DOI 10.52209/1609-1825_2024_3_73 УДК 621.9

Анализ методов многопараметрической оптимизации для механической обработки деталей

[1]**ЖЕТЕСОВА Гульнара Сантаевна,** *д.т.н., профессор, zhetesova@mail.ru,*
[1]***ЖАРКЕВИЧ Ольга Михайловна,** *к.т.н., профессор, zharkevich82@mail.ru,*
[2]**ХРУСТАЛЕВА Ирина Николаевна,** *к.т.н., доцент, hrustaleva_in@spbstu.ru,*
[1]**КОЖАНОВ Мурат Галиаскарович,** *магистр, старший преподаватель, spark.2011@mail.ru,*
[1]**ШАХАТОВА Алия Талгатовна,** *магистр, старший преподаватель, shakhatovaa@list.ru,*
[1]НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия,
**автор-корреспондент.*

Аннотация. *В современном мире цифровизация стала неотъемлемой частью различных отраслей экономики, включая производственные предприятия. Однако для эффективной работы и развития производственного процесса необходимо не только умение использовать новейшие технологии, но и способность анализировать и оптимизировать имеющиеся данные. Одним из наиболее эффективных методов анализа и управления данными является многокритериальный анализ. Этот метод позволяет учитывать множество факторов при принятии решений, что важно для производственных процессов, где присутствует множество переменных и ограничений. Вместе с тем, большие объемы данных, собираемые и хранящиеся предприятием, помогают улучшить качество принимаемых решений и повысить эффективность производственного процесса. Анализ данных позволяет выявить закономерности, прогнозировать поведение процессов и впоследствии оптимизировать их работу.*

Ключевые слова: *оптимизация, критерий, ограничение, решение, целевая функция.*

Введение

В настоящее время работа промышленных предприятий осуществляется в условиях рыночной экономики, одной из основных черт которой является наличие конкуренции [1]. Таким образом, в современных экономических условиях повышение эффективности производственного процесса путем оптимизации его технологических параметров является одной из приоритетных задач промышленного предприятия [2].

В основе оптимизации технологического процесса лежит детализированная модель процесса изготовления изделия, описывающая изменение его состояния в виде набора параметров. На основе цифровой модели производится оптимизация целевых показателей за счет варьирования значений параметров управления в рамках заданных диапазонов значений [3].

С точки зрения управления технологический процесс механической обработки представляет собой сложную структуру, состоящую из последовательности изменяющихся состояний изделия [4]. Управление этим процессом заключается в определении оптимальных значений технологических параметров, чтобы достичь требуемых промежуточных состояний изделия.

В этом случае необходимо разработать наилучшую стратегию управления в многоуровневой иерархической системе, чтобы достичь оптимального целевого состояния объекта управления. Это состояние будет отличаться сбалансированной системой целевых показателей, определяющих общую эффективность системы.

Таким образом, оптимизация параметров технологического процесса механической обработки является одной из ключевых задач в рамках этапа технологической подготовки производства, решение которой

способствует повышению эффективности работы промышленного предприятия и поддержания его конкурентоспособности.

Целью данной статьи является обзор методов параметрической оптимизации процессов механической обработки деталей с учетом предиктивной аналитики многокритериального анализа.

Методы исследования

При анализе методов параметрической оптимизации процессов механической обработки деталей используются различные методы исследований, включая комплексный подход. Применяемые методы включают в себя теоретический анализ, ориентированный на обзор материалов по теме Производственного Цифрового Преобразования в период с 2021 по 2024 год, а также использование статических методов анализа и обработки информации. Важным аспектом является учет особенностей обработки данных большого объема на основе синтеза и анализа.

Результаты и обсуждение

В основе оптимизации технологического процесса лежит детализированная модель процесса изготовления изделия, описывающая изменение его состояния в виде набора параметров. На основе цифровой модели производится оптимизация целевых показателей за счет варьирования значений параметров управления в рамках заданных диапазонов значений.

Для управления большим объемом данных предполагаются сбор и обработка первичной информации, которая включает в себя параметры оборудования, характеристики установочно-зажимных приспособлений, параметры режущего инструмента, используемого в ходе технологического перехода, параметры технологических режимов, а также параметры средств контроля, применяемых при выполнении технологических операций (рисунок 1).

К методам оптимизации, используемым в работе с технологическими процессами механической обработки деталей, используют методы, указанные на рисунке 2.

Критериями оптимизации механической обработки деталей, как правило, являются:

- минимизация времени обработки ($t \to min$);
- минимизация шероховатости поверхности ($Ra \to min$);
- максимальная точность размеров ($T \to max$);
- минимизация износа инструмента ($\delta \to min$);
- минимизация энергопотребления ($W \to min$);
- максимальная производительность ($P \to max$).

Метод анализа иерархий позволяет анализировать различные альтернативные методы обработки деталей и сравнивать их с точки зрения различных критериев, таких как качество обработки, стоимость, скорость обработки, энергопотребление и другие.

Метод взвешенной суммы – метод многокритериальной оптимизации позволяет найти компромиссное решение при наличии нескольких конкурирующих критериев. В качестве оптимального решения выбирается комбинация параметров, для которой взвешенная сумма имеет наилучшее значение (например, минимальное для критериев минимизации и максимальное для критериев максимизации) [5].

Рисунок 1 – Первичная информация для выбора оптимального варианта выполнения технологических операций

Рисунок 2 – Методы многопараметрической оптимизации

Метод главного критерия заключается в выборе одного, наиболее значимого критерия из множества и оптимизации процесса по этому критерию при условии, что значения остальных критериев не ухудшаются ниже определенного допустимого уровня. Из всех критериев выбирается один, который считается наиболее важным для достижения общей цели. Для каждого из оставшихся критериев устанавливается минимально допустимое значение. Оптимизация процесса проводится с целью достижения экстремального значения главного критерия при соблюдении ограничений на значения остальных критериев [6].

Метод Парето – это один из фундаментальных подходов в решении многокритериальных задач оптимизации. В отличие от методов, которые ищут одно единственное оптимальное решение, метод Парето определяет множество решений, каждое из которых является оптимальным в определенном смысле. Решение считается недоминируемым (или парето-оптимальным), если нет другого решения, которое было бы лучше по всем критериям. Иными словами, улучшение одного критерия неизбежно приводит к ухудшению хотя бы одного другого [7].

Метод идеальной точки – подход, предлагающий интуитивный и визуальный способ выбора оптимального решения из множества альтернатив. Согласно этому методу существует такое решение, которое одновременно оптимально по всем критериям. Это и есть идеальная точка. Каждое реальное решение можно оценить по расстоянию до идеальной точки в пространстве критериев. Чем ближе решение к идеальной точке, тем лучше оно считается. В качестве оптимального решения выбирается то, которое находится на минимальном расстоянии от идеальной точки [8].

Метод линейной свертки (или линейной комбинации) является одним из самых простых и часто используемых методов многокритериальной оптимизации. Его суть заключается в том, что все критерии сводятся к одному общему критерию – целевой функции, путем их линейной комбинации с определенными весовыми коэффициентами [9].

Метод контрольных показателей представляет собой подход к оптимизации процессов, при котором для оценки эффективности процесса используются специальные метрики – контрольные показатели. Эти показатели позволяют количественно оценить различные аспекты процесса, такие как производительность, качество, затраты и т.д. [10].

Метод проекции градиентов – это итеративный алгоритм оптимизации, который используется для поиска минимума (или максимума) функции многих переменных [11].

При использовании этого метода опреде-

ляется начальное приближение к решению. Вычисляется градиент функции в текущей точке. Градиент указывает направление наискорейшего возрастания функции. Делается шаг в направлении, противоположном градиенту, то есть в направлении наискорейшего убывания функции. Если новое значение переменных выходит за допустимые границы, то оно проецируется на область допустимых значений. Шаги повторяются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность или максимальное число итераций.

Каждый из методов многокритериальной оптимизации имеет свои преимущества и недостатки, которые представлены в таблице.

Выбор наиболее эффективного метода многокритериальной оптимизации для процессов механической обработки зависит от конкретных условий задачи. Каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны, и оптимальный выбор будет зависеть от таких факторов, как:

- количество и характер критериев: для небольшого числа критериев могут подойти простые методы, такие как метод линейной свертки или метод идеальной точки. При большом количестве критериев и сложных взаимосвязях между ними более эффективными могут быть методы генетических алгоритмов или методы на основе нейронных сетей;
- наличие ограничений: если задача имеет жесткие ограничения, то методы, учитывающие ограничения (например, метод проекции градиентов), будут более подходящими;
- доступность информации: для некоторых методов требуется большая вычислительная мощность и данные о производных функциях;
- требуемая точность решения: если требуется высокая точность, то могут потребоваться более сложные методы оптимизации.

Выводы

Выбор оптимального метода многокритериальной оптимизации является комплексной задачей, требующей глубокого понимания как самой задачи, так и различных методов оптимизации. Не существует уни-

Преимущества и недостатки методов оптимизации [12]

Метод	Преимущества	Недостатки
Метод анализа иерархий	Структуризация проблемы. Учет качественных факторов. Интуитивная понятность. Гибкость	Субъективность. Трудность определения весов. Несогласованность суждений. Ограничения при большом количестве критериев
Метод взвешенной суммы	Гибкость в выборе критериев и весов. Возможность учета различных ограничений	Метод не учитывает возможные нелинейные взаимосвязи между критериями
Метод главного критерия	Возможность учета субъективных предпочтений лица, принимающего решение	Искусственное разделение критериев на главный и второстепенные
Метод Парето	Предоставляет все возможные оптимальные решения, позволяя выбрать наиболее подходящее с учетом конкретной ситуации	Множество Парето может содержать большое количество решений, что затрудняет выбор конечного варианта
Метод идеальной точки	Метод учитывает все критерии одновременно	Выбор метрики для расчета расстояния может существенно повлиять на результат
Метод линейной свертки	Простота реализации. Гибкость в выборе критериев и весов	Метод не учитывает возможные нелинейные взаимосвязи между критериями
Метод контрольных показателей	Позволяет оценить процесс в целом и выявить узкие места.	Точность результатов зависит от качества сбора и обработки данных
Метод проекции градиентов	Точность результатов зависит от качества сбора и обработки данных	Метод может застрять в локальном минимуме, если функция имеет несколько экстремумов

версального метода, который был бы эффективен во всех случаях. Поэтому рекомендуется тщательно анализировать каждую конкретную ситуацию и выбирать метод, который наилучшим образом соответствует поставленной задаче.

Выбор метода многокритериальной оптимизации также зависит от доступности необходимых технических средств и ресурсов для его применения. Уровень опыта и знания специалистов в области многокритериальной оптимизации также может повлиять на выбор оптимального метода.

В целом выбор оптимального метода многокритериальной оптимизации для механической обработки деталей требует комплексного анализа указанных факторов и может быть осуществлен на основе компромисса между ними.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по гранту AP23490796 «Разработка цифровых моделей производственного процесса, основанных на многокритериальном анализе управления BigData в рамках технологической подготовки производства машиностроительных предприятий» (2024-2026 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василевская А.А., Лунин И.А. Конкуренция и её роль в современной экономической системе // X Международная студенческая научная конференция. Студенческий научный форум – 2018. М., 2018. – С. 1-9.
2. Сиротинин С.И., Францева Т.Ю. Оптимизация производственных процессов путем внедрения дополнительных операций в технологический процесс производства // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 12 [Электронный ресурс]. URL: https://web.snauka.ru/issues/2019/12/90868
3. Berg A.S., Nurzhanova O.A., Vytautas T., Berg A.A., Vitushenko D.V. Improvement of Base Sets for Complex Configuration Parts when Assessing their Manufacturability within Industry 4.0 // Material and Mechanical Engineering Technology. 2024. № 2. – С. 25-35.
4. Хрусталева И.Н., Хрусталев М.Б., Хохловский В.Н., Черных Л.Г., Шкодырев В.П. Минимизация трудоемкости выполнения комплекса вспомогательных действий для операций механической обработки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 12. – С. 26-37.
5. Карпенко А.П., Савелов А.С. Модифицированный метод адаптивных взвешенных сумм в задаче многокритериальной оптимизации // Модифицированный метод адаптивных взвешенных сумм в задаче многокритериальной оптимизации. 2013. № 11. – С. 329-362.
6. Жукова М.С. Проблема выбора оптимальных решений задач многокритериальной оптимизации // Известия института менеджмента СГЭУ. 2022. № 1 (25). – С. 127-130.
7. Ершов О.В., Скворцов А.В., Лущакова И. Н. Многокритериальная оптимизация по Парето // 58-я Научная Конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 2022. – С. 78-83.
8. Louis Tay, Vincent Ng Ideal Point Modeling of Non-cognitive Constructs: Review and Recommendations for Research // Front. Psychol., Volume 9, 2018.
9. Борисов В.И. Метод свертки критериев для решения задачи многокритериальной оптимизации // Проблемы и тенденции научных исследований в системе образования: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Тюмень, 2019. Ч. 1. – С. 25-26.
10. Коротченко А.Г., Кумагина Е.А., Сморякова В.М. Введение в многокритериальную оптимизацию. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. – 55 с.
11. Guodong Ma, Yufeng Zhang, Meixing Liu A generalized gradient projection method based on a new working set for minimax optimization problems with inequality constraints // Journal of Inequalities and Applications, volume 2, 2017. – Pp. 1-14.
12. Свитачева М.П. О некоторых многокритериальных методах выбора плановых решений // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. 2016. № 3. – С. 32-38.

Бөлшектерді механикалық өңдеуге арналған көп параметрлі оңтайландыру әдістерін талдау

[1]**ЖЕТЕСОВА Гульнара Сантаевна,** *т.ғ.д., профессор, zhetesova@mail.ru,*
[1]***ЖАРКЕВИЧ Ольга Михайловна,** *т.ғ.к., профессор, zharkevich82@mail.ru,*
[2]**ХРУСТАЛЕВА Ирина Николаевна,** *т.ғ.к., доцент, hrustaleva_in@spbstu.ru,*
[1]**КОЖАНОВ Мурат Галиаскарович,** *магистр, аға оқытушы, spark.2011@mail.ru,*
[1]**ШАХАТОВА Алия Талгатовна,** *магистр, аға оқытушы, shakhatovaa@list.ru,*
[1]*«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,*
[2]*Ұлы Петр Санкт-Петербург политехникалық университеті, Политехническая көшесі, 29, Санкт-Петербург, Ресей,*
**автор-корреспондент.*

Аңдатпа. *Қазіргі әлемде цифрландыру экономиканың әртүрлі салаларының, соның ішінде өндірістік кәсіпорындардың ажырамас бөлігіне айналды. Алайда, тиімді жұмыс істеу және өндіріс процесін дамыту үшін жаңа технологияларды қолдана білу ғана емес, сонымен қатар қолда бар деректерді талдау және оңтайландыру мүмкіндігі қажет. Деректерді талдау мен басқарудың ең тиімді әдістерінің бірі көп өлшемшартты талдау болып табылады. Бұл әдіс шешім қабылдау кезінде көптеген факторларды ескеруге мүмкіндік береді, бұл өзгермелілер мен шектеулер жиыны бар өндірістік процестер үшін маңызды. Сонымен қатар, кәсіпорын жинайтын және сақтайтын деректердің үлкен көлемі қабылданатын шешімдердің сапасын жақсартуға және өндіріс процесінің тиімділігін арттыруға көмектеседі. Деректерді талдау заңдылықтарды анықтауға, процестердің беталысын болжауға және кейіннен олардың жұмысын тиімділеуге мүмкіндік береді.*

Кілт сөздер: *оңтайландыру, өлшемшарт, шектеу, шешім, мақсатты атқарым.*

Analysis of Multiparameter Optimization Methods for Mechanical Processing of Parts

[1]**ZHETESSOVA Gulnara,** *Dr. of Tech. Sci., Professor, zhetesova@mail.ru,*
[1]***ZHARKEVICH Olga,** *Cand. of Tech. Sci., Professor, zharkevich82@mail.ru,*
[2]**KHRUSTALEVA Irina,** *Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, hrustaleva_in@spbstu.ru,*
[1]**KOZHANOV Murat,** *Master's Degree, Senior Lecturer, spark.2011@mail.ru,*
[1]**SHAKHATOVA Aliya,** *Master's Degree, Senior Lecturer, shakhatovaa@list.ru,*
[1]*NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,*
[2]*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya Street, 29, Saint Petersburg, Russia,*
**corresponding author.*

Abstract. *In the modern world, digitalization has become an integral part of various sectors of the economy, including manufacturing enterprises. However, for the efficient operation and development of the production process, it is necessary not only to be able to use the latest technologies, but also to be able to analyze and optimize the available data. One of the most effective methods of data analysis and management is multicriteria analysis. This method allows you to take into account many factors when making decisions, which is important for production processes where there are many variables and constraints. At the same time, large volumes of data collected and stored by the enterprise help improve the quality of decisions made and increase the efficiency of the production process. Data analysis allows you to identify patterns, predict the behavior of processes, and subsequently optimize their operation.*

Keywords: *optimization, criterion, constraint, solution, objective function.*

REFERENCES

1. Vasilevskaya A.A., Lunin I.A. Konkurentsiya i yeye rol' v sovremennoy ekonomicheskoy sisteme // X Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchnaya konferentsiya. Studencheskiy nauchnyy forum – 2018. – Moscow, 2018. – Pp. 1-9.
2. Sirotinin S.I., Frantseva T.YU. Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov putem dopolnitel'nykh operatsiy v tekhnologicheskikh protsessakh proizvodstva // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. 2019. № 12 [Elektronnyy resurs]. URL: https://web.snauka.ru/issues/2019/12/90868
3. Berg A.S., Nurzhanova O.A., Vitautas T., Berg A.A., Vitushenko D.V. Sovershenstvovaniye bazovykh naborov dlya Detali slozhnoy konfiguratsii pri otsenke ikh tekhnologichnosti v ramkakh Industrii 4.0 // Tekhnologii materialovedeniya i mashinostroyeniya. 2024. № 2. – Pp. 25-35.
4. Khrustaleva I.N., Khrustalev M.B., Khokhlovskiy V.N., Chernykh L.G., Shkodyrev V.P. Minimizatsiya vypolneniya kompleksov vspomogatel'nykh deystviy dlya operatsiy mekhanicheskoy obrabotki // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2024. № 12. – Pp. 26-37.
5. Karpenko A.P., Savelov A.S. Modifitsirovannyy metod adaptivnykh vzveshennykh summ v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii // Modifitsirovannyy metod adaptivnykh vzveshennykh summ v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii. 2013. № 11. – Pp. 329-362.
6. Zhukova M.S. Problema vybora optimal'nykh resheniy zadachi mnogokriterial'noy optimizatsii // Izvestiya instituta menedzhmenta SGEU. 2022. № 1 (25). – Pp. 127-130.
7. Yershov O.V., Skvortsov A.V., Lushchakova I.N. Mnogokriterial'naya optimizatsiya po Pareto // 58-ya Nauchnaya konferentsiya aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR. Minsk, 2022. – Pp. 78-83.
8. Luis Tey, Vinsent Ng Ideal'no-tochechnoye modelirovaniye nekognitivnykh konstruktov: obzor i rekomendatsii dlya issledovaniya // Peredniy. Psikhol., Tom 9, 2018.
9. Borisov V.I. Metod svertki, primenyayemyy dlya resheniya zadach mnogokriterial'noy optimizatsii // Problemy i tendentsii nauchnykh issledovaniy v sisteme obrazovaniya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tyumen', 2019. CH. 1. – Pp. 25-26.
10. Korotchenko A.G., Kumagina Ye.A., Smoryakova V.M. Vvedeniye v mnogokriterial'nuyu optimizatsiyu. Uchebno-metodicheskoye posobiye. – Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2017. – 55 p.
11. Godun Ma, Yufen Chzhan, Meysin Lyu. Obobshchennyy metod proyektsii gradiyenta, osnovannyy na novom rabochem nabore dlya zadach minimaksnoy optimizatsii s ogranicheniyami-neravenstvami // Zhurnal neravenstv i prilozheniy, tom 2, 2017. – Pp. 1-14.
12. Svitacheva M.P. O nekotorykh mnogokriterial'nykh metodakh vybora planovykh resheniy // Sotsial'no-ekonomicheskiy i gumanitarnyy zhurnal Krasnoyarskogo GAU. 2016. № 3. – Pp. 32-38.