

УДК 621.9.02 (Технические науки)

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ МОДУЛЬНОГО РАСТОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА**

*Кожин-Гребенщиков П.П., Маслов А.Р., Тивирев Е.Г.*  
 МГТУ имени Н.Э. Баумана,  
 Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5

**OPTIMIZATION OF MODULAR BORING TOOL DESIGNS**

*P.P. Kozhin-Grebenshchikov, A.R. Maslov, E.G. Tivirev*  
 Bauman Moscow State Technical University (BMSTU),  
 5, 2-nd Bauman str., Moscow, 105005, Russia  
 DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.94.1615

**АННОТАЦИЯ**

Показан один из путей создания оптимизированных конструкций модульных расточных инструментов для обработки ступенчатых отверстий в заготовках корпусных деталей изделий машиностроения.

**ABSTRACT**

One of the ways to create optimized designs of modular boring tools for processing stepped holes in blanks of body parts of mechanical engineering products is shown.

**Ключевые слова:** модульный, расточной, инструмент, математическая теория графов, параметр  
**Keywords:** modular, boring, tool, mathematical graph theory, parameter

**Введение**

Модульный расточной инструмент (МРИ) представляет собой сборные конструкции, которые компонуются из модулей различного функционального назначения и размеров для обеспечения технологической гибкости. В МРИ входят модули следующих типов: резцовые вставки, резцовые головки, переходники, удлинители и державки [1, 5]. Благодаря наличию подвижных соединений модулей имеется возможность компоновать комбинировать МРИ в соответствии с требованиями обработки.

Количество различных модулей в МРИ ограничено и относительно невелико. Число вариантов компоновок МРИ для выполнения заданного технологического перехода является конечным, что создает предпосылки для формализации процесса проектирования МРИ.

Логическое обеспечение, описывающее связь между параметрами заготовки технологического перехода и станка с конструкцией МРИ включает математическое обеспечение в виде совокупности математических методов решения задач проектирования МРИ, математических моделей технологической системы, включающей МРИ, и алгоритмов проектирования МРИ, где каждый модуль, входящий в МРИ, характеризуется рядом параметров.

**Цель исследования**

Определить конечное множество модулей, необходимых для осуществления технологического процесса обработки нескольких размерных модификаций однотипных деталей при различных последовательностях ввода МРИ в работу.

**Метод исследования**

Так как параметры  $i$ -го модуля МРИ образуют вектор параметров  $M_i$ , имеющий вид:

$$M_i = |P_{1i}, P_{2i}, \dots, P_{ki}|.$$

То каждому модулю  $i$  возможно поставить в соответствие вектор  $M_i$  его параметров  $P_{ji}$ , в том числе:

- функциональное назначение;
- размерные (длины, диаметры, присоединительные размеры и т.д.;
- инерционные (масса, координата центра масс, центральный момент инерции);
- жесткостные (угловая жесткость, приведенная к плоскости стыка, определяемая объемной и контактной жесткостью);
- технологические (диапазон регулирования резцовых вставок, присоединительные размеры для крепления на станке и т.п.);
- количественные (количество модулей с данной полной совокупностью остальных параметров в комплекте);
- организационные (номера стандарта, чертежа, фирменный код, ячейка на инструментальном складе и т.д.).

При этом вектор  $M_i$  содержит информацию, необходимую для проектирования МРИ, а значения параметров находятся во взаимной зависимости.

Если в состав Данноего ограниченного количества сборок МРИ входят  $N$  различных типоразмеров комплекта модулей. То, ставя в соответствие каждому типоразмеру вектор параметров, можно получить отображение комплекта на множество векторов параметров  $M$ , которое отображает полный состав комплекта:

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_N\}.$$

Тогда множество  $M$  может быть представлено как объединение подмножеств, образованных

исходя из значений одного из основных параметров конечного множества модулей - номинального наружного диаметра модулей МРИ.

**Результаты исследования и их обсуждение**

По признаку функционального назначения множество  $M$  может быть представлено объединением следующих подмножеств:

$$M = M_{кг} \cup M_{у\text{пг}} \cup M_{п\text{пг}} \cup M_{п} \cup M_{у} \cup M_{х}, \quad (1)$$

где  $M_{кг}$  - подмножество резцовых головок;  
 $M_{у\text{пг}}$  - подмножество удлинителей;  
 $M_{п\text{пг}}$  - подмножество переходников;  
 $M_{п}$  и  $M_{у}$  - подмножества соответственно переходников и удлинителей;  
 $M_{х}$  - подмножество державок для его крепления на станке.

Множество  $M$  также может быть представлено как объединение подмножеств, образованных исходя из значений одного из основных параметров унификации - номинального наружного диаметра модуля

$$M = M_{d \text{ ном}_1} \cup M_{d \text{ ном}_2} \cup \dots \cup M_{d \text{ ном}_n \text{ ном}}. \quad (2)$$

Пусть имеется функция, отображающая множество  $M$  на некоторое множество вершин

графа  $G$  таким образом, что каждому вектору  $M_i$  множества  $M$  становится в соответствие одна вершина  $x_i$  множества  $X$  (рис. 1).

Тогда совокупность возможных бинарных соединений модулей представится непустым множеством  $V$  ребер графа  $G$  или соответствием, показывающим связь вершин [2-4]. Соответствие  $\Gamma$  представляет собой отображение множества  $X$  на  $X$ .

При этом граф  $G = (X, V) = (X, \Gamma)$  и представляет собой граф со взвешенными вершинами. Вектор  $M_i$ , поставленный в соответствие вершине  $x$  графа  $G$ , является весом этой вершины, а значения параметров, образующие вектор, назовем параметрами  $i$ -го веса.

Граф  $G$  является ориентированным конечным графом общего вида [5,4]. Множество  $V$  ребер представляется объединением подмножеств дуг и петель. Соответственно (1) и (2) множество  $X$  вершин может быть представлено в виде объединения подмножеств, образованных по признакам как функционального назначения, так и номинального наружного диаметра:

$$X = X_{кг} \cup X_{у\text{пг}} \cup X_{п\text{пг}} \cup X_{п} \cup X_{у} \cup X_{х};$$

$$x = x_{d \text{ ном}_1} \cup x_{d \text{ ном}_2} \cup \dots \cup x_{d \text{ ном}_n \text{ ном}}.$$

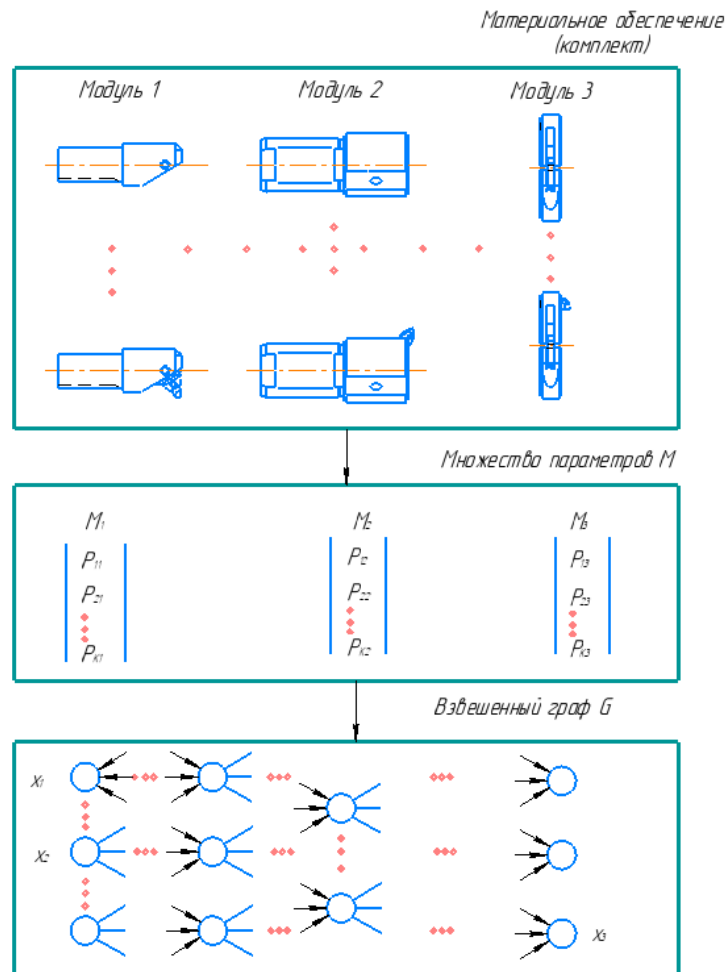


Рис. 1. Отображение материального обеспечения на множество вершин взвешенного графа

В этом случае задача проектирования МРИ может быть поставлена как задача поиска в графе:

1. Определить множество путей  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_z\}$  в графе  $G$  включающих вершины  $(x_q)_i \in P_i \in X$  с соответствующими весами  $(M_q)_i \in M_i$  образующих такое подмножество  $M_i \subseteq M$ , чтобы из модулей, обладающих свойствами  $(M_q)_i$  можно собирать  $i$ -й вариант МРИ для выполнения заданного технологического перехода на данном станке. Множество путей  $P$  соответствует множеству возможных конструкций ВИ, удовлетворяющих входным условиям.

2. Из полученного множества конструкций определить оптимальную по заданному критерию.

Проектирование, может быть, выполнено в три основных: этапа (приложение 1):

1) синтез вариантов расположения режущего инструмента (РИ) на модулях МРИ и последовательностей ввода РИ в работу во время рабочего хода;

2) синтез компоновок МРИ для каждого варианта расположения РИ;

3) выбор оптимального компоновочного решения.

В качестве входной информации для проектирования используется:

1. Информация о заготовке: количество растачиваемых ступеней

$w$ , длины ступеней  $L_i$ , расстояния между ступенями  $L_i$ .

2. Информация о положении заготовки на станке: расстояние от шпинделя до ближней ступени и ограничивающий диаметр, допустимое расстояние сквозного выхода и др.

3. Информация о технологическом переходе: количество резцов  $K_{pj}$  в МРИ, обрабатывающих  $j$ -ю ступень; номинальный диаметр растачивания  $i$ -м резцом  $D_{pi}$  ( $i=1 \dots \sum_{j=1}^w K_{pj}$ ); номера резцов, для которых допускается параллельная работа.

4. Информация о станке: модель, определяющая конструкцию хвостовика; параметры шпинделя; допустимые длины; масса МРИ; опрокидывающий момент  $M_{опр}$  МРИ.

На различных этапах проектирования возможны дополнительные требования информации [6].

Первый этап заключается в разработке схем расположения РИ на МРИ.

Пусть проектируемый МРИ должен расточить  $w$  поверхностей за один рабочий ход, причем для обработки  $j$ -й поверхности требуется  $K_{pj}$  РИ. При этом на МРИ будет закреплено всего  $n$  РИ, причем  $n = \sum_{j=1}^w K_{pj}$ ; каждый РИ настроен на номинальный диаметр растачивания  $D_{pj}$ . Для каждого из  $n$  резцов требуется определить очередность вступления в работу и для каждой последовательной пары РИ определить минимально и максимально допустимые осевые расстояния между ними.

Обозначим через  $b$  порядковый номер ввода  $i$ -го РИ в работу ( $b=1 \dots n$ ). При этом возможные комбинации расположения РИ на МРИ определяются перестановками на множестве  $\{b\}$  при следующих ограничениях

$$D_{p1} < D_{p2} < \dots < D_{p3} < \dots < D_{pn}; \quad (3)$$

$$b_q < b_{q+1} < \dots < b_{q+K_{pj}} \text{ для } \forall q = \sum_{m=1}^{j-1} K_{pm} \dots \sum_{m=1}^j K_{pm}. \quad (4)$$

Ограничение (3) является очевидным и характеризует расположение РИ на модулях МРИ исходя из возможности выполнения перехода растачивания вообще. Ограничение (4) имеет следующий смысл: для группы резцовых вставок, обрабатывающих  $j$ -ю поверхность, модуль МРИ большего номинального диаметра могут вступать в работу только после модуля МРИ с меньшим номинальным диаметром настройки.

В результате генерации вариантов перестановок на множестве  $\{b\}$  и селекции по ограничениям (рис.2) предлагается вариант порядка ввода РИ в работу. Для отдельного варианта, исходя из соотношений между длинами обрабатываемых ступеней и расстояний между ними с расстояниями между РИ, определяются допустимые осевые расстояния  $[L_{i, i+1}]_{\min}$  и  $[L_{i, i+1}]_{\max}$ .

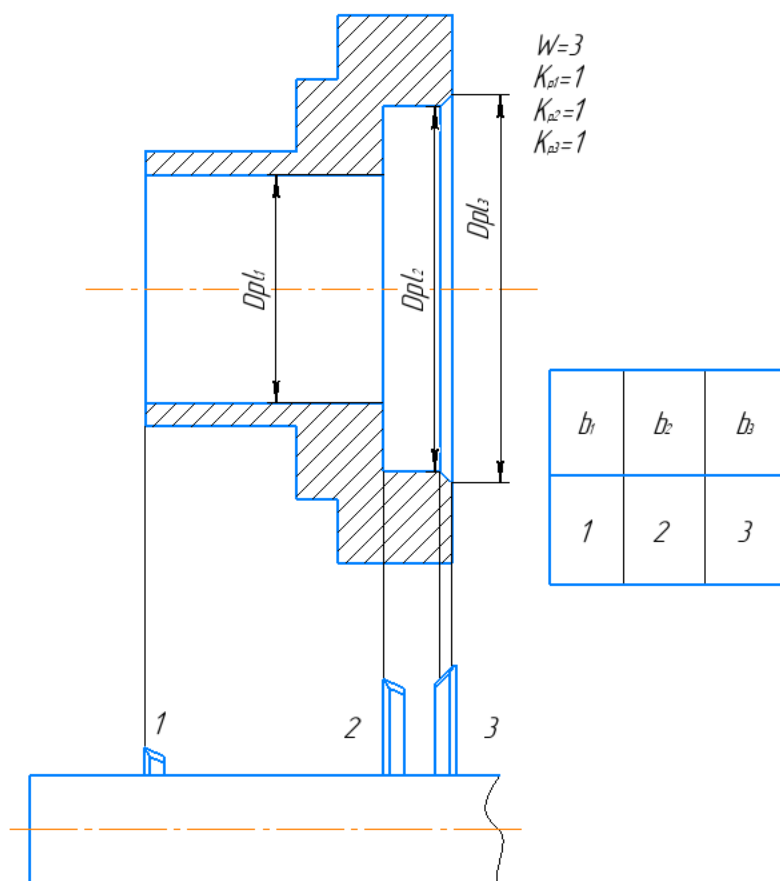


Рис. 2. Порядок ввода РИ в работу.

Выходной информацией этапа синтеза расположения РИ является вариант, который характеризуется:

- порядком ввода РИ в работу, описываемым множеством  $\{b\}$ ;
- множеством пар чисел  $[l_{i, i+1}]_{\min}$  и  $[l_{i, i+1}]_{\max}$  для последовательных пар РИ и последнего РИ со шпинделем.

Следующий этап проектирования МРИ заключается в синтезе компоновок МРИ для вариантов расположения РИ. Для одного варианта расположения РИ на модулях МРИ существует несколько компоновочных решений. Первое компоновочное решение определяется путём  $\Pi_i$  в графе  $G$  таким, что вершины, входящие в путь  $\Pi_i$  соответствуют модулям, из которых комплектуется МРИ. Задача определения соответствующих путей решается в две стадии:

1. Определить в графе  $G$  такие подмножества вершин, через которые обязательно должны пройти пути  $\Pi_i$ .

Так, если первый модуль МРИ содержащий РИ, настроенный на размер  $D_{pl1}=50\text{мм}$ , соответствует вершине  $x_1 \in x_{k1}$ , то другие вершины  $x_k \in x_{упл} \cup x_{ппг}$ . МРИ устанавливается на станке посредством хвостовика второго модуля, следовательно, последний модуль соответствует вершине  $x_3 \in x_x$ . Далее для  $D_{pl2}$  и  $D_{pl3}$  исходя из технологических параметров вектора параметров, определяется принадлежность модуля к

конкретному размеру. Таким образом, устанавливается  $n=3$  подмножеств в  $x_i'$  множества  $X$  таких, что для каждого  $i$ -го РИ и соответствующего ему модуля со своим вектором параметров найдется некоторая вершина  $x_i$  в графе  $G$ , причем

$$x_i \in x_i' \subseteq X \quad (i=1...3),$$

$$x_i' \subseteq x_{кг},$$

$$x_k' \subseteq x_{упл} \cup x_{ппг} \quad (k=1...3).$$

Хвостовик для установки МРИ на станке определяется конструкцией станка, и соответствующая ему вершина в графе  $G$  определяется:

$$X_z \in x_4' \subseteq x_x.$$

Возможность бинарного сочетания модулей  $i$  и  $k$  соответствует достижимости вершины, приписанной к  $k$  из вершины, приписанной к  $i$ . Тогда для модуля, соответствующего вершине  $x_k$ , можно определить подмножество  $X_k$ , причем  $x_k \in X_k$ , такое, что  $\forall x_k$  достижима из  $x_{k-1}$ . Пусть  $x_1$  – вершина, соответствующая первому модулю, тогда:

$$x_2''' = R(x_1) \cap x_2',$$

где  $R(x_1)$  - множество достижимости вершины  $x_1$ ;

$$x_3''' = \left\{ \bigcup_{k=1}^{|x_2|} R(x_k \in x_2'') \right\} \cap x_3'';$$

$$x_2''' = \left\{ \bigcup_{k=1}^{|x_1|} R(x_k \in x_1'') \right\} \cap x_1'' \text{ и т. д.};$$

В результате на данной стадии устанавливается  $n=3$  подмножеств  $x_i$  таких, что для каждого  $i$ -го РИ, настроенного на  $D_{pi}$ , в комплекте можно найти модуль, соответствующая которому вершина  $x_k \in x_i'''$ .

Подмножества  $x_i$  являются ограниченными. Они могут быть пересекающимися или даже тождественными. Любой искомый путь  $\Pi_m$  обязательно проходит по одной из вершин  $x_k$  каждого их  $n$  подмножеств  $X_{mj}$ . В результате различных сочетаний вершин  $x_k$ , принадлежащих последовательным подмножествам  $x_i'''$ , формируется множество вариантов прохождения путей в графе  $G$ .

2. После установления подмножеств, через вершины которых обязательно должен пройти любой из путей  $\Pi_m$ , необходимо установить подмножества, через которые проходят пути  $\Pi_m$  для обеспечения в компоновке МРИ необходимых осевых расстояний между последовательными РИ. В конструкции МРИ эта функция реализуется использованием регулировки осевого положения промежуточных модулей.

При рассмотрении двух вершин графа  $G$  -  $x_k$  и  $x_q$ , у которых  $x_k \in x_q$ , а  $x_q \in x_{i+1}$ , когда вершины  $x_k$  и  $x_q$  соответствуют модулям  $i$  и  $i+1$ , несущим два последовательных РИ обнаруживается, что для определения возможных путей из  $x_k$  в  $x_q$  следует рассмотреть порожденный подграф  $G_i$  графа  $G$ , образованный на множестве вершин  $x_i^{IV}$ , причем

$$x_i^N = \left\{ R(x_k) \cap Q(x_q) \cap \{x_n \cup x_y\} \right\} \cup x_k \cup x_q,$$

$$x_1^N = \left\{ R(x_{k1}) \cap Q(x_{q1}) \cap \{x_3 \cup x_{y1}\} \right\} \cup x_{k1} \cup x_{q1},$$

$$x_2^N = \left\{ R(x_{k2}) \cap Q(x_{q2}) \cap \{x_3 \cup x_{y2}\} \right\} \cup x_{k2} \cup x_{q2},$$

$$x_3^N = \left\{ R(x_{k3}) \cap Q(x_{q3}) \cap \{x_3 \cup x_{y3}\} \right\} \cup x_{k3} \cup x_{q3},$$

где  $Q(x_q)$  - множество достижимых положений вершины  $x_q$ .

Для установления пути от  $x_k$  в  $x_q$  необходимо рассмотреть возможные пути в подграфе  $G_i^{IV}$ . Пусть на данном этапе весами вершин, принадлежащих подмножеству  $x_i^{IV}$ , являются длины модулей, соответствующих вершинам. Тогда задача обеспечения осевого расстояния сводится к определению таких путей  $\Pi^{IV}$  в подграфе  $G_i^{IV}$ , чтобы

$$(l_{i,i+1})_{min} \leq \sum_{x_t \in \Pi^{IV}} h(x_t) \leq [l_{i,i+1}]_{max}, \quad (5)$$

$$(l_{1,2})_{min} \leq \sum_{x_t \in \Pi^{IV}} h(x_{t1}) \leq [l_{1,2}]_{max},$$

$$(l_{2,3})_{min} \leq \sum_{x_t \in \Pi^{IV}} h(x_{t2}) \leq [l_{2,3}]_{max},$$

где  $h(x_t)$  - вес вершины  $x_t$  или длина соответствующего модуля.

Чтобы сумма весов всех пройденных вершин обеспечила удовлетворение неравенства (5), необходим соответствующий проход по подграфу  $G_i$ . При этом для сокращения объема поиска необходимо чтобы стыки узлов соединения модулей МРИ были расположены в сечениях с наименьшим изгибающим моментом.

Применительно к поиску в подграфе это уточнение имеет тот смысл, что путь должен проходить по вершинам с разными весами, но при такой последовательности, чтобы обеспечивалось возрастание весов.

Количество путей в подграфе  $G_i$ , удовлетворяющих неравенству (5), является конечным. Рассматривая все пары вершин последовательных подмножеств  $x_i'''$  и  $x_{i+1}'''$ , для каждой пары определяется порожденный подграф  $G_i$  и в этом подграфе определяются пути, удовлетворяющие соответствующему этой паре вершин неравенству (5).

Аналогично определяются пути между вершиной и подмножества  $x_n'''$ , соответствующей модулю, несущему последний РИ, и вершиной из подмножества  $x_n$ , соответствующей хвостовику, причем

$$x_{n+1}''' = \left\{ \bigcup_{k=1}^{|x_n|} R(x_k \in x_n''') \right\} \cap x_{n+1}'';$$

$$x_4''' = \left\{ \bigcup_{k=1}^{|x_3|} R(x_k \in x_3''') \right\} \cap x_4'';$$

$$x_{n+1}^{IV} = \left\{ R(x_k \in x_n''') \cap Q(x_z \in x_{n+1}'') \cap \{x_n \cup x_y\} \right\} \cup x_z,$$

$$x_4^{IV} = \left\{ R(x_k \in x_3''') \cap Q(x_z \in x_4'') \cap \{x_3 \cup x_y\} \right\} \cup x_z,$$

далее определяется порожденный подграф  $G_i$  и находятся пути в нем.

Таким образом, в результате выполнения двух этапов проектирования МРИ формируются конечное множество путей  $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_e\}$  в графе  $G$ , соответствующих:

1. Различным последовательностям ввода РИ в работу, описываемым упорядоченным множеством  $\{b\} = \{b_1, b_2, \dots, b_e\}$  и соответствующим им схемам расположения РИ на МРИ.

2. Различным вершинам в подмножествах  $x_i'''$ .

3. Различным путям в порожденных подграфах  $G_i^{IV}$  между вершинами подмножеств  $x_i'''$  и  $x_{i+1}'''$ .

Каждый путь  $\Pi_m$  проходит через вершины графа  $G = \{x_{jm}, \dots, x_{zm}\}$ , соответствующие модулям

$\{M_{kn} \dots, M_{vm}\}$ , образующим множество  $e_m$ , которое соответствует  $m$ -й конструкции МРИ. Выполнение этих двух этапов приводит к определению множества  $\{\theta\}$  оптимальных конструкций МРИ.

#### Выводы

1. В результате выполнения рассмотренных этапов проектирования модульного расточного инструмента может быть сформировано оптимальное по выбранному критерию решение, которому соответствует упорядоченное множество модулей с соответствующими параметрами.

2. Получена система уравнений, при решении которой назначается упорядоченное множество модулей модульного расточного инструмента, необходимых для высокопроизводительной обработки ступенчатых отверстий в заготовках корпусных деталей.

3. Последовательная сборка указанного множества модулей, из числа имеющихся в заданном материальном обеспечении, может быть сформирован оптимальный модульный расточной инструмента для выполнения заданного технологического процесса обработки нескольких размерных модификаций однотипных деталей.

#### Список литературы

1. Маслов А.Р. Модульные инструментальные наладки // Станкоинструмент. 2021. №2 (023). – С. 86-92.
2. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств: учебник для ВУЗов // М.: «Машиностроение», 2006. 335 с.
3. Худяков М.П. Повышение эффективности

УДК 72.05

агрегатно-модульных расточных инструментов методами математического моделирования: дисс. ...канд. техн. наук // М.: МГТУ «Станкин». 1998. 213с.

4. Аслибемян С. Р., Мещеряков Р. К. Расширение технологических возможностей вспомогательного инструмента блочно-модульной конструкции // Станки и инструмент. 1988. № 2. С. 12-15.

5. Маслов А.Р., Смолкин Е.М., Тивирев Е. Г. Модульные расточные инструментальные наладки // Станкоинструмент. 2021. № 4 (025). С. 48-57

6. Темчин Г. И. Многоинструментные наладки. Теория и расчет. (2-е изд., испр.) // М.: Машгиз, 1963. 543 с.

#### Сведения об авторах

**Кожин-Гребенщиков** Павел Петрович – студент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ имени Н.Э. Баумана. Тел. +7(926)090-89-09.

**Маслов** Андрей Руффович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ имени Н.Э. Баумана. Тел. +7(958)832-85-03

**Тивирев** Евгений Геннадьевич – канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ имени Н.Э. Баумана. Тел. +7(499)263-65-03.

---

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ МНОГОУРОВНЕВЫХ АРХИТЕКТУРНО-СРЕДОВЫХ ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКИХ АНСАМБЛЕЙ СИНГАПУРА)

---

*Кравченко Е.Д.*

*ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
Россия, 344082, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105*

*Скопинцев А.В.*

*ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
Россия, 344082, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая*

### PROMISING MODELS OF MULTILEVEL ARCHITECTURAL AND ENVIRONMENTAL OBJECTS (ON THE EXAMPLE OF URBAN ENSEMBLES OF SINGAPORE)

*E.D. Kravchenko*

*Southern Federal University,  
Rostov-on-Don, 105 Bolshaya Sadovaya str., 344082, Russia*

*A.V. Skopintsev*

*Southern Federal University,  
Rostov-on-Don, 105 Bolshaya Sadovaya str., 344082, Russia*

*DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.94.1619*

#### АННОТАЦИЯ

Рассматриваются особенности формирования многоуровневых архитектурно-средовых комплексов, имеющих полифункциональную ансамблевою структуру. Целью исследования ставится задача выявления ряда перспективных моделей многоуровневых архитектурно-средовых объектов на основе обобщения опыта формирования городских ансамблей Сингапура. Границы исследования включают функционально-пространственные аспекты рассмотрения и формирования подобных моделей. В качестве метода анализа предлагается структурно-морфологический подход к исследованию городских ансамблей. Выделяется три