{ПР}b_{\text{Р.ПР}}}{n_{\text{М.Р.Ц.}}} + \\ & + a_2 a'_{2.5} \frac{\text{ПВ}b_{\text{ИЗ.ПВ}} + \text{НП}b_{\text{ИЗ.НП}} + \text{ГВ}b_{\text{ИЗ.ГВ}} + \text{РЕ}b_{\text{ИЗ.РЕ}} + \text{ПР}b_{\text{ИЗ.ПР}}}{n_{\text{М.Р.Ц.}}}, \end{aligned} \quad (25)$$

где $a'_{1.2} = a_{1.2} - a_{1.2} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{Ci}}{C}$; $a'_{2.5} = a_{2.5} - a_{2.5} \left(\frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{Ci}}{C} \right)$.

$$K_{\text{ТЧ}} = a_2 a'_{2.2} \left(1 - \frac{S}{\sum A_i b_{\text{ТЧ}i} S_i} \right), \quad (26)$$

где $a'_{2.2} = a_{2.2} - a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{пок}i} b_{\text{сл}i}}{D}$.

$$K_{\text{Ш}} = a_2 a'_{2.2} \left(1 - \frac{S}{\sum A_i b_{\text{ТЧ}i} S_i} \right). \quad (27)$$

$$K_{\text{ТВ}} = a_2 a'_{2.2} \left(\frac{\sum S_{\text{ТВ}i} b_{\text{ТВ}i}}{S} \right). \quad (28)$$

Принимая во внимание вышеизложенное, уровень ТКИ рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ТКИ} = K_{\text{ПОК}} + K_3 + K_{\text{ПВД}} + K_{\text{ПВС}} + K_{\text{ТИП}} + K_{\text{М}} + K_{\text{С}} + K_{\text{МРЦ}} + K_{\text{min}}, \quad (29)$$

где K_{min} - наименьшее значение одного из коэффициентов $K_{\text{ТЧ}}$, $K_{\text{Ш}}$, $K_{\text{ТВ}}$.

В главе 4 приводится методика расчета уровня производственной технологичности конструкции изделия посредством суммирования коэффициентов технологичности, оценка точности расчета уровня ТКИ по предложенной методике, автоматизация расчета уровня ТКИ и практическая значимость оценки уровня ТКИ.

Методика расчета уровня ТКИ включает следующие этапы: на первом этапе определяются исходные данные для расчета уровня ТКИ, на втором этапе определяются значения коэффициентов (a_i , $a_{i,j}$, b_i), входящие в расчетные формулы коэффициентов технологичности, на третьем этапе рассчитываются значения коэффициентов технологичности и на четвертом этапе рассчитывается уровень ТКИ путем суммирования их значений.

Исходные данные делятся на 2 группы. К первой группе исходных данных относятся характеристики КИ количество деталей и покупных сборочных единиц «деталей» каждого наименования; масса каждой детали и «деталей»; вид детали (покупная, заимствованная, собственная, типовая); твердость материала каждой детали; площади поверхностей деталей КИ с указанием их качества точности и параметра шероховатости; вид соединения деталей; количество соединений деталей каждого вида; геометрические характеристики соединений деталей; повторяемость каждого вида соединений деталей; методы достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей; количество размерных цепей каждого метода.

Определение исходных данных первой группы производится посредством изучения и анализа рабочей конструкторской документации, включающей сборочные чертежи КИ, спецификации, чертежи деталей.

Ко второй группе исходных данных относятся коэффициенты, которые можно разделить на две подгруппы. К первой подгруппе относятся коэффициенты, отражающие степень влияния подвидов трудоёмкости на вид: a_1 , a_2 , $a_{1.1}$, $a_{1.2}$; $a_{1.3}$; $a_{2.1}$; $a_{2.2}$; $a_{2.3}$; $a_{2.4}$; $a_{2.5}$; $a_{2.6}$; ко второй подгруппе относятся коэффициенты,

отражающие влияние характеристик КИ на трудоёмкость соответствующего вида: $b_{\text{СЛi}}$; $b_{\text{С.СЛi}}$, $b_{\text{ТЧi}}$, $b_{\text{Шi}}$, $b_{\text{ТВi}}$, b_{Mi} , b_{Ci} , $b_{\text{ИЗ.ПВ}}$, $b_{\text{ИЗ.НП}}$, $b_{\text{ИЗ.ГВ}}$, $b_{\text{ИЗ.РЕ}}$, $b_{\text{ИЗ.ПР}}$, $b_{\text{Р.ПВ}}$, $b_{\text{Р.НП}}$.

Определение значений коэффициентов первой подгруппы второй группы a_1 , a_2 , $a_{1.1}$, $a_{1.2}$; $a_{1.3}$; $a_{2.1}$; $a_{2.2}$; $a_{2.3}$; $a_{2.4}$; $a_{2.5}$; $a_{2.6}$ производится на основе анализа данных трудоёмкостей изготовления изделий на предприятиях по производству аналогичных или близких по конструкции изделий, приводимых в расчетно-калькуляционных материалах по затратам трудоемкости при производстве продукции в документе «Расчет (обоснование) трудоёмкости. Форма 25».

Исходные данные второй подгруппы второй группы определяются на основе зависимостей, приведенных в справочной литературе: $b_{\text{СЛ}}=f(n)$, где n – количество размеров на чертеже детали; $b_{\text{Ш}}=f(Ra)$, где Ra – параметр шероховатости; $b_{\text{ТЧ}}=f(IT)$, где IT – качество точности; $b_{\text{М}}=f(M)$, где M – масса детали; $b_{\text{ТВ}}=f(K_{\text{MV}})$, где K_{MV} – коэффициент, учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала; $b_{\text{МРЦi}}=f(\text{МРЦ})$, где МРЦ – методы достижения точности замыкающего звена размерной цепи; $b_{\text{Ci}}=f(l)$, где l – длина соединения. Например, значение $b_{\text{СЛi}}$, зависящее от числа размеров, определяется согласно данным приведенным в справочнике нормировщика Ахумова А.В.

Далее рассчитываются значения коэффициентов по формулам, приведенные в главе 3, и определяется уровень ТКИ посредством суммирования найденных КТ.

Для снижения трудоёмкости расчета уровня производственной ТКИ, был написан алгоритм и разработано программное обеспечение на языке программирования delphi. Чтобы облегчить заполнение и проверку исходных данных, в программе предусмотрено сохранение и загрузка данных. Рабочее окно программы с результатами расчетов приведено на Рисунке 1.

Для сравнения оценки уровня ТКИ посредством суммирования известных и разработанных в работе коэффициентов технологичности, были рассчитаны уровни ТКИ цилиндрического редуктора. В результате суммирования известных коэффициентов технологичности $K_{\text{СТ}}$, $K_{\text{У}}$, $K_{\text{ПОВ}}$, $K_{\text{ТЧ}}$, $K_{\text{Ш}}$, уровень ТКИ равен 2,54, а при суммировании разработанных коэффициентов технологичности уровень ТКИ равен 0,823. Как отмечалось выше, уровень ТКИ не может превышать единицу, поэтому оценка уровня ТКИ посредством суммирования известных коэффициентов технологичности не позволяет получить достоверную информацию об уровне ТКИ.

Определение точности расчета уровня ТКИ, предложенным методом суммирования коэффициентов технологичности, проводилось по методике, в основу которой была положена разница между отношениями трудоёмкостей и уровнями ТКИ двух изделий. В качестве примера определения точности расчета уровня ТКИ, предложенным методом, были рассчитаны трудоёмкости и уровни ТКИ цилиндрического и конического редукторов, контейнера для радиоактивных отходов и автоматического выключателя торможения.

Сначала были рассчитаны уровни ТКИ и определены значения коэффициентов технологичности, перечисленных выше изделий.

Результаты расчетов приведены в Таблице 4.

Максимальное значение, на которое можно увеличить каждый коэффициент технологичности, чтобы повысить уровень технологичности конструкции изделия

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Клок	Кз	Клвс	Клвд	Ктип	Кс	Ки	Ктч	Кш	Ктв	Кмрц
0,5321	0,5053	0,5042	0,4936	0,1166	0,0994	0,0102	0,0017	0,0002	0	0

Уровень технологичности конструкции изделия составляет 0,5837

Рисунок 1 Окно программы с результатами расчетов

Используя приведенные данные, были рассчитаны погрешности расчета уровней ТКИ предложенным методом. Расчеты производились для следующих пар сравниваемых изделий: цилиндрический редуктор – контейнер для радиоактивных отходов, конический редуктор – контейнер для радиоактивных отходов, цилиндрический редуктор – автоматический выключатель торможения, конический редуктор – автоматический выключатель торможения, контейнер для радиоактивных отходов – автоматический выключатель торможения.

Погрешности расчета у каждой пары изделий проводились в следующей последовательности. Вначале определялись отношения трудоёмкостей изготовления изделий (T_1/T_2) и уровней их ТКИ (TKI_1/TKI_2). Далее, принимая отношение трудоёмкостей изделий за 100%, а отношение их уровней ТКИ за X%, определялась погрешность расчета в процентах. Результаты расчетов погрешностей оценки уровней ТКИ приведены в таблице 5. Из таблицы 5 следует, что погрешность расчетов уровней ТКИ не превышает 59,2% и для разных изделий лежит в пределах от 59,2% до 9,4%.

При этом максимальная погрешность расчета у пары изделий с наибольшей разницей трудоёмкостей, а наименьшая погрешность расчета у пары изделий с наименьшей разницей трудоёмкостей.

По результатам расчета оценки уровня ТКИ были построены ряды коэффициентов технологичности по степени их влияния на снижение трудоёмкости изготовления КИ для цилиндрического редуктора, конического редуктора, автоматического выключателя торможения и контейнера для радиоактивных отходов (таблица 6). Это позволяет определить с улучшения каких характеристик, в какой последовательности,

Таблица 4. Результаты расчета уровня ТКИ изделий

№	Изделие	Трудоемкость	Уровень ТКИ	K _{тип}	K _{пок}	K _{мрц}	K _з	K _{пвд}	K _{пвс}	K _{тч}	K _ш	K _{тв}	K _м	K _с	Предприятие
1	Цилиндрический редуктор	85,6	0,823	0	0,033	0,073	0,09	0,099	0,110	0,115	0,125	0,15	0,15	0,153	АО «МОССЕЛЬМАШ»
2	Конический редуктор	108,6	0,717	0	0,025	0,073	0,052	0,071	0,114	0,111	0,131	0,143	0,15	0,121	АО «МОССЕЛЬМАШ»
3	Автоматический выключатель торможения	115,4	0,696	0	0,035	0,246	0,021	0,031	0,043	0,051	0,064	0,088	0,05	0,067	АО «МТЗ ТРАНСМАШ»
4	Контейнер для радиоактивных отходов	128,6	0,583	0	0,017	0,294	0	0,022	0,15	0,029	0,028	0,032	0,001	0,067	АО «345 МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Таблица 5. Погрешности расчета уровней ТКИ

№	Изделие	Ряд коэффициентов технологичности										
		$K_{\text{тип}}$	$K_{\text{пок}}$	$K_{\text{мрц}}$	K_3	$K_{\text{пвд}}$	$K_{\text{пвс}}$	$K_{\text{тч}}$	$K_{\text{ш}}$	$K_{\text{тв}}$	$K_{\text{м}}$	$K_{\text{с}}$
1	Цилиндрический редуктор	0	0,033	0,073	0,09	0,099	0,11	0,115	0,125	0,15	0,15	0,153
2	Конический редуктор	0	0,025	0,052	0,071	0,073	0,111	0,114	0,121	0,131	0,143	0,15
3	Автоматический выключатель торможения	0	0,021	0,031	0,035	0,043	0,05	0,051	0,064	0,067	0,088	0,246
4	Контейнер для радиоактивных отходов	0	0	0,001	0,017	0,022	0,028	0,029	0,032	0,067	0,15	0,294

Таблица 6. Ряд коэффициентов по степени их влияния на снижение трудоёмкости изготовления изделий

№	Пара изделий	T_1/T_2	$\text{ТКИ}_1/\text{ТКИ}_2$	Погрешность расчета, %
1	цилиндрический редуктор (1) – контейнер для радиоактивных отходов (2)	0,78	1,14	46,1
2	конический редуктор (1) – контейнер для радиоактивных отходов (2)	0,844	1,22	44,5
3	цилиндрический редуктор (1)– автоматический выключатель торможения (2)	0,741	1,18	59,2
4	конический редуктор (1)– автоматический выключатель торможения (2)	0,941	1,03	9,4
5	контейнер для радиоактивных отходов (1) – автоматический выключатель торможения (2)	1,114	0,837	24,86 %

T_1 – трудоемкость первого изделия пары изделий; T_2 – трудоемкость второго изделия пары изделий; ТКИ_1 – первого изделия пары изделий; ТКИ_2 – второго изделия пары изделий.

льности и до какого уровня следует улучшать конструкцию изделия, тем самым существенно снизить трудоёмкость отработки КИ на технологичность.

В соответствии с изложенным, предлагается следующая методика повышения уровня ТКИ на этапе разработки рабочей конструкторской документации, где исходными данными являются полученные ряды значений коэффициентов технологичности.

Методика включает следующие этапы: определяется резерв возможностей снижения трудоёмкости изготовления изделия по каждому коэффициенту технологичности; перестраивается ряд коэффициентов технологичности по степени убывания их резерва возможностей снижения трудоёмкости изготовления изделия по каждому коэффициенту технологичности; далее, согласно полученному ряду, начинается улучшение характеристик КИ до заданного значения уровня ТКИ.

Общие выводы

1. Разработан метод оценки уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности.
2. Установлено, что точность оценки уровня ТКИ оказывает существенное влияние на эффективность процесса отработки КИ на технологичность.
3. Метод оценки ТКИ с помощью известных коэффициентов технологичности позволяет не только оценить уровень ТКИ, но и установить степень влияния характеристик КИ на полную трудоёмкость его изготовления.
4. Показано, что комплексная оценка уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности невозможна, так как известные коэффициенты технологичности не отражают степень их влияния на полную трудоёмкость изготовления изделия.
5. В результате исследования было установлено следующее: перечень характеристик, влияющих на трудоёмкость изготовления изделия, перечень коэффициентов технологичности и выведены их расчетные формулы, отражающие степень их влияния на полную трудоёмкость изготовления изделия.
6. В качестве критерия оценки точности расчета уровня ТКИ принята разница отношений трудоёмкостей и уровней технологичности двух изделий, изготавливаемых в идентичных условиях.
7. Разработано программное обеспечение на языке Delphi с целью автоматизации расчета уровня ТКИ.
8. Применение предложенного метода расчета уровня ТКИ позволит существенно снизить трудоёмкость отработки КИ на технологичность на этапе разработки рабочей конструкторской документации.
9. Разработанный метод оценки уровня ТКИ с помощью коэффициентов технологичности, позволяет построить регрессионный ряд характеристик КИ по степени их влияния на снижение трудоёмкости его изготовления. В результате на этапе разработки конструкторской документации на изделие до технологической подготовки производства становится

возможным снизить трудоёмкость процесса повышения уровня ТКИ, а автоматизация процесса определения регрессионного ряда характеристик КИ, позволяет исключить негативное влияние на этот процесс субъективного фактора в лице конструктора.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Базров Б.М., Троицкий А.А. Анализ метода оценки технологичности конструкции изделия как предмета производства. Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 4 (241). С. 39-43. (0,75 п.л./0,63 п.л.).
2. Базров Б.М., Троицкий А.А. Анализ коэффициентов технологичности конструктивного исполнения изделия. Научноёмкие технологии в машиностроении 2018 № 7. С. 23-26. (0,4 п.л./0,29 п.л.).
3. Базров Б.М., Троицкий А.А. Метод расчета уровня технологичности конструкции изделия. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 1 (241). С. 98-102. (0,6 п.л./0,32 п.л.).
4. Троицкий А.А. Коэффициенты технологичности разнообразия элементов изделия. Справочник инженерный журнал. 2019. № 4. С. 24-27.
5. Базров Б.М., Троицкий А.А. Система коэффициентов производственной технологичности конструкции изделия. Станки и инструмент. 2020. № 3. 22-26. (1,15 п.л.).
6. Троицкий А.А. Расчетные формулы коэффициентов производственной технологичности конструкции изделия. Научноёмкие технологии в машиностроении. 2020. № 7. С. 31-34. (0,75 п.л./0,3 п.л.).
7. Базров Б.М., Троицкий А.А. Метод суммирования коэффициентов производственной технологичности конструкции изделия. Технология машиностроения. 2020. № 8. С. 70-75. (0,92 п.л.).
8. Базров Б.М., Троицкий А.А. Преобразование коэффициентов технологичности при их групповом влиянии на трудоёмкость изготовления изделия. Научноёмкие технологии в машиностроении. 2020. № 11. С. 8-15. (0,7 п.л./0,57 п.л.).