

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Дуюн Т. А., д-р техн. наук, доц.,
Гринек А. В., канд. техн. наук, доц.,
Сахаров Д. В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

tanduun@mail.ru

Предложен метод моделирования и оптимизации технологических процессов изделий, отличительной особенностью которого является сочетание структурной и параметрической оптимизации, возможность минимизации затрат при обеспечении требуемых параметров качества изделия. Эффективность предложенного метода продемонстрирована при оптимизации технологического процесса изготовления коллектора электрической машины.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, технологический процесс, метод динамического программирования, коллектор электрической машины.

Большинство машиностроительных производств имеют резервы повышения эффективности по экономическим, энергетическим, потребительским и др. критериям. Существует ряд объективных причин, мешающих эффективно решать задачи оптимизации производственного процесса в целом и технологических процессов в частности. В первую очередь это связано с тем, что процесс построения математических моделей, используемых для оптимизации, не является формализованным, он всегда содержит предположения (интуитивный этап), расчеты на их основании и сравнение с накопленной информацией. На окончательный результат существенно влияет степень адекватности математической модели изучаемому технологическому процессу. При построении математических моделей возникают серьезные методические и вычислительные трудности, так как оптимизацию технологического процесса сложного изделия можно отнести к классу оптимизации «больших систем». В связи с этим оптимизация проводится, как правило, для отдельных более простых частных задач. При проектировании технологических процессов наиболее распространена параметрическая оптимизация режимов резания для отдельных операций. При этом в пределах одного технологического процесса отдельные операции могут оптимизироваться с использованием критериев оптимальности, противоречащих друг другу, например, максимальной производительности и минимальной себестоимости. Операции, являющиеся оптимальными в

отдельности, не всегда приводят к оптимальному в целом технологическому процессу. Используется также структурная оптимизация при проектировании последовательности технологических операций или выбора их альтернативных вариантов, но она не учитывает возможности изменения технологических режимов, как результата параметрической оптимизации. Поэтому актуальной задачей является разработка методов проектирования технологических процессов, позволяющих комплексно решать задачу оптимизации, эффективно обеспечивая заданные параметры качества.

Сложность решения задач оптимизации технологических процессов состоит в том, что структурная и параметрическая оптимизации являются взаимно обуславливающими, так как технологические режимы и условия проведения отдельных операций определяют общую структуру технологического процесса. Параметры технологического оборудования определяют возможные технологические режимы, которые в свою очередь оказывают непосредственное влияние на показатели качества обработки и формируют структуру операций и технологического процесса в целом. Например, от возможностей оборудования, в частности жесткости элементов технологической системы, во многом зависит структура токарной операции. Если технологическая система имеет малую податливость, то точность обработки может быть обеспечена за один переход, в противном случае может потребоваться два и более перехода. Таким образом,

математическая модель технологического процесса должна иметь многоуровневую структуру, решая задачу оптимизации на уровне маршрута, операции и перехода.

Для задач оптимизации технологических процессов может быть успешно использован алгоритм динамического программирования (ДП) Беллмана в дискретной форме, который представляет собой особый математический метод оптимизации решений, специально приспособленный к многошаговым операциям. Основным достоинством данного метода является принцип пошаговой оптимизации с учетом развития процесса во времени. При этом каждый шаг оптимизируется не в отдельности, а с учетом всех его последствий в будущем. Динамическое программирование определяет оптимальное решение n -мерной задачи путем ее декомпозиции на n этапов, каждый из которых представляет собой подзадачу относительно одной переменной. Для случая оптимизации технологического процесса этапами будут являться последовательно выполняемые операции.

При проектировании технологического процесса существует множество вариантов структурных решений. Метод динамического программирования позволяет сократить число возможных вариантов перебора с использованием правила доминирования, подразумевающего сравнение вариантов будущего развития на каждом этапе и исключения бесперспективных вариантов. Фундаментальным принципом ДП, составляющим основу декомпозиции задачи на этапы, является оптимальность. Вычислительные аспекты решения оптимизационных подзадач на каждом этапе проектируются и реализуются по отдельности. При этом вычисления выполняются рекуррентно в том смысле, что оптимальные решения одной подзадачи используются в качестве исходных данных для следующей подзадачи.

Одним из наиболее важных этапов оптимизации является корректное назначение целевой функции. При оптимизации технологических процессов в качестве целевой функции используют, как правило, максимальную производительность или минимальную себестоимость. Данные функции являются взаимно исключающими и имеют ряд недостатков. Повышение производительности часто приводит к дополнительным затратам, например, связанным со снижением стойкости инструмента. Минимальная себестоимость, напротив, может не обеспечивать высокопроизводительные режимы. Поэтому в качестве целевой функции примем комплексный показатель, учитывающий как производительность, так и себестоимость – суммар-

ные затраты на реализацию технологического процесса:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i \Pi_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где Z – полные затраты, руб.; i – количество операций технологического процесса; C_i – приведенная стоимость выполнения i -той операции технологического процесса, включающая все текущие затраты, руб./мин; Π_i – продолжительность проведения i -той операции технологического процесса.

Использование выбранной целевой функции позволит получить максимальную производительность при минимальных затратах.

Рекуррентное выражение, используемое для решения оптимизационной задачи на i -том этапе, представим в следующем виде:

$$Z_i(x_i) = \min \{C_i \Pi_i + Z_{i+1}(x_{i+1})\}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где $Z_i(x_i)$ – затраты на проведение i -той операции, руб.; $Z_{i+1}(x_{i+1})$ – суммарные затраты на проведение всех последующих за i -той операций, руб.

Если нет исходного ограничения на общее количество затрат, то оптимизационное решение сводится к минимизации затрат на каждой операции. Оптимизационное решение каждой отдельной подзадачи выполняется с учетом системы ограничений. Система ограничений формируется условием обеспечения заданных значений вектора параметров качества. Поэтому, одним из наиболее важных этапов является представление в математической форме взаимосвязей между входными параметрами технологической операции, внутренними управляемыми и выходными параметрами качества. Входными параметрами будем считать параметры качества, полученные на предшествующей операции технологического процесса и исходные неизменяемые условия проведения выполняемой операции, например, параметры металлорежущего оборудования, оснастки, режущего инструмента и др. Управляемыми параметрами будем считать режимы резания, выходными – параметры качества, получаемые после проведения выполняемой операции (рис. 1). Важной особенностью является сочетание структурной и параметрической оптимизации: структура технологического процесса формируется одновременно с содержанием операций. Технологические условия проведения операций оптимизируются методом линейного программирования при введении систем ограничений, обеспечивающих заданные значения параметров качества. Использование параметров качества, полученных на предшествующей операции, в качестве входных пара-

метров управления технологической операцией позволит учесть технологическую наследствен-

ность.

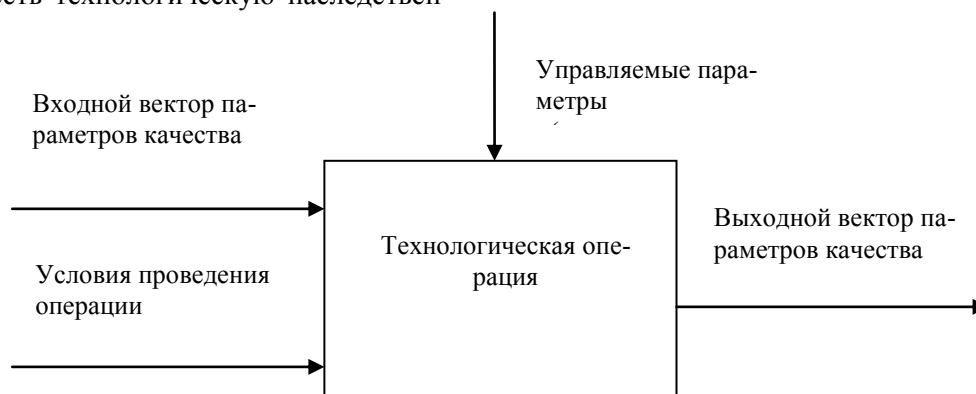


Рис.1. Схема управления технологической операцией

Таким образом, выделим основные этапы, необходимые для решения задачи оптимизации технологического процесса:

1. Анализируется типовой технологический процесс с точки зрения возможности наличия альтернативных вариантов, повышающих производительность или снижающих себестоимость.

2. Формируется вектор выходных параметров качества изделия, и записываются модели изменения параметров качества в процессе выполнения операций с учетом технологической наследственности.

3. С использованием теории графов строится граф типа «дерево», который отображает возможные варианты структуры технологического процесса.

4. Обосновываются технологические параметры выполняемых операций с учетом эксплуатационных нагрузок.

5. Назначается целевая функция и вид экстремума.

6. Для каждой технологической операции формируется система математических выражений (ограничений), отображающих взаимосвязь обеспечиваемых параметров качества с технологическими параметрами.

7. Производится оптимизационное решение методом динамического программирования.

Используем представленную последовательность для оптимизации технологического процесса изготовления коллектора электрической машины.

Коллектор (рис.2.) является наиболее сложным и ответственным звеном электрической машины, определяя надежность и ресурс работы этого класса машин. Это связано с особенностями конструктивного исполнения, сложным напряженно-деформированным состоянием в условиях эксплуатации и жесткими требованиями, предъявляемыми к качеству рабочей по-

верхности для обеспечения благоприятных условий работы скользящего контакта.

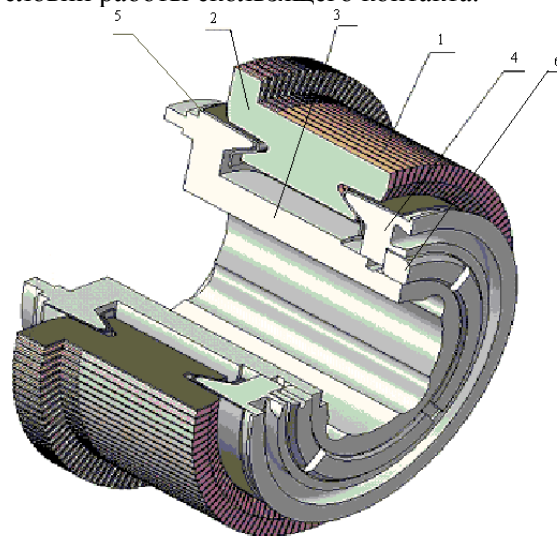


Рис. 2. Конструкция коллектора электрической машины:

- 1 – коллекторная пластина; 2 – изоляционная прокладка; 3,4 – передний и задний нажимные конусы; 5 – изоляционная манжета, 6 – гайка

Надежность и качество работы коллекторного узла во многом определяются технологией его изготовления, являющейся наиболее дорогостоящим и длительным этапом при производстве электрических машин. Традиционная технология имеет ряд недостатков и существенный резерв повышения эффективности, который может быть обеспечен за счет использования научно обоснованных технологических режимов и оптимизации технологического процесса.

Анализ типового технологического процесса изготовления коллекторов позволил выявить следующие альтернативные структурные решения и мероприятия, повышающие производительность и снижающие себестоимость:

1. В зависимости от исходной точности изготовления коллекторных пластин и требуемой точности формы коллектора сборка коллектор-

ных пластин в круговую арку может производиться по методу полной взаимозаменяемости или с использованием селективной сборки. Селективная сборка повышает точность, однако снижает производительность и увеличивает себестоимость изготовления.

2. В зависимости от требуемой точности формы коллектора и жесткости технологической системы используемого оборудования структура токарной операции на черновом точении может состоять из одного или более переходов.

3. В зависимости от числовых значений показателей качества коллектора, в частности шероховатости и твердости, в качестве окончательного метода может быть использовано традиционное шлифование или альтернативный метод – обкатыванием роликом.

Таким образом, конечный вектор показателей качества изделия может быть сформирован различным содержанием и последовательностью операций. Разработан граф, представляющий структурные варианты разрабатываемого технологического процесса. Каждый структурный вариант технологического процесса имеет различную производительность и себестоимость и характеризуется особой последовательностью изменения показателей качества. Целью является выбор очередности и содержания технологических операций, обеспечивающих заданные параметры качества при наименьших затратах труда и материальных ресурсов.

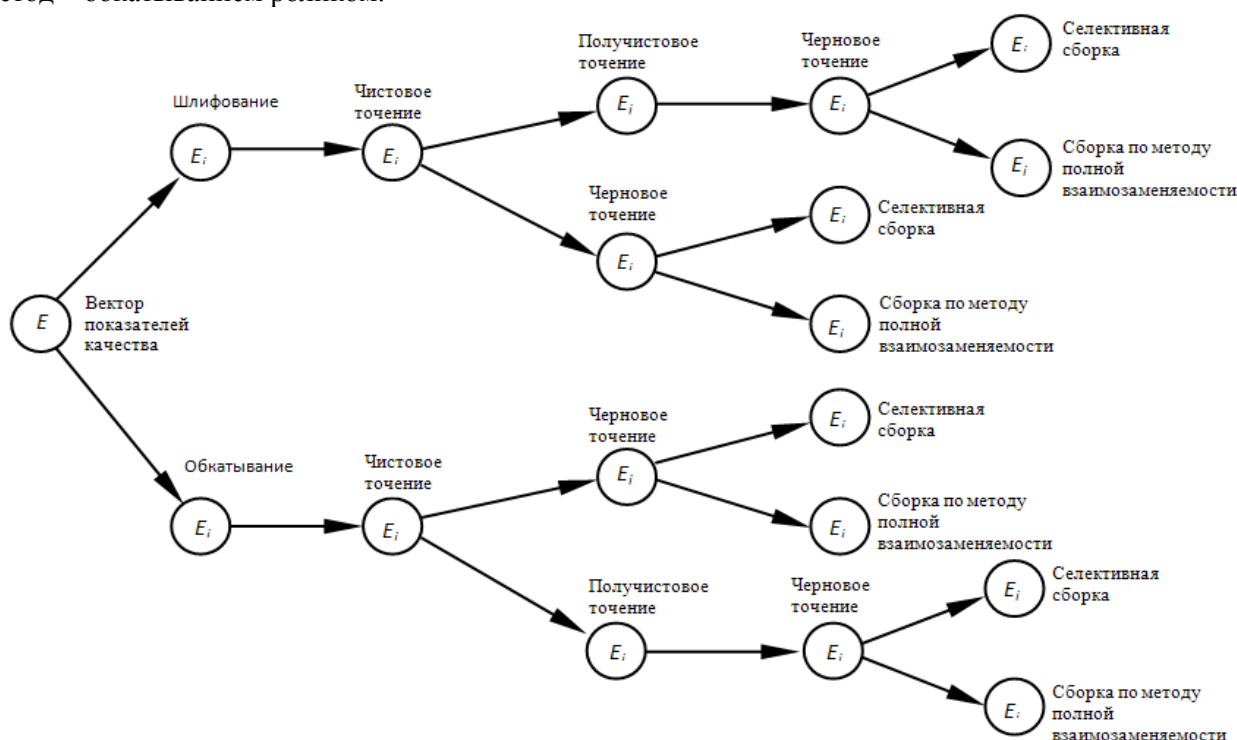


Рис. 3. Граф структурных вариантов технологического процесса изготовления коллектора: E – вектор конечных показателей качества; E_i – вектор показателей качества на i-той технологической операции

В систему ограничений для токарных операций входят: выражения, устанавливающие связь между получаемой шероховатостью поверхности и технологическими режимами; выражения, характеризующие силовые и энергетические характеристики процесса точения; выра-

жения, обеспечивающие допустимые параметры вибраций; обеспечиваемые значения параметров качества и предельные значения технологических режимов; выражения, определяющие достигаемую точность формы обрабатываемой поверхности

$$\Delta_{\text{сум}} \leq \Delta_{\text{доп}}, \quad \Delta_{\text{сум}} = \sqrt{3\Delta_{\text{и}}^2 + \Delta_{\text{у.д.}}^2 + 3\Delta_{\text{т.д.}}^2 + \Delta_{\text{г}}^2},$$

$$\Delta_{\text{у.д.}} = \frac{P_y (t - \Delta_{\text{у.д.}}^l)}{j_c}, \quad \frac{1}{j_c} = \frac{1}{j_{\text{суп}}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{j_{\text{п.б.}}} + \frac{1}{j_{\text{з.б.}}} \right), \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{и}} = \frac{\pi D I I_0}{10^6 s}, \quad \Delta_{\text{т.д.}} \leq \Delta_{\text{т.д.доп}}, \quad \Delta_{\text{г}} \leq \Delta_{\text{г.доп}}$$

где Δ_и, Δ_{уст}, Δ_{у.д.}, Δ_{т.д.}, Δ_г – соответственно погрешности износа режущего инструмента, уста-

новки заготовки, упругих и тепловых деформаций технологической системы, геометрических

неточностей оборудования, мкм; $\Delta_{y,d}$ – погрешность формы, полученная на предшествующей операции, мкм; $j_c, j_{суп}, j_{п.б.}, j_{з.б.}$ – соответственно суммарная жесткость технологической системы, жесткости суппорта, передней и задней бабки;

D_k – диаметр коллектора, мм; l – длина обработки, мм; I_0 – удельный износ инструмента, мкм/км.

Система ограничений для операции обкатывания имеет вид

$$Ra(s, v, P) = 1,5 - 1,98 \cdot 10^{-3} \cdot P - 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot v + 4,25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{Ra_{зад} \cdot P},$$

$$- 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot v \cdot P + 3,4 \cdot s^2 + 1,43 \cdot 10^{-6} \cdot P^2,$$

$$2 \leq \varphi \leq 3, \quad \varphi = \frac{\Phi_a + \Phi_b}{2}, \quad \Phi_a = \frac{a}{r}, \quad \Phi_b = b \left(\frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_k} \right), \quad a = 2,6n_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{\eta \cdot P}{\sum k}},$$

$$b = 2,6n_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{\eta \cdot P}{\sum k}}, \quad \eta = \frac{1 - \mu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \mu_k^2}{E_k}, \quad \sum k = \frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_k} + \frac{1}{r}, \quad (4)$$

$$h = h_{зад}, \quad h = \omega \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \quad \omega = \frac{1}{1 + 0,07R_{II}}, \quad R_{II} = \frac{1}{\sum k}, \quad N = N_{зад}, \quad N = \frac{2 \cdot a}{s},$$

$$v_{min} \leq v \leq v_{max}, \quad s_{min} \leq s \leq s_{max}, \quad P_{min} \leq P \leq P_{max}.$$

где $Ra_{зад}$ – заданное значение шероховатости поверхности; r – профильный радиус ролика, мм; D_p – диаметр ролика, мм; n_a, n_b – коэффициенты формы контакта; P – усилие обкатывания, Н; μ_p, μ_k, E_p, E_k – коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов ролика и коллектора соответственно; $N_{зад}$ – заданное количество циклов обкатывания; $h_{зад}$ – заданная глубина упроченного слоя; $v_{min}, v_{max}, s_{min}, s_{max}, P_{min}, P_{max}$ – соответственно минимально и максимально допустимые значения скорости обкатывания, подачи и усилия обкатывания.

В систему входят обеспечиваемые параметры качества, геометрические и физико-механические параметры обрабатываемого изделия и накатного инструмента, допустимые интервалы изменения технологических режимов, функции параметров качества, выраженные через технологические режимы. При необходимости в систему могут быть включены и другие ограничения.

При использовании разработанного алгоритма оптимизации для коллектора электродвигателя ДПЭ-52 (рабочий диаметр 250 мм) получены следующие результаты: сокращение затрат за счет исключения кругло-шлифовального станка и повышения стойкости накатного инструмента по сравнению с абразивным в 15 раз; сокращение времени за счет исключения операции полустого точения, совмещения операций чистового точения и обкатывания, исключения селективной сборки при обосновании точности изготовления коллекторных пластин, обоснования времени технологического нагрева; сокращение основного времени выполнения финишной операции в 7 раз при замене шлифования на обкатывание и основного времени выполнения операции чистового точения в 15 раз за счет изменения обеспечиваемой шероховато-

сти и режимов резания с $Ra1,25, s=0,05$ мм/об, $v=80$ м/мин, $r=1,5$ мм на $Ra1,6, s=0,2$ мм/об, $v=310$ м/мин, $r=3$ мм; уменьшение погрешности износа инструмента в 4 раза с 15,4 мкм до 3,85 мкм (инструментальный материал ВК3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Рыбак Л.А. Обеспечение надежности работы щеточно-коллекторного узла электрических машин постоянного тока с учетом технологической и эксплуатационной наследственности // Приводная техника. 2009. №2. С. 13–18.
2. Дуюн Т.А. Технологические методы повышения надежности работы коллектора // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». 2009. С. 47–52.
3. Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.
4. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П.И. Ящерицын. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.