

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

УДК 004.94:519.714

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326



Проектирование конфигурации оборудования производственного участка на основе генетического алгоритма

© 2026, А.И. Сергеев ✉, С.А. Гуньков

Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, Оренбург, Россия

Аннотация

Предложен подход к оптимизации конфигурации оборудования, основанный на интеграции генетического алгоритма с имитационной моделью производственного участка. Представлена онтология предметной области, формализующая ключевые сущности производственного участка и их взаимосвязи, что обеспечивает концептуальную основу построения модели и интерпретации результатов. Особенность алгоритма – структура хромосомы в виде двухмерного массива, включающего параметры оборудования: скорость перемещения, временные характеристики операций, ёмкость накопителей робокаров, станков и манипуляторов. Для оценки проектных решений разработана функция приспособленности, объединяющая нормализованные критерии простоев и стоимости оборудования с возможностью гибкой настройки приоритетов через весовые коэффициенты. Для прогнозирования рыночной стоимости оборудования, нелинейно зависящей от его технических характеристик, использована экспертная система на базе алгоритма случайного леса. Архитектура программного комплекса, реализующего предложенный подход, включает этапы отбора, скрещивания и формирования новых поколений. Разработанное программное обеспечение позволяет находить оптимальные конфигурации оборудования по критериям производительности и стоимости в изменяющихся производственных условиях. Приводится пример оптимизации конфигурации оборудования производственного участка.

Ключевые слова: матричный генетический алгоритм, компьютерное моделирование, оптимизация, алгоритм случайного леса, производственный процесс, конфигурация оборудования.

Цитирование: Сергеев А.И., Гуньков С.А. Проектирование конфигурации оборудования производственного участка на основе генетического алгоритма. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №2(60). С. 314-326. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326.

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-01405, <https://rscf.ru/project/25-29-01405>.

Вклад авторов: Сергеев А.И. – разработка концепции и плана исследования; Гуньков С.А. – разработка алгоритмов и программная реализация, проведение вычислительных экспериментов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Цель и задачи работ

Планирование и оптимизация производственных процессов на современных предприятиях относятся к классу *NP*-трудных, многокритериальных задач. Традиционные методы математического программирования в таких условиях оказываются недостаточно эффективными, что стимулирует развитие и применение эволюционных методов, в частности, генетических алгоритмов (ГА), позволяющих учитывать широкий спектр факторов.

Цель статьи – разработка и апробация подхода к проектированию конфигурации оборудования на основе интеграции онтологического моделирования, матричного ГА и имитаци-

онной модели производственного участка (ПУ), обеспечивающего сокращение простоев оборудования и его стоимости.

В [1, 2] показано применение имитационного подхода для анализа технологических комплексов. Систематизация инструментов для этих целей представлена в [3]. Принципы работы ГА, их архитектура и операторы изложены в [4]. Развитие ГА идёт по пути адаптации их операторов к особенностям предметных областей (ПрО). Так, в [5] исследуется использование генетического оператора старения для борьбы с преждевременной сходимостью. В [6] рассматриваются модели ГА для оптимизации гиперпараметров нейронных сетей, а в [7] показано их применение для топологической оптимизации электрических машин. В [8] представлен ГА для синтеза технических параметров оборудования, а в [9] эта тема расширена до масштаба производственных систем. Подход в [10] фокусируется на применении ГА для оперативного планирования с учётом временных ограничений.

Одним из подходов является совместное использование ГА и имитационного моделирования [11]. Интеграция с оптимизационными алгоритмами, среди которых ГА наиболее распространены, отмечается как вектор развития цифровых двойников (ЦД) [12].

В [13] предлагается гибридный подход, сочетающий глубокое обучение для трёхмерного распознавания объектов и семантическое моделирование на основе онтологий. В [14] рассматривается сопряжение данных и моделей в рамках ЦД, где онтология описывает структуру данных, параметры моделей, а также динамические связи между ними, что позволяет унифицировать обмен информацией на семантическом уровне. Онтология используется как связующее звено между разнородными источниками данных (сенсоры, системы управления, исторические записи) и различными видами моделей (геометрические, физические, поведенческие). Поддержание актуальности ЦД в условиях динамически изменяющейся производственной среды рассмотрено в [15], где онтологическая модель описывает структуру сборочного цеха и позволяет поддерживать её изменения во времени. Разработанная онтология включает классы для элементов цеха (оборудование, оснастка, продукция, операции), а также отношения, фиксирующие временные интервалы.

В [16] разработан онтологический словарь, который систематизирует термины, атрибуты, параметры процессов и их взаимосвязи в данной ПрО. Словарь позволяет унифицировать описание производственных ресурсов (станки, оснастка, материалы, заказы) и обеспечить бесшовный обмен данными между различными системами планирования и ЦД.

В [17] онтология используется для семантического описания структуры оборудования, истории отказов, параметров состояния, а также доступных ремонтных воздействий и ресурсов. Разработанная система поддержки принятия решений на основе правил и онтологического вывода позволяет формировать рекомендации по времени и типу обслуживания, учитывая текущую загрузку производства и приоритеты.

На основе приведённого обзора выделены идеи и методы, которые нашли применение при разработке программного комплекса проектирования конфигурации оборудования ПУ: для формализации связей между параметрами оборудования и показателями эффективности применён подход к сопряжению данных и моделей в ЦД на основе онтологии [14]; задание границ изменения параметров в ГА позволяет осуществить онтологическое моделирование эволюции состояний ПУ [15]; при разработке онтологии ПУ использованы принципы семантического описания производственных ресурсов [16, 17].

В работе поставлена следующая проектная задача: определить оптимальную конфигурацию оборудования ПУ (значения скоростей, ускорений, времени погрузки/разгрузки, ёмкости накопителей для станков, робокаров и манипуляторов), которая обеспечит минимизацию критерия, объединяющего оценку простоев оборудования и его стоимости.

1 Онтология производственного участка

Онтология ПУ определяет его сущности, их атрибуты и отношения, обеспечивая единый понятийный аппарат и структурную основу для конфигурирования имитационной модели ПУ, задания пространства поиска и границ параметров для ГА, интерпретации результатов оптимизации в терминах ПрО. Онтология включает следующие основные классы и их взаимосвязи.

Сменное задание – набор деталей, определяемых на основе параметров технологических процессов, связывает деталь с «Плановым объёмом» производства за одну смену;

Деталь – класс, представляющий производимое изделие, связан отношениями:

- имеет «Тип_детали», определяет технологическую группу;
- включается в «Сменное задание», характеризуется «Временем изготовления»;

Технологический процесс определяет маршруты обработки деталей, включенных в сменное задание, связан отношениями:

- имеет «Маршрут обработки», задаёт последовательность выполнения операций и технологическое оборудование, на котором будет производиться обработка;
- включается в «Деталь», характеризуется «Длительностью операции» на каждом этапе обработки;

Оборудование – абстрактный класс, конкретизируемый через дочерние классы:

- «Станок» характеризуется атрибутами «Тип станка» (например, токарный, фрезерный) и «Скорость смены заготовки», является параметром, влияющим на простои;
- «Робокар» характеризуется атрибутом «Скорость движения», обеспечивает транспортировку деталей между станками, влияет на общее время цикла и возникновение простоев;
- «Манипулятор» характеризуется атрибутом «Скорость подачи», обеспечивает загрузку/разгрузку станков, влияет на вспомогательное время операций.

Производственный показатель – класс, объединяющий метрики ПУ. Включает следующие свойства и размерности данных:

- «Время изготовления» – показатель (мин), зависящий от параметров оборудования;
- «Стоимость» – рыночная стоимость оборудования (руб.);
- «Простои» – суммарное время простоев (мин).

Модель – класс, описывающий процесс управления ПУ.

Все классы оборудования связаны отношением «Имеет параметры», которые являются целевыми переменными для ГА.

Для формального описания каждый класс онтологии наделён набором атрибутов, характеризующих его свойства. Ключевые атрибуты классов онтологии представлены в таблице 1.

Примеры конкретных значений экземпляров классов онтологии.

Станок: токарный_станок_1: тип_станка = «токарный»; скорость_смены_заготовки = 34 с; количество_ячеек_накопителя = 10 шт.

Робокар: робокар_транспортный_2: скорость_движения = 1,8 м/с; ускорение = 0,8 м/с²; торможение = 0,8 м/с².

Манипулятор: манипулятор_загрузочный_А: время_погрузки = 40 с; время_разгрузки = 35 с; количество_схватов = 2 шт.

Деталь: вал_приводной: тип_детали = «вал»; время_изготовления = 185 с.

Сменное задание: задание_смены: плановый_объём = 150 шт.; связано с деталями вал_приводной, корпус.

Данные экземпляры показывают, каким образом классы онтологии наполняются конкретными значениями, которые в дальнейшем используются ГА в качестве генов хромосом (для оборудования) либо как входные условия и целевые показатели (для деталей и заданий).

Разработанная онтология реализована на языке *OWL 2* в редакторе *Protégé*.

Пример основных аксиом онтологии.

Иерархия классов: Станок \sqsubseteq Оборудование; Робокар \sqsubseteq Оборудование; Манипулятор \sqsubseteq Оборудование; ТокарныйСтанок \sqsubseteq Станок; ФрезерныйСтанок \sqsubseteq Станок.

Ограничения на свойства: Скорость_движения только xsd:float [≥ 0.0]; Ускорение только xsd:float [≥ 0.0]; Торможение только xsd:float [≤ 0.0]; Тип_станка только {токарный, фрезерный, сверлильный}.

Объектные свойства: обслуживает_станок (домен: Манипулятор); транспортирует_деталь (домен: Робокар); имеет_в_составе один Манипулятор (для производственной ячейки).

Таблица 1 – Атрибуты классов онтологии

Класс	Атрибут	Диапазон / допустимые значения	Ед. изм.	Связь с генетическим алгоритмом
Станок	Скорость смены заготовки	15–60	с	Целевой параметр (ген)
	Минимальное отклонение	1–15	%	Параметр устойчивости
	Максимальное отклонение	3–22	%	Параметр устойчивости
	Количество ячеек накопителя	2–20	шт.	Целевой параметр (ген)
	Тип_станка	{токарный, фрезерный, шлифовальный}	—	Ограничивающее условие
Робокар	Скорость_движения	0.5–3.0	м/с	Целевой параметр (ген)
	Отклонение скорости	1–25	%	Параметр устойчивости
	Ускорение	0.5–2.0	м/с ²	Целевой параметр (ген)
	Отклонение ускорения	1–23	%	Параметр устойчивости
	Торможение	0.5–2.5	м/с ²	Целевой параметр (ген)
	Отклонение торможения	1–24	%	Параметр устойчивости
	Время погрузки	20–60	с	Целевой параметр (ген)
	Время разгрузки	15–55	с	Целевой параметр (ген)
	Количество ячеек накопителя	1–6	шт.	Целевой параметр (ген)
Манипулятор	Время погрузки	18–42	с	Целевой параметр (ген)
	Отклонение погрузки	1–48	%	Параметр устойчивости
	Время разгрузки	18–42	с	Целевой параметр (ген)
	Отклонение разгрузки	2–50	%	Параметр устойчивости
	Количество ячеек накопителя	5–40	шт.	Целевой параметр (ген)
	Количество схватов	1–4	шт.	Целевой параметр (ген)
Деталь	Тип_детали	{вал, шестерня, корпус}	—	Входное условие
	Время изготовления	вычисляется моделью	мин	Целевой показатель
Сменное задание	Плановый_объём	50–500	шт.	Входное условие
Технологический процесс	Маршрут_обработки	[1..100]	—	Входное условие
	Длительность_операции	[1..100]	—	Входное условие

Такая формализация обеспечивает однозначную интерпретацию терминов ПрО, возможность автоматической проверки непротиворечивости модели, формирует основу для генерации пространства поиска ГА с учётом всех ограничений ПрО.

Онтология интегрирована с ГА следующим образом:

- на этапе запуска ГА задаются границы допустимых значений параметров (ограничение пространства поиска) в соответствии с атрибутами и ограничениями из таблицы 1;
- в процессе работы ГА проверяется согласованность решений (например, наличие всех необходимых связей между единицами оборудования);
- при выводе результатов обеспечивается их интерпретация в терминах ПрО (формирование описания параметров конкретных станков, робокаров и манипуляторов).

На основе разработанной онтологии формируется пространство поиска: для каждого класса оборудования («Станок», «Робокар», «Манипулятор») задаётся набор генов (свойств данных из таблицы 1), а объектные свойства («Влияет_на», «Формирует_состав_работ») определяют структуру целевой функции. В отличие от известных ГА [4, 18], в данной работе предложены следующие дополнения, обусловленные особенностями проектной задачи:

- матричное представление хромосомы в виде двухмерного массива, где строки соответствуют типам оборудования, а столбцы – конкретным параметрам;
- нормализованная функция приспособленности – значения целевой функции для каждой особи вычисляются относительно базового (эталонного) решения (исходной конфигурации ПУ до оптимизации); это позволяет интерпретировать результат в терминах улучшения: значение меньше 1 означает, что решение лучше базового, больше 1 – хуже, равно 1 – эквивалентно;
- интеграция с экспертной системой на основе алгоритма случайного леса для прогнозирования рыночной стоимости оборудования;
- использование кроссовера [18], адаптированного для вещественного кодирования параметров, что обеспечивает плавное изменение их значений и поиск в непрерывном пространстве.

Базовая архитектура ГА взята из работы [4], кроссовер – из работы [18]. Авторским вкладом является адаптация ГА к матричному представлению и его интеграция с имитационной моделью ПУ на основе предложенной онтологии.

2 Описание работы генетического алгоритма

В основе разрабатываемого ГА лежит представление решения в виде двухмерного массива. Каждая ячейка такого массива соответствует конкретному значению параметра, а массив в целом представляет полный набор оптимизируемых параметров ПУ.

Выбор исходной популяции ГА для оптимизации выполняется путём случайного определения значений изменяемых параметров в заданной области. Хромосомы алгоритма представляют собой совокупность параметров. Набор хромосом, составляющих популяцию, можно представить в виде:

$$H^0 = \begin{bmatrix} h_1^0 \{v_{wi}; a_{wp}; -a_{wp}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; q_{pl}; t_{in}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; v_{wr}\} \\ h_2^0 \{v_{wi}; a_{wp}; -a_{wp}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; q_{pl}; t_{in}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; v_{wr}\} \\ \dots \\ h_i^0 \{v_{wi}; a_{wp}; -a_{wp}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; q_{pl}; t_{in}; t_{cp}; t_{dp}; q_{tp}; v_{wr}\} \end{bmatrix}, \text{ при } i = 1 \dots N_h \quad (1)$$

где h_i^0 – i -я хромосома популяции, содержащая параметры (гены) ПУ начального поколения работы ГА; N_h – число хромосом в популяции (принято равным 100), ед.; параметры, определяемые в ГА, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры, определяемые генетическим алгоритмом

Параметр	Обозначение	Оборудование	Параметр	Обозначение	Оборудование
Скорость перемещения, м/с	v_{wi}	Робочар	Количество ячеек в накопителе, шт.	q_{pl}	Станок
Ускорение, м/сек ²	a_{wp}		Время смены заготовок, с	t_{in}	
Торможение, м/сек ²	$-a_{wp}$		Время погрузки, с	t_{cp}	Манипулятор
Время погрузки, с	t_{cp}		Время разгрузки, с	t_{dp}	
Время разгрузки, с	t_{dp}		Количество ячеек в накопителе, шт.	q_{tp}	
Количество ячеек в накопителе, шт.	q_{tp}		Количество схватов, шт.	v_{wr}	

Ключевым показателем для работы ПУ является соотношение эффективности и стоимости. В данной работе под эффективностью понимается степень реализации производственного потенциала, которая зависит от использования рабочего времени в условиях производства продукции с заданным уровнем качества. Стоимость рассматривается как объем инвестиций в оборудование, необходимый для обеспечения заданного уровня технической готовности.

Для объединения критериев, имеющих разные единицы измерения (время и деньги), их необходимо привести к сопоставимому виду. Используется нормализация относительно базового решения, в качестве которого принимается исходная конфигурация ПУ.

Пусть: $Cost_{base}$ – стоимость оборудования в базовом решении (руб.); $Down_{base}$ – суммарное время простоев в базовом решении (мин). Вводится защита от нулевых значений ($\epsilon = 10^{-9}$):

$$Cost_{base}^{safe} = \max(Cost_{base}, \epsilon), Down_{base}^{safe} = \max(Down_{base}, \epsilon), \quad (2)$$

Тогда для i -й особи (варианта конфигурации) с фактической стоимостью $Cost_i$ и фактическими простоями $Down_i$ вычисляются нормированные показатели:

$$r_{Cost,i} = \frac{Cost_i}{Cost_{base}^{safe}}, r_{Down,i} = \frac{Down_i}{Down_{base}^{safe}}. \quad (3)$$

Целевая функция формируется как взвешенная сумма:

$$J_i = W_{Cost} \cdot r_{Cost,i} + W_{Down} \cdot r_{Down,i} \quad (4)$$

где W_{cost} и W_{down} – весовые коэффициенты, задаваемые пользователем и удовлетворяющие условиям: $W_{cost} \geq 0, W_{down} \geq 0, W_{cost} + W_{down} = 1$.

Значение целевой функции интерпретируется следующим образом: $J_i < 1$ – решение лучше базового; $J_i = 1$ – решение эквивалентно базовому; $J_i > 1$ – решение хуже базового. Значение функции приспособленности J_i , близкое к нулю, свидетельствует об идеально функционирующем объекте с минимальными простоями и приемлемыми затратами. Значения больше единицы характеризуют нежелательные варианты с высокими расходами и несогласованной работой оборудования.

Предложенный подход обеспечивает сопоставимость значений целевой функции на любых итерациях алгоритма благодаря фиксированной базе, что позволяет оценивать прогресс оптимизации. Результаты выражаются в терминах улучшения относительно исходной конфигурации (что делает их интуитивно понятными для лица, принимающего решения).

3 Применение генетического алгоритма

Общая структура и последовательность операций разработанного ГА представлены на рисунке 1. В ГА реализуется известная эволюционная схема, адаптированная для работы с двумерным представлением особей.

Работа ГА начинается с задания входных параметров: вероятностей генетических операторов, размера популяции и параметров ПУ. На этапе «Задание начальной популяции» формируется множество решений, где каждая особь (хромосома) представляет собой вектор значений оптимизируемых параметров ПУ.

Далее выполняется основной эволюционный цикл, который включает следующую последовательность генетических операторов.

1) *Отбор* – процедура выбора родительских особей для последующего скрещивания на основе значения их функции приспособленности. Приме-



Рисунок 1 – Схема генетического алгоритма параметрического синтеза

няется турнирный метод, обеспечивающий баланс между селективным давлением и поддержанием генетического разнообразия популяции.

- 2) *Скращивание* – операция рекомбинации генетического материала родительских особей с использованием кроссовера [18], который имитирует односточный кроссовер для вещественного кодирования.
- 3) *Формирование новой популяции* – объединение родителей и потомков с последующим отбором наиболее приспособленных особей для следующего поколения.

После формирования новой популяции выполняется проверка критерия останова. Критерием служит либо достижение заданного числа поколений, либо выполнение условия по минимальному значению целевой функции, либо достижение заданной разности между значениями целевой функции на предыдущей и текущей итерациях. Расчёт выполняется с использованием имитационной модели производственного процесса, которая оценивает эффективность каждой особи.

Если критерий останова не достигнут, происходит возврат к началу цикла для продолжения эволюционного процесса. Если критерий выполнен, формируется набор оптимальных параметров производственного оборудования, обеспечивающий минимальное значение целевой функции.

Для определения стоимости оборудования используется регрессионная модель на основе алгоритма случайного леса. Модель обучена на выборке, включающей данные более 500 моделей оборудования с известными техническими характеристиками и рыночной стоимостью (цены производителей¹, аналитические обзоры²). Для оценки точности прогнозов использовалась тестовая выборка (20 % данных).

Критерий оценки простоев рассчитывается на основе временных характеристик работы оборудования.

Пример. На рисунке 2 представлены результаты моделирования ПУ с параметрами оборудования, заданными по умолчанию (базовое решение).

Для каждой единицы оборудования отображаются значения времени обработки, простоев и ожидания, а также итоговые показатели: общий коэффициент загрузки 61,45 %, общая стоимость оборудования – 78 510 000 руб. Продолжительность смены в базовом сценарии – 861,53 мин.

Загрузка оборудования по сменам для базового решения показана на рисунке 3. Можно отметить неравномерность загрузки единиц оборудования и наличие значительных простоев.

Для поиска оптимальной конфигурации применён разработанный ГА. На рисунке 4 показаны результаты моделирования для лучшего найденного решения после 100 поколений оптимизации. Весовые коэффициенты целевой функции были приняты равными $W_{\text{cost}} = 0,5$ и $W_{\text{down}} = 0,5$. Время смены в оптимизированном сценарии сократилось до 510,70 мин. Достигнутые показатели: общий коэффициент загрузки 90,86 %; общая стоимость оборудования 50 909 699 руб.

Загрузка оборудования по сменам для оптимизированной конфигурации представлена на рисунке 5. Видно существенное снижение доли простоев и ожидания по сравнению с базовым сценарием.

Сравнение базового и оптимизированного решений приведено в таблице 3. Как видно из таблицы 3, применение ГА позволило повысить загрузку оборудования почти на 48 % при одновременном снижении стоимости оборудования более чем на треть. Время выполнения

¹ Металлообрабатывающее оборудование: станки с ЧПУ. Официальный сайт компании «Промойл». <https://promoil.com/>.

Каталоги станков и кузнечно-прессового оборудования металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, деревообрабатывающее оборудование. Официальный сайт компании «Рубикон». <https://stanki-katalog.ru>.

² Ярмушевская В.Н. Металлорежущие станки: номенклатурный каталог. ВНИИТЭМР. М.: Каталог, 2005. 154 с.

JET Tools. Станки с ЧПУ // Официальный сайт JET Tools Россия. <https://www.jettools.ru/catalog/stanki-s-chpu/>.

смены сократилось на 40 %, что отражает рост производительности ПУ. Значение целевой функции J уменьшилось с 1,00 (базовый уровень) до 0,72, что свидетельствует о существенном улучшении интегрального показателя эффективности с учётом заданных приоритетов.

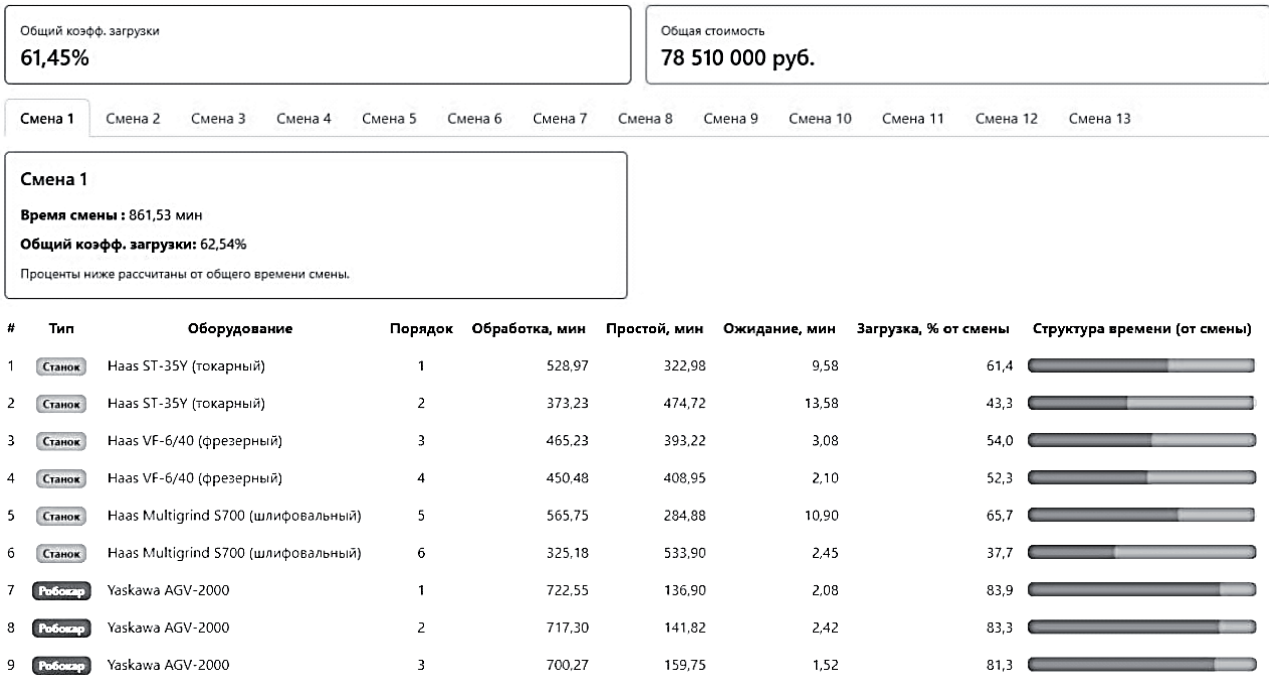


Рисунок 2 – Результаты моделирования с базовыми параметрами оборудования

Проценты рассчитываются относительно времени соответствующей смены.

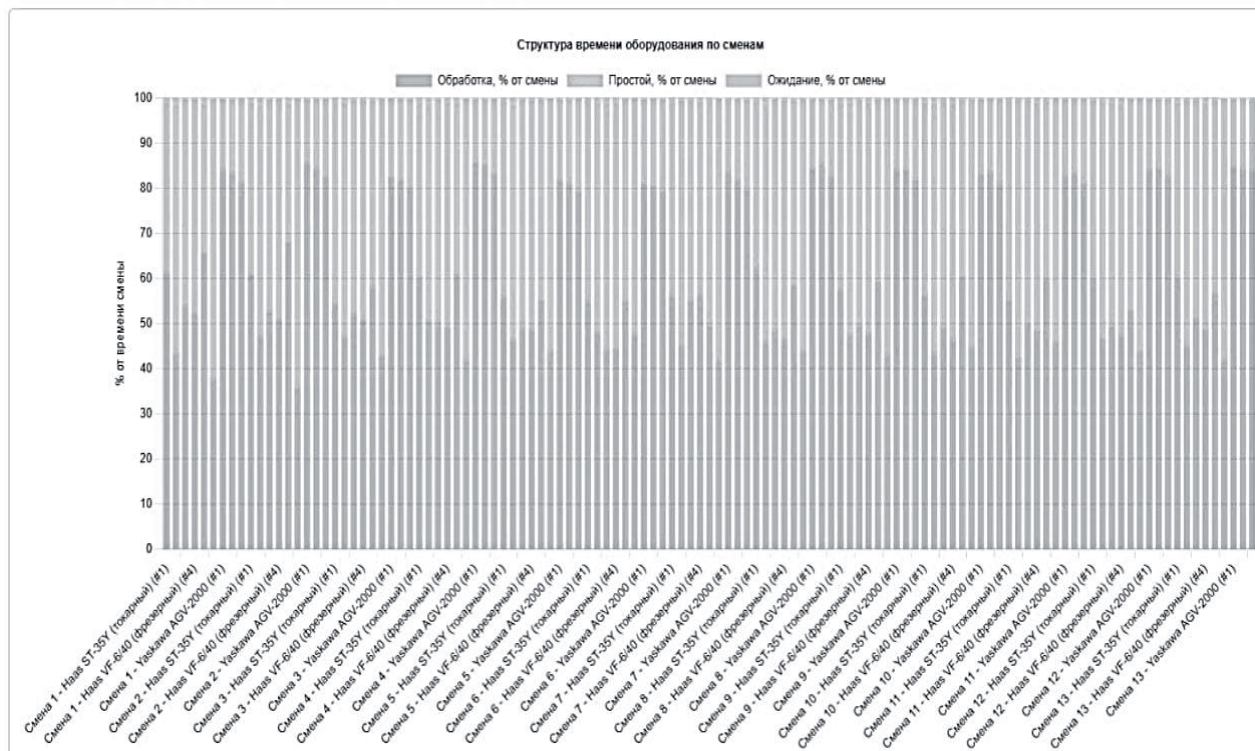


Рисунок 3 – График загрузки оборудования (базовое решение)

Таблица 3 – Сравнение показателей производственного участка до и после оптимизации его конфигурации

Показатель	До оптимизации	После оптимизации	Изменение, %
Средняя загрузка оборудования, %	61,45	90,86	+47,8
Общая стоимость оборудования, руб.	78 510 000	50 909 699	-35,2
Время смены, мин	861,53	510,70	-40,7
Целевая функция J	1,00 (база)	0,72	-28,0

Моделирование (ГА): результаты

Общий коэф. загрузки 90,86%	Общая стоимость 50 909 699 руб.
---------------------------------------	---

Смена 1 Смена 2 Смена 3 Смена 4 Смена 5 Смена 6 Смена 7 Смена 8 Смена 9 Смена 10 Смена 11 Смена 12 Смена 13

Смена 1
 Время смены : 510,70 мин
 Общий коэф. загрузки: 91,19%

#	Тип	Оборудование	Порядок	Загрузка, мин	Простой, мин	Ожидание, мин	Загрузка, % смены	Структура времени
1	Станок	Станок №1 (Токарный (Lathe))	1	470,48	38,84	1,37	92,1	
2	Станок	Станок №2 (Токарный (Lathe))	2	458,50	50,84	1,36	89,8	
3	Станок	Станок №3 (Фрезерный (Milling))	3	472,65	37,59	0,46	92,6	
4	Станок	Станок №4 (Фрезерный (Milling))	4	506,05	3,48	1,17	99,1	
5	Станок	Станок №5 (Шлифовальный (Grinding))	5	477,38	32,93	0,38	93,5	
6	Станок	Станок №6 (Шлифовальный (Grinding))	6	476,93	32,63	1,13	93,4	
7	Роботар	Роботар №1	1	458,82	50,67	1,20	89,8	
8	Роботар	Роботар №2	2	442,22	66,89	1,59	86,6	
9	Роботар	Роботар №3	3	428,25	82,15	0,30	83,9	

Рисунок 4 – Результаты моделирования с оптимальными параметрами оборудования

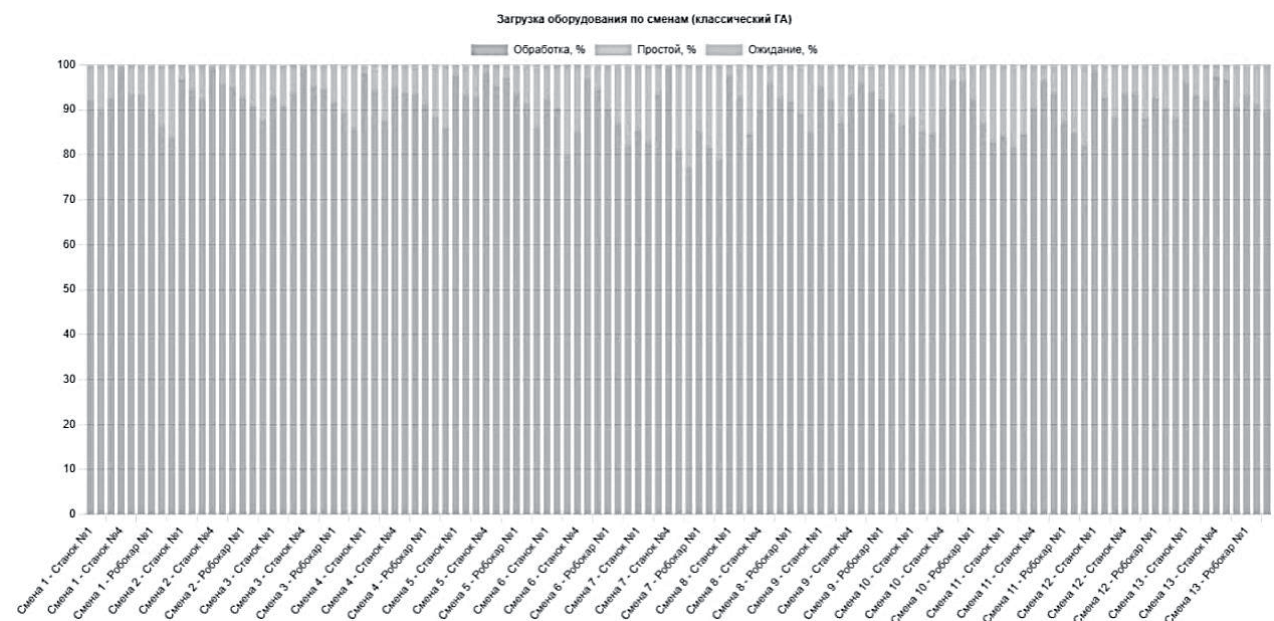


Рисунок 5 – График загрузки оборудования (оптимизированная конфигурация)

Заключение

В исследовании рассмотрена задача оптимизации конфигурации оборудования ПУ на основе матричного ГА. Разработана онтология ПрО, включающая сущности «Сменное задание», «Деталь», «Технологический процесс», «Станок», «Роботар», «Манипулятор» и их атрибуты, которая положена в основу постановки задачи оптимизации. Предложена модификация матричного ГА с турнирным отбором, кроссовером и функцией приспособленности, объединяющей нормализованные критерии простоев и стоимость оборудования. Разработано программное обеспечение, объединяющее ГА, имитационную модель ПУ и экспертную систему на основе случайного леса. На выполненном примере показана возможность повысить среднюю загрузку оборудования (на 47,8 %), снизить его стоимость (на 35,2 %) и сократить время выполнения смены (на 40,7 %).

Список литературы

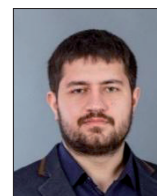
- [1] **Ковалев А.А., Скаков М.Д.** Имитационное моделирование технологических комплексов механосборочных производств в программной среде AnyLogic. *Технологии разработки и отладки сложных технических систем: IX Всероссийская научно-практическая конференция*, Москва, 05–06 апреля 2023 года. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2024. Том 1. С.288-296.
- [2] **Салаев Р.А., Федоров А.А., Салаева А.В.** Имитационное моделирование процессов агрегатно-сборочного производства. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2021. Т.23, №1(99). С.60-66. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66.
- [3] **Жаров М.В.** Обзор программных средств имитационного моделирования для исследования технологий и производств машиностроения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2021. Т.23, №4. С.85-92.
- [4] **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия –Телеком, 2013. 384 с.
- [5] **Курейчик В.М. Гогохия Л.Р.** Решения задачи коммивояжера с применением генетического оператора старения. *Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2020»* в 2-х томах (2–8 сентября 2020 г., Дивноморское, Россия). Дивноморское: Издательство Ступина С.А., 2020. Том 1. С.7-17.
- [6] **Ершов В.В.** Перспективные модели генетических алгоритмов в задачах оптимизации нейронных сетей. *Перспективы науки*. 2022. №8(155). С.21-25.
- [7] **Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., Максимов В.В., Цветков А.Н., Гибадуллин Р.Р., Петров Т.И.** Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2018. № 4(40). С. 77-85.
- [8] **Сергеев А.И., Русяев А.С., Кузнецова В.Б.** Генетический алгоритм синтеза технических параметров производственного оборудования. *СТИН*. 2014. №3. С.29-34.
- [9] **Сергеев А.И., Русяев А.С., Корнипаев М.А., Попов А.Н.** Исследование генетических алгоритмов параметрического синтеза высокоавтоматизированных производственных систем. *Автоматизация в промышленности*. 2022. №1. С.13-17. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.03.
- [10] **Гладков Л.А., Гладкова Н.В., Громов С.А.** Модифицированный генетический алгоритм для решения задач оперативного планирования. *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование*. 2016. №4(28). С.1-8.
- [11] **Сочнев А.Н.** Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии»*. 2021. Т.14. №2. С. 233-243. DOI: 10.17516/1999-494X-0304.
- [12] **Зайцева Н.М., Семькина И.Ю.** Создание интеллектуальной системы управления для технологических комплексов предприятий алюминиевой промышленности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т.335, №11. С.119-132. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613.
- [13] **Boroukhanian T., Supyen K., Samson J.B., Bashyal A., Wicaksono H.** Integrating 3D object detection with ontologies for accurate digital twin creation in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol.140, No.9. P.4679-4711. DOI: 10.1007/s00170-025-16548-x.
- [14] **Ma X., Qi Q., Tao F.** An ontology-based data-model coupling approach for digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol.87. P.102649. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102649.

- [15] **Bao Q., Zhao G., Yu Y., Dai S., Wang W.** The ontology-based modeling and evolution of digital twin for assembly workshop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol.117, No.1. P.395-411. DOI: 10.1007/s00170-021-07773-1.
- [16] **Sapel P., Hopmann C.** Towards an ontology-based dictionary for production planning and control in the domain of injection molding as a basis for standardized asset administration shells. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023. Vol.35. P.100488. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100488.
- [17] **Mohammed A., Chaimae A., Hussain B.-A.** A Smart Decision Making System for the Optimization of Manufacturing Systems Maintenance using Digital Twins and Ontologies. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol.13, No.8. P.661-672. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130811.
- [18] **Акопов А.С., Бекларян А.Л., Тхакур М., Верма Б.Д.** Разработка параллельных генетических алгоритмов вещественного кодирования для систем поддержки принятия решений социально-экономического и экологического планирования. *Бизнес-информатика*. 2019. Т.13, №1. С.33-44. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.33.44.

Сведения об авторах



Сергеев Александр Иванович, 1979 г. рождения. Окончил Оренбургский государственный университет (ОГУ) в 2003 г., д-р техн. наук (2017). Директор Аэрокосмического института ОГУ, профессор кафедры систем автоматизации производства ОГУ. В списке научных трудов более 300 работ. Author ID (РИНЦ): 159650; Author ID (Scopus): 55424212300; ORCID: 0000-0002-1104-7424; Researcher ID (WoS): E-6655-2015. alexandr_sergeew@mail.ru. ✉



Гунков Сергей Алексеевич, 1994 г. рождения. Окончил ОГУ в 2021 г. Соискатель кафедры систем автоматизации производства ОГУ. В списке научных трудов около 8 работ. Author ID (РИНЦ): 1335092; ORCID 0009-0001-7104-1649; Researcher ID (WoS): AEC-6051-2022. roughst56@gmail.com.

Поступила в редакцию 24.02.2026, после рецензирования 23.04.2026. Принята к публикации 30.04.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326

Design of production area equipment configuration based on a genetic algorithm

© 2026, A.I. Sergeev ✉, S.A. Gunkov

Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia

Abstract

This article proposes an approach to equipment configuration optimization based on the integration of a genetic algorithm with a simulation model of a production area. Domain ontology is presented that formalizes the key entities of the production area and their interrelations, thereby providing a conceptual basis for model construction and interpretation of the results. A distinctive feature of the algorithm is the chromosome structure represented as a two-dimensional array that incorporates equipment parameters, including movement speed, temporal characteristics of operations, and the storage capacities of robotic carts, machines, and manipulators. To evaluate design solutions, a fitness function was developed that combines normalized criteria of equipment downtime and cost, with the possibility of flexible priority adjustment through weighting coefficients. To predict the market value of equipment, which depends nonlinearly on its technical characteristics, an expert system based on the random forest algorithm was employed. The architecture of the software system implementing the proposed approach includes the stages of selection, crossover, and generation of new populations. The developed software enables finding optimal equipment configurations based on performance and cost

criteria under changing production conditions. An example of optimization of the equipment configuration of a production area is provided.

Keywords: matrix genetic algorithm, computer simulation, optimization, random forest algorithm, production process, equipment configuration.

For citation: *Sergeev A.I., Gunkov S.A.* Design of production area equipment configuration based on a genetic algorithm [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(2): 314-326. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-2-314-326.

Financial Support: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-29-01405, <https://rscf.ru/project/25-29-01405>.

Authors' contributions: *Sergeev A.I.* – development of the concept and research plan; *Gunkov S.A.* – development of algorithms and software implementation, conducting computational experiments.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

Figure 1 – Scheme of the genetic algorithm for parametric synthesis

Figure 2 – Simulation results with baseline equipment parameters

Figure 3 – Equipment utilization graph (baseline solution)

Figure 4 – Simulation results with optimal equipment parameters

Figure 5 – Equipment utilization graph (optimized configuration)

Table 1 – Attributes of ontology classes

Table 2 – Parameters determined by the genetic algorithm

Table 3 – Comparison of production area performance indicators before and after configuration optimization

References

- [1] **Kovalev AA, Skakov MD.** Simulation modeling of technological complexes of mechanical assembly plants in the AnyLogic software environment [In Russian]. *Technologies for the development and debugging of complex technical systems: IX All-Russian Scientific and Practical Conference*, Moscow, 05-06 April 2023. Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2024, pp. 288-296.
- [2] **Salaev RA, Fedorov AA, Salaeva AV.** Simulation modeling of processes of unit-assembly production of aircraft products [In Russian]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021; 23(1): 60-66. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66.
- [3] **Zharov MV.** Review of simulation software tools for the study of technologies and industries of mechanical engineering [In Russian]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2021; 23(4): 85-92.
- [4] **Rutkovskaya D, Pilinsky M, Rutkovsky L.** Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems [In Russian]. Moscow : Hotline –Telecom, 2013. 384 p.
- [5] **Kureichik VM, Gogokhia LR.** Solving the traveling salesman problem using the genetic aging operator [In Russian]. *Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies 2020" (IS & IT 2020, IS&IT'20) in 2 volumes (02-08 September 2020, Divnomorskoe, Russia)*. Divnomorskoe: Stupina S.A. Publishing House, 2020. Volume 1. pp. 7-17.
- [6] **Yershov VV.** Promising models of genetic algorithms in neural network optimization problems [In Russian]. *Perspectives of science*. 2022; 8(155): 21-25.
- [7] **Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, Maksimov VV, Tsvetkov AN, Gibadullin RR, Petrov TI.** Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm [In Russian]. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2018; 4(40): 77-85.
- [8] **Sergeev AI, Rusyaev AS, Kuznetsova VB.** A Genetic algorithm for the synthesis of technical parameters of industrial equipment [In Russian]. *STIN*. 2014; 3: 29-34.
- [9] **Sergeev AI, Rusyaev AS, Kornipaev MA, Popov AN.** Investigation of genetic algorithms for parametric synthesis of highly automated production systems [In Russian]. *Automation in industry*. 2022; 1: 13-17. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.03.
- [10] **Gladkov LA, Gladkova NV, Gromov SA.** A modified genetic algorithm for solving operational planning problems [In Russian]. *Informatics, computer engineering and engineering education*. 2016; 4(28): 1-8.

- [11] **Sochnev AN.** Production planning based on a genetic algorithm controlled simulation model [In Russian]. *Journal of the Siberian Federal University. The series "Engineering and technology"*. 2021; 14(2): 233-243. DOI: 10.17516/1999-494X-0304.
- [12] **Zaitseva NM, Semykina IY.** Creation of an intelligent control system for technological complexes of aluminum industry enterprises [In Russian]. *Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2024; 335(11): 119-132. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4613.
- [13] **Boroukhian T., Supyen K., Samson J.B., Bashyal A., Wicaksono H.** Integrating 3D object detection with ontologies for accurate digital twin creation in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025; 140(9): 4679-4711. DOI: 10.1007/s00170-025-16548-x.
- [14] **Ma X., Qi Q., Tao F.** An ontology-based data-model coupling approach for digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024; 87: 102649. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102649.
- [15] **Bao Q., Zhao G., Yu Y., Dai S., Wang W.** The ontology-based modeling and evolution of digital twin for assembly workshop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021; 117(1): 395-411. DOI: 10.1007/s00170-021-07773-1.
- [16] **Sapel P., Hopmann C.** Towards an ontology-based dictionary for production planning and control in the domain of injection molding as a basis for standardized asset administration shells. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023; 35: 100488. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100488.
- [17] **Mohammed A., Chaimae A., Hussain B.-A.** A Smart Decision Making System for the Optimization of Manufacturing Systems Maintenance using Digital Twins and Ontologies. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022; 13(8): 661-672. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130811.
- [18] **Akopov AS, Beklaryan AL, Thakur M, Verma BD.** Developing parallel real-coded genetic algorithms for decision-making systems of socio-ecological and economic planning [In Russian]. *Business Informatics*. 2019; 13(1): 33-44. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.33.44.
-

About the authors

Alexander Ivanovich Sergeev (b. 1979) graduated from Orenburg State University (OSU) in 2003, Doctor of Technical Sciences (2017). Director of the Aerospace Institute of OSU and Professor at the Department of Production Automation Systems of the same university. The list of scientific papers includes more than 300 works. Author ID (RSCI): 159650; ORCID: 0000-0002-1104-7424; Author ID (Scopus): 55424212300; Researcher ID (WoS): E-6655-2015. alexandr_sergeew@mail.ru ✉.

Sergey Alekseevich Gunkov (b. 1994) graduated from OSU in 2021. Research applicant at the Department of Production Automation Systems of OSU. The list of scientific papers includes about 8 works. Author ID (РИНЦ): 1335092; ORCID: 0009-0001-7104-1649; Researcher ID (WoS): AEC-6051-2022. roughest56@gmail.com.

Received February 24, 2026. Revised April 23, 2026. Accepted April 30, 2026.
