

УДК 681.7.027

Повышение качества сборки высокоточных узлов деталей с применением индивидуального подбора деталей

Г.А. Тимофеев, Н.Н. Барбашов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Improving the quality of assembly of high-precision parts using individual part selection

G.A. Timofeev, N.N. Barbashov

Bauman Moscow State Technical University

■ Автоматизация контрольных операций — один из ключевых и сложнейших аспектов автоматизации технологических процессов. Наиболее перспективным представляется активный контроль, ориентированный на поддержание необходимого качества изделий по размерным и другим характеристикам непосредственно в ходе их изготовления. Он способствует автоматизации высокоточных технологических процессов, уменьшению брака и снижению затрат на контрольные процедуры. В контексте управления технологическим процессом с использованием средств активного контроля точность обработки деталей можно повысить путем оптимизации алгоритмов управления и внесения соответствующих корректировок. В современных условиях математико-статистические методы анализа являются критически важным инструментом управления качеством в промышленной среде. При высоких требованиях к точности изготовления изделий необходим непрерывный контроль, обеспечивающий регулирование технологического процесса и предотвращение дефектов. Традиционные математико-статистические методы выборочного контроля чаще всего применяются при приемочном контроле для верификации соответствия продукции техническим требованиям. Они оказывают косвенное влияние на процесс производства, выявляя дефекты уже после изготовления изделий.

EDN: WLSLJO, <https://elibrary/wsljjo>**Ключевые слова:** автоматизация контрольных операций, управление точностью, алгоритмы управления

■ Automation of control operations is one of the key and most complex aspects of automation of technological processes. In particular, active control, which is focused on maintaining the required quality of products in terms of their dimensions and other characteristics directly during their production, is the most promising area. It contributes to the automation of high-precision technological processes, reduces the number of defects, and reduces the cost of control procedures. In modern production, in the context of process control using active control tools, it is possible to increase the accuracy of part processing by optimizing control algorithms and making appropriate adjustments. In today's environment, mathematical and statistical analysis methods are a critical tool for quality management in the industrial sector. With high demands on product accuracy, continuous monitoring is essential to regulate the manufacturing process and prevent defects. Traditional mathematical and statistical sampling methods are commonly used in acceptance testing to verify product compliance with technical requirements. Consequently, they in-

directly impact the manufacturing process by identifying defects after the production of products.

EDN: WLSLJO, <https://elibrary/wsljo>

Keywords: automation of control operations, accuracy control, control algorithms, moving average

Активный контроль, направленный на обеспечение требуемого качества изделия, является наиболее перспективным. Его суть при обработке деталей на станках заключается в повышении точности компенсацией погрешностей, вызванных износом инструмента и деформациями технологического оборудования [1, 2].

Многие современные станки оснащены датчиками активного контроля, которые позволяют измерять размеры деталей и корректировать настройки оборудования в процессе работы. Микропроцессорные блоки управления обеспечивают дополнительное управление и адаптацию станка к изменяющимся условиям обработки, что повышает эффективность и точность. В связи с этим остается актуальной задача разработки рациональных методик контроля, обеспечивающих и поддерживающих заданный уровень качества [3–5]. В области управления технологическим процессом с помощью приборов активного контроля задачу повышения точности можно решить выбором рационального алгоритма управления.

Геометрические параметры детали оказывают существенное влияние на долговечность и надежность машиностроительной продукции, определяясь как точностью изготовления компонентов, так и применяемыми методами их соединения. Сборочный процесс, являясь частью производственного цикла, очень важен для обеспечения высокого качества конечного изделия [6–8]. Его отличает значительное потребление человеческого труда, а расходы на сборку в машиностроении могут составлять до половины общей стоимости изделия, что связано с преобладанием ручного труда квалифицированных специалистов.

Для поддержания необходимой точности в промышленности при сборке чаще всего используют методы взаимозаменяемости [9]. Повышение коэффициента взаимозаменяемости является важным требованием современного массового и серийного производства. Тем не менее, когда точность изготовления деталей превышает возможности стандартных способов их производства, применение этих методов

оказывается недостаточным для сборки изделий при наличии высоких требований к допускам и отклонениям расположения.

Современное машиностроение характеризуется усложнением конструкций и быстрым расширением ассортимента продукции (частые переходы к новым объектам производства), что вызвано необходимостью замещения импортных аналогов и создания новых изделий для поддержания конкурентоспособности. Важным фактором является внедрение и выпуск новых изделий требуемого качества при минимальных затратах.

В настоящее время машиностроительные предприятия все чаще направляют дополнительные средства на обновление технологий и повышение качества продукции, так как себестоимость и качество служат залогом их конкурентоспособности и эффективности.

Качество машины определяется набором характеристик, представляющих собой числовое выражение свойств, подтверждающих ее соответствие поставленной задаче. Оно обеспечивается уровнем инженерных решений, влияющих на конструктивное совершенство, а также технологией, в частности, качеством сборки.

На характеристики качества изделия в значительной степени влияют точность сборки и отклонения формы и расположения деталей, из которых оно состоит. Качество отдельной детали оценивают по ее соответствию чертежам, техническим условиям и требованиям к приемке, включая следующие параметры:

- точность изготовления;
- шероховатость поверхности, волнистость, отклонения формы и взаимного расположения детали;
- физико-химические и физико-механические свойства материала;
- прочность, жесткость, состояние поверхностного слоя.

Качество машины, как комплексное понятие, отражающее ее сущность и свойства, можно оценить только после ее изготовления. Сборочный процесс — заключительный, трудозатратный и критически важный этап производства,

на котором отдельные детали переходят в готовое изделие. Технологически сборка предполагает соединение компонентов, а параметры качества конечного продукта во многом зависят от уровня применяемой технологии и качества сборочных процессов.

Если допуски на изготовление деталей значительно уже, чем позволяют существующие производственные методики, то использование принципа взаимозаменяемости для сборки высокоточных изделий не всегда обеспечивает требуемые характеристики. Для достижения требуемых показателей качества сборки в условиях, когда методы взаимозаменяемости неприменимы, а регулировка и подгонка неэффективны, используют метод индивидуального подбора деталей [10]. Он заключается в оптимизации комбинации деталей с целью компенсации отклонений размеров. Для реализации этого метода используют ручной перебор (ограниченное число вариантов) и компьютеризированный (работа с массивами и сортировка) [11]. Полный перебор неэффективен для многозвенных размерных цепей из-за высокой вычислительной сложности, а сортировка оказывается эффективной только для двух подбираемых деталей.

Развитие вычислительной техники и технологий работы с данными о продукции позволяет создавать информационные и математические модели сборочных процессов. Моделирование, применяемое для оптимизации комплектации и взаимного расположения деталей, является перспективным направлением совершенствования сборочных процессов и повышения эффективности индивидуального подбора деталей.

В авиационной и космической промышленности для выполнения эксплуатационных требований детали и сборочные единицы необходимо изготавливать с малыми экономически неприемлемыми или технологически трудновыполнимыми допусками. В этих случаях для получения требуемой точности сборки применяют групповой подбор деталей (селективную сборку), компенсаторы, регулирование положения некоторых частей машин и приборов, пригонку и другие дополнительные технологические операции при обязательном выполнении требований к качеству сборочных единиц и изделий [12, 13].

Достижение высокого качества в сборке ответственных изделий требует значительных

усилий и высокой квалификации персонала. Процесс характеризуется ручным подбором и подгонкой деталей, а иногда и многократными повторными сборками для обеспечения требуемого результата [14–16].

В классической литературе [1, 2, 17] рекомендовано использовать компенсаторы, так как сборка с их применением позволяет выдерживать установленные пределы точности в размерной цепи путем изменения размера одного из ранее выбранных звеньев. Все остальные звенья цепи обрабатывают по допускам, наиболее приемлемым для данных производственных условий. Величину компенсирующего звена можно регулировать двумя способами: введением в размерную цепь специальной детали — прокладки, шайбы, промежуточного кольца и т. п. (неподвижные компенсаторы) и изменением положения одной из деталей — клина, втулки, эластичной или пружинной муфты, эксцентрика и др. (подвижные компенсаторы).

Метод селективной сборки демонстрирует эффективность не только при работе с гладкими цилиндрическими деталями, но и при сборке более сложных элементов, таких как резьбовые соединения. Его основное достоинство заключается в возможности многократного повышения точности сборки без ужесточения производственных допусков на изготовление деталей, либо расширением этих допусков до экономически более выгодных значений при сохранении заданной точности соединения.

Однако метод селективной сборки имеет недостатки, к которым относятся: усложнение системы контроля, требующее увеличения штата контролеров, применения более точных измерительных средств и внедрения автоматизированных контрольно-сортировочных устройств; повышение трудоемкости процесса сборки, обусловленное необходимостью формирования сортировочных групп; потенциальное увеличение объемов незавершенного производства, возникающее из-за возможного дисбаланса в количестве деталей, входящих в парные группы. Для минимизации образования незавершенного производства при селективной сборке используют статистические подходы к анализу фактического распределения размеров деталей по группам, что позволяет вносить необходимые корректировки в процесс их разделения.

При традиционном подходе к сборке детали выбираются случайным образом, без учета их индивидуальных характеристик. Это означает,

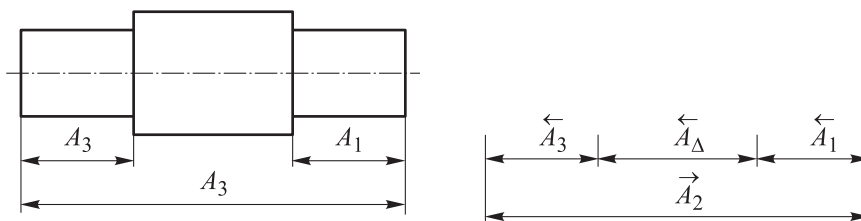


Рис. 1. Схема линейной размерной цепи

что качество сборки можно оценить только после ее завершения. Как следствие, суммарная погрешность, возникающая при соединении деталей, становится непредсказуемой и может стать причиной брака.

Цель исследования — разработка методики повышения качества изделий на основе индивидуального подбора деталей при выполнении сборочных операций.

Метод индивидуального подбора деталей, основанный на компьютерном моделировании и анализе вариативности соединений, позволяет компенсировать производственные допуски [18, 19]. Эффективность подбора и качество сборки напрямую коррелируют с объемом рассматриваемых вариантов. Компьютерная симуляция определяет оптимальную конфигурацию сопряжения деталей. На этапе сборки оператору предоставляется информация о конкретных компонентах, подлежащих соединению, из имеющегося пула. Управляемость процесса сборки обеспечивается предварительной операцией комплектации, выполняемой компьютером. Для многозвенных размерных цепей, где количество возможных вариантов значительно возрастает, такой метод требует существенных затрат времени на выполнение операций перебора данных [20–22].

Пусть имеется обычная размерная цепь и поставлена задача по достижению заданного допуска на замыкающее звено. Исходное звено — элемент, к которому предъявляются наивысшие требования по точности, что напрямую влияет на соответствие изделия техническим условиям. При расчете размерных цепей на этапе проектирования именно исходное звено служит ориентиром. В процессе производства или сборки его часто выполняют в конце, завершая тем самым размерную цепь. В этом случае его называют замыкающим звеном. Таким образом, замыкающее звено не изготавливается как отдельная деталь, а является итогом точного выполнения всех остальных звеньев цепи. Понятие замыкающего зве-

на используют для проверки правильности расчета размерной цепи.

Рассмотрим простейшую размерную цепь (рис. 1), состоящую из трех звеньев A_1 , A_2 , A_3 и замыкающего звена A_Δ , определяемого выражением

$$A_\Delta = A_2 - A_1 - A_3.$$

Возможные отклонения звеньев от заданных размеров приведены в табл. 1.

При наличии нескольких деталей, выполненных с погрешностью, возникают отклонения, полученные после контрольной операции (табл. 2).

При индивидуальном подборе деталей можно добиться оптимального решения поставленной задачи, но компьютеру приходится перебирать значительное количество вариантов.

Для двухзвенной размерной цепи оказывается достаточно обычного алгоритма сортировки по возрастанию или убыванию, который можно реализовать с помощью любого языка программирования или в среде MS Excel. Полученные после измерения размеры заносятся

Таблица 1

Значения возможных отклонений звеньев

Звено	Отклонения, мкм							
A_1	1	6	1	5	5	4	8	
A_2	12	5	11	24	17	9	19	
A_3	9	11	3	14	2	10	4	
A_Δ	2	-12	7	5	10	-5	7	

Таблица 2

Значения отклонений звеньев, полученные после контрольной операции

Звено	Отклонения, мкм							
A_1	8	6	5	1	5	4	1	
A_2	24	19	17	12	11	9	5	
A_3	14	11	10	9	4	3	2	
A_Δ	2	2	2	2	2	2	2	

в базу данных и сортируются по возрастанию для первой детали и по убыванию для второй, а затем суммируются. Но для трех звеньев и более в размерной цепи этот алгоритм является неэффективным [23, 24].

В некоторых случаях возникает ситуация, когда из-за одного резко отличающегося значения происходит неоптимальное сочетание подбираемых параметров. Для устранения этого недостатка предлагается использовать алгоритм групповой сортировки, где все имеющиеся значения делятся на интервалы, аналогично тому, как это происходит при построении гистограммы. Внутри соответствующих интервалов подбираются пары деталей. Как показали исследования, при использовании этого алгоритма объем незавершенного производства можно сократить в несколько раз.

Методы поиска решений в пространстве состояний удобно рассмотреть, используя методику графов состояний. На графах поиск решения сводится к определению пути (оптимального, если задан критерий оптимальности) от корня дерева к целевой вершине, т. е. к вершине, соответствующей целевому состоянию. Поиск решения можно наглядно проиллюстрировать на дереве состояний, когда начальное состояние одно.

Рассмотрим процедуру построения графа состояний на примере выбора оптимального значения поля допуска при сборке корпусной детали *A*, к которой присоединены детали *B*, *C* и *D*. Схема маршрутов и расстояние между пунктами показаны на рис. 2.

При использовании метода графов общий размер детали обозначают буквенным набором, образованным из букв, соответствующих дета-

лям, собранным вместе к текущему моменту и расположенных в порядке сборки. Тогда начальным будет состояние *A*, а целевыми — состояния, которые начинаются с буквы «*A*», оканчиваются на нее и содержат остальные буквы по одному разу.

В этом примере правила раскрытия соответствуют выбору того или иного маршрута.

На графе состояний этой задачи начальной вершине (корню дерева) соответствует состояние *A*. Корень дерева порождает три дочерние вершины, соответствующие состояниям *AB*, *AC* и *AD*. Каждая из вершин, порожденных корнем, порождает по две вершины и каждая из вершин второго и третьего уровней — по одной. На дугах указаны максимальные отклонения, которые возникают при сборке изделия.

Поиск решения имеет итеративный характер, причем число итераций и вершин, раскрытых до нахождения целевой вершины, существенно зависит от порядка (последовательности), в котором раскрывались вершины (см. рис. 2). Порядок раскрытия вершин принято называть стратегией поиска.

Для большей части практических задач удается сформулировать эмпирические правила, позволяющие уменьшить объем выборки. Эти правила используют специфическую информацию о решаемой задаче, формулируемую на основе опыта, интуиции и здравого смысла исследователя.

При оптимизации поиска в задачах индивидуального подбора деталей следует найти среднее значение по массиву полученных измерений и, считая найденный средний размер как математическое ожидание, поставить перед

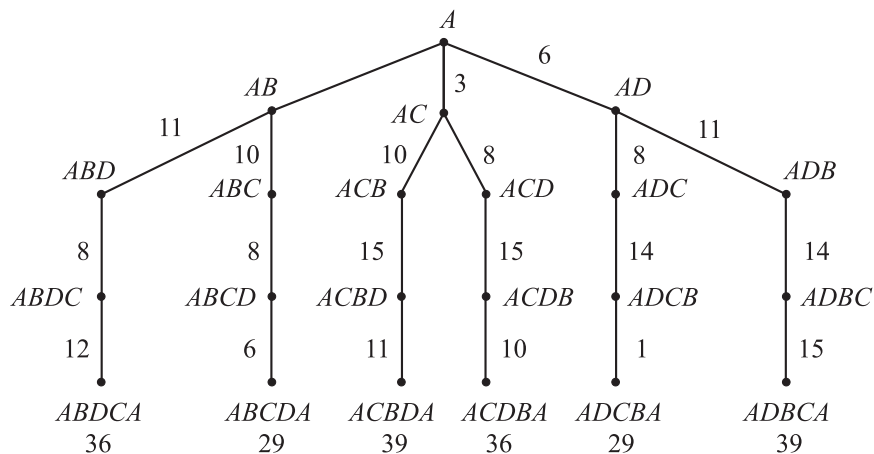


Рис. 2. Схема решения задачи методом графов

программой задачу подбора таких размеров деталей, чтобы стремиться к оптимальному (среднему) значению.

То есть определяется граф состояний как граф, где вершины заданы текущими значениями размеров деталей, а ребра — возможностью перейти от одной перестановки к другой за один шаг. Для упрощения поиска запускаются два поиска в ширину из начальной и конечной вершин с максимальной глубиной $k/2$. Записываются два множества, все состояния, в которых побывали поиски в ширину. Рациональное решение будет лежать там, где множества пересекаются.

Метод встречи посередине (Meet in the Middle — MITM) позволяет оптимизировать решение некоторых задач. Суть метода заключается в том, чтобы разбить исходную задачу на две половины, решить каждую из них независимо и получить решение исходной задачи путем объединения двух решений. Такой подход особенно рационален при работе с задачами, которые при прямом решении требуют большого количества времени.

Метод MITM применяют для решения следующих задач: защиты схем шифрования (криптография); нахождения оптимальных решений (логистика и распределение ресурсов); анализа генетических последовательностей и поиска закономерностей в больших наборах данных (биоинформатика); финансового моделирования с целью оптимизации портфеля и расчетов оценки рисков.

При решении задач с индивидуальной сборкой изделий метод MITM разбивает задачу пополам и решает всю задачу через частичный расчет половинок. Он работает следующим образом. Переберем все возможные значения x и запишем пару значений $(x, f(x))$ во множество. Затем будем перебирать всевозможные значения y , для каждого из них будем вычислять $g(y)$, которое будем искать в этом множестве. Если в качестве множества использовать отсортированный массив, то время работы алгоритма составляет $O(X \log X)$ на сортировку, и $O(Y \log X)$ на двоичный поиск, что дает в сумме $O((X+Y) \log X)$.

При работе с этим алгоритмом создается база данных по результатам измерений деталей, которые в дальнейшем будут участвовать в сборочном процессе. Затем этот массив разделяется на две части. Заметим, что искомое подмножество имеет какое-то количество эле-

ментов из левой половины и какое-то количество элементов из правой. Попробуем посчитать все суммы слева и справа по отдельности и найти пару, дающую нужную общую сумму, стремящуюся к оптимальному значению поля допуска.

Методика обеспечения качества сборочных операций, базирующаяся на применении индивидуального подбора деталей, представляет собой действенный инструмент, направленный на решение практической задачи достижения требуемой точности при производстве изделий высокой точности.

В качестве примера применения методики рассмотрим сборку узла редуктора, где предъявляются высокие требования к качеству изготовления деталей. В этом случае элементы редуктора подбираются индивидуально для каждого изделия с учетом фактических размеров после финишной обработки. Это позволяет компенсировать технологические допуски и достичь минимальных зазоров. Погрешности сборки оказывают значительное влияние на эксплуатационные показатели работы и надежность редуктора (рис. 3).

Определим номинальные размеры составляющих звеньев. Номинальные размеры стандартных деталей (например, подшипников) находят по соответствующим стандартам. Остальные размеры составляющих звеньев определяют по рабочим чертежам, за исключением размера прокладки, толщина которой обозначена звеном A_9 .

Для определения номинального размера увеличивающего звена A_9 воспользуемся выражением

$$A_{\Delta} = \bar{A}_9 + \bar{A}_8 + \bar{A}_7 - \bar{A}_1 - \bar{A}_2 - \bar{A}_3 - \bar{A}_4 - \bar{A}_5 - \bar{A}_6 - \bar{A}_{10}.$$

Рассмотрим номинальные размеры деталей и допуски, учитывая требования, предъявляемые к рабочему чертежу. Большая часть изделий выполнена по 7-му качеству, менее ответственные детали A_3 и A_8 — по 8-му.

При изготовлении партии деталей желательно добиться одинакового размера A_{Δ} без значительного разброса полученных значений. Это обеспечит необходимый осевой зазор между торцом крышки и наружным кольцом подшипника для компенсации тепловых деформаций деталей, возникающих во время работы узла.

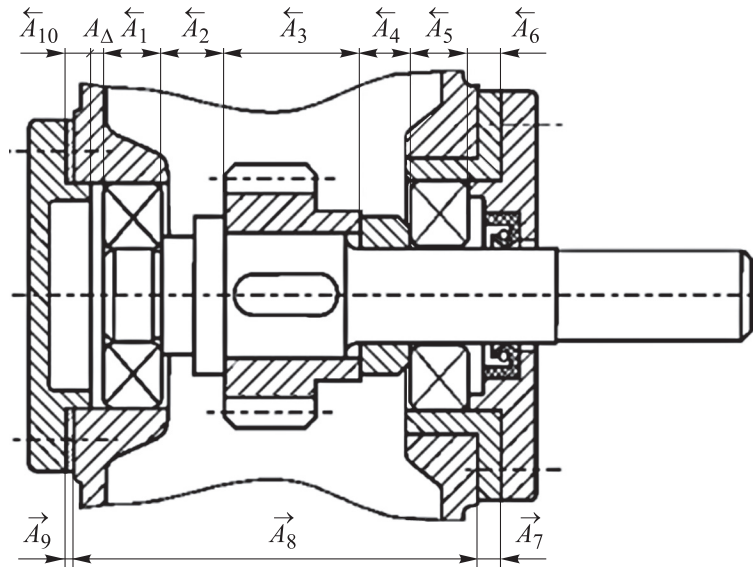


Рис. 3. Схема узла редуктора

При подборе деталей обычным методом разброс размеров замыкающего звена может достигать 250 мкм (табл. 3), что можно проверить путем алгебраической суммы допусков всех размеров, составляющих размерную цепь. С помощью индивидуальной сборки деталей можно добиться практически одинакового размера замыкающего звена, что упрощает сборку изделия, а также повышает качество и надежность узла.

Значения отклонений деталей и замыкающего звена, полученные путем индивидуального подбора, приведены в табл. 4.

Для многозвенных размерных цепей индивидуальный подбор деталей оказывается трудоемкой задачей, требующей высокой вычислительной мощности и значительных временных затрат. Поэтому при оценивании рациональности внедрения метода индивидуального подбора деталей следует учитывать затраты на их контроль, подбор и сортировку.

В отношении любой алгоритмически разрешимой задачи, как правило, существует не единственный, а целый класс различных алго-

ритмов, способных привести к ее решению. Эти алгоритмы могут различаться как фундаментальными принципами работы, так и деталями реализации выбранного метода. С практической точки зрения приоритетом является не просто разработка алгоритма, а идентификация среди множества существующих алгоритмов того, который обладает наименьшей вычислительной сложностью.

Главная задача при моделировании процесса подбора заключается в сокращении погрешности замыкающего звена. Исходя из этой цели, математическая модель, описывающая индивидуальный подбор, относится к типу оптимизационных моделей. Ее структура предусматривает наличие целевой функции и совокупности допустимых вариантов.

Сборку деталей можно смоделировать как задачу оптимизации с выбором из ограниченного числа альтернатив. Требуется определить такое подмножество деталей, которое приведет к достижению оптимального значения целевой функции. Если целевой функцией является минимизация поля рассеяния замыкающего звена,

Таблица 3

Значения отклонений деталей и замыкающего звена, полученные путем традиционного подбора

Звено	Отклонение, мкм	Звено	Отклонение, мкм	Звено	Отклонение, мкм
A_{Δ}	250	A_4	21	A_8	63
A_1	21	A_5	21	A_9	12
A_2	21	A_6	15	A_{10}	22
A_3	39	A_7	15	-	-

Таблица 4

Значения отклонений деталей и замыкающего звена, полученные путем индивидуального подбора

Звено	Отклонения, мкм									
A ₁	8	6	15	7	4	19	18	16	15	7
A ₂	9	17	12	16	13	11	17	3	10	5
A ₃	22	20	23	11	31	17	32	17	28	33
A ₄	13	14	18	5	9	15	17	11	17	16
A ₅	14	16	6	17	8	9	18	13	18	11
A ₆	9	10	4	3	6	2	3	4	12	6
A ₇	8	7	6	11	7	8	4	12	13	7
A ₈	20	27	26	10	25	34	55	12	49	25
A ₉	6	6	9	4	7	1	7	9	2	8
A ₁₀	10	7	13	16	19	20	11	19	14	13
A _Δ	-51	-50	-50	-50	-51	-50	-50	-50	-50	-51

то задача заключается в поиске наименьшего значения. Решение этой оптимизационной задачи осуществляется на множестве допустимых комбинаций деталей с соблюдением всех предельных ограничений.

Точность моделирования процесса подбора деталей при сборке и потребление машинных ресурсов являются основными критериями оценки его эффективности. При выборе между точными и приближенными методами решения задачи основным критерием является сложность алгоритма. Сложность, будучи одним из показателей оценки алгоритма, характеризует объем вычислительных ресурсов, необходимых для решения задачи. Она определяет, насколько интенсивно будут расти требования к вычислительным ресурсам (времени и памяти) по мере увеличения размерности задачи.

Время является наиболее значимым ресурсом. Размер задачи, обозначаемый через n , представляет собой количественную меру объема входных данных. В задаче подбора деталей размер задачи определяется количеством деталей разного типа и объемами соответствующих партий. Временная сложность алгоритма является важной характеристикой, представляющей собой функцию, которая описывает зависимость максимального количества основных операций, выполняемых алгоритмом, от размера задачи.

Метод полного перебора неэффективен для индивидуального подбора деталей, так как его вычислительная сложность растет экспоненци-

ально с увеличением объема данных. Хотя он может быть оправдан для небольших задач, даже при наличии всего пяти деталей и десяти комплектов изделий, огромное количество возможных комбинаций (более 10^{25}) делает полный перебор практически неосуществимым.

Жадные алгоритмы (Greedy) — стратегия построения решений, где каждый шаг направлен на достижение локального улучшения. Название «жадный» подчеркивает их склонность выбирать наиболее привлекательный вариант на текущем этапе, не выполняя глубокого анализа последствий. В отличие от полного перебора, который исследует все возможные пути развития решения (что часто является непозволительно долгим), жадные методы делают выбор в пользу компонента, который минимально ухудшает качество текущего решения. Этот компромисс между скоростью и оптимальностью является основной характеристикой жадных методов: они быстро формируют решение, но не всегда находят наилучшее.

Стохастические методы, так же известные, как методы Монте-Карло, основаны на применении случайных чисел для поиска решений. В задачах дискретной комбинаторной оптимизации эти методы используют генераторы псевдослучайных чисел для случайного выбора направлений в пространстве возможных решений. В отличие от систематического поиска в глубину, где количество исследуемых вариантов ограничено, случайный перебор распределяет анализируемые решения более равномерно

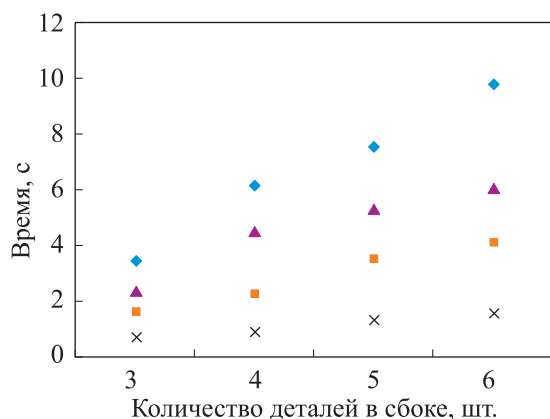


Рис. 4. Зависимости расчетного времени от количества деталей в сборке:

- ◆ — алгоритм случайного перебора; ▲ — жадный алгоритм;
- — алгоритм частичного перебора;
- × — алгоритм МПТ

но по всему пространству признаков. Однако из-за недостатка глубокого анализа при формировании каждого компонента решения чистые

методы случайного перебора требуют значительного количества итераций и редко применяются в первоначальной форме.

Для всестороннего анализа точности и трудоемкости предлагаемого алгоритма перебора, необходимо провести сравнительное исследование с другими алгоритмами (рис. 4).

Выводы

1. Решение практических задач методом МПТ позволяет сократить время обработки данных, что особенно важно для высокоточных изделий и виртуальной сборки трудоемких изделий, когда показатели качества описываются сложными математическими выражениями.

2. Предложена методика повышения качества сборки изделий на основе индивидуального подбора деталей, позволяющая решать практические проблемы обеспечения точности сборки высокоточных изделий.

Литература

- [1] Соломенцев Ю.М., ред. *Машиностроение. Энциклопедия*. Т. III-5 *Технология сборки в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 2006. 640 с.
- [2] Абрамов О.В. Использование технологии параллельных и распределенных вычислений в системах автоматизированного проектирования. *Вестник Дальневосточного отделения РАН*, 2021, № 4, с. 110–118, doi: https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_218_04_12
- [3] Новиков М.П. *Основы технологии сборки машин и механизмов*. Москва, Машиностроение, 1980. 592 с.
- [4] Вартанов М.В. *Технологические основы автоматической сборки*. Москва, Московский Политех, 2021. 57 с.
- [5] Вороненко В.П., Соломенцев Ю.М., Схиртладзе А.Г. *Проектирование машиностроительного производства*. Москва, Дрофа, 2006. 380 с.
- [6] Гаер М.А., Журавлев Д.А. Моделирование и анализ нелинейных технологических размерных цепей сборок. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2014, № 11, с. 33–38.
- [7] Глушань В.М., Зубрицкий А.В. Применение полного и частичного перебора для решения малоразмерных комбинаторных задач. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2019, № 3, с. 85–96.
- [8] Дальский А.М., Кулешова З.Г. *Сборка высокоточных соединений в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1988. 304 с.
- [9] Задорина Н.А., Непомилуев В.В., Олейникова Е.В. Индивидуальный подбор деталей при сборке как альтернатива необходимости повышения точности их обработки. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2019, № 5, с. 225–230.
- [10] Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Гусарова Н.И. Вероятностно-статистическая модель процесса индивидуального подбора деталей. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2015, № 1, с. 8–13.
- [11] Матренин П.В., Гриф М.Г., Секаев В.Г. *Методы стохастической оптимизации*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2016. 67 с.
- [12] Ковешников В.А., Мехтиев А.Я. Исследование накопительно-сортировочного метода решения задач параметрической оптимизации. *Проблемы управления*, 2020, № 2, с. 28–35, doi: <https://doi.org/10.25728/ru.2020.2.3>

- [13] Ламнауэр Н.Ю. Метод сборки деталей машин, обеспечивающий точность соединения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2014, № 7, с. 45–49, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321>
- [14] Набатников Ю.Ф. Метод селективной сборки соединений деталей машин в условиях мелкосерийного производства. *Сборка в машиностроении и приборостроении*, 2012, № 9, с. 19–32.
- [15] Набатников Ю.Ф. Обеспечение точности соединений деталей машин методом межгрупповой взаимозаменяемости. *Вестник машиностроения*, 2012, № 11, с. 43–51.
- [16] Нейдорф Р.А., Черногоров И.В., Полях В.В. и др. Экспериментальное исследование возможностей решения многоэкстремальных задач оптимизации эвристическими методами. *Вестник ДГТУ*, 2015, т. 15, № 4, с. 82–93, doi: <https://doi.org/10.12737/16074>
- [17] Непомилуев В.В., Семенов А.Н. Перспективные направления совершенствования качества сборки изделий машиностроения. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2016, № 8-2, с. 71–78.
- [18] Сазонников А.В., Хаймович А.И., Абрамова И.Г. Создание концепции электронного паспорта детали. *Вестник Международного института рынка*, 2019, № 2, с. 150–153.
- [19] Сибирский В.В., Чотчаева С.К. Использование компьютерных моделей пространственных размерных цепей и метода виртуальных сборок для повышения производительности монтажных операций. *Вестник СГАУ*, 2012, № 5, с. 297–303.
- [20] Слащев Е.С., Осетров В.Г. Моделирование метода групповой взаимозаменяемости на координатные оси. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2012, № 1, с. 55–60.
- [21] Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа «вал–втулка» по методу межгрупповой взаимозаменяемости. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2012, № 9, с. 15–18.
- [22] Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2011, № 8, с. 16–19.
- [23] Холодкова А.Г., ред. *Технология автоматической сборки*. Москва, Машиностроение, 2010. 560 с.
- [24] Павлов С.Н. *Системы искусственного интеллекта*. Ч. 1. Томск, Эль Контент, 2011. 176 с.

References

- [1] Solomentsev Yu.M., ed. *Mashinostroenie. Entsiklopediya*. Т. III-5 *Tekhnologiya sborki v mashinostroenii* [Mechanical engineering encyclopedia. Vol. III-5. Assembly technology in mechanical engineering.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 640 p. (In Russ.).
- [2] Abramov O.V. Application of parallel and distributed processing techniques for computer-aided design problems. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya RAN* [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences], 2021, no. 4, pp. 110–118, doi: https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_218_04_12 (in Russ.).
- [3] Novikov M.P. *Osnovy tekhnologii sborki mashin i mekhanizmov* [Fundamentals of machine and mechanism assembly technology.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 592 p. (In Russ.).
- [4] Vartanov M.V. *Tekhnologicheskie osnovy avtomaticheskoy sborki* [Technological foundations of automatic assembly]. Moscow, Moskovskiy Politekh Publ., 2021. 57 p. (In Russ.).
- [5] Voronenko V.P., Solomentsev Yu.M., Skhirtladze A.G. *Proektirovanie mashinostroitelnogo proizvodstva* [Design of mechanical engineering production]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 380 p. (In Russ.).
- [6] Gaer M.A., Zhuravlev D.A. Modeling and analysis of non-linear technological assembly dimensional chains. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 11, pp. 33–38. (In Russ.).
- [7] Glushan V.M., Zubritskiy A.V. Application of exhaustive and partial search for solving the low-sized combinator problems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFeDU. Engineering Sciences], 2019, no. 3, pp. 85–96. (In Russ.).

- [8] Dalskiy A.M., Kuleshova Z.G. *Sborka vysokotochnykh soedineniy v mashinostroyeni* [Assembly of high-precision joints in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988. 304 p. (In Russ.).
- [9] Zadorina N.A., Nepomiluev V.V., Oleynikova E.V. Individual selection of parts during assembly as an alternative to the need to improve the accuracy of their processing. *Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2019, no. 5, pp. 225–230. (In Russ.).
- [10] Nepomiluev V.V., Oleynikova E.V., Gusarova N.I. Mathematical modeling of the component selection during assembly. *Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2015, no. 1, pp. 8–13. (In Russ.).
- [11] Matrenin P.V., Grif M.G., Sekaev V.G. *Metody stokhasticheskoy optimizatsii* [Methods of stochastic optimization]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU Publ., 2016. 67 p. (In Russ.).
- [12] Koveshnikov V.A., Mekhtiev A.Ya. Data accumulation and sorting method for solving parametric optimization problem. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2020, no. 2, pp. 28–35, doi: <https://doi.org/10.25728/pu.2020.2.3> (In Russ.).
- [13] Lamnauer N.Yu. Machine parts assembly method, which provides connection accuracy. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2014, no. 7, pp. 45–49, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321> (in Russ.).
- [14] Nabatnikov Yu.F. Selective assembly method of joints of machine parts at small-lot production. *Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2012, no. 9, pp. 19–32. (In Russ.).
- [15] Nabatnikov Yu.F. The accuracy assurance of joint assemblies of machinery by intergroup compatibility technology. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2012, no. 11, pp. 43–51. (In Russ.).
- [16] Neydorf R.A., Chernogorov I.V., Polyakh V.V. et al. Experimental study on solution possibilities of multiextremal optimization problems through heuristic methods. *Vestnik DGTU* [Vestnik of Don State Technical University], 2015, vol. 15, no. 4, pp. 82–93, doi: <https://doi.org/10.12737/16074> (in Russ.).
- [17] Nepomiluev V.V., Semenov A.N. Perspective directions of the machine building quality improving. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2016, no. 8-2, pp. 71–78. (In Russ.).
- [18] Sazonnikov A.V., Khaymovich A.I., Abramova I.G. Creating a workpiece electronic passport concept. *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta rynka*, 2019, no. 2, pp. 150–153. (In Russ.).
- [19] Sibirskiy V.V., Chotchaeva S.K. Using computer models spatial dimension chains and database of virtual assemblies for improvement of assembly operations performance. *Vestnik SGAU* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2012, no. 5, pp. 297–303. (In Russ.).
- [20] Slashchev E.S., Osetrov V.G. Modeling of group interchangeability method on coordinate axis. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing], 2012, no. 1, pp. 55–60. (In Russ.).
- [21] Sorokin M.N., Anurov Yu.N. The algorithm of the decision of a problem of acquisition is offered at selective assemblage of products of type "shaft-plug" on a method of intergroup interchangeability. *Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2012, no. 9, pp. 15–18. (In Russ.).
- [22] Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Formalization of a method of intergroup interchangeability at realization of selective assembly of products. *Sborka v mashinostroyeni, priborostroyeni* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2011, no. 8, pp. 16–19. (In Russ.).
- [23] Kholodkova A.G., ed. *Tekhnologiya avtomaticheskoy sborki* [Automatic assembly technology]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2010. 560 p. (In Russ.).
- [24] Pavlov S.N. *Sistemy iskusstvennogo intellekta*. Ch. 1 [Artificial intelligence systems. P. 1]. Tomsk, El Kontent Publ., 2011. 176 p. (In Russ.).

Информация об авторах

ТИМОФЕЕВ Геннадий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

БАРБАШОВ Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: barbashov83@yandex.ru).

Information about the authors

TIMOFEEV Gennadiy Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

BARBASHOV Nikolai Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Systems of Manufacture Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: barbashov83@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тимофеев Г.А., Барбашов Н.Н. Повышение качества сборки высокоточных узлов деталей с применением индивидуального подбора деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 3, с. 38–49.

Please cite this article in English as:

Timofeev G.A., Barbashov N.N. Improving the quality of assembly of high-precision parts using individual part selection. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 3, pp. 38–49.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие

«Активная система внутренней пассивной безопасности автомобиля»

Авторы: А.В. Гонсалес Астуа, Р.Б. Гончаров,
А.В. Петюков

Изложены основные принципы построения, применения и функционирования всех известных типов модулей подушек безопасности и натяжителей ремней, относящихся к системе внутренней пассивной безопасности автомобиля. Представлены физические и математические модели процессов функционирования этих устройств и их взаимодействия с антропоморфным манекеном при дорожно-транспортном происшествии, а также инженерные методики расчета параметров нагружения газогенераторов. Приведено описание процедур сертификации автомобилей на пассивную безопасность, анализа регламентов, сопровождающих разработку, испытания и эксплуатацию модулей подушек безопасности в соответствии с международными и российскими стандартами.

Для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства». Может быть также полезно аспирантам высших технических учебных заведений и инженерно-техническим работникам предприятий, занимающимся разработкой, производством и эксплуатацией автомобильной техники.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>