

УДК: 519.712.2

## 1.10. Метод построения модели технологического процесса

Варнухов А.Ю., Зобнин Б.Б.,  
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*Определена задача структурно-параметрического синтеза технологического процесса. Предложено представление и методика вычисления результата моделируемого технологического процесса в виде орграфа. Разработан метод решения поставленной задачи на основе модифицированного генетического алгоритма. Показаны результаты проведенного эксперимента и сформулированы направления развития метода.*

### Введение

Происходящий процесс цифровой трансформации в экономике усиливает необходимость модернизации и преобразований в подходах планирования и управления производственными, организационными и бизнес-процессами в организациях [Kraus Sascha et al., 2021] и [Teixeira & Tavares-Lehmann, 2023]. Вместе с тем растущее конкурентное давление и изменения во внешней среде приводят к постоянному поиску способов адаптации и инновационных стратегий для повышения основных экономических показателей эффективности деятельности организации [Osintsev & Khalilian, 2023]. Одним из направлений повышения эффективности является оптимизация производственных процессов. Под оптимизацией производственного процесса можно понимать выбор такой совокупности действий, методов, ресурсов и управляющих воздействий, которые приводят к значимому увеличению производительности, повышению качества, снижению издержек или затрачиваемого времени. Для этого применяются подходы, основанные на анализе внутренних процессов, математическом и имитационном моделировании [Волошко, Ивутин, Крюков, 2020] и [Савенкова, 2021], концепции шести сигм и бережливого производства [Денисова, Петрова, Сопин, 2022], [Aripin et al., 2023] и [Achibat et al., 2023], проектно-матричном управлении [Матюшок, Фомина, Хрусталев, 2014], а также применяются технологии «умного производства». Важной частью производственного процесса является технологический процесс, который позволяет преобразовывать исходные ресурсы в конечный продукт. В свою очередь каждый технологический процесс может образовывать иерархическую систему, которая состоит из вложенных в нее подпроцессов. Операцией технологического процесса называется элемент процесса, обладающий признаком условной неделимости, при котором дальнейшая декомпозиция нецелесообразна. Каждая операция может обладать набором параметров, которые задают характер и особенности ее функционирования. В частности, при изготовлении изделий могут быть применены различные режимы работы оборудования, варианты обработки, использования ресурсов и график работы. Поиск параметров, задающих работу технологического процесса, при которых обеспечивается минимизация себестоимости, времени на обработку и других критериев оценки, является задачей параметрической оптимизации. Известны различные подходы к решению этой задачи с применением аппарата линейного и динамического программирования, на основе хронометража, сетей петри и так далее [Тациенко, Шатко, Баканов, 2020] и [Сочнев, 2020]. В общем виде задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: пусть имеется целевая функция (1), которая определяет требуемый критерий. Необходимо из определенного множества  $X$ , которое представляет собой совокупность параметров операции, при условии соблюдения ограничений (2-4), подобрать такое  $x^*$ , что выполняется (5).

$$f: X \rightarrow \mathbb{R} \quad (1)$$

$$x_{i1} \leq x_i \leq x_{i2} \quad (2)$$

$$x_i \in \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\} \quad (3)$$

$$g_k(x_i) \leq 0; g_m(x_i) = 0; g_o(x_i) < 0 \quad (4)$$

$$f(x^*) = \min f(x), x \in X \quad (5)$$

В качестве критерия часто выступают такие показатели, как: удельные затраты, себестоимость, затрачиваемое время и другие.

Для многих технологических процессов допускается возможность построения различной структурной организации и последовательности выполнения операций. Таким образом, подбор композиции элементов технологического процесса обуславливает необходимость постановки задачи синтеза структуры при наличии заданного критерия оптимальности. Среди подходов решения задачи структурной оптимизации можно отметить поисковые, аналитические, численные и графические методы. При этом часто возникают затруднения в формализации условий, правил и накладываемых ограничений, что обуславливает сложность решения задач данного вида. Могут возникать случаи, при которых искомая структура должна содержать только выборочное подмножество из всей совокупности доступных операций. В частности, представляют интерес методы синтеза оптимальных технологических маршрутов [Попов, Запольская, Попова, 2020]. Таким образом, задача оптимизации технологического процес-

са и его составляющих является актуальной и значимой для повышения эффективности функционирования предприятий и обеспечения возможностей цифровой трансформации.

Целью исследования является разработка метода построения оптимальной модели технологического процесса с учетом налагаемых ограничений.

#### Постановка задачи

Пусть имеется множество элементарных операций  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$  некоторого технологического процесса. Для каждой операции из множества  $O$  задан известный входной поток, который преобразуется операцией  $O_i$  в некоторый выходной поток. При этом очевидно, что в реальном производственном процессе различные операции могут иметь на входе определенные изделия или сырье и производить на выходе из операции другие изделия или полуфабрикаты. Исходя из этого, существуют и определены правила, которые ограничивают доступные входы и выходы для каждой операции. Кроме этого, каждая операция может обладать набором параметров вида (2-4), которые задают особенности ее функционирования: режим работы, расписание, мощность, и так далее. Требуется найти технологический процесс, который является композицией элементарных операций из множества  $O$  и переходов между ними, удовлетворяющий следующим условиям:

- ▶ соответствует наложенным ограничениям на входные и выходные потоки каждой операции;
- ▶ оптимален с точки зрения критерия оценки его эффективности;
- ▶ может состоять как из некоторых, так и из всех возможных элементарных операций множества  $O$ .

Учитывая вышеизложенное, можно заключить в обобщенном виде, что требуется решить задачу структурно-параметрического синтеза и оптимизации технологического процесса.

#### Метод построения модели технологического процесса

Технологический процесс может быть представлен различными способами, например, в виде инструкций, схем, таблицы последовательностей, сетевого графика и так далее. В настоящей работе предлагается использовать представление в виде графа операций. Поскольку для каждой операции установлены конкретные входные и выходные потоки, то будем использовать ориентированный граф (далее – орграф). Пример такого графа показан на рисунке 1.

Орграф  $G = (O, T)$  технологического процесса состоит из двух множеств  $O$  и  $T$ . Множество узлов  $O$  является подмножеством множества всех доступных операций моделируемого технологического процесса. Множество дуг  $T$  определяет переходы между операциями и состоит из упорядоченных троек  $(O_i, O_j, w_{ij}) \in T$ , где  $O_i$  соответствует операции, из которой совершается переход, а  $O_j$  операции, в которую совершается переход. Для каждой дуги в графе задан ее вес  $w_{ij}$ , при этом для каждого узла  $O_i$  должно выполняться (6), где  $J$  – это множество узлов, в которые совершается переход из  $O_i$ .

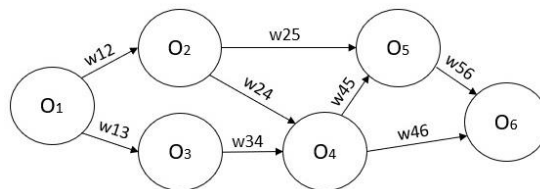


Рисунок 5. Пример орграфа  
Источник: составлено авторами

$$\sum_{j \in J} w_{ij} = 1 \quad (6).$$

Последовательности переходов вида  $T_1, T_2, \dots, T_n$  описывают «маршруты» технологического процесса. Для задания правил взаимодействия между операциями, которые ограничивают возможные переходы, используется матрица смежности. Пример такой матрицы показан в таблице 1.

Таблица 1. Матрица правил взаимодействия между операциями

	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$
$O_1$	0	1	1	0	0	0
$O_2$	0	0	0	1	1	0
$O_3$	0	1	0	0	1	0
$O_4$	0	0	0	0	1	1
$O_5$	0	0	1	0	0	1
$O_6$	0	0	0	0	0	0

Каждая строка матрицы правил указывает операцию, из которой совершается исходящий переход. Столбцы матрицы обозначают направление, куда совершается переход. Если задан допустимый переход из операции  $O_1$  в  $O_2$ , то на пересечении первой строки и второго столбца указывается единица и ноль в противоположном случае. Поскольку в рассматриваемой задаче не допускается образование петель, то главная диагональ матрицы всегда заполнена нолями. Из матрицы правил можно определить операции, с которых начинается и которыми заканчивается технологический процесс. Операции, у которых в столбце, соответствующем их индексу, стоят одни ноли, будут начальными. Операции, у которых в строке, соответствующей их индексу, стоят одни ноли, будут конечными. Возможна ситуация, когда технологический процесс содержит такое множество операций, которые могут комбинироваться между собой так, что все строки и столбцы матрицы правил будут содержать, по меньшей мере,

одну единицу. Тогда необходимо дополнить матрицу виртуальными операциями таким образом, чтобы были заданы начальные и конечные операции.

Поскольку разные операции в технологических процессах преобразуют входные потоки в выходные по некоторому закону, то для каждой операции зададим функцию вида (7), в которой аргументы  $p_1, p_2, \dots, p_n$  определяют параметры операции.

$$y = F(x, p_1, p_2, \dots, p_n), x \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^k, p_n \in \mathbb{R} \quad (7).$$

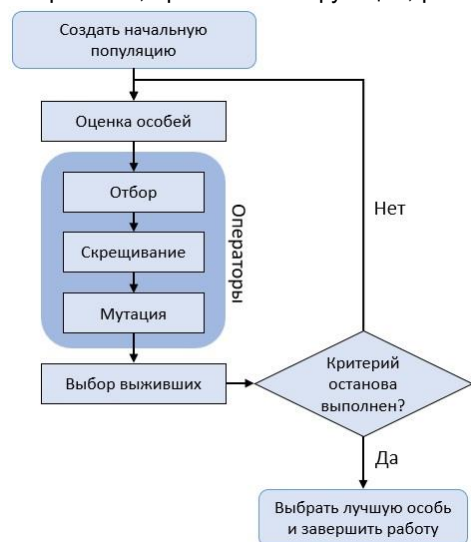
Например, если рассмотреть технологическую операцию по очистке проточной воды фильтром, то можно представить перерабатываемую воду как вектор  $x = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ , в котором каждая компонента  $a_m$  содержит состав воды (концентрацию взвеси, тяжелых металлов, солей и прочее). Тогда через операцию очистки функция (7) преобразует характеристики исходной воды путем модификации компонентов вектора.

Допустим, получен некоторый орграф, представляющий технологический процесс, и выполнено вышеизложенное. Требуется рассчитать итоговый выход модели процесса после преобразований совершенными операциями. Для этого составим упорядоченную последовательность узлов для последующего расчета. Порядок в последовательности должен быть таким, чтобы узлы, в которые совершается переход, располагались позднее, чем узлы, из которых совершается переход. Для составления такой последовательности можно использовать подходы, основанные на поиске в глубину (DFS), а также алгоритмы Демукрона, Кана или Тарьяна. Для непосредственного расчета выполним следующие шаги:

- 1) инициализируем входными значениями начальные узлы;
- 2) возьмем первый узел  $O_j$  из упорядоченной последовательности узлов;
- 3) найдем все входящие в узел  $O_j$  дуги из множества  $T$  и составим линейную комбинацию, состоящую из весов  $w_{ij}$  дуг и значений входящих узлов  $O_i$ ;
- 4) выполним расчет по формуле (7) и запишем результат в узел  $O_j$ ;
- 5) удалим узел  $O_j$  из упорядоченной последовательности;
- 6) если в последовательности остались узлы, то перейти на шаг 2.

После выполнения указанных выше шагов в конечных узлах будет находиться итоговый выход модели технологического процесса. Если в орграфе технологического процесса содержатся обратные переходы, то в этом случае необходимо проделать аналогичные шаги за исключением того, что требуется выполнить несколько проходов и узлы, из которых исходят обратные дуги, должны быть инициализированы при первом проходе нолями. В качестве итогового выхода можно взять среднее от полученных результатов.

Для поиска решений в форме орграфа технологической операции применим подход на основе модифицированного генетического алгоритма. Генетические алгоритмы используются для обучения нейросетей, приближения функций, решения NP-полных задач, построения конечных автоматов, задач



**Рисунок 2. Общая схема работы**  
Источник: составлено авторами

В качестве теоретического подкрепления работы генетических алгоритмов выступает теорема о шаблонах Дж. Холланда. Стоит отметить, что принципы работы алгоритма носят вероятностный характер и обладают свойством обеспечения разнообразия потенциальных решений в каждом поколении популяции. Схема работы генетического алгоритма представлена на рисунке 2.

В классической реализации генетического алгоритма при создании популяции используются особи, хромосомы которых закодированы в векторы фиксированной длины вида  $v = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  где  $a_n$  — это бинарные или вещественные числа. Оператор скрещивания реализуется путем замены  $i$ -ой компо-

нечек моделирования, динамического программирования и других областях [Almufti et al., 2023]. Концепция работы генетического алгоритма построена на принципах упрощенного эволюционного развития. Сначала создается исходная популяция, состоящая из разнообразных особей. Каждая особь представляет собой решение или его часть, которое закодировано в виде хромосомы. После этого производится воздействие на популяцию оператором отбора и при помощи функции оценки отбираются наиболее приспособленные для дальнейшего развития особи. Выжившие на этапе отбора особи скрещиваются между собой с целью получения более жизнеспособного потомства, которое обладает признаками своих родителей. Такая рекомбинация позволяет вести контролируемое и направленное эволюционное развитие в процессе поиска решений. Для обеспечения разнообразия в популяции применяется оператор мутации. Мутация носит случайный характер и выполняется путем изменения некоторых частей решения внутри отдельных особей. Остановка эволюционного процесса может происходить по-

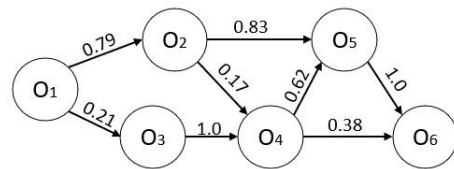
сле того, как найдено искомое решение или достигнут лимит по количеству оцениваемых поколений популяции.

ненты вектора хромосомы одной особи на j-ую компоненту вектора хромосомы другой особи. Оператор мутации выполняется путем случайного изменения i-ой компоненты вектора хромосомы.

Поскольку решаемая задача поиска допускает переменное, и более того, заранее неизвестное количество операций технологического процесса, то применение фиксированной длины хромосомы, а значит и классической реализации генетического алгоритма невозможно. При этом стоит отметить, что имеются работы, в которых продемонстрирована возможность применения генетического алгоритма с хромосомами переменной длины [Cruz-Piris et al., 2019] и [Liu et al., 2023].

В настоящей работе для соблюдения наложенных условий и ограничений предложены отличные от классического: способ кодирования решения в виде хромосомы, способ выполнять оператор скрещивания, а также способ выполнять оператор мутации.

Для кодирования решения в виде хромосомы представим орграф в виде множества маршрутов, где отдельный маршрут состоит из последовательности операций. Процесс составления одного маршрута заключается в случайном выборе начальной операции, после чего из выходов этой операции, в соответствии с матрицей правил, случайным образом выберем следующую операцию, а затем для этой операции повторим поиск и выбор последующей и будем действовать таким образом, пока не достигнем конечной операции. Составленный таким образом маршрут будет удовлетворять наложенным ограничениям на входящие и исходящие потоки операций. Если объединить N таких маршрутов, то получится образовать верный орграф технологического процесса. Кроме маршрутов в хромосоме будем хранить множество дуг T для полученного орграфа. Пример хромосомы показан на рисунке 3.



- R1=O1-O2-O4-O5-O6
- R2=O1-O2-O5-O6
- R3=O1-O3-O4-O6

O1	O2	O1	O3	...	...
0.79		0.21		...	...

Рисунок 3. Пример кодирования  
Источник: составлено авторами

Оператор скрещивания будет воздействовать на уровне маршрутов хромосомы. У каждой из двух выбранных оператором отбора для рекомбинации родительских особей выделяется по одному маршруту. В хромосому одной особи добавляется маршрут из другой особи, при этом добавленный маршрут удаляется. Если в процессе скрещивания образуются «висячие» узлы, то они также удаляются из хромосомы. Если при добавлении или удалении маршрута изменяется количество исходящих дуг узла, то для них выполняется пересчет весов согласно (6). Таким образом, соблюдается корректность операций и всего технологического процесса. Пример скрещивания показан на рисунке 4.

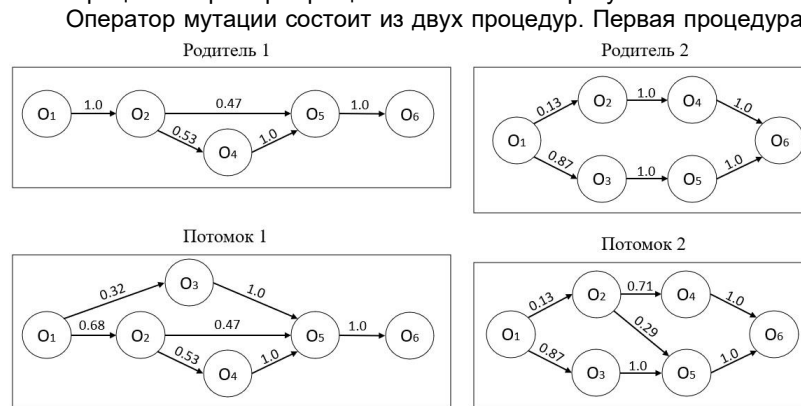


Рисунок 4. Рекомбинация особей  
Источник: составлено авторами

Оператор мутации состоит из двух процедур. Первая процедура заключается в модификации весовых коэффициентов после очередной итерации цикла развития популяции. Поскольку мутация носит вероятностный характер, определим уровень  $P_w \in [0, 1]$  для контроля над запуском процедуры мутации. Для каждого узла орграфа сгенерируем случайную величину  $P_{rand} \in [0, 1]$  и в случае, если  $P_{rand}$  меньше  $P_w$ , то зададим новые веса для всех исходящих дуг из этого узла с учетом (6). Вторая процедура используется для обеспечения возможности расширения или сужения пространства поиска. Обозначим вероятность изменения маршрутной сети внутри хромосомы  $P_{route} \in [0, 1]$ . Если у особи не произошла мутация весовых коэффициентов, то для нее с вероятностью  $P_{route}$  будем добавлять или удалять маршруты в хромосоме после очередной итерации генетического алгоритма.

**Эксперимент**

Под руководством профессора Б.Б. Зобнина выполняется проект по разработке комплекса безрегентной очистки кислородных шахтных вод, нацеленный на снижение экологических последствий самоизлива на шахтах, которые находятся на «мокрой» консервации. Одной из задач в процессе разработки является поиск оптимальной структуры построения комплекса из имеющейся компонентной базы. С точки зрения технологического процесса комплекс состоит из множества операций, выполняемых для получения очищенной воды: откачка воды насосами, фильтрационная очистка, промывка, осаждение и так далее. При этом каждая операция может быть реализована с помощью различных компонентов. Так, для операции очистки могут быть использованы разные виды фильтров. В свою

очередь каждый такой фильтр характеризуется различным исполнением, производительностью, потерями, размерами и фильтрующими материалами загрузки. Таким образом, множество допустимых операций технологического процесса задается доступной компонентной базой. Матрица правил процесса определяется возможностью соединения между собой компонентов и общими требованиями к реализуемому процессу очистки. Функции вида (7) задавались модельным способом, поскольку компонентная база находится в стадии формирования. Для оценки приспособленности особи использовалась формула (8), которая определяется как разность суммарного выпуска очищенной воды  $Q$  и величины затрат на ее производство с учетом затрат на ремонт комплекса в случае выхода из строя его компонентов.

$$Fitness(x) = Q - \left( \sum_{k \in K} S_k(x_k) + \sum_{i=1}^n P_i C_i \right), n = |K| \quad (8).$$

В формуле (8) множество  $K$  состоит из компонентов технологического процесса. Каждое слагаемое  $S_k$  отражает затраты на осуществление  $k$ -ой операции при условии  $x_k$  входа,  $P_i$  показывает вероятность выхода из строя  $i$ -ого компонента,  $C_i$  – средняя стоимость ремонта вышедшего из строя компонента. Для остальных параметров установлены следующие значения: количество особей начальной популяции 100, уровень  $P_w$  мутации 0.05, величина  $P_{route}$  равна 0.10, критерием останова выбрано максимальное количество итераций 100. График развития популяции показан на рисунке 5.

На графике развития можно заметить, что начальные поколения имели низкую приспособленность, однако с развитием популяции виден рост как средней, так и максимальной приспособленности особей. Несмотря на падения, которые наблюдались в процессе эксперимента, направленное эволюционное развитие позволило обеспечить общее движение популяции к поиску лучшего решения.

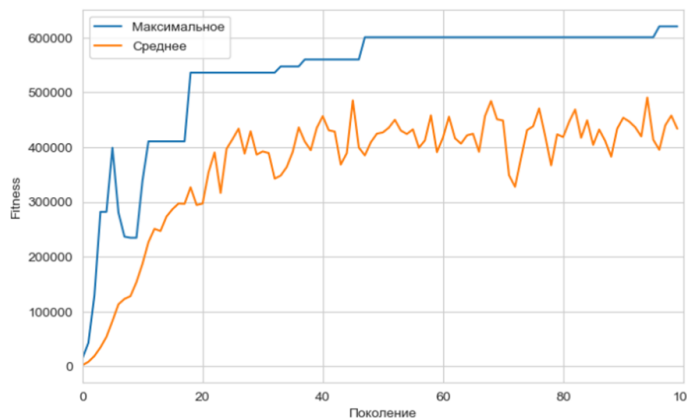


Рисунок 5. Зависимость приспособленности  
Источник: составлено авторами

Несмотря на падения, которые наблюдались в процессе эксперимента, направленное эволюционное развитие позволило обеспечить общее движение популяции к поиску лучшего решения.

### Заключение

Предложенный в настоящей работе метод в условиях проведенного эксперимента показал свою работоспособность и возможность его применения к поставленной задаче. При этом для использования генетического алгоритма потребовалось разработать способ хранения решения в виде хромосомы, реализовать операторы скрещивания и мутации, а также определить функцию для оценки приспособленности особей в популяции. Из проведенного эксперимента также стало понятно, что итоговый результат работы зависит от выбора гиперпараметров и начальной популяции. Данный метод можно использовать как для проектирования технологических процессов с нуля, так и для оценки эффекта от проведения модернизации при появлении новых технологических операций. Задание для каждой операции функции в виде (7) позволяет выполнить расчет модели произвольной структуры и смысла. В качестве дальнейшего развития метода целесообразно разработать подходы, увязывающие множество технологических процессов между собой с учетом различных уровней иерархии производственных процессов, а также исследовать вопрос снижения зависимости от начальной популяции.

В отличие от других детерминированных подходов семейство генетических алгоритмов используют операторы, которые имеют вероятностный характер, однако в совокупности применяемых методов удается использовать случайность для направленного поиска решений. Важной особенностью методов, которые основаны на идее эволюционного развития, является возможность их применения к задачам, которые имеют сложную математическую формулировку или вообще не поддаются математическому представлению. Среди других достоинств можно отметить стойкость к шумовым колебаниям и допустимость применения распределенных вычислений.

### Литература

1. Волошко А.Г., Ивутин А.Н., Крюков О.С. (2020), Методы моделирования и анализа производственных процессов для разработки стратегии модернизации предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – No 12. – С. 36–44
2. Денисова Я.В., Петрова А.С., Сопин В.Ф. (2022), Оптимизация производственного процесса путем внедрения методов бережливого производства // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, vol. 84, no. 2 (92), 2022, pp. 315-323

3. Матюшок С.В., Фомина А.В., Хрусталеv Е.Ю. (2014), Проектный подход как метод повышения экономической эффективности наукоемких промышленных предприятий // Экономический анализ: теория и практика, no. 34 (385), 2014, pp. 2-16
4. Попов А.П., Запольская А.Н., Попова Т.А. (2020), Многовариантный подход в решении оптимизационных задач составления алгоритмического описания маршрутов обработки // Транспортное машиностроение, no. 11 (96), 2020, pp. 18-25
5. Савенкова Н.П. (2021), Новый подход к математическому моделированию календарного планирования на промышленном предприятии / Н.П. Савенкова, В.С. Лапонин, А.Ю. Мокин, Л.А. Артемьева, А.А. Дряженков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2021. – No 2 (135). – С. 103-114
6. Сочнев А.Н. (2020), Постановка задачи оптимизации в терминологии сетей петри // Вестник кибернетики, no. 1 (37), 2020, pp. 85-90
7. Тациенко В.П., Шатько Д.Б., Баканов А.А. (2020), Оптимизация технологического процесса на основе хронометража его ключевых операций // Вестник Кузбасского государственного технического университета, no. 1 (137), 2020, pp. 12-19
8. Achibat, Fatima Ezzahra & Lebkiri, Ahmed & Aouane, M. & Lougraimzi, Hanane & Berrid, Nabyl & Maqboul, Abdelaziz (2023), Analysis of the Impact of Six Sigma and Lean Manufacturing on the Performance of Companies. Management Systems in Production Engineering. 31. 191-196. 10.2478/mspe-2023-0020
9. Almufti, Saman & Shaban, Awaz & Ali, Rasan & Fuente, Jayson (2023), Overview of Metaheuristic Algorithms. Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends. 2. 10-32
10. Aripin, Norhana Mohd, Nawanir, Gusman, Mahmud, Fatimah, Fauzi, Muhammad Ashraf, Hussain, Suhaidah and Lee, Khai Loon (2023), Systematic Literature Review: Theory Perspective in Lean Manufacturing Performance // Management Systems in Production Engineering, vol.31, no.2, 2023, pp.230-241
11. Cruz-Piris, Luis & Marsá-Maestre, Ivan & López-Carmona, Miguel (2019), A Variable-Length Chromosome Genetic Algorithm to Solve a Road Traffic Coordination Multipath Problem. IEEE Access. PP. 1-1
12. Kraus, Sascha & Jones, Paul & Kailer, Norbert & Weinmann, Alexandra & Chaparro-Banegas, Nuria & Roig-Tierno, Norat (2021), Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. SAGE Open. 11. 10.1177/21582440211047576
13. Liu, Xiaoming & Wang, Liang & Cao, Yongji & Ma, Ruicong & Wang, Yao & Li, Changgang & Liu, Rui & Zou, Shihao (2023), Renewable Scenario Generation Based on The Hybrid Genetic Algorithm with Variable Chromosome Length. Energies. 16. 3180
14. Osintsev N. and Khalilian B. (2023), Does organizational performance increase with innovation and strategic planning, J. Oper. Strateg Anal., vol. 1, no. 1, pp. 25–33
15. Teixeira, J.E. and Tavares-Lehmann, A.T. (2023), Industry 4.0: the future of manufacturing from the perspective of business and economics – a bibliometric literature review, Competitiveness Review, Vol. 33 No. 2, pp. 458-482

#### References in Cyrillics

1. Voloshko A.G., Ivutin A.N., Kryukov O.S. (2020), Metody modelirovaniya i analiza proizvodstvennykh protsessov dlya razrabotki strategii modernizatsii predpriyatiya // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2020. – No 12. – pp. 36-44
2. Denisova Ya.V., Petrova A.S., Sopin V.F. (2022), Optimizatsiya proizvodstvennogo protsessa putem vnedreniya metodov berezhlivogo proizvodstva // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii, vol. 84, no. 2 (92), 2022, pp. 315-323
3. Matyushok S.V., Fomina A.V., Khrustalev E.Yu. (2014), Proektnyi podkhod kak metod povysheniya ekonomicheskoi effektivnosti naukoemkikh promyshlennykh predpriyatii // Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika, no. 34 (385), 2014, pp. 2-16
4. Popov A.P., Zapol'skaya A.N., Popova T.A. (2020), Mnogovariantnyi podkhod v reshenii optimizatsionnykh zadach sostavleniya algoritmicheskogo opisaniya marshrutov obrabotki // Transportnoe mashinostroenie, no. 11 (96), 2020, pp. 18-25
5. Savenkova N.P. (2021), Novyi podkhod k matematicheskomu modelirovaniyu kalendarного planirovaniya na promyshlennom predpriyatii / N.P. Savenkova, V.S. Laponin, A.Yu. Mokin, L.A. Artem'eva, A.A. Dryazhenkov // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie. – 2021. – No 2 (135). – pp. 103-114
6. Sochnev A.N. (2020), Postanovka zadachi optimizatsii v terminologii setei petri // Vestnik kibernetiki, no. 1 (37), 2020, pp. 85-90
7. Tatsienko V.P., Sha't'ko D.B., Bakanov A.A. (2020), Optimizatsiya tekhnologicheskogo protsessa na osnove khronometrazha ego klyuchevykh operatsii // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, no. 1 (137), 2020, pp. 12-19
8. Achibat, Fatima Ezzahra & Lebkiri, Ahmed & Aouane, M. & Lougraimzi, Hanane & Berrid, Nabyl & Maqboul, Abdelaziz (2023), Analysis of the Impact of Six Sigma and Lean Manufacturing on the Per-

- formance of Companies. Management Systems in Production Engineering. 31. 191-196. 10.2478/mspe-2023-0020
9. Almufti, Saman & Shaban, Awaz & Ali, Rasan & Fuente, Jayson (2023), Overview of Metaheuristic Algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*. 2. 10-32
  10. Aripin, Norhana Mohd, Nawadir, Gusman, Mahmud, Fatimah, Fauzi, Muhammad Ashraf, Hussain, Suhaidah and Lee, Khai Loon (2023), Systematic Literature Review: Theory Perspective in Lean Manufacturing Performance // *Management Systems in Production Engineering*, vol.31, no.2, 2023, pp.230-241
  11. Cruz-Piris, Luis & Marsá-Maestre, Ivan & López-Carmona, Miguel (2019), A Variable-Length Chromosome Genetic Algorithm to Solve a Road Traffic Coordination Multipath Problem. *IEEE Access*. PP. 1-1
  12. Kraus, Sascha & Jones, Paul & Kailer, Norbert & Weinmann, Alexandra & Chaparro-Banegas, Nuria & Roig-Tierno, Norat (2021), Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open*. 11. 10.1177/21582440211047576
  13. Liu, Xiaoming & Wang, Liang & Cao, Yongji & Ma, Ruicong & Wang, Yao & Li, Changgang & Liu, Rui & Zou, Shihao (2023), Renewable Scenario Generation Based on The Hybrid Genetic Algorithm with Variable Chromosome Length. *Energies*. 16. 3180
  14. Osintsev N. and Khalilian B. (2023), Does organizational performance increase with innovation and strategic planning, *J. Oper. Strateg Anal.*, vol. 1, no. 1, pp. 25–33
  15. Teixeira, J.E. and Tavares-Lehmann, A.T. (2023), Industry 4.0: the future of manufacturing from the perspective of business and economics – a bibliometric literature review, *Competitiveness Review*, Vol. 33 No. 2, pp. 458-482

#### Ключевые слова

Технологический процесс, структурно-параметрический синтез, оптимизация, генетический алгоритм, модель процесса.

*Варнухов Артем Юрьевич,  
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия  
[vudyart@gmail.com](mailto:vudyart@gmail.com)*

*Зобнин Борис Борисович, д.т.н., профессор  
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия  
[zobninbb@mail.ru](mailto:zobninbb@mail.ru)*

#### **Artem Varnukhov, Boris B. Zobnin A method for constructing a process model based on an oriented graph of operations using a genetic algorithm**

#### Keywords

Technological process, structural-parametric synthesis, optimization, genetic algorithm, process model.

DOI: 10.34706/DE-2023-03-10

JEL classification C61 – Методы оптимизации, программные модели, динамический анализ

#### Abstract

The problem of structural-parametric synthesis of the technological process is defined. A representation and a method for calculating the result of the simulated technological process in the form of a digraph is proposed. A method for solving the problem based on a modified genetic algorithm has been developed. The results of the experiment are shown and the directions of the method development are formulated.