

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,  
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: *gbtms@yandex.ru*

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2020

В работе показана методика оценки решений при проектировании технологических процессов. Методика применима при синтезе технологических процессов по способу многовариантной декомпозиции, когда проектирование выполняется на нескольких уровнях. Отбор решений в соответствии с предлагаемыми критериями позволяет резко сократить число просматриваемых вариантов синтезированных решений и целенаправленно управлять процессом проектирования.

*Ключевые слова:* машиностроительное производство, декомпозиция, критерии оптимальности, целевая функция, технологический процесс, системы автоматизированного проектирования технологических процессов.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-68-76**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Машиностроительное производство в настоящее время является по большей части многономенклатурным, относящимся к серийному и мелкосерийному типам производства. Этот факт предполагает малые сроки проведения технологической подготовки производства в связи с большим числом одновременно запускаемых в работу заказов.

Использование систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), как правило, заключается в оформлении с их помощью разработанных технологами процессов механообработки, а также в выборе из имеющихся баз данных модели оборудования и средств технологического оснащения.

Применение при проектировании в САПР ТП метода декомпозиции ограничивается необходимостью просмотра большого числа вариантов решений, что приводит к значительным временным затратам.

В связи с этим целью выполняемого исследования явилась разработка системы критериальных оценок для отбора целесообразных решений на уровнях декомпозиции процесса проектирования.

### **МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ**

Рассмотрим основные правила, которые определяют построение системы критериев (СК) на уровнях декомпозиции процесса проектирования (ПП).

Система критериев на уровнях декомпозиции [1, 2] ПП в автоматизированных системах проектирования технологических процессов – важная составляющая для оценки возможных вариантов.

Так как полученные варианты технологических процессов на верхних уровнях проектирования вследствие малой степени их подробности затруднительно оценить в окончательных параметрах технологического процесса, оценка выполнялась технологом. Предлагаемый подход лишен указанного недостатка.

Следует также отметить, что степень точности оценок качества технологии должна увеличиваться, и это должно обеспечивать сужение пространства поиска решений в районе оптимума.

Известен тот факт, что при многоуровневой декомпозиции наличие оптимальных решений на уровнях ПП не обеспечивают оптимума общего решения. Следовательно, чтобы не потерять при проектировании и переходе с уровня на уровень близкого к оптимальному общего решения, необходимо на каждом уровне проектирования технологического процесса оставлять несколько решений.

Для учета этого момента следует на основе экспертных оценок назначать интервальные критерии, что автоматически будет формировать некоторое число возможных вариантов.

Определены следующие важнейшие принципы, позволяющие создать СК:

1. Учет главных параметров и их влияния на результаты общего решения.
2. Количественный вид СК. Данное представление системы критериальной оценки гарантированно позволяет увидеть количественную связь параметров общего решения по технологическому процессу и численных величин критериев более высоких иерархических уровней и отражать изменение параметров технологического процесса.
3. Система критериев охватывает все уровни процесса проектирования, главные системные свойства технологического процесса и отражает изменения в производственной системе.
4. Система критериев должна быть системно связанной и отражать иерархию процесса проектирования.
5. Семантическое содержание системы критериальных оценок на всех иерархических уровнях должна отвечать логике и смыслу решаемой технологической задачи.
6. Отбор возможных вариантов с помощью СК должен обеспечивать на уровнях процесса проектирования постепенное уменьшение числа возможных решений.

## **ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РЕШЕНИЙ В САПР ТП**

**1. На первом уровне ПП – построение схемы ТПр** – применяются следующие критерии: технологической себестоимости  $C_m \rightarrow \min$ ; приведенных затрат неполного оперативного времени  $t_{on} \rightarrow \min$ ; максимума производительности процесса резания  $K_m \rightarrow \max$ . Данные критерии предполагают наличие параметров технологии, проектируемой на низшем уровне, что вызывает длительность итерационных процедур при проектировании ТПр.

К недостаткам такого подхода на первом уровне ПП можно отнести отсутствие взаимосвязи критериев с состоянием технологических подразделений; неявную связь с параметрами, описывающими решение данного уровня.

Основным параметром ТПр, которым можно варьировать на этом уровне, являются маршруты обработки поверхностей (МОП), отражающие определенные особенности спроектированного решения.

Проанализируем два параметра – мощность обобщенного маршрута обработки поверхностей,  $M_o = \cup \text{МОП}_i = \cup \{ \text{ПЕР}_j \}_i$ ,  $M_o = \cup \text{МОП}_i = \cup \{ \text{ПЕР}_j \}_i$ , где  $i$  – обрабатываемые поверхности детали,  $j$  – переход обработки,  $(\text{ПЕР})_j$ ; мощность пересечения (общность) методов обработки поверхностей детали,  $M_{II} = \cap \text{МОП}_i = \cap \{ \text{ПЕР}_{ji} \}_i$ . Проанализируем эти характеристики ( $M_o$  и  $M_{II}$ ) по такому параметру, как вид перехода механообработки.

Определим число элементов в данных множества  $M_O$  и  $M_{II}$  как  $N_O$  и  $N_{II}$ , их отношение  $K_{II} = N_O / N_{II}$  подвергнем анализу.

Возрастание  $K_{II}$  свидетельствует о реализации большего числа различных технологических методов и, соответственно, металлорежущего инструмента; об увеличении затрат на инструмент, простоев.

Сокращение  $K_{II}$  говорит о сокращения различных технологических переходов, уменьшении числа установов.

Проанализируем  $M_O$  и  $M_{II}$  по другому признаку – типу металлорежущего инструмента. Количество элементов –  $N^I_o$  и  $N^I_{II}$ , их частное определим как коэффициент  $K_{II} = N^I_o / N^I_{II}$ .

Величина  $K_{II}$  пропорционально характеризует число металлорежущего инструмента и денежные затраты на его эксплуатацию.

Введем коэффициент  $K_{III}$ , отражающий загрузку оборудования в технологических подразделениях:

$K_{III} = (Z_T / 0,85)^{m_1}$ , где  $Z_T$  – приведенная загрузка металлорежущих станков, реализующих  $M_O$ ;  $Z_T = \sum^n Z_{II_i}$ , где  $Z_{II_i}$  – приведенная загрузка  $i$ -го типа станочного оборудования,  $n$  – число единиц оборудования данного типа; 0,85 – загрузка металлорежущего оборудования, желательная для производства данного типа (может корректироваться);  $m_1$  – показатель степени.

В свою очередь  $Z_{II_i} = (z_i \times p_i) / p$ , где  $z_i$  – фактическая загрузка  $i$ -го типа металлорежущего оборудования;  $p_i$  – общее число переходов, выполняемых на  $i$ -м типе оборудования;  $p$  – общее число переходов, выполняемых на всех типах оборудования.

$K_{III}$  комплексно характеризует загрузку оборудования и работоспособность технологических подразделений. Можно также отметить, что данный коэффициент пропорционально связан с загрузкой рабочих мест и со степенью дифференциации и концентрации технологических процессов.

Рассмотрим произведение  $K_{II}$  и  $(1 \div K_{III})$ , обозначая его коэффициентом  $K_1^1$ :

$$K_1^1 = ( \cup MO_{II_i} / MO_{II_i} ) \cdot (1 \div K_{III}) = ( N_O / N_P ) \cdot (1 \div (Z_T / 0,85)^{m_1}).$$

$K_1^1$  характеризует структуру технологического процесса по технологическим методам и ожидаемое распределение методов по оборудованию и загрузку станков.

Рассмотрим  $K_2^1 = K_{II} \cdot (1 - K_{III})$ , или  $K_2^1 = ( N^I_o / N^I_P ) \cdot (1 \div (Z_T / 0,85)^{m_1})$ .

$K_2^1$  позволяет комплексно оценить структуру технологического процесса и загрузку оборудования предусмотренными переходами, т.е. имеет синтетический характер, но в большей степени связан с затратами, чем  $K_1^1$ .

Следовательно, критерий  $K_1^1 = E_1^1$  целесообразно применять, если целевая функция технологического процесса  $Q \rightarrow \max$ , а  $K_2^1 = E_2^1$  – при  $C \rightarrow \min$ :

$$K_{1\min} \leq E_1^1 \leq K_{1\max}; \quad K_{2\min} \leq E_2^1 \leq K_{2\max}.$$

Если целевая функция – минимизация технологического цикла  $T_u \rightarrow \min$ , то предусматривается дифференциация технологического процесса и

параллельно-последовательная обработка. Тогда загрузка технологических подразделений во времени не учитывается ( $K_{III} = 1$ ), а  $K_1^1$  смещен в сторону увеличения; поэтому критерий  $E_3^1 = K_{II}$ :

$$K_{3\min} \leq E_3^1 \leq K_{3\max}.$$

Значения  $K_{1\max}, K_{2\max}, K_{1\min}, K_{2\min}, K_{3\max}, K_{3\min}$  должны устанавливаться на основе опыта работы производственных подразделений и анализа расчетных и фактических параметров их работы. Рекомендуемые значения критериев приведены в табл. 1.

Таблица 1. Интервалы критериев

Детали	$K_{1\min}^1$	$K_{1\max}^1$	$K_{2\min}^1$	$K_{2\max}^1$	$K_{3\min}^1$	$K_{3\max}^1$	$m_1$
Корпусные детали вращения	1,5	3,6	1,9	3,4	1,8	4,5	0,8
Диски, втулки	1,9	3,8	1,95	3,6	1,9	4,4	0,8
Валы непустотелые	1,7	4,3	1,95	3,9	1,8	4,7	0,8

**2. На уровне проектирования маршрута обработки детали** используются следующие критерии: максимум производительности технологической операции  $Q_{оп} \rightarrow \max$ ; минимум приведенных затрат  $C_{пр.оп} \rightarrow \min$ ; минимум технологической себестоимости  $C_{т.оп} \rightarrow \min$  и станкоемкости  $T_{штк} \rightarrow \min$  [4]. Критерии ориентировочны, так как технологические расчеты еще не конкретны.

Введем коэффициент  $K_0 = \kappa / q$ , где  $\kappa$  – число технологических операций механической обработки в маршруте обработки детали;  $q$  – количество этапов механической обработки, предусмотренных решениями на первом уровне ПП. Возрастание  $K_0$  будет означать более дифференцированные операции технологического процесса, снижение – более концентрированные.

Проанализируем формулу  $K_d = (L_p / L_d)^{m_2}$ , где  $L_d$  – величина партии деталей, с которой целесообразна дифференциация ТПр;  $L_p$  – величина фактической партии, запускаемой в производство. При возрастании партии изделий  $L_p$  следует повышать уровень дифференциации технологии. Справедливо и обратное.

Введем коэффициент  $K_{III}^2$ , учитывая, что уже выяснены группы оборудования в пределах типа:

$K_{III}^2 = (Z_r / 0,85)^{m_1}$ , где  $Z_r$  – загрузка по группам станочного оборудования в пределах типа;  $Z_r = \sum Z_{ггн}$ , где  $Z_{ггн}$  – обобщенная загрузка  $i$ -й группы станков,  $Z_{ггн} = (Z_i \cdot p_i) / p$ ;  $Z_i$  – фактическая загрузка  $i$ -й группы станков.

Проанализируем следующие зависимости:

1)  $K_1^2 = K_0 \cdot (1 \div K_{III}^2)$ . Значение  $K_1^2$  отражает структуру спроектированного технологического процесса и состояние технологических подразделений. Следовательно, выражение  $K_1^2 = (\kappa / q) \cdot (1 \div (Z_r / 0,85)^{m_1})$  можно реализовать как критерий  $E_1^2$  (верхний индекс означает уровень), когда целевая функция технологического процесса  $Q_{оп} \rightarrow \max$  (верхний индекс означает уровень):  $K_1^2 \min < E_1^2 < K_1^2 \max$ ;

2)  $K_2^2 = E_2^2 = K_0 \cdot (1 \div (K_{III}^2 \cdot K_d))$ .  $K_d$  отражает экономический аспект технологии. Тогда, при  $K_1^2 \min = K_2^2 \min$  и  $K_1^2 \max = K_2^2 \max$  и  $L_p \leq L_d$  ( $K_d < 1$ ), соблюдение

неравенства  $K_2^2 \min < E_2^2 < K_2^2 \max$  определяет уменьшение  $K_o$ , т.е. концентрацию операций. Критерий следует использовать при целевой функции технологического процесса  $C \rightarrow \min$ .

При целевой функции технологического процесса  $T_{ц} \rightarrow \min$ ,  $E_3^2 = K_3^2 = K_o$  и критерий  $K_3^2 \min < E_3^2 < K_3^2 \max$ , его интервал должен быть смещен в сторону более высоких значений. Значения интервалов для критериев данного уровня показаны в табл. 2.

Таблица 2. Интервалы критериев

Детали	$K_{1\min}^2$	$K_{1\max}^2$	$K_{2\min}^2$	$K_{2\max}^2$	$K_{3\min}^2$	$K_{3\max}^2$	$m_1$
Корпусные детали	1,4	1,8	1,6	2,1	1,9	2,6	0,85
Втулки, диски	1,2	1,5	1,5	2,3	1,7	2,2	0,85
Валы непустотелые	1,35	1,6	1,4	2,1	1,75	2,4	0,85

Выбор критериев осуществляется в соответствии с принципом справедливой относительной уступки [5], согласно которому «справедливым является такой компромисс, при котором суммарный относительный уровень снижения качества одного или нескольких критериев не превосходит суммарного относительного уровня повышения качества по остальным критериям», и определяется тем, что мы обеспечиваем выравнивание значений локальных критериев.

**3. На уровне синтеза структуры технологических операций** реализуют критерии:

- 1) неполного штучного времени  $t'_{шт}$ ;
- 2) неполного вспомогательного времени  $\sum t'_B$ ;
- 3) себестоимости всех переходов обработки  $\sum C_{пер i}$ .

Очевидна попытка нахождения соответствия между производительностью и себестоимостью, однако точное значение критериев получить пока затруднительно. Посмотрим оценку операции с помощью такого критерия, как неполное штучное время, оцениваемое по его изменяемым затратам:

$$t'_{шт} = (\sum l_{pxi} / S_i + \sum l_{xkj} / V_{xkj} + t_{cuk}) V,$$

где  $l_{pxi}$ ,  $l_{xkj}$  – длины рабочих и холостых перемещений режущего инструмента;  $S_i$ ,  $V_{xkj}$  – величина рабочей подачи, скорости холостых подач соответственно, мм/мин;  $t_{cuk}$  – время на  $k$ -ю смену режущего инструмента;  $V$  – вариант структуры технологической операции.

Рассмотрим возможность использования критерия  $t'_{шт}$  для различного вида станочного оборудования. Для станков с ручным управлением длины рабочих ходов и очередность смены инструмента сформированы при построении структур операций, а холостые перемещения самостоятельно формируются рабочим, следовательно, общая величина рабочих перемещений будет достаточно точным критерием.

Рассмотрим станки с числовым программным управлением (ЧПУ) по типам. Для токарных станков с ЧПУ важна оценка времени на рабочие перемещения, так как холостые строятся возможно малыми, а их скорости на порядок превышают скорости

рабочих. Затраты времени на смену инструмента незначительны, и ими можно пренебречь.

Для фрезерно-сверлильно-расточных станков с ЧПУ свои особенности. Объемная фрезерная обработка формируется типовыми траекториями, затраты времени на эти переходы для определенной детали приблизительно одинаковы. Поскольку затраты времени на переходы сверления, растачивания, развертывания, нарезания резьб и другие технологические операции зависят от длины резания и для конкретной детали постоянны, рациональность структуры операции определяется затратами времени на переход к обработке между поверхностями. Поэтому авторами предлагается выявленная зависимость [6] для определения изменяющихся составляющих времени на холостые хода  $t_{ев}$ . Для отражения свойств технологических подразделений, с учетом того, что модель станка определяется на данном уровне, можно ввести критерий  $K_{3q} = (Z_q/Z_{mo})^{m3}$ , где  $Z_q$  – загрузка  $q$  станка данной группы; средняя загрузка  $K$  станков группы,  $Z_{mo} = \sum Z_q / K$ . Тогда предложим критерии  $E^3$ . Для универсальных станков с ручным управлением при целевой функции  $Q \rightarrow \max$ , приняв

$$\forall v, q \left[ \sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \cdot K_{3q} \right]_{\min} = E_{1\min}^3 \text{ и } \left[ \sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \cdot K_{3q} \right] = E_1^3,$$

имеем

$$K_1^3 \cdot E_{1\min}^3 \geq E_1^3 \geq E_{1\min}^3,$$

где  $v$  – порядковый номер варианта;  $K_1^3$  – коэффициент, можно принять его равным 1,3...1,4.

Когда целевая функция  $C \rightarrow \min$ , то исходя из предположения, что затраты на амортизацию оборудования и инструмента пропорциональны величинам рабочих перемещений, можно записать выражение для общих затрат  $Z_{ql}$ :

$$Z_{ql} = \left( \sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \right) \cdot C_{cq} + \sum_{l=1}^n \left( \left( \sum_{pxj}^{p_i} l_{pxj} \right)_l \right) \cdot C_{ul},$$

где  $C_{cq}$  – затраты на станко-час работы  $q$ -го станка без учета затрат по инструменту;  $C_{ul}$  – затраты по  $l$  инструменту ( $l=1, n$ ), отнесенные к 1-му часу процесса резания;  $l_{pxjl}$  – величина  $j$ -го рабочего перемещения  $l$ -го инструмента,  $j=1, p_i$ ;  $\sum_{l=1}^n \left( \sum_{pxj}^{p_i} l_{pxj} \right)_l = \sum_{pxiv}^m l_{pxiv}$ ;  $m=n \cdot p_i$  – общее число рабочих перемещений инструмента.

Приняв  $\forall (q, l(Z_{ql}))_{\min} = E_{2\min}^3$ , имеем критерий  $E_2^3$ : рекомендуется принять  $K_2^3 = K_1^3$ . Если целевая функция  $T_{II} \rightarrow \min$ , то загрузку станков можно не учитывать.

Введем обозначения  $\left( \sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \right) = E_3^3$  и  $\forall (v) \left( \sum_{pxiv}^m l_{pxiv} \right)_{\min} = E_{3\min}^3$ . Будем иметь:

$$K_3^3 \cdot E_{3\min}^3 \geq E_3^3 \geq E_{3\min}^3. \text{ Можно принять } K_3^3 = K_1^3 = K_2^3.$$

Для токарных станков с числовым программным управлением критерии сходны с критериями для станков с ручным управлением:

$$E_{4T}^3 = E_1^3(Q_\phi \rightarrow \max), E_{5T}^3 = E_2^3(C \rightarrow \min), E_{6T}^3 = E_3^3(T_u \rightarrow \min).$$

В работе [6] доказано, что для многооперационных станков целевые функции  $Q_{оп} \rightarrow \max$  и  $C \rightarrow \min$  формируют схожие по структуре операции, в связи с чем следует применять критерии  $E_7^3 = E_8^3 = t'_{ev} \cdot K_q$ .

Введя  $\forall v, q(t'_{ev} \cdot K_q)_{\min} = E_{7,8\min}^3$ , будем иметь

$$K_3^3 \cdot E_{7,8\min}^3 \geq E_{7,8}^3 \geq E_{7,8\min}^3.$$

Если целевая функция  $T_{ц} \rightarrow \min$ , то  $E_9^3 = t'_{ev}$ ,  $E_{9\min}^3 = t'_{ev\min}$ , а  $K_9^3 \cdot E_{9\min}^3 \geq E_9^3 \geq E_{9\min}^3$ .

**4. На уровне нахождения структуры и параметров технологических переходов** критерии, кроме  $T_{ц} \rightarrow \min$ , были исследованы в [7–11].

Имеются зависимости  $Q$  и  $C$  от структуры и параметров выполнения технологического процесса. Для уточнения критерия необходим учет способа организации инструментального хозяйства.

Критерий  $K_1^4$  может быть записан в виде

$$K_1^4 = Q = f(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_j\}, t_e) \cdot K_{3q} \rightarrow \max,$$

где  $\{\{PP_j\}_i\}$  – множества параметров режимов обработки на  $i$ -х переходах;  $\{l_{pxi}\}$  – множество величин рабочих перемещений инструмента;  $\{C_j\}$  – временные потери, связанные с  $\{\{PP_j\}_i\}$ ;  $t_e$  – внецикловые потери, не связанные с  $\{\{PP_j\}_i\}$ .

Критерий  $K_2^4$  может быть записан в виде

$$K_2^4 = C = f_2(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_{cq}\}, C_{ul}) \cdot K_{3q} \rightarrow \min.$$

Если целевая функция  $T_{ц} \rightarrow \min$ , целесообразно рассмотреть такой критерий, как максимальная производительность резания  $K_{pi}$  на  $i$ -м рабочем ходе. Следует иметь в виду, что использование критерия предполагает централизованную наладку инструмента, без привлечения основного рабочего. Для любого перехода или рабочего хода  $K_3^4 = K_p$ , тогда  $K_3^4 = \sum((n_i \cdot s_i) / l_{pxi}) \rightarrow \max$ , где  $n_i, s_i$  – частота вращения шпинделя и подача на оборот соответственно. Если централизованная наладка инструмента не предусмотрена, то в качестве критерия следует установить  $K_3^4 = Q \rightarrow \max$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика назначения критериев на уровнях синтеза технологических процессов в САПР ТП учитывает организационные особенности единичного и мелкосерийного производства, в частности загрузки оборудования по группам и типам. Этот факт, с одной стороны, позволяет модифицировать критерии, с другой – стимулирует выравнивание загрузки металлорежущего оборудования и предотвращения «узких мест». Таким образом, реализуется один из предложенных автором [8] подходов в рамках организационно-технологической концепции проектирования технологических процессов – создание предпосылок для оптимального управления на стадии их проектирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Палюх Б.В., Бурдо Г.Б. Оптимизация процедур поиска технологических решений в комплексной САПР ТП – АСУТП // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2010. № 3 (47). С. 109–112.
2. Бурдо Г.Б. Исследование процедур проектирования технологий в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2010. № 4 (48). С. 109–113.
3. Палюх Б.В., Бурдо Г.Б. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многономенклатурном производстве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2010. № 2 (27). С. 44–54.
4. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. М.: Академия, 2007. 272 с.
5. Саркисян С.А., Квашнин В.И., Лисичкин В.А. Теория прогнозирования и принятия решений. М.: Высшая школа, 1993. 347 с.
6. Бурдо Г.Б., Рагозин Г.И. Закономерности автоматизированного проектирования технологий в ГПС: *сборник научных трудов*. Тверь: ТГТУ, 1995. С. 41–44.
7. Зарубин В.М., Капустин Н.М., Павлов В.В. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства. М.: Машиностроение, 1979. 247 с.
8. Burdo G.B. Improving the technological preparations for manufacturing production // *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. № 1. P. 49–56.
9. Капустин Н.М. Развитие систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) в машиностроении // *Информационные технологии*. 1996. № 5. С. 13–15.
10. Кунву Ли. Основы САПР CAD/CAM/CAE. СПб.: Питер, 2004. 559 с.
11. Гореткина Е.Н. Перспективы развития САПР // *PC WEEKRE*. 2016. № 35. С. 30–32.

**Для цитирования:** Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Оценка качества решений при проектировании операций механической обработки // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 68–76.



## EVALUATING THE QUALITY OF SOLUTIONS IN THE DESIGN OF MACHINING OPERATIONS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The paper shows a method for evaluating solutions in the design of technological processes. The method is applicable to the synthesis of technological processes using the method of multivariate decomposition, when the design is performed at several levels. Selecting solutions in accordance with the proposed criteria allows you to drastically reduce the number of viewed options for synthesized solutions, and purposefully manage the design process.

*Keywords:* machine-building production, decomposition, optimality criteria, target function, technological process, computer-aided design of technological processes.

### REFERENCES

1. Palyukh B.V., Burdo G.B. Optimization of procedures for the search for technological solutions in integrated CAD TP – APCS. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No. 3 (47), pp. 109–112. (In Russian).
2. Burdo G.B. The study of technology design procedures in computer-aided design and process control systems. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No. 4 (48), pp. 109–113. (In Russian).
3. Palyukh B.V., Burdo G.B. Theoretical foundations of an integrated automated system for designing and controlling technological processes in multinomenclature production. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskiye nauki*. 2010. No. 2 (27), pp. 44–54. (In Russian).
4. Kondakov A.I. SAPR tekhnologicheskikh protsessov. [CAD of technological processes]. Moscow: Akademiya, 2007. 272p.
5. Sargsyan S.A., Kvashnin V.I., Lisichkin V.A. Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya resheniy. [The theory of forecasting and decision making]. Moscow: Vysshaya shkola, 1993. 347 p.
6. Burdo G.B., Ragozin G.I. Patterns of computer-aided design of technologies in GPS. *Sbornik nauchnykh trudov TGTU*. Tver, 1995. Pp. 41–44. (In Russian).
7. Zarubin V.M., Kapustin N.M., Pavlov V.V. Avtomatizirovannaya sistema proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanosbornochnogo proizvodstva. [Automated system for designing technological processes of mechanical assembly production]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979. 247 p.
8. Burdo G.B. Improving the technological preparations for manufacturing production. *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. No. 1, pp. 49–56.
9. Kapustin N.M. Development of computer-aided design of technological processes (CAD TP) in mechanical engineering. *Informatsionnye tekhnologii*. 1996. No. 5, pp. 13–15. (In Russian).
10. Kunwu Lee. CAD Basics CAD / CAM / CAE. St. Petersburg: Piter, 2004. 555 p.
11. Goretkina E.N. Prospects for the development of CAD. *RS WEEKRE*. 2016. No. 35, pp. 30–32. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 24.08.2020; после рецензирования/revised: 16.10.2020;  
принята/accepted 15.11.2020

*Вестник Тверского государственного технического университета.*  
*Серия «Технические науки». № 4 (8), 2020*