

УДК 621.924.93-047.58

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.10

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ В СУДОСТРОЕНИИ

**Ю. К. ЯГЛИЦКИЙ**

Херсонская филия Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, УКРАИНА  
e-mail: Y.Yahlytskyi@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** В статье рассматривается моделирование процесса гидроабразивной резки с использованием принципов системного проектирования.

Применение принципов системного проектирования позволяет систематизировать знания в любой области и определить целостность технологического процесса как системы с упорядоченным расположением операций как во времени, так и в пространстве. Такое представление структуры технологического процесса относится к уровню маршрутного описания.

В рамках статьи исследуется структурная оптимизация технологического процесса на уровне их маршрутного описания. Данная задача возникает при внедрении в производство нового прогрессивного технологического оборудования с неопределенной степенью концентрации технологических операций. Кроме того, внедрение альтернативных технологических методов в совокупности с сопровождающими их технологическими операциями требует структурного анализа с целью выбора наиболее экономичного решения и перераспределения имеющегося оборудования между действующими и внедряемыми технологическими процессами.

Рассматриваемая структурная оптимизация предусматривает: моделирование технологического процесса с построением различных моделей, выявление приоритетности критериев оптимизации на основе анализа действующей технологии, поиск оптимальной структуры.

Для моделирования процесса гидроабразивной резки была разработана структурно-функциональная модель, позволяющая оценить затраты на отдельные функциональные части процесса и их функции, рассматривать варианты перераспределения функций между элементами, выявлять функционально ненужные элементы в процессе.

Показано, что при проектировании технологического процесса синтез и оптимизация структуры процесса являются определяющими по отношению к оптимизации его функциональных параметров, при этом в процессе построения математической модели задействуется система количественных и качественных функциональных параметров технологического процесса. Предлагается решение оптимизационных задач проектирования технологических процессов осуществлять с использованием обобщенного критерия оптимизации и так называемой "пороговой оптимизации".

**Ключевые слова:** гидроабразивная резка; технологический процесс; системное проектирование; структурная оптимизация; математическое моделирование; обобщенный критерий оптимизации.

## MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF WATER-JET CUTTING IN SHIPBUILDING

**Yu. YAHLYTSKYI**

Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, UKRAINE

**ABSTRACT** The article considers modeling of the process of water-jet cutting with the use of system design principles.

Application of the system design principles allows systematizing the knowledge in any sphere and defining integrity of a technological process as a system with operations ordered both in time and in space. This representation of the technological process structure belongs to the level of the process flow description.

The article studies structural optimization of the technological process at the level of its flow description. This problem arises when brand new, advanced technological equipment with an undefined degree of concentration of technological operations is introduced into production. In addition, the introduction of alternative technological methods together with appropriate technological operations demands structural analysis with the purpose of selecting the most economical solution and redistributing the available equipment among the existing and prospective technological processes.

The structural optimization under consideration includes modeling of the technological process, identification of the priority of optimization criteria based on the analysis of the existing technology, and search for the optimal structure.

To render the process of water-jet cutting, a structural and functional model has been developed. It allows estimating the expenditures for individual functional components of the process and their functions, considering various options for redistributing functions among the components, and identifying functionally redundant components in the process.

As shown in the study of the technological process design, synthesis and optimization of a process structure define optimization of its functional parameters. At that, mathematical modeling engages a system of quantitative and qualitative functional parameters of the technological process. It is proposed to solve the optimization problems for designing of technological processes with the help of a generalized optimization criterion and threshold optimization.

**Keywords:** abrasive water jet cutting; technological process; system design; structural optimization; mathematical modeling; generalized optimization criterion.

### Введение

Одной из важнейших задач дальнейшего развития отечественного судостроительного

производства становится повышение инновативности судостроительных предприятий, которое выражается в способности четко и адекватно реагировать на

изменения на рынке путем выпуска новой или усовершенствования существующей продукции. Учитывая современные тенденции развития мирового судостроения, которые характеризуются повышением требований к качеству продукции и снижению сроков постройки судов, это становится возможным только при углублении технологической специализации и внедрении на этой основе новых прогрессивных технологий и высокопроизводительного оборудования.

### Цель работы

Проведение структурного анализа и оптимизации технологических процессов с использованием системных принципов и рационального сочетания традиционных методов моделирования и достижений теории множеств и теории графов.

### Изложение основного материала

Резка деталей является важным технологическим процессом (ТП), который в значительной степени определяет качество и сроки изготовления деталей, корпусных конструкций и судна в целом. В настоящее время, как одна из наиболее прогрессивных технологий, гидроабразивная резка (ГАР) все больше применяется в заготовительном и металлообрабатывающем производствах в таких отраслях, как судостроение, авиастроение и специальное машиностроение [1-3].

*Сущность процесса ГАР.*

Гидрорезка (водоструйная резка) - вид резки, при котором материал обрабатывается тонкой сверхскоростной струей воды. При гидроабразивной резке для увеличения разрушительной силы водяной струи в нее добавляются частицы высокотвердого материала - абразива.

*Общепринятые обозначения*

*ГАР* - гидроабразивная резка.

*WJC - Water Jet Cutting* - резка водяной (или водно-абразивной) струей.

*AWJC - Abrasive Water Jet Cutting* - абразивная водоструйная резка.

Технология ГАР основана на принципе эрозионного (истирающего) воздействия высокоскоростных твердофазных частиц абразива и водяной струи, которые, ударяясь о частицы изделия, отрывают и удаляют последние из полости реза. Скорость эрозии зависит от кинетической энергии воздействующих частиц, их массы, твердости, формы и угла удара, а также от механических свойств обрабатываемого материала.

Основными технологическими параметрами процесса ГАР являются: *скорость резки, вид, свойства и толщина разрезаемого изделия, внутренние диаметры водяного сопла и смесительной трубки, тип, размер, скорость потока и концентрация в режущей смеси абразивных частиц, давление* [4-8].

В общих чертах, можно обозначить следующие преимущества ГАР перед альтернативными методами (механическая, лазерная и плазменная резки): *большая точность, низкая температура резки, универсальность обработки, полное отсутствие не только механического, но и термического влияния на зону резки, технологичность процесса, автоматизация процесса, качество обработки, возможность резки любых материалов, экономичность процесса, доступность, безопасность*. Эти преимущества создают уникальные возможности для раскрытия материала при использовании ГАР [9-15].

В современных условиях при разработке мероприятий по внедрению инновационных производственных процессов (например, ГАР) все большее значение приобретает моделирование процессов, основанное на системном подходе к объектам производства и ТП. Системный подход к решению сложных технических задач основывается на анализе и синтезе структуры, функции и характеристик рассматриваемого объекта. При этом основой системных исследований является представление этого объекта (изделия, процесса проектирования, ТП и др.) в виде системы, состоящей из множества взаимосвязанных элементов, выступающих как единое целое. Все системное рассмотрение осуществляется в соответствии со структурой объекта - совокупностью устойчивых отношений между частями целостного объекта [16,17].

Рассмотрим в качестве примера структуру ТП обработки (резки) деталей. Данный ТП является искусственно созданной иерархической системой с детерминированной структурой. Системное проектирование ТП особенно с использованием ПК включает в себя использование двух основных принципов:

1) применение при проектировании ТП системного подхода, который основывается на следующих понятиях:

- ТП нужно рассматривать, с одной стороны, как просто перечень отдельных его элементов (операций, переходов и т.д.), а с другой стороны, как совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных элементов, т.е. необходимо говорить о структуре ТП. *Структура технологического процесса* - это множество его элементов и множество связей между ними. Если  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  - множество элементов ТП,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  - множество связей между элементами, то  $Str = \{V, S\}$  - структура ТП (рис.1);

- процесс проектирования ТП - это, с одной стороны, просто перечень отдельных его этапов (выбор обрабатываемого материала, определение маршрута обработки детали и т. д.), а с другой стороны, совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных этапов;

- рациональное разбиение процесса проектирования на части. Проектирование ТП - сложная задача. Общепринятый подход к решению сложных задач - разбиение их на простые задачи и их решение во взаимосвязи друг с другом. «Простые» задачи при проектировании ТП: выбор обрабатываемого материала, расчет режимов резания и т. д.;

- принятие оптимальных решений.

2) использование при проектировании ТП рационального сочетания традиционных (иногда «ручных») методов проектирования и достижений теории множеств, теории графов, теории оптимизации

и других современных системных наук, ориентированных на использование персональных компьютеров.

Применение принципов системного проектирования позволяет систематизировать знания в любой области и определить целостность ТП как системы упорядоченным расположением операций как во времени (определен порядок их следования друг за другом), так и в пространстве (определены рабочие места, на которых выполняются операции). Такое представление структуры ТП относится к уровню маршрутного описания [18].



Рис. 1 - Представление структуры ТП в виде графа-дерева

При проектировании синтез и оптимизация структуры создаваемого ТП являются определяющими по отношению к оптимизации функциональных параметров по двум причинам: во-первых, формирование структуры является начальным проектным этапом по отношению к расчету функциональных параметров, так как реализация этих задач представляет интерактивный взаимосвязанный процесс, который начинается все же с формирования структуры; во-вторых, ошибочность полученной структуры уже не сможет быть исправлена никакой функциональной оптимизацией.

Задачу оптимизации можно определить как поиск наилучшего решения  $s_{opt}$  из множества допустимых  $S_D = \{sj\}, j \in [1, n]$  по заданному критерию оптимизации. Если определено множество критериев, то уже имеет место многокритериальная оптимизация. Говоря о структурной оптимизации, следует заметить, что множество  $S_D$  является допустимым с точки зрения функции оптимизируемой системы. По отношению к ТП обработки (резки) деталей это говорит о том, что какую бы структуру технологии из множества  $S_D$  мы не выбрали, в любом случае получится

отвечающая требованиям производства и пожеланиям разработчика карта раскроя деталей. В рамках настоящей статьи будет рассматривается структурная оптимизация ТП на уровне их маршрутного описания. Данная задача возникает при внедрении в производство нового прогрессивного технологического оборудования с неопределенной степенью концентрации технологических операций. Кроме того, внедрение альтернативных технологических методов в совокупности с сопровождающими их технологическими операциями требует структурного анализа с целью выбора наиболее экономичного решения и перераспределения имеющегося оборудования между действующими и внедряемыми ТП. Рассматриваемая структурная оптимизация предусматривает решение трех основных задач: *моделирование ТП с построением различных моделей; выявление приоритетности критериев оптимизации на основе анализа действующей технологии; поиск оптимальной структуры.*

*Моделирование ТП с построением различных моделей.* Сущность моделирования заключается в замене реального физического процесса моделью -

искусственно создаваемым объектом и воспроизводящим ограниченное число его свойств. Если такая модель будет создана, то методами оптимизации с помощью компьютерного моделирования можно будет исследовать поведение этого процесса либо оценить различные алгоритмы, обеспечивающие функционирование данного процесса и применение этой модели для решения поставленной задачи: анализа, исследования, оптимизации или синтеза (проектирования) ТП и оборудования и, в конечном итоге, найти оптимальные соотношения между отдельными элементами процесса (временами операций, производительностями оборудования и пр.) и режимами их работы. Компьютерная модель может быть создана только на основе качественно формализованной информационной модели. Формализованная информационная модель представляет собой определенные совокупности знаков (символов), которые существуют отдельно от объекта моделирования, могут подвергаться передаче и обработке. Реализация информационной модели на компьютере сводится к ее формализации в форматы данных, с которыми «умеет» работать компьютер. Построение информационной модели начинается с системного анализа объекта моделирования. Результаты такого анализа формализуются: представляются в виде таблиц, графов, формул, уравнений, неравенств и пр. Совокупность таких описаний и есть теоретическая модель системы. Следующий этап формализации - теоретическая модель переводится в формат компьютерных данных и программ. Для этого используется либо готовое программное обеспечение, либо привлекаются программисты для его разработки. В конечном итоге получается компьютерная информационная модель, которая будет использоваться по своему назначению [18,19].

При разработке мероприятий по внедрению прогрессивной технологии гидроабразивной резки и для моделирования этого процесса была разработана структурно-функциональная модель (рис. 2). С помощью структурно-функциональной модели можно решать следующие задачи: оценивать затраты на отдельные функциональные части и их функции; рассматривать варианты перераспределения функций между элементами; выявлять функционально ненужные элементы в объекте.

Из структурно-функциональной модели ГАР видно, что скорость резки и качество резки зависят от различных параметров, затрудняющих создание общей математической модели, которая могла бы описать полный процесс ГАР. Поэтому при моделировании процесса ГАР необходимо рассматривать наиболее значительные параметры, а остальные принимать заданными для конкретных условий производства.

В зависимости от условий проектирования, вида самого ТП и рассматриваемого уровня его описания

используются те или иные методы и модели структурной оптимизации [17], которые могут быть и альтернативными по отношению к решаемой задаче. В качестве математической модели, генерирующей допустимое множество структур ТП, из которых осуществляется оптимизационный выбор, будем использовать сетевой граф  $G = (X, U)$ .

Вершинами  $X$  такого графа являются элементы множества возможных вариантов технологических операций, отличающихся концентрацией, используемыми технологическими методами (в том числе при получении исходного листа проката) и оборудованием. Дуги графа  $U$  – это логические связи возможности последовательного выполнения пар технологических операций, соответствующих инцидентным вершинам.

Формирование модели осуществляется путем анализа возможных многовариантных технологических структурных решений, а именно: различной концентрации операций; различного технологического оборудования для выполнения операции; различного уровня автоматизации; различных технологических методов. При этом в системном анализе при построении математической модели задействуется система количественных и качественных функциональных параметров ТП (рис. 2). В процессе анализа выявляется влияние параметров на конкретные операции базового ТП с последующим достраиванием вершин по результатам данного анализа (рис. 3).

На рис. 4 показан пример модели, построенной путем анализа возможных многовариантных технологических структурных решений, а именно: различной концентрации технологических операций (операция, соответствующая вершине  $X_{10}$  включает операции  $X_3, X_4, X_5$  вершин), использования технологического оборудования с различной степенью автоматизации (на графе это операции, соответствующие вершинам  $X_7$  и  $X_8$ ), различных технологических методов. Любой полный путь  $L_j = \{x_i\}, x_i \in X$  на таком графе, соединяющий вершины входа и выхода сети (для рассматриваемого примера - это вершины  $X_1$  и  $X_6$ ), является отображением допустимого варианта структуры ТП.

Поставив в соответствие каждой вершине графа  $x_i \in X$  вещественное число  $\varepsilon(x_i)$ , представляющее из себя значение выходного функционального параметра, соответствующего критерию оптимизации (приведенные затраты, штучное время, скорость и качество резки и др.), можно говорить об оптимальном решении, определяемом соотношением:

$$L_{\text{opt}} = \min \{L_j\}, \quad (1)$$

где  $L_j$  - длина пути  $L_j$ , определяемая в свою очередь формулой

$$L_j = \sum_{x_i \in L_j} \varepsilon(x_i), \quad (2)$$

а  $\{L_j\}$  - множество длин всех путей графа.

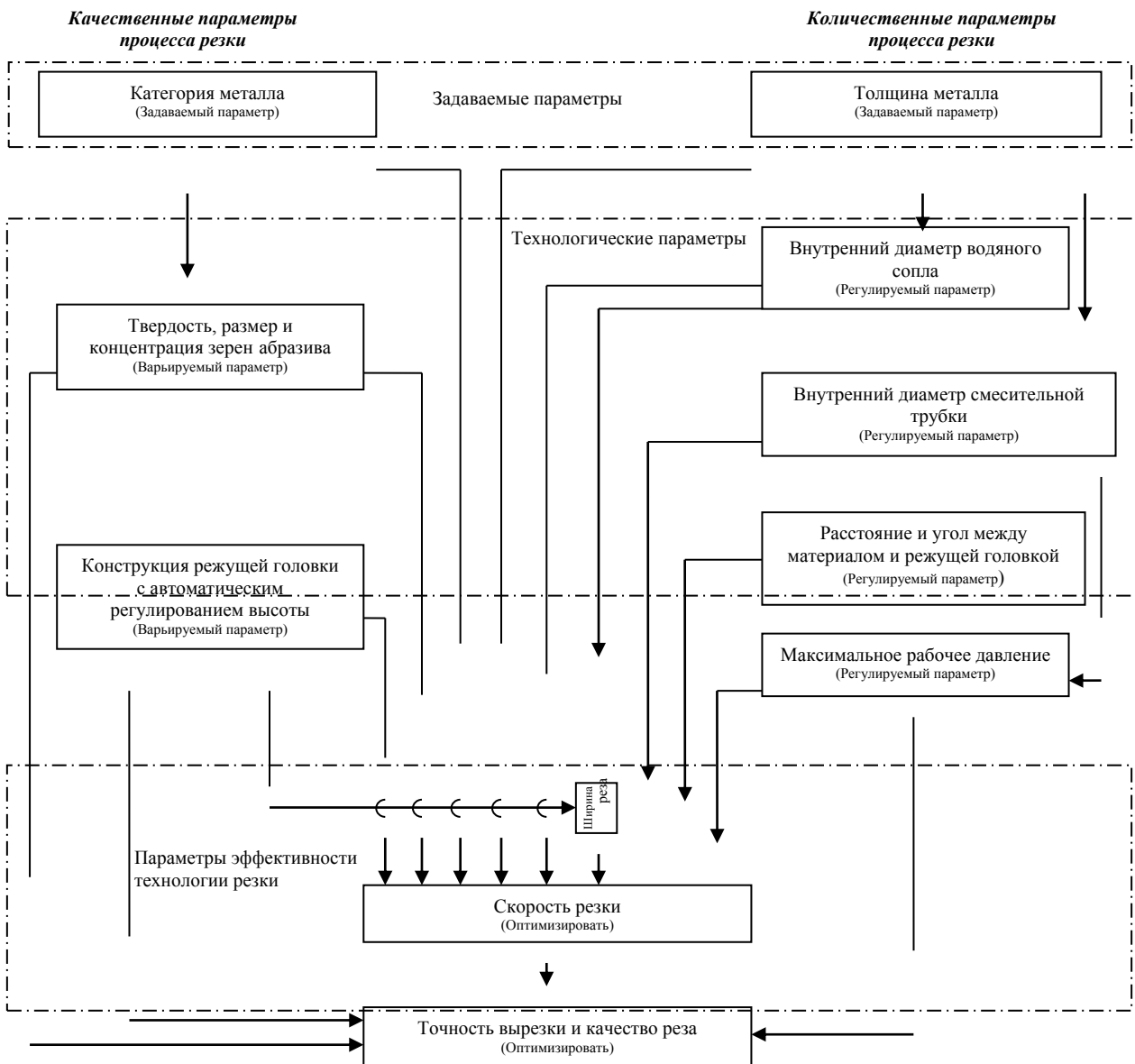


Рис. 2 - Структурно-функциональная модель процесса ГАР

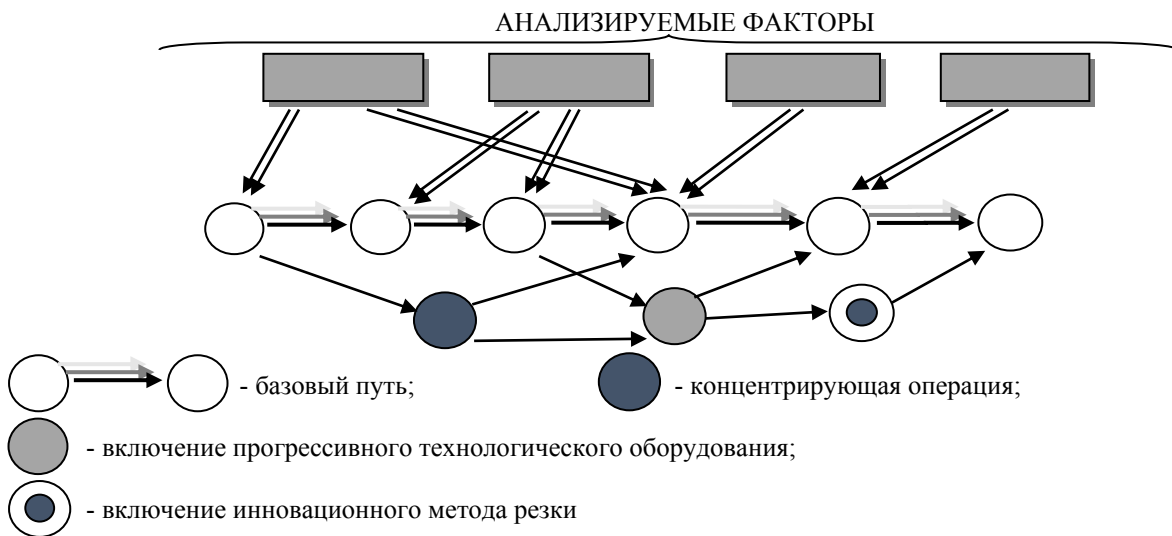


Рис. 3

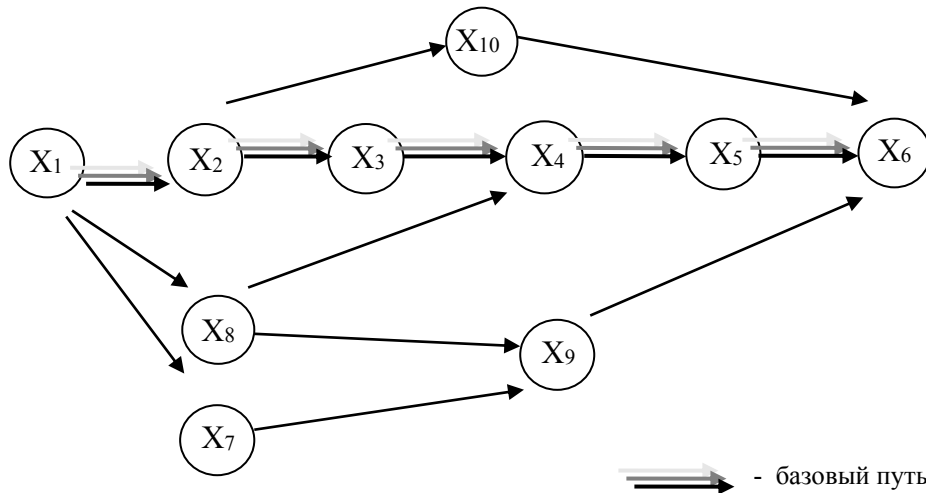


Рис. 4 - Граф технологических процессов вырезки деталей

Решение задачи в таком однокритериальном варианте не представляет трудности. Для этого достаточно использовать любой из известных алгоритмов поиска критического пути на сетях [20] или алгоритм поиска кратчайшего пути в ориентированном графе. Таким образом, оптимальной структурой обладает тот ТП, который соответствует полному пути, имеющему минимальную (максимальную) длину.

Однако поиск оптимального решения усложняется, когда приходится иметь дело с несколькими противоречивыми критериями, что наиболее вероятно в условиях реального производства. Это могут быть такие основные технико-экономические критерии, как максимальная прибыль и максимальная производительность производства. В этом случае при нормировании модели вершинам графа ставится в соответствие не одно, а несколько вещественных чисел, соответствующих значениям критериев оптимизации, и каждому критерию оптимизации будет соответствовать своя длина одного и того пути  $L_j$ .

Решение многокритериальных оптимизационных задач осуществляется двумя подходами [16] - с использованием обобщенного критерия оптимизации, в который сворачиваются все критерии, и так называемой "пороговой оптимизации".

*Оптимизация по обобщенному критерию*

Оптимизационная задача сводится к однокритериальной по параметру  $\varepsilon \sum(x_i)$ , который ставится в соответствие вершинам графа при его нормировании. Данный параметр рассчитывается по формуле [18]

$$\varepsilon \sum(x_i) = \sum_{k=0}^n \xi_k \cdot a_k \cdot \varepsilon^{-k}(x_i), \quad \sum a_k = 1 \quad (3)$$

где  $a_k$  - весовые коэффициенты, назначаемые экспертно и определяющие значимость

соответствующего критерия среди рассматриваемого множества;

$n$  - количество критериев;

$\varepsilon^{-k}(x_i)$  - величина параметра, соответствующего  $k$ -му критерию, приведенная к относительному безразмерному виду по формуле

$$\varepsilon^{-k}(x_i) = \varepsilon^k(x_i) / L_{max}^k \quad (4)$$

$L_{max}^k$  - максимальная длина среди всех путей графа по  $k$ -му критерию;

$\xi_k = \pm 1$  - коэффициент, принимающий положительное значение, если значение параметра  $\varepsilon^k$  при оптимизации стремится к минимуму, и отрицательное в противном случае.

Формула (3) не является единственным вариантом конструкции обобщенного критерия. Так, если возникает необходимость повышения чувствительности обобщенного критерия в определенных областях изменения входящих в него параметров, то выражение (3) может быть преобразовано к другому виду.

Задача поиска оптимальной структуры технологического процесса в этом случае сводится к решению однокритериальной оптимизационной задачи, т.е. поиску кратчайшего пути на сетевом графе по обобщенному критерию.

*Пороговая оптимизация*

Определяется основной критерий, который является главным при проведении оптимизации в данном случае. Основу метода пороговой оптимизации составляет построение по основному критерию упорядоченного множества путей графа  $S_D = \{L_j\}$  [3], отвечающих следующим требованиям: если  $t$  - это порядковый номер пути, то

$$L_t^k < L_{t+1}^k \quad \text{для } L_t \in S_D \quad (5)$$

Второстепенные критерии оптимизации формируют ограничения следующего типа:

$$L_j^k < L^k \quad (\text{ограничение сверху}) \quad \text{или} \\ L_j^k > L^k \quad (\text{ограничение снизу}) \quad (6)$$

где  $L_k$  - пороговое значение на длину пути по  $k$ -му второстепенному критерию, определяемое выражением (2).

#### *Выявление приоритета критериев оптимизации*

Системный анализ позволяет определять приоритетность используемых при оптимизации критериев. К основным нормативным показателям уровня технологии, которые и определяют основные критерии структурной оптимизации ТП, относятся приведенные затраты  $C_{\Sigma}$  и суммарное штучное время  $T_{\Sigma}$ . Анализ взаимосвязи функционального соотношения параметров  $C_{\Sigma}$  и  $T_{\Sigma}$  показывает, что внедрение более производительных методов обработки требует применения более сложного и дорогостоящего оборудования, что сопровождается увеличением приведенных затрат и, наоборот, использование дешевых менее универсальных станков приводит к дифференциации ТП, а, следовательно, и к увеличению времени вырезки деталей в соответствии с технологическими условиями.

### Обсуждение результатов

Повышение конкурентоспособности строящихся судов на внутреннем и внешнем рынках требует от судостроительных предприятий особого внимания к реализации процессов технического перевооружения действующего производства с использованием инновационных технологий.

Проектирование перспективных ТП при технологической подготовке проектов технического перевооружения судостроительного производства является сложной задачей, требующей математического моделирования и оптимизации получаемых проектных решений с использованием современных информационных технологий.

Особую важность приобретает задача структурной оптимизации перспективных ТП на уровне маршрутного описания, так как ошибочно построенная структура ТП сведет к нулю все усилия по реализации процессов технического перевооружения действующего производства [16-18]. Для решения задачи структурной оптимизации перспективного ТП необходимо произвести анализ структуры ТП действующего производства, сформировать оптимизационную математическую модель путем анализа возможных многовариантных технологических структурных решений. Кроме того, используя аппарат системного анализа, необходимо выявить приоритетность основных критериев оптимизации.

Основной целью системного анализа ТП на операционном уровне является выбор оптимального маршрута - такого пути на многовариантном графе, который является наилучшим по выбранным заранее критериям.

Так как улучшение одного критериального параметра приводит к ухудшению другого, то

невозможно минимизировать длину пути по каждому из критериев одновременно. Поэтому следует проводить многократную структурную оптимизацию ТП как по обобщенному критерию, так и с выделением главного критерия (пороговую оптимизацию). Основными критериями для выбора оптимального варианта ТП являются себестоимость и производительность.

На основе проведенных оптимизационных расчетов можно делать выводы о возможных вариантах построения структуры технически перевооружаемого судостроительного производства и получаемых в результате экономических, социальных и других эффектах.

### Выводы

Использование при проектировании ТП системных принципов с рациональным сочетанием традиционных методов моделирования и достижений теории множеств и теории графов позволяет выполнить структурный анализ и оптимизацию ТП с целью выбора наиболее экономичного решения и внедрения более производительных методов резки в судостроении, авиастроении и специальном машиностроении.

### Список литературы

1. Сазанов, И. И. Современное состояние и перспективы развития технологий гидроструйной и гидроабразивной резки / И. И. Сазанов, А. М. Лядник, С. В. Лядник // *Технология машиностроения*. – 2013. – № 3. – С. 11-14.
2. Лядник, С. В. Возможности технологии гидроабразивной резки / С. В. Лядник, И. И. Сазанов // *Технология машиностроения*. – 2012. – № 11. – С. 9-11.
3. Саленко, А. Ф. Гидроструйное резание: проблемы и перспективы метода / А. Ф. Саленко // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2002. – №10. – С. 20-23.
4. Полянский, С. Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки / С. Н. Полянский, А. С. Нестеров // *Вестник машиностроения* – 2004. – №5. – С. 43-46.
5. Галиновский, А. Л. Оценка технико-экономической оптимизации технологии гидроабразивного резания конструкционных материалов / А. Л. Галиновский, В. М. Елфимов // *Вестник МГИУ*. – 2008. – № 2. – С. 20-29.
6. Галиновский, А. Л. Научно-методическое обеспечение технологических параметров гидроабразивной обработки конструкционных материалов / А. Л. Галиновский, В. М. Елфимов // *Оборонная техника*. – 2008. – № 6. – С. 49-54.
7. Бреннер, В. А. Гидроструйные технологии в промышленности. Гидроабразивное резание / В. А. Бреннер, А. Б. Жабин, А. Е. Пушкарев, М. М. Щеголевский. М., 2003. – 279 с.
8. Иващенко, А. А. Технология гидроабразивной резки / А. А. Иващенко // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2002. – № 8.1. – С. 20-21.

9. **Miller, R.** Waterjet Cutting: Technology and Industrial Applications / **R. Miller.** – Fairmont Press, 1991. – 154 p.
10. **David, A.** Waterjetting Technology / **A. David, D. Summers.** – Printed in Great Britain by the Alden Press, Oxford, 1995. – 882 p.
11. **Zeng, J.** A study of brittle erosion mechanism applied to abrasive waterjet processes / **J. Zeng, T. J. Kim** // *Proc. 10th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, BHRA, England.* – 1990. – B1.
12. **Blickwedel, H.** Prediction of abrasive jet cutting efficiency and quality / **H. Blickwedel, N. S. Guo, H. Haferkamp, H. Louis** // *Proc. 10th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, BHRA, Fluid Engineering Centre, Cranfield, UK.* – 1990.
13. **Brandt, S.** AWJ parameters selection – a technical and economical evaluation / **S. Brandt, Z. Maros, M. Monno** // *Jetting Technology, BHR Group.* – 2000. – 41. – P. 353-366.
14. **Agus, M.** Optimization of abrasive – workpiece machining / **M. Agus, A. Bortolussi, N. Careddu, R. Ciccu, B. Grosso** // *Jetting Technology, BHR Group.* – 2000. – 41. – P. 171-182.
15. **Орел, В. Н.** Повышение эффективности гидроструйного резания использованием средств управляемого трещинообразования / **В. Н. Орел, В. Т. Щетинин, А. Ф. Саленко, Н. Н. Яцына** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* – 2016. – Т. 1, № 7 (79). – С. 45 – 56. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.59907.
16. **Перегудов, Ф. И.** Введение в системный анализ / **Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко.** – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
17. **Николаев, В. И.** Системотехника: методы и приложения / **В. И. Николаев, В. М. Брук.** – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
18. **Анферов, М. А.** К вопросу математического обеспечения структурной оптимизации технологических процессов в гибких производственных системах / **М. А. Анферов** // *Автоматизация технологических процессов и производств.* – Харьков: Харьк. авиац. ин-т. – 1988. – С. 16 – 25.
19. **Yong, Z.** Modeling of 3D abrasive waterjet machining part 4 - simulation of machining / **Z. Yong, R. Kovacevic** // *Jetting technology, BHR Group.* – 1996.
20. **Кофман, А.** Сетевые методы планирования / **А. Кофман, Г. Дебазей.** – М.: Прогресс, 1968. – 182 с.
5. **Galinovskiy, A. L., Elfimov, V. M.** Otsenka tekhniko-ekonomicheskoy optimizatsii tekhnologii gidroabrazivnogo rezaniya konstruksionnykh materialov [Evaluation of technical and economic optimization of the technology of hydroabrasive cutting of structural materials]. *Vestnik MGIU [Herald MGIU]*, 2008, 2, 20-29.
6. **Galinovskiy, A. L., Elfimov, V. M.** Nauchno-metodicheskoe obespechenie tekhnologicheskikh parametrov gidroabrazivnoy obrabotki konstruksionnykh materialov [Scientific and methodological support of technological parameters of hydroabrasive processing of construction materials]. *Oboronnaya tekhnika [Defense technology]*, 2008, 6, 49-54.
7. **Brenner, V. A., Zhabin, A. B., Pushkarev, A. E., Schegolevskiy, M. M.** Gidrostruynyie tekhnologii v promyshlennosti. Gidroabrazivnoe rezanie [Hydrojet technology in industry. Hydroabrasive cutting], 2003, 279.
8. **Ivaschenko, A. A.** Tekhnologiya gidroabrazivnoy rezki [Water jet cutting technology]. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov [Equipment and tools for professionals]*, 2002, 8.1, 20-21.
9. **Miller, R.** Waterjet Cutting: Technology and Industrial Applications. *Fairmont Press*, 1991, 154.
10. **David, A.** Waterjetting Technology. *Printed in Great Britain by the Alden Press, Oxford*, 1995, 882.
11. **Zeng, J., Kim, T. J.** A study of brittle erosion mechanism applied to abrasive waterjet processes. *Proc. 10th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, BHRA, England*, 1990, B1.
12. **Blickwedel, H., Guo, N. S., Haferkamp, H., Louis, H.** Prediction of abrasive jet cutting efficiency and quality. *Proc. 10th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, BHRA, Fluid Engineering Centre, Cranfield, UK*, 1990.
13. **Brandt, S., Maros, Z., Monno, M.** AWJ parameters selection – a technical and economical evaluation. *Jetting Technology, BHR Group*, 2000, 41, 353-366.
14. **Agus, M., Bortolussi, A., Careddu, N., Ciccu, R., Grosso, B.** Optimization of abrasive – workpiece machining. *Jetting Technology, BHR Group*, 2000, 41, 171-182.
15. **Orel, V. N., Schetinina, V. T., Salenko, A. F., Yatsyina, N. N.** Povyishenie effektivnosti gidrostruynogo rezaniya ispolzovaniem sredstv upravlyаемого трещинообразования [The use of controlled cracking to improve the efficiency of waterjet cutting] *Eastern European Journal of Enterprise Technology*, 2016, 1, 7 (79), 45-56, doi: 10.15587/1729-4061.2016.59907.
16. **Peregudov, F. I., Tarasenko, F. P.** Vvedenie v sistemnyy analiz [Introduction to system analysis]. *M.: Vysshaya shkola*, 1989, 367.
17. **Nikolaev, V. I., Bruk, V. M.** Sistemotekhnika: metody i prilozheniya [Systems engineering: methods and applications]. *Mashinostroenie [Engineering]*, 1985, 199.
18. **Anferov, M. A.** K voprosu matematicheskogo obespecheniya strukturnoy optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh [On the question of mathematical support of structural optimization of technological processes in flexible production systems]. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv [Automation of technological processes and production]*, Khar'kovskiy aviatsionnyy institut [Kharkov Aviation Institute], 1988, 16 – 25.
19. **Yong, Z., Kovacevic, R.** Modeling of 3D abrasive waterjet machining part 4 - simulation of machining. *Jetting technology, BHR Group*, 1996.
20. **Kofman, A., Debazey, G.** Setevye metody planirovaniya [Network planning methods], *M.: Progress*, 1968, 182.

#### References (transliterated)

1. **Sazanov, I. I., Lyadnik, A. M., Lyadnik, S. V.** Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya tekhnologii gidrostruynoy i gidroabrazivnoy rezki [The current state and prospects for the development of technology of hydro-jet and water-jet cutting]. *Tekhnologiya mashinostroeniya [Engineering technology]*, 2013, 3, 11-14.
2. **Lyadnik, S. V., Sazanov, I. I.** Vozmozhnosti tekhnologii gidroabrazivnoy rezki [Features of waterjet cutting technology]. *Tekhnologiya mashinostroeniya [Engineering technology]*, 2012, 11, 9-11.
3. **Salenko, A. F.** Gidrostruynoe rezanie: problemy i perspektivy metoda [Waterjet cutting: problems and prospects of the method]. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov [Equipment and tools for professionals]*, 2002, 10, 20-23.
4. **Polyanskiy, S. N., Nesterov, A. S.** Tekhnologiya i oborudovanie gidroabrazivnoy rezki [Technology and equipment for waterjet cutting]. *Vestnik mashinostroeniya [Mechanical Engineering Bulletin]*, 2004, 5, 43-46.

**Сведения об авторах (About authors)**

**Яглицкий Юрий Константинович** - к.т.н., доцент кафедры Судостроения и ремонта судов, Херсонская филия Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, пр. Ушакова, 44, г. Херсон, Украина, 73022; ORCID: 0000-0002-4865-0411; e-mail: Y.Yahlysyi@gmail.com.

**Yurii Yahlytskyi** - candidate of engineering sciences, associate professor of the Department of Shipbuilding and Ship Repair, Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ushakova ave., 44., Kherson, Ukraine, 73022; ORCID: 0000-0002-4865-0411; e-mail: Y.Yahlysyi@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Яглицкий, Ю. К.** Моделирование технологического процесса гидроабразивной резки в судостроении / **Ю. К. Яглицкий** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 78-86. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.10.

*Please cite this article as:*

**Yahlytskyi, Yu.** Modeling of the technological process of water-jet cutting in shipbuilding. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **45** (1321), 78–86, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.10.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Яглицький, Ю. К.** Моделювання технологічного процесу гідроабразивного різання у судобудуванні / **Ю. К. Яглицький** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 78-86. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.10.

**АННОТАЦІЯ** У статті розглядається моделювання процесу гідроабразивного різання з використанням принципів системного проектування.

Застосування принципів системного проектування дозволяє систематизувати знання в будь-якій області і визначити цілісність технологічного процесу (ТП) як системи з упорядкованим розташуванням операцій як в часі, так і в просторі. Таке уявлення структури ТП належить до розряду маршрутного опису.

В рамках статті досліджується структурна оптимізація ТП на рівні їх маршрутного опису. Дана задача виникає при впровадженні у виробництво нового прогресивного технологічного обладнання з невизначеним ступенем концентрації технологічних операцій. Крім того, впровадження альтернативних технологічних методів в сукупності з супроводжуваними їх технологічними операціями вимагає структурного аналізу з метою вибору найбільш економічного рішення і перерозподілу наявного обладнання між діючими і впроваджуваними ТП.

Розглядувана структурна оптимізація передбачає: моделювання ТП з побудовою різних моделей, виявлення пріоритетності критеріїв оптимізації на основі аналізу діючої технології, пошук оптимальної структури.

Для моделювання процесу гідроабразивного різання була розроблена структурно-функціональна модель, що дозволяє оцінювати витрати на окремі функціональні частини процесу і їх функції, розглядати варіанти перерозподілу функцій між елементами, виявляти функціонально непотрібні елементи в процесі.

Показано, що при проектуванні ТП синтез і оптимізація структури процесу є визначальними по відношенню до оптимізації його функціональних параметрів, при цьому в процесі побудови математичної моделі задіюється система кількісних і якісних функціональних параметрів технологічного процесу.

Пропонується рішення оптимізаційних задач проектування технологічних процесів здійснювати з використанням узагальненого критерію оптимізації і так званої "порогової оптимізації".

**Ключові слова:** гідроабразивне різання; технологічний процес; системне проектування; структурна оптимізація; математичне моделювання.

Поступила (received) 18.11.2018