

**КУТИН**

Андрей Анатольевич
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой

**ТУРКИН**

Михаил Владимирович
аспирант кафедры
«Технология
машиностроения»
(МГТУ «Станкин»)

Критерий структурной оптимизации производственного процесса изготовления сложных деталей машиностроения

А.А. Кутин, М.В. Туркин

Рассмотрены принципы выбора и формирования критерия структурной оптимизации сложных деталей машиностроения. Предлагаемый метод формирования основан на теории размерностей и применим для многих типов производства.

Ключевые слова: оптимизация производства, гибкое производство, теория размерностей, критерий оптимальности.

The article deals with the process of forming a correct criterion for structural optimization of the manufacturing process. The proposed method uses dimensional analysis and is applicable for a wide range of manufacturing environments.

Keywords: process optimization, flexible manufacturing, structural optimization, optimization criterion.

Машиностроительная отрасль промышленности всегда была и остается основной движущей силой развития экономики России [1]. Особо актуальным для отечественного машиностроения является вопрос о правильности выбора приоритетов производственно-технологического развития, который во многом диктуется необходимостью повышения эффективности управления дефицитными ресурсами по принципам максимального ресурсосбережения [2].

Основная задача предлагаемой работы — определение принципов построения производственно-технологической системы, обеспечивающей снижение цикла изготовления детали-сборочных единиц (ДСЕ), уменьшение объема незавершенного производства при обеспечении требуемой точности изготавливаемых деталей.

Выбор критерия оптимальности

При решении любой оптимизационной задачи одним из основных вопросов является правильный выбор и формулировка критерия оптимальности. В критерии формируется выражение конечного результата того или иного действия. Неправильно выбранный или неудачно сформулированный критерий может привести к тому, что разработанный технологический процесс будет по форме оптимальным, а по существу противоречащим действительности [3].

Мера эффективности любого производства — себестоимость, качество и время изготовления конечной продукции. Данные критерии во

многим противоречивы и выбор только одного из них может привести к ошибочным результатам [4]. Следовательно, необходим критерий оптимальности, который связан как с себестоимостью, так и со временем изготовления деталей. При этом оптимизационная модель также должна учитывать качество производимых деталей.

Таким образом, наиболее общим критерием оптимальности можно считать производительность, заданную в виде количества деталей, выпускаемых за единицу времени.

Использование производительности в качестве ключевого параметра оптимальности позволяет оценить эффективность всей производственной системы, так как от значения производительности участков напрямую зависит длительность цикла изготовления деталей, что, в свою очередь, определяет цикл изготовления основных сборочных узлов и изделий в целом.

Длительность цикла изготовления деталей зависит не только от времени поставки (реализации) основных изделий, но и минимального объема незавершенного производства (НЗП), который должен находиться в системе,

$$N_{\min(i+1)} = n_{\text{пар}(i+1)} + T_{\text{изг}(i)} R_{\text{дн}(i+1)}, \quad (1)$$

где $N_{\min(i+1)}$ — минимальный объем незавершенного производства $(i+1)$ -го цеха; $n_{\text{пар}(i+1)}$ — партия запуска $(i+1)$ -го цеха; $T_{\text{изг}(i)}$ — длительность цикла изготовления партии деталей в i -м цехе; $R_{\text{дн}(i+1)}$ — дневная потребность $(i+1)$ -го цеха; i — порядковый номер цеха в маршрутной ведомости.

В свою очередь объем незавершенного производства диктует объем финансовых средств, необходимых для обслуживания всех запасов предприятия, что определяет рентабельность всего производства.

Таким образом, можно отметить, что интегральная производительность участков определяет потенциальные возможности всей производственной системы предприятия.

Формирование критерия оптимальности

В общем случае производственные процессы в машиностроении дискретны, однако при относительно длительных отрезках времени их

можно охарактеризовать усредненными переменными и параметрами, отражающими относительно устойчивые связи между ними. Таким образом, при формировании критерия оптимальности можно рассматривать функциональные зависимости между переменными и параметрами производственно-технологического процесса как постоянные.

Основной задачей любых оптимизационных мероприятий на производстве является максимальное сокращение длительности производственного цикла деталей и узлов, обеспечивая при этом заданные технологические параметры и требуемое качество производимых изделий. Для формирования критерия оптимальности необходимо определить ключевые параметры производственного процесса, определяющие эффективность производственной системы.

Рассмотрим ряд параметров, которые наиболее четко описывают состояние производственного процесса.

Размер партии запуска (V). Данный параметр определяется номенклатурным планом и зависит, как от требований по комплектности сборочных единиц, так и от возможностей цеха поставщика заготовок.

Выход годных из партии запуска (Q). Определяет стабильность технологического процесса и включает в себя как прямые, так и технологические потери с учетом внутрицеховых возвратов на доработку.

Нормированное время выполнения операций технологического процесса ($T_{\text{норм}}$). Характеризует время, используемое для определения трудоемкости изготовления деталей. Рассчитывается исходя из режимов обработки и не включает ряд операций, например контрольные.

Время переналадки оборудования при смене партий производимых деталей ($T_{\text{пер}}$). Определяет неизбежный простой оборудования, связанный с изменением номенклатуры производимых деталей.

Расстояние, проходимое деталью в процессе обработки (d). Показывает сложность межоперационного маршрута передвижения деталей в процессе их обработки.

Общая производственная площадь цеха (A). Определяет эффективность использования

производственной площади, а также характеризует реальные возможности оптимальной расстановки оборудования, обеспечивающего непрерывное движение деталей в потоке.

Средний уровень незавершенного производства (W). Показывает наличие в системе производственного задела способного затормозить сдачу вновь попавших в цех деталей.

Месячная программа по выпуску деталей (M). Характеризует обеспеченность цеха заказами на изготовление деталей, как правило, определяется номенклатурным планом на квартал.

Таким образом, общий вид производительности в качестве критерия оптимальности можно записать следующим образом:

$$P = f(V, Q, T_{\text{норм}}, T_{\text{пер}}, A, d, W, M). \quad (2)$$

Расшифровка основных параметров производственного процесса приведена в таблице.

Таблица

Перечень основных параметров производственного процесса

Переменная	Значение переменной	Единица измерения	Размерность
Зависимая P	Производительность	Шт./ч	Количество/время
<i>Независимые</i>			
$T_{\text{норм}}$	Нормированное время изготовления деталей	ч	Время
$T_{\text{пер}}$	Время переналадки оборудования при смене номенклатуры	ч	Время
Q	Выход годных из партии запуска	шт.	Количество
V	Размер партии запуска	шт.	Количество
A	Общая производственная площадь цеха	м ²	Расстояние
D	Расстояние проходимое деталью в процессе обработки между операциями	м	Расстояние
W	Средний уровень НЗП	нор./ч	Время
M	Месячная программа выпускаемых деталей	нор./ч	Время

Аналитическое выражение для количественной оценки производительности и ее изменения определим, используя методы теории размерностей [5]. Тогда формирование независимых параметров и безразмерных групп определится по выражению

$$\frac{PT_{\text{норм}}}{Q} \text{ зависит от } \left\{ \frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{пер}}}; \frac{Q}{V}; \frac{A}{d^2}; \frac{M}{W} \right\}. \quad (3)$$

Проверим адекватность полученного результата (3) при помощи теоремы Бакингема [6]:

- количество независимых параметров $N = 8$;
- количество размерностей $M = 3$;
- количество безразмерных групп $K = X - Y = 8 - 3 = 5$.

Таким образом, следует вывод что, выполняется условие адекватности по количеству безразмерных групп.

Рассмотрим более детально значимость каждой из получившихся безразмерных групп:

$T_{\text{норм}} / T_{\text{пер}}$ — доля простоя оборудования, вызванного переналадкой в общем цикле нормированного производственного процесса;

Q / V — характеризует стабильность технологического процесса;

A / d^2 — характеризует соотношение длины маршрута передвижения детали в процессе обработки к производственной площади цеха;

M / W — оценивает продолжительность оборота незавершенного производства в рамках цеха.

Полученную зависимость (3) можно представить в виде уравнения:

$$\frac{PT_{\text{норм}}}{Q} = \alpha \left(\frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{пер}}} \right)^{\beta} \left(\frac{Q}{V} \right)^{\gamma} \left(\frac{A}{d^2} \right)^{\delta} \left(\frac{M}{W} \right)^{\theta}, \quad (4)$$

где α — постоянный коэффициент, зависящий от типов производимых деталей; $\beta, \gamma, \delta, \theta$ — постоянные показатели степени, зависящие от типов производимых деталей.

Значения констант $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и θ подлежат определению экспериментальным путем с использованием фактически известных значений производительности, полученных при соответствующих значениях производственных параметров.

Выделив производительность в качестве критерия оптимальности, уравнение (4) можно записать в следующем виде:

$$P = \alpha \frac{Q}{T_{\text{норм}}} \left(\frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{пер}}} \right)^{\beta} \left(\frac{Q}{V} \right)^{\gamma} \left(\frac{A}{d^2} \right)^{\delta} \left(\frac{M}{W} \right)^{\theta}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что для повышения производительности участка необходимо обеспечить следующие условия:

- повысить выход годных деталей;
- сократить время переналадки оборудования;
- уменьшить расстояние, проходимое деталями в процессе их обработки;
- увеличить обрабатываемость незавершенного производства.

Комплексное выполнение указанных выше условий возможно только при построении производственных ячеек замкнутого цикла.

Полученная зависимость позволяет определить производительность как для одной детали, так и интегральную производительность для всего участка:

$$\frac{PT_{\text{норм}}}{Q} = \alpha \left(\frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{пер}}} \right)^{\beta} \left(\frac{Q}{V} \right)^{\gamma} \left(\frac{A}{d^2} \right)^{\delta} \left(\frac{M}{W} \right)^{\theta}, \quad (6)$$

где $P_i = \alpha \left(\frac{Q}{T_{\text{норм}}} \right)_i \left(\frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{пер}}} \right)_i^{\beta} \left(\frac{Q}{V} \right)_i^{\gamma} \left(\frac{A}{d^2} \right)_i^{\delta} \left(\frac{M}{W} \right)_i^{\theta}$; n —

количество типов деталей выпускаемых данным участком.

В свою очередь, зная фактическое значение производительности для определенной детали, можно рассчитать реальную длительность цикла ее изготовления, отражающую фактическое межоперационное пролеживание,

$$L_{\text{ц. факт}} = \frac{1}{P}. \quad (7)$$

Знание фактической длительности цикла изготовления детали позволяет более точно планировать запуск данной детали в производство, что в свою очередь позволяет снизить объем существующего страхового (неучтенного) производственного задела и, как следствие, уменьшить объем финансовых средств, задействованных в незавершенном производстве. В результате это увеличит размер оборотных средств предприятия.

Апробация подхода к использованию критерия структурной оптимизации, сформулиро-

ванного в виде уравнения (5), была проведена на производстве компрессорных лопаток газотурбинных двигателей изготавливаемых ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют». Значения констант α , β , γ , δ и θ были рассчитаны методом градиентного спуска на основе производственной статистики, взятой за период в двенадцать месяцев. Расхождения теоретических и фактических значений полученной производительности были зафиксированы в пределах 6%, что объясняется влиянием случайных производственных факторов и неконтролируемых возмущений производственного процесса.

Выводы

Предложенный и сформулированный критерий структурной оптимизации объединяет в себе параметры технологического и производственного процесса, что позволяет:

- проводить комплексную оценку эффективности всей производственной системы предприятия;
- определять оптимальные размеры партий запуска особо ответственных деталей;
- снижать себестоимость изготавливаемых деталей за счет повышения пропускной способности производственных участков.

Литература

1. Григорьев С.Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 3. С. 7—13.
2. Кутин А.А., Туркин М.В. Высокоэффективные машиностроительные технологии на основе ГПС нового поколения // Вестник МГТУ «Станкин». № 4. 2010. С. 41—47.
3. Соломенцев Ю.М. Современное автоматизированное производство // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 4. С. 125—132.
4. Калачанов В.Д., Джамай Е.В. Формирование и оптимизация ресурсного обеспечения программ авиастроительного производства // Авиакосмическая техника и технология. 2005. № 4. С. 61—69.
5. Хантли Г. Анализ размерностей. М.: Мир, 1970.
6. Pankhurst R.C. Dimensional Analysis and Scale Factors, Chapman and Hall. 1985.

Статья поступила в редакцию 12.09.2011