

Определение рациональных уровней отсева вариантов проектных решений в системе автоматизированного планирования технологических процессов

© 2021

Митин Сергей Геннадьевич^{1,5}, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения и прикладная механика»

Бочкарёв Пётр Юрьевич^{*1,2,6}, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения и прикладная механика», профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК»

Шалунов Вячеслав Викторович^{3,7}, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры педагогики, образовательных технологий и профессиональной коммуникации

Разманов Иван Александрович^{4,8}, исследователь, ведущий инженер-конструктор

¹Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Камышин (Россия)

²Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов (Россия)

³Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского Министерства здравоохранения Российской Федерации, Саратов (Россия)

⁴ООО «Газснабинвест», Саратов (Россия)

*E-mail: bpy@mail.ru

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-0424>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9908-232X>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1921-057X>

Аннотация: Разработка системы автоматизированного планирования технологических процессов механической обработки направлена на решение актуальной задачи сокращения сроков и повышения качества технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств, поскольку в существующих системах автоматизированного проектирования технологических процессов отсутствует возможность быстрого реагирования на изменения производственной ситуации, часто возникающие в условиях многономенклатурного производства. В системе автоматизированного планирования технологических процессов, разрабатываемой авторами работы, заложены требования полной автоматизации проектных действий, многовариантности проектных решений и наличия обратной связи с подсистемой реализации технологических процессов. Статья посвящена разработке математической модели и методики нахождения рациональных уровней отсева вариантов проектных решений в зависимости от производственной ситуации для всей совокупности проектных процедур системы автоматизированного планирования технологических процессов. Обосновано использование математического аппарата генетических алгоритмов, дано описание математической модели в его терминах. В качестве гена обозначен уровень отсева в отдельной проектной процедуре. Хромосома представляет собой набор генов в соответствии с проектными процедурами. Целевая функция определяет минимальное суммарное время обработки заданной номенклатуры деталей на основе множеств комбинаций генов, возникающих в результате проведения операций скрещивания и мутаций. Результатом работы является математическая модель и методика для определения рациональных уровней отсева в каждой проектной процедуре, обеспечивающая возможность самонастройки системы автоматизированного планирования технологических процессов в зависимости от производственной ситуации.

Ключевые слова: система автоматизированного планирования технологических процессов; технологическая подготовка производства; отсев вариантов проектных решений.

Для цитирования: Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю., Шалунов В.В., Разманов И.А. Определение рациональных уровней отсева вариантов проектных решений в системе автоматизированного планирования технологических процессов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 3. С. 48–56. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-48-56.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении значительная доля производственных систем носит многономенклатурный характер. Наряду с повышением сложности технологических задач предъявляются всё более жесткие требования к сокращению сроков технологической подготовки производства (ТПП). Эффективное проектирование технологических процессов (ТП) механообработ-

ки в условиях многономенклатурного производства возможно только с применением систем автоматизированного проектирования (САПР ТП).

Методологические основы разработки отечественных САПР ТП и различные подходы к ней заложены в работах [1–3]. Проблема автоматизации проектирования ТП механообработки деталей в различных условиях машиностроительного производства исследовалась в [1], в результате чего были разработаны теория системно-

структурного моделирования ТП и программно-алгоритмическое обеспечение многоуровневого итерационного синтеза проектных решений. Но в работе не рассматривается связь системы проектирования с производственной системой, что не позволяет реагировать на изменения производственной ситуации.

В работе [2] описан метод проектирования групповых ТП, согласно которому групповой ТП разрабатывается для изготовления сходных по конфигурации изделий, что позволяет обрабатывать любую деталь группы без значительного отклонения от общей технологической схемы. Однако при многономенклатурном производстве часто возникает необходимость выполнять вновь поступившие задания по механообработке деталей, не входящих в группу, поэтому в такой ситуации метод создания групповых ТП оказывается недостаточным эффективным.

Идея модульного проектирования ТП, которая заключается в представлении изделия в виде структурированного множества соединений и поверхностей деталей (модулей), с помощью которых детали выполняют ту или иную служебную функцию, предлагается в работе [3]. Для изготовления модулей создается банк технологических переходов и средств технологического оснащения. В результате модульная технология имеет свойства инвариантности и альтернативности, так как набор технологических блоков ограничен, а для изготовления модуля разрабатывается несколько вариантов ТП. К недостаткам модульной технологии относятся низкая взаимозаменяемость оборудования и возможное возникновение трудностей при создании установочно-зажимных приспособлений для применения на одном станке различных по своему характеру методов обработки. Это в условиях многономенклатурного производства накладывает ограничение на номенклатуру обрабатываемых деталей.

В [4] описан подход к разработке автоматизированной системы для выбора стратегий обработки на основе распознавания конструкторско-технологических элементов (КТЭ) детали по ее 3D-модели. В результате работы такой системы формируются рекомендации по инструментальной стратегии обработки КТЭ, включая предложения о вариантах режущего инструмента, рекомендуемые режимы резания и предварительный расчет времени и себестоимости механообработки. Такой подход позволяет повысить эффективность ТПП за счет сокращения времени проектирования ТП, однако окончательное решение по выбору рациональных ТП принимает технолог, что не позволяет системе автоматически подстраиваться под изменения производственной ситуации.

Таким образом, задача наделения производственных систем свойствами гибкости с точки зрения возможности адаптации к постоянным изменениям производственной ситуации является актуальной.

Изучение международного опыта по разработке САПР ТП [5; 6], анализ перспектив автоматизации ТПП [7] и критический обзор возможностей известных отечественных САПР ТП приводят к заключению, что задачи оценки эффективности проектных решений и особенно их взаимовлияния недостаточно проработаны.

Так, например, в существующих САПР ТП имеется возможность выбора и сравнения нескольких вариантов

маршрутов ТП из базы данных аналогов ТП или вариантов технологического оборудования [8–10]. Однако их сравнительный анализ ограничен опытом конкретного технолога и заданными сроками ТПП. Большую сложность для технолога представляет недостаточность информации на начальных этапах проектирования ТП для оценки эффективности принимаемых решений. Например, расчет себестоимости механообработки при наличии только маршрутных ТП является приближенным в условиях отсутствия точных сведений о применении режущем инструменте, технологической оснастке и режимах резания. В итоге совокупность решений может оказаться малоэффективной для производственной системы в целом.

Метод повышения эффективности многономенклатурного производства на основе адаптации базового ТП, созданного на этапе ТПП, к текущему состоянию технологического оборудования и других технологических подсистем реализации ТП в соответствии с организационно-экономическими требованиями путем создания множества настраиваемых производственно-технологических решений предложен в работе [11]. Этот метод позволяет сократить непродуктивные потери времени, вызванные необходимостью согласования текущей производственной ситуации и требований ТП, однако в работе не предложены критерии выбора решений в зависимости от производственной ситуации.

Система автоматизированного планирования технологических процессов (САПлТП), разрабатываемая авторами данного исследования, обладает возможностями полной автоматизации проектных действий, многовариантности проектных решений и имеет обратную связь с подсистемой реализации ТП. САПлТП состоит из множества подсистем, реализующих проектные процедуры по разработке ТП [12; 13]. Проектные процедуры выполняются в три стадии: генерации возможных вариантов проектных решений, отсева нерациональных вариантов и выбора рациональных вариантов для складывающейся производственной ситуации. В каждой проектной процедуре на стадии отсева обоснованы критерии, количественные значения которых (уровни отсева) в зависимости от производственной ситуации должны отличаться. В результате появляется возможность поиска рациональных вариантов для текущей производственной ситуации из сгенерированного множества вариантов.

В наших работах [14; 15] предложена система показателей, обеспечивающая оценку проектных решений в автоматизированном режиме [14], и обоснован обобщенный критерий эффективности (ОКЭ) ТПП [15], который представляет собой суммарное время работы оборудования для обработки заданной номенклатуры деталей и позволяет оценить влияние решений, принятых в различных проектных процедурах. Отсев нерациональных вариантов проводится по критериям, которые не обладают свойством гибкости, что может привести к исключению из рассмотрения вариантов, которые потенциально могли бы увеличить совокупные показатели эффективности работы производственной системы.

Для решения этого вопроса в работе [15] описана методика ранжирования проектных процедур по уровню влияния на значение ОКЭ. В результате проектные

процедуры, имеющие более высокий ранг, обладают большей значимостью и влекут необходимость проведения менее жесткого отсева для увеличения количества анализируемых вариантов.

Анализ литературных источников показал, что актуальна проблема повышения эффективности многономенклатурных производственных систем механообработки. Современные САПР ТП не обладают возможностью быстрой адаптации к изменениям производственной ситуации. Разрабатываемая нами САПР ТП учитывает эти недостатки, однако для наделения ее функционалом самонастройки необходимо решить задачу оценки проектных решений в автоматизированном режиме.

Цель исследования – разработка математической модели и методики для определения рациональных уровней (значений показателей) отсева для каждой проектной процедуры, в результате чего на этапе выбора рациональных вариантов система сформирует наиболее эффективные варианты проектных решений с точки зрения функционирования всей производственной системы.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящее исследование, направленное на разработку проектной процедуры определения рациональных уровней отсева проектных решений на различных этапах проектирования в рамках САПР ТП, проводилось по следующей методике:

- выбор и обоснование математического метода;
- разработка математической модели, отражающей проектные действия по определению рациональных уровней отсева проектных решений;
- разработка программного обеспечения для проверки адекватности математической модели и работоспособности данной проектной процедуры;
- обсуждение результатов, формулирование выводов и предложений по дальнейшим исследованиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Обоснование выбора математического метода

Рациональные уровни отсева можно определить путем полного перебора значений показателей для каждой проектной процедуры. Эта задача относится к NP-полным, что только увеличивает сложность общей проблемы проектирования рациональных ТП с помощью САПР ТП. Очевидно, что сроки ТПП не позволяют оценить все возможные комбинации вариантов. В связи с этим нами были проанализированы математические подходы к решению задач, связанных с полным перебором вариантов [16], с целью поиска математического аппарата, позволяющего в кратчайшие сроки найти оптимальные решения задачи.

В современных научных публикациях, связанных с проектированием ТП механообработки, успешно применяются генетические алгоритмы (ГА). Например, в работе [17] приводится методика оптимизации маршрутного технологического процесса с помощью ГА, авторы [18] предлагают подход для определения последовательности технологических операций для призма-

тических деталей на основе ГА, в [19] описывается методика адаптивного планирования наладок с использованием ГА.

Работа [20] посвящена использованию ГА на этапах предварительного и детального проектирования ТП. На предварительном этапе на основе анализа ограничений с использованием ГА генерируются возможные последовательности операций. Далее на этапе детального планирования использование ГА позволяет сократить количество возможных последовательностей операций, оптимизировать выбор технологического оборудования, режущего инструмента и технологической оснастки для каждой операции. В работе утверждается, что применение ГА дает возможность генерировать оптимальные или близкие к оптимальным варианты ТП на основе выбранного критерия, что подтверждается рядом экспериментов, направленных на демонстрацию выполнимости и надежности предложенного алгоритма.

Таким образом, простые в реализации, ГА обладают достаточной стойкостью к попаданию в локальные оптимумы, используются для решения сложных оптимизационных задач. Главным преимуществом ГА является отсутствие необходимости знать точное поведение оптимизируемой функции, поэтому имеется возможность использования ГА в изменяющихся системах. Все эти аспекты относятся к условиям работы САПР ТП: производственная ситуация в многономенклатурных производственных системах постоянно изменяется, поведение функции, определяющей значения обобщенного критерия эффективности, стохастическое.

Далее рассмотрим интерпретацию классической модели ГА для решения поставленной задачи по определению рациональных уровней отсева в каждой проектной процедуре.

2. Разработка математической модели для определения рациональных уровней отсева проектных решений

2.1. Описание модели в терминах генетического алгоритма

Обозначим в качестве гена $x_{i,j}$ – значение критерия отсева (уровень отсева) для i -й проектной процедуры, где $i=1..n$, n – количество проектных процедур; $j=1..m_i$ – номер варианта уровня отсева для i -й проектной процедуры; m_i – количество вариантов уровней отсева, которое задается в зависимости от значимости i -й проектной процедуры.

При этом

$$x_{i,j} \in [x_{i,\min}; x_{i,\max}],$$

где $x_{i,\min}$ – минимально допустимый уровень отсева для i -й проектной процедуры, обеспечивающий сохранение вариантов проектных решений, которые позволяют обработать заданную номенклатуру деталей;

$x_{i,\max}$ – максимальный уровень отсева, зависящий от значимости проектной процедуры:

$$x_{i,\max} = r_i + \frac{100 - r_i}{K_r}, \quad (1)$$

где r_i – ранг i -й проектной процедуры, определяющий ее значимость для конкретных производственных условий [15];

$K_r > 1$ – коэффициент пропорциональности, который задается как исходный параметр ГА. Чем выше его значение, тем уже диапазон уровней отсева и меньше влияние значимости проектной процедуры на верхнюю границу уровня отсева. При этом не рекомендуется задавать значение $K_r = 1$, поскольку тогда ГА должен будет обработать ситуации, в которых после отсева останутся все сгенерированные варианты проектных решений, что значительно увеличит время работы подсистемы проектирования ТП.

Для каждой проектной процедуры количество генов ограничено m_i , а их числовые значения вычисляются в соответствии с рангом:

$$m_i = \lceil r_i \cdot K_m \rceil + 1, \quad (2)$$

$$x_{i,j} = x_{i,\min} + \frac{x_{i,\max} - x_{i,\min}}{m_i - 1} \cdot (j - 1), \quad (3)$$

где $K_m > 0$ – коэффициент пропорциональности, который задается как исходный параметр ГА в зависимости от начальных условий. Чем более детально мы хотим определить уровень отсева, тем больше значение K_m . Например, сформированный набор генов для проектной процедуры № 1 с параметрами $i=1, r_i=10, K_r=2, K_m=1, m_i=11, x_{i,\min}=5, x_{i,\max}=55$ представляет множество $x_1 = \{5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55\}$.

Решение поставленной задачи представляет собой такой набор уровней отсева для совокупности проектных процедур, который обеспечивает минимальное

значение ОКЭ. Следовательно, **хромосома** представляет собой множество

$$X = (x_{i,j} | i = 1 \dots n, j = 1 \dots m_i), \quad (4)$$

то есть каждый элемент множества (ген) означает уровень отсева в соответствующей проектной процедуре, например $X = \{10, 20, 50, 10, 30, 70, 20\}$.

Для инициализации исходной популяции генерируются K_o хромосом из случайных генов из каждого набора генов в соответствующих проектных процедурах. В нашем случае для хромосомы, состоящей из 7 генов, примем $K_o = 10$. Пример генерации исходной популяции из 10 особей представлен в таблице 1.

Целью решения задачи является нахождение минимального суммарного времени обработки заданной номенклатуры деталей по формуле (1) в зависимости от уровней отсева, заданных в хромосоме X :

$$T_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Приспособленность особи (фитнесс-функция) F тем выше, чем меньше значение:

$$F = f(X) = \frac{1}{T_{\Sigma}} \rightarrow \max. \quad (6)$$

2.2. Методика инициализации исходной популяции и селекции

Следующим блоком ГА является выбор пар родителей. Для нашей задачи из-за ресурсоемкости расчета целевой функции необходимо стремиться к сокращению

Таблица 1. Пример генерации исходной популяции
Table 1. The example of initial population generation

Хромосома	Номера генов (i)						
	1	2	3	4	5	6	7
X_{o1}	5	5	5	5	10	40	5
X_{o2}	5	10	5	5	10	10	30
X_{o3}	5	20	10	50	5	5	50
X_{o4}	10	5	25	10	20	5	10
X_{o5}	30	25	5	10	5	5	5
X_{o6}	25	40	20	10	50	5	10
X_{o7}	5	30	10	20	10	5	25
X_{o8}	40	20	10	20	40	15	20
X_{o9}	30	20	10	5	10	20	20
X_{o10}	20	20	30	5	70	25	5

числа итераций, поэтому при каждой итерации с большей вероятностью должны чаще выбираться более приспособленные особи. Это обеспечивается в методе рулетки, когда родительские особи выбираются путем определенного количества «запусков» рулетки, равного количеству особей в популяции. Количество секторов на колесе рулетки эквивалентно количеству особей, а размер каждого k -го сектора пропорционален вероятности попадания в новую популяцию $P(k)$.

$$P(k) = \frac{f(X_k)}{\sum_{k=1}^N f(X_k)}. \quad (7)$$

Иллюстрация метода рулетки приведена в таблице 2 (значения приспособленности определены случайным образом только для примера).

2.3. Методика проведения процедуры скрещивания

Следующим шагом ГА является получение новых особей-потомков путем применения оператора рекомбинации, благодаря чему потомки наследуют генетический материал от обеих родительских особей. Наиболее распространенным оператором рекомбинации является одноточечный кроссинговер, или «скрещивание».

В нашем случае наряду с одноточечным кроссинговером целесообразно использовать кроссинговер с уменьшением замены, чтобы не допустить образование дублирующих особей с целью сокращения времени работы алгоритма. Это осуществляется путем введения ограничения на выбор точки разрыва, которая выбирается

только в месте, где имеется различие между генами родительских хромосом (таблица 3).

Таким образом, еще одним параметром алгоритма является $K_c=1 \dots n$ – точка кроссинговера.

2.4. Методика проведения процедуры мутации

Одним из недостатков ГА является возможность преждевременной сходимости при попадании в точку локального экстремума. Во избежание этого в ГА вводится процедура мутации, вероятность которой $P_m \ll 1$. В нашем случае на изменение целевой функции (времени производства рассматриваемой совокунности деталей) влияет множество факторов, к которым в том числе относятся технологические возможности оборудования, текущее состояние производственной системы, при этом производственный процесс имеет стохастический характер, поэтому целесообразно использовать методику самоадаптирующейся оценки вероятности мутаций.

В результате методика мутации в рассматриваемой задаче будет следующей:

1) для каждой особи вычисляется вероятность возникновения мутации $P_{m,q}$, где q – номер особи;

2) генерируется случайное число p из отрезка $[0; 1]$, если $p < P_{m,q}$, то q -я особь подвергается мутации: выбирается случайным образом 1 или 2 гена, каждый из которых заменяется другим, выбранным случайным образом из сгенерированного ранее набора.

Пример процедуры мутации представлен в таблице 4. В примере мутации подвергнуты два гена для $i=3$ и $i=5$.

После процедуры мутации ГА переходит к очередной итерации и продолжает работать, пока не будет достигнуто условие завершения (необходимое значение целевой функции или ограничение по количеству итераций или времени работы алгоритма).

Таблица 2. Пример выбора родительских особей методом рулетки
Table 2. The example of selection of parents using the roulette-wheel selection method

Особь	Приспособленность	$\sum_{k=1}^N f(X_k)$	$P(k)$
X_{o1}	0,012	0,426	0,03
X_{o2}	0,039	0,426	0,092
X_{o3}	0,019	0,426	0,046
X_{o4}	0,013	0,426	0,031
X_{o5}	0,028	0,426	0,067
X_{o6}	0,067	0,426	0,158
X_{o7}	0,053	0,426	0,125
X_{o8}	0,056	0,426	0,132
X_{o9}	0,036	0,426	0,083
X_{o10}	0,018	0,426	0,041

Таблица 3. Пример операции кроссинговера
Table 3. The example of the crossing-over operation

Родительские хромосомы	Номера генов (i)						
	1	2	3	4	5	6	7
X_{o1}	5	5	5	5	10	40	5
X_{o8}	40	20	10	20	40	15	20
Хромосомы потомков	Кроссинговер при $i=3$						
$X_{1,1}$	5	5	5	20	40	15	20
$X_{1,2}$	40	20	10	5	10	40	5

Таблица 4. Пример процедуры мутации
Table 4. The example of the mutation procedure

Хромосома	Номера генов (i)						
	1	2	3	4	5	6	7
X_{o1} до мутации	5	5	5	5	10	40	5
X_{o1m} после мутации	5	5	<u>25</u>	5	<u>40</u>	40	5

Примечание: подчеркнуты изменившиеся уровни отсева.

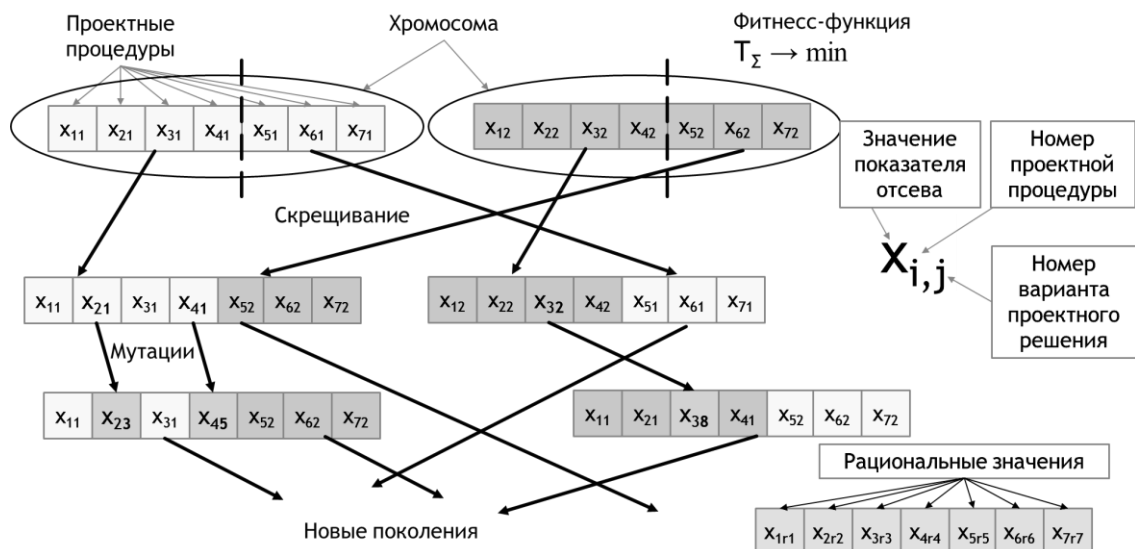


Рис. 1. Структурная модель методики определения рациональных уровней отсева
Fig. 1. The structural model of the technique of identifying the sustainable selection levels

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обобщенная структурная модель методики определения рациональных уровней отсева представлена на рис. 1. На основе данной методики разработано программное обеспечение «Программа определения ра-

циональных значений показателей отсева в проектных процедурах системы автоматизированного планирования технологических процессов»¹, которое позволило

¹ Митин С.Г., Разманов И.А., Бочкарёв П.Ю., Бокова Л.Г. Программа определения рациональных значений показателей

оценить адекватность предложенной модели и сделать вывод о работоспособности проектной процедуры определения рациональных уровней отсева.

Ввиду значительного объема сгенерированных вариантов работа генетического алгоритма может занять продолжительное время, поэтому необходимо сократить число вариантов перебора с целью подбора параметров генетического алгоритма, таких как количество особей в исходной популяции, количество шагов (поколений), расположение разделителя (кроссинговера), варианты мутаций. Для этого предлагается сформировать обобщенную статистически обработанную номенклатуру деталей и произвести на ней моделирование работы системы проектирования.

Главным недостатком ГА является проблема нахождения точного глобального оптимума и неэффективность применения для оптимизации сложно вычисляемой функции. Для его минимизации необходима разработка методики формирования обобщенной номенклатуры деталей для сокращения размерности решаемой оптимизационной задачи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты.

1. Предложена и разработана математическая модель, использующая аппарат генетических алгоритмов для описания проектных действий, направленных на определение рациональных уровней отсева в проектных процедурах САПЛТП.

2. Разработаны методика и программное обеспечение для определения рациональных уровней отсева для всей совокупности проектных процедур САПЛТП, что позволяет оценить необходимое и достаточное количество вариантов проектных решений и обеспечить соблюдение заданных сроков ТПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.
2. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2-х т. Т. 1. Организация группового производства. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. 407 с.
3. Базров Б.М. Модульная технология и её внедрение в механосборочное производство // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 24–30.
4. Аверченков А.В. Повышение эффективности виртуальной подготовки производства на основе выбора оптимального режущего инструмента и стратегий обработки // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17. № 3. С. 767–774.

5. Yusof Y., Latif K. Survey on computer-aided process planning // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. № 1-4. P. 77–89.
6. Xu X., Wang L., Newman S.T. Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2011. Vol. 24. № 1. P. 1–31.
7. Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочников Е.И. Перспективы автоматизации технологической подготовки производства // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 8. С. 7–11.
8. Андриченко А.Н. Три поколения отечественных САПР технологических процессов // Станкоинструмент. 2017. № 1. С. 56–63.
9. Евгеньев Г.Б., Крюков С.С., Кузьмин Б.В., Стисес А.Г. Интегрированная система автоматизации проектирования технологических процессов и оперативного управления производством // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 3. С. 49–60.
10. Миловзоров О.В. Реализация принципов синтеза технологических процессов из обобщенной структуры на базе системы T-FLEX Технология // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-1. С. 133–138.
11. Долгов В.А. Повышение эффективности многономенклатурного машиностроительного производства путём адаптации работ технологического процесса к текущему состоянию технологической системы // Вестник МГТУ Станкин. 2011. № 3. С. 83–87.
12. Бочкарёв П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10–14.
13. Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю. Принципы создания системы автоматизированного проектирования технологических операций в условиях многономенклатурного производства // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-2. С. 117–122.
14. Разманов И.А., Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе разработки системы показателей для автоматизированной оценки уровня проектных решений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 9. С. 132–134.
15. Разманов И.А., Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю. Формирование методики ранжирования проектных процедур в системе планирования многономенклатурных технологических процессов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2019. № 1. С. 58–63. DOI: [10.18323/2073-5073-2019-1-58-63](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-1-58-63).
16. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Кнорус, 2018. 192 с.
17. Bo Z.W., Hua L.Z., Yu Z.G. Optimization of process route by genetic algorithms // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2006. Vol. 22. № 2. P. 180–188.
18. Qiao L., Wang X.-Y., Wang S.-C. A GA-based approach to machining operation sequencing for prismatic parts // International Journal of Production Research.

отсева в проектных процедурах системы автоматизированного планирования технологических процессов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018663134, 22.10.2018.

2000. Vol. 38. № 14. P. 3283–3303. DOI: [10.1080/002075400418261](https://doi.org/10.1080/002075400418261).
19. Cai N., Wang L., Feng H.-Y. GA-based adaptive setup planning toward process planning and scheduling integration // *International Journal of Production Research*. 2009. Vol. 47. № 10. P. 2745–2766. DOI: [10.1080/00207540701663516](https://doi.org/10.1080/00207540701663516).
 20. Salehi M., Tavakkoli-Moghaddam R. Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2009. Vol. 22. № 8. P. 1179–1187.
 10. Milvzorov O.V. Realization of synthesis principles of technological processes using generalized structure on the basis of T-flex technology. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 54-1, pp. 133–138.
 11. Dolgov V.A. Increase of effectiveness of multiproduct limited production by adaptation of engineering process to current status of the technological system. *Vestnik MGTU Stankin*, 2011, no. 3, pp. 83–87.
 12. Bochkarev P.Yu. System representation of planning technological machining process. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2002, no. 1, pp. 10–14.
 13. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Principles of creating the system of computer-aided design of production operations in multiproduct manufacturing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 117–122.
 14. Razmanov I.A., Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Improving the efficiency of technological preparation of diversified production based on the development of a system of indicators to assess the level of design solutions. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 9, pp. 132–134.
 15. Razmanov I.A., Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. The formation of project procedures ranking technique in the system of planning of multiproduct engineering processes. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 58–63. DOI: [10.18323/2073-5073-2019-1-58-63](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-1-58-63).
 16. Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy. Zadachi, printsipy, metodologiya* [The research of operations. Objectives, principles, methodology]. Moscow, Knorus Publ., 2018. 192 p.
 17. Bo Z.W., Hua L.Z., Yu Z.G. Optimization of process route by genetic algorithms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 180–188.
 18. Qiao L., Wang X.-Y., Wang S.-C. A GA-based approach to machining operation sequencing for prismatic parts. *International Journal of Production Research*, 2000, vol. 38, no. 14, pp. 3283–3303. DOI: [10.1080/002075400418261](https://doi.org/10.1080/002075400418261).
 19. Cai N., Wang L., Feng H.-Y. GA-based adaptive setup planning toward process planning and scheduling integration. *International Journal of Production Research*, 2009, vol. 47, no. 10, pp. 2745–2766. DOI: [10.1080/00207540701663516](https://doi.org/10.1080/00207540701663516).
 20. Salehi M., Tavakkoli-Moghaddam R. Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, vol. 22, no. 8, pp. 1179–1187.

REFERENCES

Determination of sustainable levels of design alternatives selection in the workflow cap system

© 2021

Sergey G. Mitin^{1,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair of Mechanical Engineering and Applied Mechanics

Petr Yu. Bochkarev^{*1,2,6}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, professor of Chair of Engineering Support of AIC

Vyacheslav V. Shalunov^{3,7}, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair of Teaching, Education Technologies and Business Communications

Ivan A. Razmanov^{4,8}, researcher, leading design engineer

¹*Kamyshin Institute of Technology (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin (Russia)*

²*Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov (Russia)*

³*V.I. Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov (Russia)*

⁴*Gazsnabinvest JSC, Saratov (Russia)*

*E-mail: bpy@mail.ru

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-0424>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9908-232X>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1921-057X>

Abstract: The development of the mechanical treatment workflow CAP system is aimed at the solution of a crucial task of reduction of terms and the improvement of quality of multiproduct machining manufactures work preparation, as the existing workflow CAP systems have not got the possibility of fast response to changes in a production situation often arising within the multiproduct manufacture. The authors of this paper developed the workflow CAP system, which contains the requirements of the design activity full automation, design solution multivariance, and the feedback with the engineering process implementation subsystem. The paper deals with the development of a mathematical model and the technique of searching for sustainable levels of selecting design alternatives depending on the production situation for the whole design procedures of the workflow CAP system. The authors prove the application of a mathematical tool of genetic algorithms; describe the mathematical model using its terms. As a gene, the level of selection in a separate project procedure is specified. A chromosome is a set of genes according to the project procedures. The objective function determines the minimum total time of processing of the specified nomenclature of parts based on the ranges of gene aggregates resulting from crossing and mutation operations. The result of the work is the mathematical model and the technique for identifying the sustainable levels of selection in each project procedure ensuring the possibility of self-adjustment of the workflow CAP system depending on the production situation.

Keywords: workflow CAP system; work preparation; design alternatives selection.

For citation: Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Shalunov V.V., Razmanov I.A. Determination of sustainable levels of design alternatives selection in the workflow cap system. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 3, pp. 48–56. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-3-48-56.