



Оптимизация технологических процессов



Александр ПОПОВ
Alexander P. POPOV

Татьяна ПОПОВА
Tatiana A. POPOVA



Попов Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Попова Татьяна Александровна — преподаватель Московского государственного университета приборостроения и информатики, Москва, Россия.

Optimization of Technological Processes
(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 22)

Статья рассматривает проблемы структурной оптимизации технологических процессов, возможность учитывать возникающие неопределенности, применяя теорию принятия решений. На основе анализа различных методов авторами разработана математическая модель с использованием сетевых графов для многокритериальной структурной оптимизации перспективных технологических процессов. Показан алгоритм реализации предусмотренной процедуры, позволяющей находить упорядоченное множество полных путей, опираясь на неубывающую последовательность их длин. Гибкость поиска решений обеспечивают и сами возможности метода структурирования, и итерационный характер вычислений.

Ключевые слова: теория принятия решения, оптимизационные задачи, математическая модель, сетевые графы, структурная оптимизация, алгоритм, система, AMACONT.

При рассмотрении таких задач, как конструирование сложных технических систем, выбор технологических процессов по их изготовлению, вариантов эксплуатации и т.д., становится очевидным, что принятие неверного решения может повлечь за собой непоправимые последствия. Как правило, принятие решений человеком происходит с учетом имеющихся у него опыта и знаний, а в какой-то мере интуиции, однако в подавляющем большинстве случаев подобные шаги не являются оптимальными и даже порой ошибочными. В то же время понятно, насколько непросто избежать риска и неопределенностей, найти надежные способы достижения приемлемых результатов [1].

Существуют два подхода к решению многокритериальных оптимизационных задач в области проектирования технологических процессов: это использование обобщенного критерия оптимизации ε_Σ и «пороговая оптимизация» [2]. Как известно, пороговая оптимизация предусматривает выделение из всего допустимого множества решений s_0 подмножеств $S_i \subset S_0, i \in [1, n]$ (n — количество второсте-

пенных критериев), определяемых вводимыми ограничениями на допустимые значения второстепенных критериев с последующим поиском посредством множества $S^* = \bigcap_{i=1}^n S_i$ решения, имеющего мини-

мальное (максимальное) значение основного критерия оптимизации (см. рис. 1). И если множество S_D является допустимым с точки зрения функционирования оптимизируемой системы (т.е. реализации функции данной системы по отношению к системе более высокого уровня), то множество S^* – это допустимое множество решений, удовлетворяющее всем ограничениям на второстепенные критерии, и именно с опорой на него реализуется оптимизация по основному критерию [3].

Стоит отметить, что при техническом перевооружении предприятий, тем более в современных условиях, имеют место неформализуемые критерии оптимизации – такие, как особенности рынка, связанные с приобретением высоких технологий, материалов и оборудования, требования пожаро- и взрывобезопасности, социальные факторы и т.п.

Иными словами, нужны прежде всего методы структурной оптимизации технологических решений, обладающие всеми достоинствами пороговой оптимизации и эффективной процедурой реализации, исключающей трудоемкий перебор допустимых вариантов, и учитывающие специфику проектирования.

Процесс принятия адекватных задач решений включает в себя следующие этапы: формирование и анализ цели; выделение множества допустимых решений, обеспечивающих ее достижение; определение критериев эффективности, по которым сравниваются альтернативные решения. Для грамотного подхода к ожидаемым действиям необходимо определить ключевые моменты: постановку задачи и идею способа оптимизации.

Постановка задачи исходит из того, что имеется допустимое (с точки зрения функционирования системы) множество структурных решений $S_D = \{s_i\}, i \in [1, n]$ с изоморфными $s_j: S_D \rightarrow E_j = \{\varepsilon_i^j\}, j \in [0, m]$

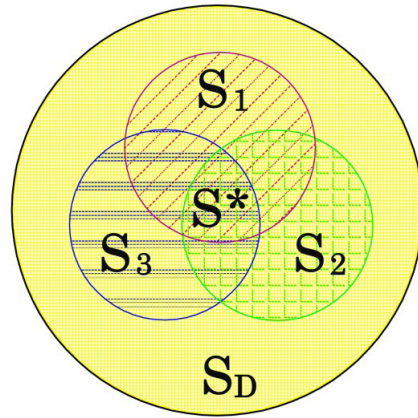


Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая выделение ядра решений из допустимого множества при пороговой оптимизации.

(m – количество второстепенных критериев оптимизации), где ε_i^j – значение j -го критерия для i -го структурного решения (индекс $j = 0$ присвоен априорно выбранному основному критерию оптимизации). Кроме этого для каждого второстепенного критерия определено отношение $\varepsilon_i^j \leq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m]$ (1)

или

$$\varepsilon_i^j \geq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m] \quad (2)$$

в зависимости от того, максимум (2) или минимум (1) данного критерия определяют предпочтительный выбор оптимального решения.

Требуется найти решение s_{opt} , используемое для постоптимизационного анализа по неформализуемым критериям оптимизации. При этом необходимо выполнение ряда условий:

$$\exists s_x \in S_D, \varepsilon_x < \varepsilon_{opt}^0, \varepsilon_x^j \leq \varepsilon^j, j \in [1, m] \quad (3)$$

и в расширенной постановке задачи множество подоптимальных решений $S_{opt} = \{s_{opt}^1, s_{opt}^2, \dots, s_{opt}^{\xi}\}$ такое, что

$$a) s_{opt}^1 \equiv s_{opt};$$

$$б) \forall s_{opt}^i \in S_{opt}, i \in [1, \xi] \Rightarrow \varepsilon_{opt}^{ij} \leq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m]; \quad (4)$$

$$в) \forall s_{opt}^i \in S_{opt}, i \in [1, \xi - 1] \Rightarrow \varepsilon_{opt}^{i0} \leq \varepsilon_{opt}^{(i+1)0}.$$

Идея метода заключается в том, чтобы:

- во-первых, выделить из множества S_D такое упорядоченное подмножество решений



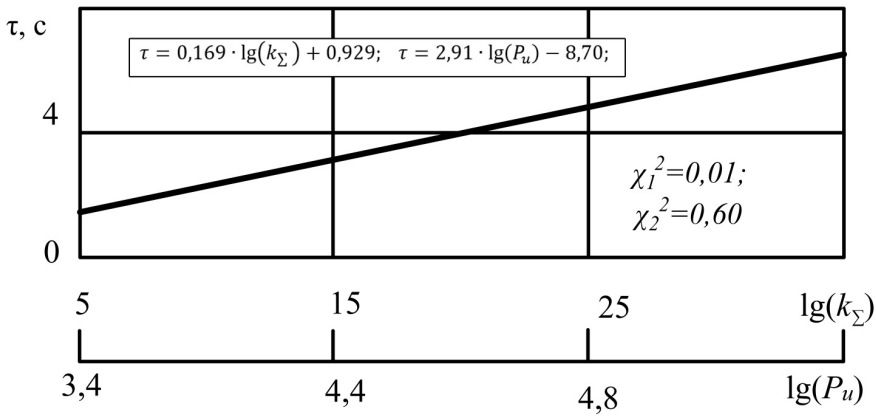


Рис. 2. Характеристика эффективности алгоритма AMACONT: $k = 95$.

$$S^0 = \{s_1^0, s_2^0, \dots, s_k^0\}, S^0 \subset S_D, \quad (5)$$

что

$$1) \forall s_i^0 \in S^0, i \in [2, k-1] \Rightarrow \varepsilon_{i-1}^0 \leq \varepsilon_i^0 \leq \varepsilon_{i+1}^0; \quad (6)$$

$$2) \exists s_y, \text{ что } s_y \in S_D, s_y \notin S^0, \varepsilon_1^0 \leq \varepsilon_y \leq \varepsilon_k^0. \quad (7)$$

Выражение записано применительно к первому из отношений (1) и (2);

- во-вторых, путем последовательного просмотра элементов данного множества, начиная с первого, выбрать тот из них s_i^0 , для которого в первую очередь выполняется условие (1), и принять его в качестве оптимального, т.е. $s_{opt} = s_i^0$;

- в-третьих, в случае расширенной постановки задачи продолжить последовательный просмотр с проверкой условия (1) для выбора остальных элементов $S_{opt} : s_{opt}^2, \dots, s_{opt}^k$.

Теория принятия решений, благодаря развитию мощных математических средств и специализированного программного обеспечения, превратилась в очень эффективный инструмент, оказывающий всестороннюю поддержку руководящим структурам на самых разных уровнях. В рамках этой теории применительно к технологическим процессам успешно действует система структурной оптимизации AMACONT [4].

Система позволяет вести поиск оптимального решения и его реализацию с участием автоматизированной компьютерной сети и это делает процесс более гибким. Однако следует заметить, что подобное стало возможным только благодаря эффективному алгоритму поиска « k -кратчайших»

путей, который превращает вычислительные итерации почти в незаметные для проектировщика.

На рис. 2 показаны характеристики алгоритма AMACONT в виде эмпирических зависимостей времени расчетов модели от величин p_u и k_Σ . Вычислительные эксперименты проводились на процессоре средней производительности Intel 166 МГц класса IBM. Как видно, для расчета графов, предполагающих 10^{30} вариантов решений, требуется всего около 6 секунд.

Тем не менее, нельзя опускать тот факт, что использование обобщенного критерия оптимизации не является эффективным способом решения многокритериальных оптимизационных задач в силу следующих причин:

- требуется приведение всех критериев к относительному безразмерному виду, что предполагает знание пределов изменения их значений, которые в большинстве случаев при структурной оптимизации неизвестны (т.е. не ясны пределы изменения);

- использование весовых коэффициентов, экспертно назначаемых критериям оптимизации, вносит повышенный субъективизм в решение задач;

- сведение оптимизационной задачи к однокритериальному виду снижает её гибкость при поиске вариантов, поскольку в однокритериальном понимании с точки зрения поиска экстремума не существует оптимума в многокритериальной постановке из-за противоречивости критериев.

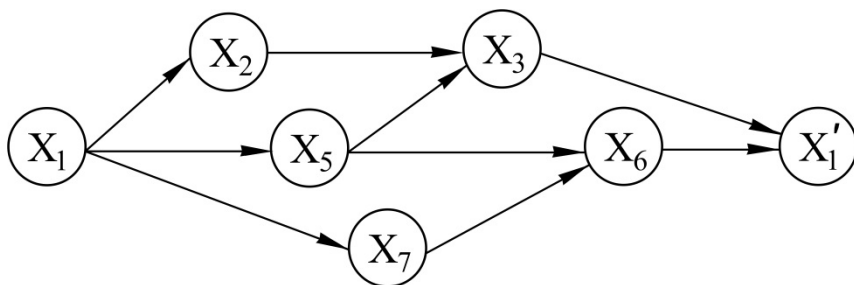


Рис. 3. Пример сетевого технологического графа $G=(X, U)$.

С другой стороны, реализация пороговой оптимизации при поиске структурного решения предполагает поиск множеств S_1 перебором всех элементов множества S_D , что является нереальным в силу большого количества допустимых технологических решений.

Теоретическая основа метода определяется совокупностью математических методов и теоретических положений, позволяющих эффективно, без полного перебора элементов множества S_D находить множество S^0 . Применительно к структурной оптимизации на сетевых орграфах — это теория графов [5], методы динамического программирования, новый метод структурирования и алгоритм поиска « k -кратчайших» путей.

Алгоритм реализации метода.

Шаг 1. Назначить основной ε^0 и второстепенные $\{\varepsilon^j\}, j \in [1, m]$ критерии оптимизации. Второстепенные критерии не помечены.

Шаг 2. Назначить для каждого j -го второстепенного критерия пороговое значение $\varepsilon^j, j \in [1, m]$.

Шаг 3. Положить $t = 1$.

Шаг 4. Найти t -й элемент упорядоченного множества S^0 , т.е. s_t^0 .

Шаг 5. Выбрать любой непомеченный второстепенный критерий. Если такой критерий найден, пометить его и перейти к шагу 6. Если поиск неудачен, закончить процедуру — оптимальным является решение s_t^0 .

Шаг 6. Проверить для элемента s_t^0 выполнение неравенства (1) по выбранному на шаге 5 критерию. Если неравенство

справедливо, перейти к шагу 5, если нет — к шагу 7.

Шаг 7. Проверить: если $t = k$, то решения не существует, в противном случае снять метки со всех второстепенных критериев, увеличить $t = t + 1$ и перейти к шагу 4.

Следует помнить, что любое из множеств S_i может оказаться пустым, а оптимальное решение не найденным. Тогда надо изменить (уменьшить в случае (1)) пороговое значение соответствующего второстепенного критерия и повторить оптимизационную процедуру.

При реализации расширенной постановки задачи оптимизации шаги 3, 5 и 7 алгоритма имеют следующий вид.

Шаг 3. Положить $t = 1, i = 1$.

Шаг 5. Выбрать любой непомеченный второстепенный критерий. Если такой критерий найден, пометить его и перейти к шагу 6. Если поиск неудачен — элемент $s_t^0 \equiv s_{opt}^i \in S_{opt}$. Перейти к шагу 5⁰.

Шаг 5⁰. Проверить: если $(i = \xi) \wedge (t = k)$, то закончить процедуру; в противном случае снять метки со всех второстепенных критериев, увеличить $t = t + 1, i = i + 1$ и перейти к шагу 4.

Шаг 7. Проверить: если $(t = k) \vee (i = 1)$, то решения не существует, в противном случае перейти к шагу 7⁰.

Шаг 7⁰. Проверить: если $t = k$, то закончить процедуру — есть решение S_{opt} . В противном случае снять метки со всех второстепенных критериев, увеличить $t = t + 1$ и перейти к шагу 4.

Сетевые графы $G=(X, U)$ (см. рис. 3) при структурной оптимизации задают допустимое множество S_D структур проектируемого объекта. При этом множеством вершин X такого графа является отображение допустимых вариантов ис-



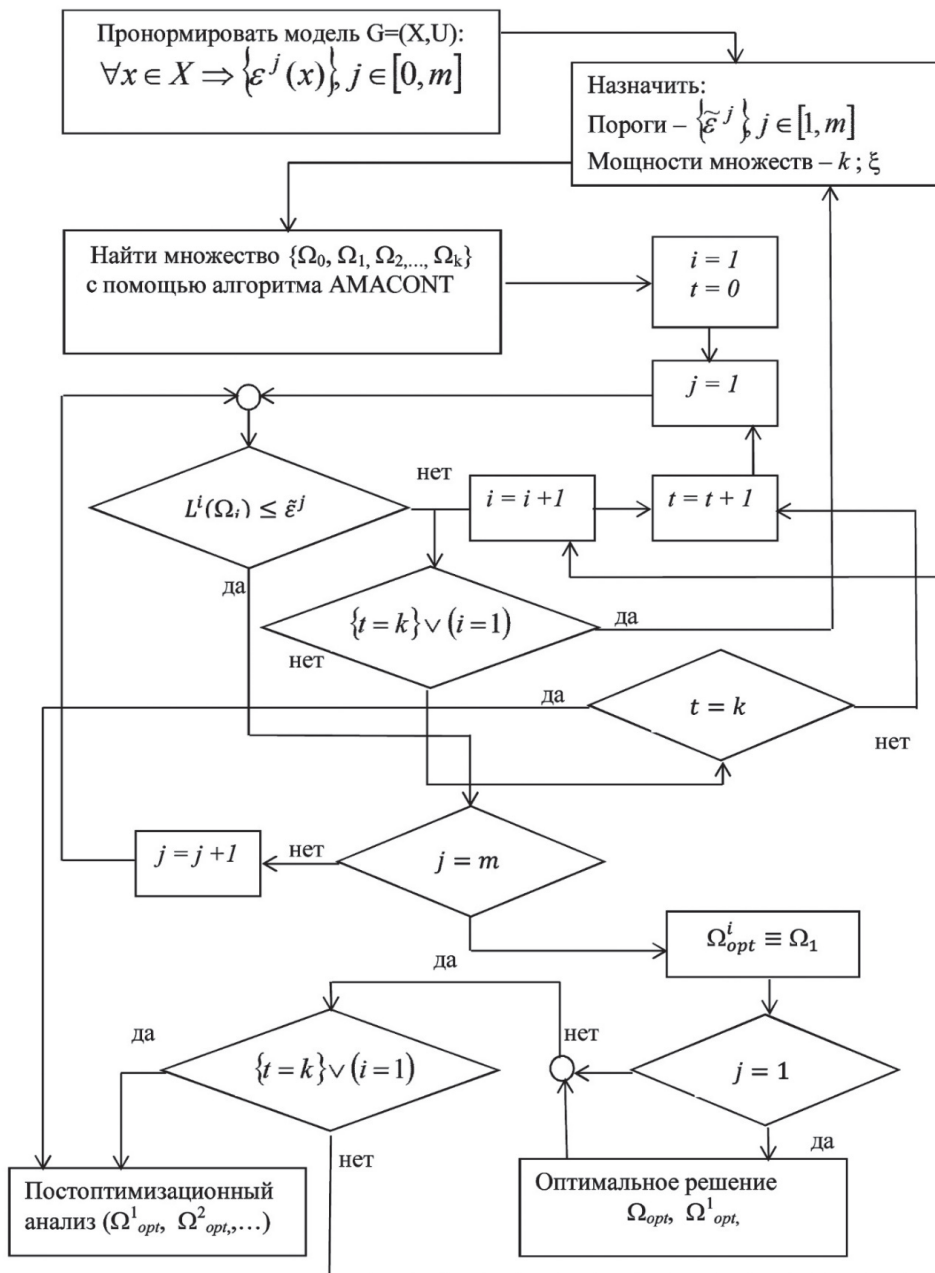


Рис. 4. Блок-схема оптимизационной процедуры.

полнения структурных элементов, а множеством дуг U – логические связи возможности последовательного объединения данных элементов в оптимизируемую структуру [6, 7].

При нормировании такой модели каждому варианту структурного исполнения элементов технологического объекта (т.е. $x_i \in X$) ставится в соответствие множеством

во локальных критериев оптимизации $\{\varepsilon^j(x_i)\}, j \in [0, m]$ (m – количество второстепенных критериев). Понятие локальных критериев связано с тем, что критерии оптимизации, вообще говоря, соответствуют выбираемому в качестве оптимального решению, то есть всей структуре объекта, а не его какому-либо элементу [8, 9].

Вариант технологического решения $s_i \in S_D$ в этом случае определяется i -м вариантом полного пути графа (рис. 3), а соответствующее ему значение j -го критерия оптимизации (уже не локального) – длиной этого пути в виде

$$L^j(\Omega_i) = \varepsilon^j(u_i^-) + \sum_{t=1}^k \varepsilon^j(u_t^+), \quad (8)$$

причем $u_i^- \equiv x', u_k^+ \equiv x''$.

Таким образом, поскольку метод структурной оптимизации основан на поиске упорядоченного множества S^0 , то он может быть с успехом применен к многокритериальной пороговой оптимизации технологических структур с использованием алгоритма поиска « k -кратчайших» путей сетевых графов AMACONT, которые и образуют упомянутое множество S^0 .

На рис. 4 показана блок-схема процедуры пороговой оптимизации структурных технологических решений на сетевых графах на основе описанного метода.

Демонстрируемая процедура является итерационной, поскольку в ней предусмотрена возможность того, что решение не будет найдено при заданных начальных условиях (пороговых значениях второстепенных критериев и мощности множества), что в свою очередь приводит к новому витку вычислений [10].

В заключение отметим, что для решения задач многокритериальной оптимизации можно применять метод структурированных графов. Кроме того, предлагается использовать алгоритм поиска « k -кратчайших» путей на сетевых орграфах, отличающийся от известных наличием нового метода структурирования и позволяющий находить упорядоченное множество полных путей, определяемое неубывающей последовательностью их длин, вычисляемых по оптимизационному критерию. Предложенная процедура многокритериальной структурной оптимизации технологических процессов на сетевых графах обладает гибкостью при поиске оптимальных решений, которая обеспечивается

возможностями метода и итерационным характером порядка вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анферов М. А., Селиванов С. Г. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении. – Уфа: Гилем, 1998. – 185 с.
2. Интегрированные автоматизированные системы управления в машиностроении / Под ред. Х. Г. Газматова. – М.: ВНИИТЭМП, 1988. – 124 с.
3. [Электронный ресурс] http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?index=16&tutindex=4. Доступ 24.08.2015.
4. Соломенцев Ю. М. Проблема создания компьютеризированных интегрированных производств // Автоматизация проектирования. – 1997. – № 1. – С. 10–14.
5. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Курейчик В. М. Применение графов для проектирования дискретных устройств. – М.: Наука, 1974. – 304 с.
6. Блехерман М. Х. Гибкие производственные системы: Организационно-экономические аспекты. – М.: Экономика, 1988. – 40 с.
7. Блехерман М. Х., Федосеева Н. Г. Организационно-технологический анализ транспортно-складского обеспечения ГПС // Станки и инструмент. – 1985. – № 11. – С. 3–5.
8. [Электронный ресурс] <http://jre.cplire.ru/jre/avg01/6/text.html>. Доступ 24.08.2015.
9. Калянов Г. Н. Методы и средства системного структурного анализа и проектирования. – М.: НИВЦ МГУ, 1996. – 59 с.
10. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Изд-во иностр. лит., 1975. – 534 с.
11. Бродецкий Г. Л., Гусев Д. А. Экономико-математические методы и модели в логистике. Процедуры оптимизации. – М.: Академия, 2012. – 288 с.
12. Смирнов С. Н., Галкина В. А. Оптимизационные задачи на графах. – М.: Гелиос АРВ, 2012. – 368 с.
13. Васильев Г. Н. Оптимальное проектирование станочных систем // Известия ВУЗов, 1987. – № 10. – С. 142–153.
14. Васильев В. И., Борщенко Я. А. Интеллектуальные технологии в процессах проектирования систем диагностирования автотранспортных средств // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 3. [Электронный ресурс] <http://web.snauka.ru/issues/2012/03/10235>. Доступ 24.08.2015.
15. Чернов В. Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 312 с.
16. Селиванов С. Г., Габитова Г. Ф. Оптимизация межцеховых технологических маршрутов машиностроительного предприятия средствами искусственного интеллекта: Монография. LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 152 с.
17. Селиванов С. Г., Габитова Г. Ф., Яхин А. И., Шайхулова А. Ф. Каскадный метод оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП на основе использования искусственных нейронных сетей // Вестник УГАТУ. – Т. 18. – 2014. – № 3. – С. 170–174.

Координаты авторов: **Попов А. П.** – pap60@bk.ru, **Попова Т. А.** – tatiana241187@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 23.04.2015, актуализирована 24.08.2015, принята к публикации 28.08.2015.



Popov, Alexander P., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Popova, Tatiana A., Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, Moscow, Russia.

ABSTRACT

This article considers problems of structural optimization of technological processes, possibility to take into account arising uncertainties, applying decision-making theory. Basing on the analysis of different methods, the authors developed a mathematical model for multicriteria structural optimization of promising technological processes.

The implementation algorithm of proposed procedure is shown, which allows to find an ordered set of full routes, based on nondecreasing sequence of their lengths. The flexibility of solution search is provided by possibilities of structuring method and iterative nature of their calculation.

Keywords: decision-making theory, optimization tasks, mathematical model, network graphs, structural optimization, algorithm, system, AMACONT.

Background. In considering such tasks as design of complex technical systems, selection of technological processes for their manufacture, operation options etc., it becomes obvious that making a wrong decision can lead to irreparable consequences. As a general rule, decision-making by a person takes place on the basis of his experience and knowledge, and intuition to some extent, however, in most cases, such steps are not optimal, and sometimes wrong. At the same time, it is clear how difficult it is to avoid risk and uncertainties, to find reliable ways to achieve appropriate results [1].

Objective. The objective of the authors is to consider issues concerning optimization of technological processes and to suggest optimal solutions.

Methods. The authors use general scientific methods, structural analysis, simulation, graph construction.

Results. There are two approaches to solution of multicriteria optimization tasks in the design of technological processes: it is the use of a generalized optimization criterion ε_Σ and «threshold optimization» [2]. As it is known, the threshold optimization provides for allocation of the total allowable set of solutions S_D subsets $S_i \subset S_D, i \in [1, n]$ (n is a number

of secondary criteria) defined by imposed restrictions on allowable values of secondary criteria

followed by the search through the set $S^* = \bigcap_{i=1}^n S_i$ for

a solution having minimum (maximum) value of the primary optimization criterion (see. Pic. 1). If the set S_i is acceptable in terms of the optimized system operation (i.e. implementation of functions of the system in relation to the system of a higher level), then the set S^* is an allowable solution set that satisfies all the constraints in the secondary criteria, and namely on its basis optimization by the main criterion is implemented [3].

It should be noted that in the modernization of an enterprise, especially in today's environment, non-formalizable optimization criteria exist, such as market conditions associated with the acquisition of high technology, materials and equipment, fire explosion safety requirements, social factors, and others.

Thus, there is a need primarily for new methods of structural optimization of technological solutions, having all the advantages of the threshold optimization and effective implementation procedure, eliminating time-consuming search of all feasible solutions and taking into account design specifics.

The decision making process involves following steps: formation and analysis of purpose (objective); selection of the set of feasible solutions to ensure its achievement; definition of efficiency criteria by which alternative solutions are compared. For a right approach to expected actions it is necessary to define key points: statement of a task and an idea of optimization method.

Statement of a task is based on the assumption that there is an allowable (in terms of system functioning) set of structural solutions $S_D = \{s_i\}, i \in [1, n]$ with

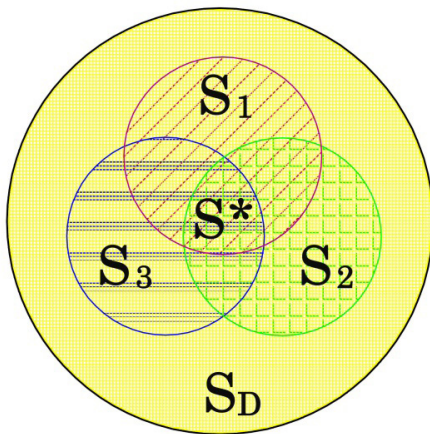
isomorphic $\mathcal{G}_j: S_D \rightarrow E_j = \{\varepsilon_i^j\}, j \in [0, m]$ (m is a number

of secondary optimization criteria), where ε_i^j is a value of j -th criterion for the i -th structural solution (index $j = 0$ is assigned to a priori selected main optimization criterion). In addition, for each secondary criterion the equation is determined

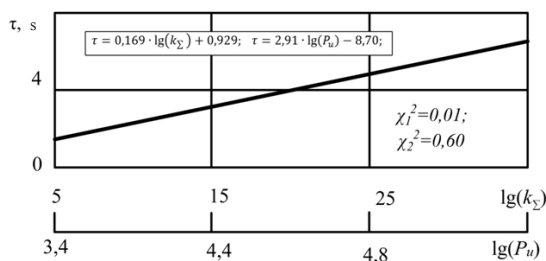
$$\varepsilon_i^j \leq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m] \quad (1)$$

or

$$\varepsilon_i^j \geq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m] \quad (2)$$



Pic. 1. Diagram, illustrating the selection of the core of solutions in the admissible set at threshold optimization.



Pic. 2. Characteristics of efficiency of the algorithm AMACONT: $k = 95$.

depending on whether maximum (2) or minimum (1) of this criterion defines preferred selection the optimal solutions.

It is necessary to find a solution s_{opt} used for post optimization analysis on non-formalizable optimization criteria. It is necessary to perform a number of conditions:

$$\exists s_x \in S_D \text{ such that } \varepsilon_x^0 < \varepsilon_{opt}^0, \varepsilon_x^j \leq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m] \quad (3)$$

in extended statement of a task a set of suboptimal solutions $S_{opt} = \{s_{opt}^1, s_{opt}^2, \dots, s_{opt}^5\}$ is such that

- $s_{opt}^1 \equiv s_{opt}$;
- $\forall s_{opt}^i \in S_{opt}, i \in [1, 5] \Rightarrow \varepsilon_{opt}^{ij} \leq \tilde{\varepsilon}^j, j \in [1, m]$;
- $\forall s_{opt}^i \in S_{opt}, i \in [1, 5] \Rightarrow \varepsilon_{opt}^{i0} \leq \varepsilon_{opt}^{(i+1)0}$.

The idea of this method is to:

• Firstly, select from a set S_D such an ordered subset of solutions

$$S^0 = \{s_1^0, s_2^0, \dots, s_k^0\}, S^0 \subset S_D, \quad (5)$$

that

$$1) \forall s_i^0 \in S^0, i \in [2, k-1] \Rightarrow \varepsilon_{i-1}^0 \leq \varepsilon_i^0 \leq \varepsilon_{i+1}^0; \quad (6)$$

$$2) \exists s_y \text{ such that } s_y \in S_D, s_y \notin S^0, \varepsilon_1^0 \leq \varepsilon_y \leq \varepsilon_k^0. \quad (7)$$

Expression is recorded in relation to the first of relations (1) and (2);

• Secondly, by sequential viewing elements of this set, starting with the first one, to select the one s_i^0 for which the condition (1) is met primarily and take it as optimal, i.e. $s_{opt} = s_i^0$;

• Thirdly, in case of extended statement of the task, to continue sequential viewing with checking condition (1) to select other elements $S_{opt} = \{s_{opt}^2, \dots, s_{opt}^5\}$.

Decision-making theory, due to development of powerful mathematical tools and specialized software has become a very effective tool that supports decision-making of governing structures at various levels. Within this theory for technological processes the system of structural optimization AMACONT is successfully applied [4].

The system allows to search for an optimal solution and its implementation in the framework of an automated computer system and makes the process flexible. However, it should be noted that this became only possible due to the efficient search algorithm of «k-shortest» routes, which makes the computational iteration virtually invisible for a designer.

Pic. 2 shows characteristics of the algorithm AMACONT in the form of empirical dependencies of model calculation time on the values p_u and k_v .

Numerical experiments were performed on a processor of average performance Intel 166 MHz class IBM.

As can be seen, for the computation of graphs, suggesting 10^{30} possible solutions, only about 6 seconds are required.

Nevertheless, we cannot omit the fact that the use of generalized optimization criterion is not an effective way to solve multiobjective optimization tasks for the following reasons:

- it is required to bring all of the used criteria to a relative dimensionless form, which implies knowledge of the range of change of their values, which in most cases are unknown at structural optimization (i.e., the range of change is not clear);
- the use of weighting factors, appointed by experts regarding the criteria of optimization, brings the increased subjectivity in the solution of the tasks;
- bringing optimization problem to a one-criterion form reduces its flexibility when looking for solutions, as in one-criterion understanding in terms of the search for an extremum there is no optimum in multi-criteria formulation due to conflicting criteria.

On the other hand, implementation of the threshold optimization in finding structural solutions involves finding sets S_i through search of all elements of the set S_D , which is unrealistic because of the large number of valid technical solutions.

The theoretical basis of the method is determined by a set of mathematical methods and theoretical statements that allow effectively and without complete search of elements of the set S_D to find the set S^0 .

With regard to structural optimization on network digraphs, these are graph theory [5], dynamic programming methods, a new method of structuring and search algorithm for «k-shortest» routes.

The algorithm of method implementation.

Step 1. Set main ε^0 and secondary $\{\varepsilon^j\}, j \in [1, m]$

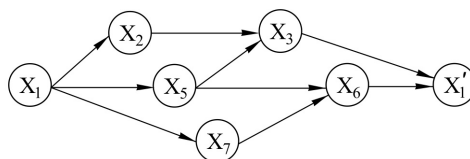
optimization criteria. Secondary criteria are not marked.

Step 2. Set for each j-th secondary criterion a threshold value.

Step 3. Take $t = 1$.

Step 4. Find a t-th element of the ordered set S^0 , i.e. s_t^0 .

Step 5. Select any unmarked secondary criterion. If such a criterion is found, mark it and go to step 6. If the search is unsuccessful, finish the procedure – the optimal solution is s_t^0 .



Pic. 3. An example of network technological graph $G = (X, U)$.





the search is unsuccessful – element $s_t^0 \equiv s_{opt}^i \in S_{opt}$.
Go to step 5°.

Step 5°. Check: if $(i = \xi) \wedge (t = k)$, finish the procedure; otherwise remove marks from all the secondary criteria, increase $t = t + 1$, $j = j + 1$ and go to step 4.

Step 7. Check: if $(t=k) \vee (i=1)$, the solution does not exist, otherwise go to step 7°.

Step 7. Check: if $t = k$, finish the procedure – there is a solution S_{opt} . Otherwise remove marks from all the secondary criteria, increase $t = t + 1$ and go to step 4.

Network graphs $G = (X, U)$ (see Pic. 3) at structural optimization set an allowable set s_o of structures of designed object. At the same time vertex set X of this graph is a display of permissible variants of structural elements, and the set of arcs U – logical connections of possible sequential combination of these elements in the optimized structure [6, 7].

When evaluating this model, each variant of the structural execution of elements of technological object (i.e. $x_i \in X$) is associated with a set of local optimization criteria $\{\varepsilon^j(x_i)\}$, $j \in [0, m]$ (m is a number of secondary criteria). The concept of local criteria is connected with the fact that optimization criteria, generally speaking, correspond to the solution selected as an optimal that is, the entire structure of the object, not any of its element [8, 9].

Option of technological solution $s_i \in S_p$ in this case is determined by the i -th option of the complete route of the graph (Pic. 3), and the corresponding value of the j -th optimization criterion (not local) by the length of this route in the form

$$L^j(\Omega_i) = \varepsilon^j(u_i^-) + \sum_{t=1}^k \varepsilon^j(u_t^+), \quad (8)$$

and $u_i^- = x', u_k^+ = x''$.

Thus, since the structural optimization method is based on finding an ordered set S^0 , it can be successfully applied to the multicriteria threshold optimization of technological structures using search algorithm of « k -shortest» routes of network graphs AMACONT, which form the aforementioned set S^0 .

Pic. 4 shows a flow chart of the threshold optimization of structural technological solutions on network graphs based on this method.

This procedure is iterative, since it provides for the possibility that the solution will not be found in case of established initial conditions (threshold values of secondary criteria and power of the set), which in turn leads to a new round of calculations [10].

Conclusion. For solving multi-criteria optimization it is possible to apply the method of structured graphs. Moreover, it is offered to use the search algorithm of « k -shortest» routes on network digraphs, different from the known in the presence of a new method for structuring and allowing to find an ordered set of complete routes defined by a non-decreasing sequence of their lengths, calculated via an optimization criterion. The proposed procedure for multi-criteria structural optimization of technological processes on network graphs is flexible in the search for optimal solutions, provided for by the capacities of the method and iterative nature of calculations.

REFERENCES

1. Anferov, M. A., Selivanov, S. G. Structural optimization of technological processes in mechanical engineering [Strukturnaja optimizacija tehnologicheskikh processov v mashinostroenii]. Ufa, Gilem publ., 1998, 185 p.
2. Integrated automated control systems in mechanical engineering [Integrirovannye avtomatizirovannye sistemy upravleniya v mashinostroenii]. Ed. by H. G. Gazmatov. Moscow, VNIITEMP publ., 1988, 124 p.
3. [Electronic data] http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?index=16&tutindex=4. Last accessed 24.08.2015.

4. Solomentsev, Yu. M. The problem of creation of computerized integrated industries [Problema sozdaniya komp'yuterizirovannykh integrirovannykh proizvodstv]. Avtomatizacija proektirovaniya, 1997, Iss. 1, pp. 10–14.

5. Melikhov, A. N., Bernstein, L. S., Kureichik, V. M. The use of graphs for designing discrete devices [Primenenie grafov dlya proektirovaniya diskretnykh ustroystv]. Moscow, Nauka publ., 1974, 304 p.

6. Bleherman, M. H. Flexible manufacturing systems: Organizational and economic aspects [Gibkie proizvodstvennyye sistemy: Organizatsionno-ekonomicheskie aspekty]. Moscow, Ekonomika publ., 1988, 40 p.

7. Bleherman, M. H., Fedoseeva, N. G. Organizational and technological analysis of transport and storage support of FMS [Gibkie proizvodstvennyye sistemy: Organizatsionno-ekonomicheskie aspekty]. Stanki i instrument, 1985, Iss. 11, pp. 3–5.

8. [Electronic data] <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/6/text.html>. Last accessed 24.08.2015.

9. Kalyanov, G. N. Methods and tools for system structural analysis and design [Metody i sredstva sistemnogo strukturnogo analiza i proektirovaniya]. Moscow, NIVC MGU, 1996, 59 p.

10. Himmelblau, D. Applied Nonlinear Programming [Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye]. Moscow, Izdatel'stvo inostr.lit., 1975, 534 p.

11. Brodetsky, G. L., Gusev, D. A. Economic-mathematical methods and models in logistics. Optimization procedure [Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli v logistike. Procedury optimizatsii]. Moscow, Academia publ., 2012, 288 p.

12. Smirnov, S. N., Galkina, V. A. Optimization problems on graphs [Optimizatsionnye zadachi na grafhah]. Moscow, Helios ART, 2012, 368 p.

13. Vasiliev, G. N. Optimal design of machine systems [Optimal'noe proektirovaniye stanochnykh sistem]. Izvestiya VUZov, 1987, Iss. 10, pp. 142–153.

14. Vasiliev, V. I., Borshchenko, Ya. A. Intelligent technologies in the design of systems of diagnosing vehicles [Intellektual'nye tehnologii v processah proektirovaniya sistem diagnostirovaniya avtotransportnykh sredstv]. Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii, 2012, Iss. 3. [Electronic data] <http://web.snauka.ru/issues/2012/03/10235>. Last accessed 24.08.2015.

15. Chernov, V. G. Models of decision support in investment activity on the basis of fuzzy sets [Modeli podderzhki prinjatija reshenij v investicionnoj dejatel'nosti na osnove apparata nechetkikh mnozhestv]. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom publ., 2007, 312 p.

16. Selivanov, S. G., Gabitova, G. F. Optimization of interplant technological routes of engineering enterprise by means of artificial intelligence: a monograph [Optimizacija mezhechovykh tehnologicheskikh marshrutov mashinostroitel'nogo predpriyatija sredstvami iskusstvennogo intellekta: monografija]. LAMBERT Academic Publishing, 2013, 152 p.

17. Selivanov, S. G., Gabitova, G. F., Yakhin, A. I., Shaykhulova, A. F. Cascade method for optimization of design processes in the CAM through the use of artificial neural networks [Kaskadnyj metod optimizatsii proektnykh tehnologicheskikh processov v ASTPP na osnove ispol'zovaniya iskusstvennykh neyronnykh setej]. Vestnik UGATU, Vol. 18, 2014, Iss. 3, pp. 170–174.

Information about the authors:

Popov, Alexander P. – Ph.D. (Eng.), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, pap60@bk.ru.

Popova, Tatiana A. – lecturer of Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, Moscow, Russia, tatiana241187@gmail.com.

Article received 23.04.2015, revised 24.08.2015, accepted 28.08.2015.

