

СИСТЕМА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Запропоновано систему критеріїв оптимальності для вибору найвигіднішого варіанту технологічного процесу. Проведено обґрунтування вибору кожного критерія оптимальності. Розглянуті методи вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації.

The article propositions the set of criteria optimality for choice of the version engineering process optimal. The substantiation of the optimality criterion choice are make. The aggregative method of the optimality criterion are make. The methods of the determination goal multiobjective optimization are concerned.

Проектирование технологического процесса (ТП) обработки деталей типа тел вращения характеризуется многовариантностью технологических решений, которые связаны с выбором технологического маршрута обработки и разработкой операционных технологий. Выбор наивыгоднейшего варианта ТП осуществляется путем оптимизации технологических решений, которые обеспечивают выполнение ограничений, отражающих условия протекания процесса и требования, предъявляемые к нему.

Критериями оптимальности ТП являются количественные показатели, которые в наибольшей степени соответствуют его целевому назначению, связанному с достижением требуемой производительности, себестоимости и т.д. Наивыгоднейшим технологическим решениям соответствуют экстремальные значения критериев оптимальности. Для принятия оптимального технологического решения используются математические методы, предполагающие построение математических моделей, в которые входят целевые функции и системы технических ограничений.

Принятие решения при выборе наивыгоднейшего варианта ТП с учетом нескольких критериев, заданных целевыми функциями f_1, f_2, \dots, f_n и зависящих от ряда конструктивно-технологических параметров z_1, z_2, \dots, z_m называется многокритериальной, глобальной, или векторной оптимизацией [1,2].

Система, состоящая из отдельных целевых функций, образует глобальный критерий оптимальности:

$$F = \{f_1(z_1, \dots, z_m), f_2(z_1, \dots, z_m), \dots, f_n(z_1, \dots, z_m)\}.$$

Каждое решение системы x характеризуется соответствующей оценкой, глобального критерия оптимальности F . Выбор оптимального решения из множества решений D_x , которые принимает система, сводится к выбору оптимальной оценки из множества достижимых оценок

$$x = F(D_x) = \{D_x \in E^n\},$$

где E^n n – мерное критериальное пространство, в котором существуют

все показатели системы критериев; n – количество критериев оптимальности.

Таким образом, при многокритериальной оптимизации ТП множество всех решений D_x выделяется из более широкого множества $D_x \subseteq E^n$ с помощью системы технических ограничений, которая чаще всего представляется в виде неравенств.

Необходимость многокритериальной оптимизации ТП связана с тем, что отдельные показатели ТП (локальные критерии) не сводимы один к другому. Кроме того, критерии оптимальности находятся между собой в сложной взаимосвязи, которая характеризуется противоречивостью отдельных локальных критериев, т. е. увеличение или уменьшение значения одного критерия не позволяет одновременно увеличить или уменьшить значения других. Например, при повышении параметров режима резания увеличивается производительность, но при этом уменьшается стойкость инструмента и его надежность, что приводит к дополнительным простоям оборудования и дополнительным затратам, связанным с его обслуживанием. В свою очередь это сказывается на себестоимости продукции и вероятности выполнения производственного задания в требуемые сроки, а также приводит к изменению потребления электроэнергии.

При многокритериальной оптимизации невозможно получить единственное объективное решение, которое обращает в экстремум все локальные критерии. Объективным фактором, характеризующим решение многокритериальных задач, является существование области Парето в пространстве критериев, которое ограничивает возможный выбор проектных решений и характеризуется тем, что любое принадлежащее ей решение нельзя улучшить одновременно по всем критериям и наличие так называемых Парето-оптимальных решений. Решение многокритериальной задачи является Парето-оптимальным, если улучшение (увеличение или уменьшение) одного из критериев оптимальности приводит к ухудшению других.

Рассмотрим нахождение области Парето при выборе оптимального ТП изготовления детали с помощью критериев производительности и себестоимости обработки. Например, металлорежущий станок с учетом материала режущей части инструмента, концентрации технологических переходов и применяемой технологической оснастки обеспечивает производительность обработки $f_1 = [10...20] \mu\text{m}/\text{час}$. Для изготовления производственной партии деталей в течении планового периода необходимо обеспечить производительность $14 \mu\text{m}/\text{час}$, т. е. техническое ограничение $f_1 \geq 14 \mu\text{m}/\text{час}$. При этом технологическая себестоимость изготовления детали, соответствующая указанному диапазону производительности, находится в пределах $f_2 = [45...70] \mu\text{m}/\text{час}$. С учетом максимальной цены детали, которая установлена заказчиком, технологическая себестоимость изготовления

детали не должна превышать 60 грн, т. е. $f_2 \geq 60 \text{ грн}$. Технологическая себестоимость зависит от производительности обработки и определяется функциональной зависимостью, которая имеет вид

$$f_2 = 1.75 \cdot f_1 + 30.5$$

Для рассматриваемого примера на рис. 1 показано пространство критериев, множество допустимых решений и область Парето.

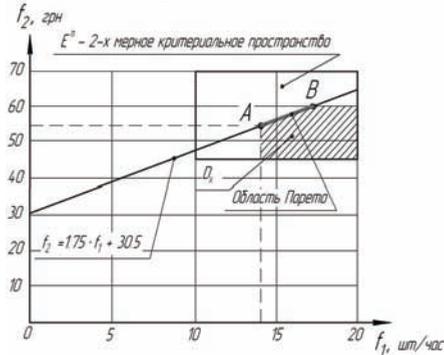


Рис. 1 – Пространство критериев, множество допустимых решений и область Парето при оптимизации с учетом производительности и себестоимости обработки

Как видим, областью Парето являются значения производительности и себестоимости, которые принадлежат отрезку АВ. Выбор Парето-оптимального решения из области Парето требует дальнейшего решения, которое заключается в указании наиболее предпочтительного критерия, введении весовых коэффициентов значимости критериев и др.

Развитие современных машиностроительных предприятий различных форм собственности (государственные, акционерные, частные) обусловлено законами рыночной экономики. Основным условием стабильной работы и развития предприятий в условиях конкурентной борьбы является получение максимальной прибыли. При этом направления развития предприятий ориентированы на эффективное использование возможностей технологического оборудования и оснастки, производственных площадей при экономичном использовании материало- и энергоресурсов.

Для выбора наиболее выгодного ТП в качестве экономического критерия оптимальности предлагается использовать интенсивность прибыли (I_n), а в качестве технических - трудоемкость обработки детали ($T_{штк}$), эффективность использования электрической энергии ($K_{э}$), производственную площадь (S_n), занимаемую оборудованием и вероятность выполнения задания в установленные сроки (P).

В общем случае система целевых функций принятых критериев оптимальности имеет следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = I_n(k_1, \dots, k_a) \rightarrow \max; \\ \Phi_2 = T_{штк}(l_1, \dots, l_b) = \sum_{b=1}^A T_{штк\ b} \rightarrow \min; \\ \Phi_3 = K_{ИЭ}(o_1, \dots, o_c) \rightarrow \max; \\ \Phi_4 = S_{И}(p_1, \dots, p_d) = \sum_{d=1}^B S_{И\ d} \rightarrow \min; \\ \Phi_5 = P(r_1, \dots, r_e) = \prod_{e=1}^B P_e \rightarrow \max. \end{array} \right.$$

Здесь $k_1, \dots, k_a, l_1, \dots, l_b, o_1, \dots, o_c, p_1, \dots, p_d, r_1, \dots, r_e$ – конструктивно-технологические параметры, влияющие на величину критериев оптимальности; A – количество металлорежущих станков, задействованных в ТП; B – общее количество основного и вспомогательного оборудования ТП.

Трудоемкость обработки детали не является абсолютным критерием, поэтому может использоваться только для сравнения ТП изготовления одной и той же детали. Актуальной задачей для сравнения вариантов ТП является прогнозирование трудоемкости обработки деталей на различных станках. С этой целью предлагается метод укрупненной оценки трудоемкости обработки, в котором используются полиномиальные зависимости для нахождения интенсивности формообразования поверхностей детали.

Практическое решение задач энергосбережения и энергопотребления становится все более актуальной проблемой машиностроительных предприятий. Основные тенденции энергосбережения направлены на снижение энергоемкости продукции, выпускаемой промышленными предприятиями, и уменьшение влияния энергозатрат на себестоимость продукции. Эффективное использование энергоресурсов позволяет повысить конкурентоспособность продукции.

Существуют различные критерии оценки энергетической эффективности основного и вспомогательного технологического оборудования. К числу наиболее широко используемых показателей энергетической эффективности относятся: энергоемкость, которая определяется расходом энергии на единицу выполненной работы, т.е. на единицу снятого с поверхности заготовки материала, определяемого объемом, массой и др., $\text{Дж} / \text{мм}^3$; удельная энергия технологических операций, которая определяется затратами работы, необходимыми на снятие единицы массы заготовки, $\text{Дж} / \text{кг}$, др. [3].

Рассмотренные показатели энергетической эффективности характеризуют потребление электроэнергии. Потребителями электрической энергии технологического оборудования являются электродвигатели и системы управления основного и вспомогательного оборудования, а также системы освещения.

Существенное влияние на эффективность использования электрической энергии имеет степень загрузки электродвигателей оборудования по мощности, от которой зависит величина реактивной мощности

электродвигателей, а также коэффициент полезного действия электродвигателей, длительность простоев и работы оборудования на холостом ходу.

На процесс выполнения производственного задания влияют случайные факторы, поэтому он является стохастическим и характеризуется интенсивностями отказов λ и восстановлений μ оборудования и режущего инструмента.

Таким образом, величина производительности обработки имеет некоторое рассеяние и существует вероятность того, что реально достигнутая производительность окажется меньше требуемой, которая необходима для выполнения производственного задания в установленный срок. Определить эффективность ТП и оценить стохастическую связь между требуемой и фактической производительностью позволяет показатель «вероятность выполнения задания» [4], который характеризует надежность процесса функционирования оборудования ТП в течение планового промежутка времени, определенного сроком выполнения задания. Оценить вариант ТП на основании значения показателя вероятности выполнения задания можно без учета случайных факторов, вызванных организационными причинами, так как они не оказывают влияния на выбор структуры ТП. Основные факторы, которые влияют на величину вероятности выполнения задания - это показатели, характеризующие надежность оборудования и технологической оснастки (вероятность безотказной работы, вероятность восстановления, интенсивность отказов, интенсивность восстановления, коэффициент готовности), а также временное и структурное резервирование [5].

Функции распределения вероятности безотказной работы и вероятности восстановления оборудования принято считать экспоненциальными [6, 7]. Вероятностные оценки процесса функционирования режущего инструмента рекомендуется осуществлять на основании закона распределения Вейбулла [8]. Это обусловлено статистическими данными изменения значений вероятности безотказной работы и вероятности восстановления в процессе эксплуатации, которые хорошо описываются этими законами распределения. Значения параметров интенсивности отказов λ и интенсивности восстановления μ определяются на основании статистических данных о среднем времени наработки на отказ и среднем времени восстановления отказавшего элемента в условиях действующего производства. Параметры λ и μ зависят от конструктивно-технологических характеристик оборудования и условий его эксплуатации. Процесс эксплуатации обусловлен износом и старением оборудования, что приводит к уменьшению среднего времени наработки на отказ и усложнению причин отказов, а также увеличению среднего времени восстановления отказавших элементов. Это приводит к изменению значений параметров λ и μ . Однако для рассматриваемого периода времени, который необходим для выполнения отдельного производственного задания, предполагаем, что параметры λ и

μ остаются неизменными.

С целью обеспечения стабильного функционирования технологической системы, которое не приведет к срыву выполнения производственного задания, предусмотрено обеспечение временного и структурного резервирования. Временное резервирование подразумевает существование резерва времени на выполнение производственного задания. К способам временного резервирования относятся: обеспечение избыточной производительности технологической системы; создания межоперационных накопителей деталей.

Структурное резервирование предполагает дублирование, как правило, наиболее часто выходящих из строя станков, агрегатов или инструментов для уменьшения или исключения потерь времени на их восстановление.

При определении вероятности выполнения производственного задания технологической системой целесообразно рассматривать влияние интенсивности отказов и восстановлений оборудования и инструмента отдельно. Это вызвано тем, что причины возникновения этих отказов и время их восстановления различны и выполняются различными категориями обслуживающего персонала [7].

Структуру ТП можно представить как систему из последовательно соединенных элементов, выполняющих задание длительностью t . Для увеличения значения показателя вероятности выполнения задания в указанный срок она может иметь непополняемый резерв времени τ . Функционирование каждого элемента – это процесс, в котором интервалы времени безотказной работы чередуются с интервалами времени восстановления. Система может находиться в дискретном множестве состояний E , которое разбивается на два подмножества: E_o и E_g . В E_o (работоспособные состояния) резерв времени не расходуется, а при нахождении системы в состоянии E_g (состояния отказов) в течении времени r приводит к уменьшению резерва времени на величину r [9].

В себестоимость детали входят затраты, связанные с производственной площадью, занимаемой оборудованием ТП. Величина арендной платы для предприятий, арендующих производственные площади во многих случаях является наибольшей статьёй затрат в себестоимости продукции. Это обстоятельство требует наиболее эффективного использования производственных площадей, занимаемых оборудованием.

В условиях единой общегосударственной системы хозяйствования в качестве экономического критерия определения эффективности вариантов новой техники, технологий и ТП использовались годовые приведенные затраты, которые учитывали себестоимость годового объема выпуска продукции и капитальные затраты, отнесенные к одному году эксплуатации оборудования. Они рассматривались как народнохозяйственные затраты общественного труда, овеществленные в средствах производства и переносимые на изготавливаемую продукцию. При этом средства на

дополнительные капитальные вложения поступали из единого государственного фонда.

Для сравнения вариантов ТП, не требующих дополнительных капиталовложений в качестве экономического критерия оптимальности используется технологическая себестоимость, которая учитывает только изменяющиеся по вариантам статьи затрат.

Обеспечение работы современных предприятий осуществляется за счет средств, получаемых из различных источников, поэтому в качестве экономических критериев оптимальности целесообразно использовать критерии, которые характеризуют величину прибыли предприятия в единицу времени.

Целевые функции рассмотренных технических и экономического критериев оптимальности с учетом технических ограничений формируют математическую модель многокритериальной оптимизации ТП.

При решении задачи многокритериальной оптимизации ТП можно применить следующие методы [1]

- 1) последовательных уступок;
- 2) выделения Парето-оптимальных решений;
- 3) введения весовых коэффициентов;
- 4) близости решения к идеальной точке;

Многокритериальная оптимизация методом последовательных уступок осуществляется путем упорядочения критериев по важности

$$f_1(z_1, \dots, z_m) > f_2(z_2, \dots, z_2) > \dots > f_n(z_1, \dots, z_m).$$

Затем осуществляется формирование процедур, необходимых для последовательной оптимизации сначала по первому критерию, затем по второму и т.д. После нахождения оптимального значения первого критерия h_1° назначается уступка Δh_1 , которая при потере эффективности критерия f_1 может быть допущена с целью оптимизации по второму критерию. После чего производится оптимизация по второму критерию при условии

$$f_1(z_1, \dots, z_m) \geq h_1^\circ - \Delta h_1.$$

Затем назначается уступка Δh_2 и производится оптимизация по критерию $f_3(z_1, \dots, z_m)$ и т.д.

Недостатком этого метода является необходимость обоснованного выбора предпочтения критериев и значений уступок, а также большие затраты времени, необходимые для решения отдельных оптимизационных задач, количество которых соответствует количеству критериев оптимальности.

В случаях, когда невозможно назначить предпочтения по отдельным локальным критериям и упорядочить их по важности, ограничиваются определением всего множества Парето-оптимальных решений. Однако метод выделения Парето-оптимальных решений является трудоемкой задачей, которая требует организации специальных вычислительных процедур и поэтому практически не используется.

Многокритериальная оптимизация методом введения весовых коэффициентов критериев основывается на нахождении компромиссного решения путем установления весовых соотношений между локальными критериями, что позволяет сформировать единый обобщенный критерий.

$$F = \sum_{i=1}^n V_i \cdot f_i(z_1, \dots, z_m) ,$$

где V_i – весовой коэффициент важности i -го критерия; n - количество критериев оптимальности.

Определение весовых коэффициентов критериев, как и упорядочение их по важности сложная задача, которая чаще всего решается путем экспертных оценок. Однако оптимальное решение, полученное по единому обобщенному критерию, является Парето-оптимальным.

Метод решения задачи многокритериальной оптимизации, основанный на близости решения к идеальной точке, в которой все критерии имеют экстремальное значение, осуществляется в следующей последовательности: определение оптимальных значений всех локальных критериев; нахождение решения, наиболее близкого к идеальной точке, для чего выбирается мера близости, которая, как и весовые коэффициенты, и уступки позволяет определить различные точки области Парето.

Этот метод наиболее трудоемкий, так как кроме решения отдельных оптимизационных задач, связанных с определением оптимальных значений всех локальных критериев, необходимо выбрать меру близости и только после этого найти Парето-оптимальное решение.

Таким образом, методы многокритериальной оптимизации отличаются сложностью вычислительных процедур, трудоемкостью обработки данных и степенью достоверности получаемых.

Выводы:

1. Для принятия технологического решения на основании многокритериальной оптимизации необходимо учитывать систему критериев, в которую входят: интенсивность прибыли; трудоемкость обработки; эффективность использования электрической энергии; производственная площадь, занимаемая оборудованием; вероятность выполнения задания в установленный срок.

2. Эффективным при решении задач многокритериальной оптимизации является метод последовательных уступок и метод введения весовых коэффициентов критериев.

Список литературы: 1. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. – М.: Наука, 1989. – 88 с. 2. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с. 3. Степанов М.С., Тимофеев Ю.В., Фадеев В.А. Энергетические критерии процесса обработки. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. №17. – С. 88 – 91. 4. Юхимов В.В., Кац В.И., Гамарник А.И. Расчет вероятности выполнения задания гибких производственных систем методом «состояний». // Надежность и контроль качества. – 1989, №12. – С. 32 – 36. 5. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Под ред. А.М. Половко. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с. 6. Оганян А.А., Монахов Г.А. Надежность и долговечность металлорежущих станков. – М.: НИИмаш, 1971. – 104 с. 7. Дашенко А.И., Белоусов А.П. Проектирование автоматических линий. – М.: Высш. шк., 1983. – 327 с. 8. Автоматические линии в машиностроении: Справочник. В 3 т. / Под ред. А.И. Дашенко. – М.: Машиностроение, 1984. – Т. 2: Станочные автоматические линии. - 408 с. 9. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

Поступила в редколлегию 24. 03. 08