

УДК 004.89+007.52

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.017](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.017)

Разработка миварной экспертной системы для планирования ресурсов цеха и анализа отклонений

О.О. Варламов^{1,2}, Сянцянь Чжан¹, А.В. Балдин^{1,2},
К.С. Мышенков^{1,2}, Е.В. Сидоренко³

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева,
Москва, Российская Федерация

³Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация

Резюме. Для создания машиностроительного искусственного интеллекта применяют миварные технологии логического искусственного интеллекта. Производственный процесс часто сопровождается большим количеством событий, а различные виды отклонений и помех прямо или косвенно влияют на стабильную и эффективную работу производства, а также приводят к снижению качества продукции. Прогнозирование отклонений и помех при планировании производства – это проблема научных исследований, которая является основой планирования ресурсов производственных систем. Известен подход к решению оптимизационных задач распределения ресурсов производственных систем на основе построения логического вывода в миварной базе знаний, который и представляет собой план распределения ресурсов. В данной работе анализируются отклонения и/или нарушения, вызванные вмешательством в производство в цехе, а именно материалы, персонал, оборудование, процессы и так далее, и предлагается определение производственных помех в производственной среде цеха. Значительная степень вмешательства выражается в задержках поставок продукции, снижении уровня качества и других отклонениях от запланированного производственного плана. Разработана миварная экспертная система для прогнозирования отклонений в производственных процессах после планирования ресурсов цеха. Экспертная система разработана с использованием программного комплекса КЭСМИ Wi!Mi «Разуматор». Проанализированы отклонения в производственной среде, установлена система факторов, влияющих на отклонения, и построена соответствующая миварная модель прогнозирования производственных отклонений в цехе. Применение миварной экспертной системы эффективно и быстро решает задачу поддержки принятия решений на основе проведения гибких сложных вычислений при расчете весов. Поэтому миварная экспертная система играет критически важную роль в прогнозе помех планирования цеховых операций, значительно повышая эффективность работы всей системы управления предприятием.

Ключевые слова: миварные сети, миварная экспертная система, система поддержки принятия решений, КЭСМИ, Разуматор, большие знания, оптимизация, распределение ресурсов производства цеха, отклонения в производственных процессах.

Для цитирования: Варламов О.О., Чжан С., Балдин А.В., Мышенков К.С., Сидоренко Е.В. Разработка миварной экспертной системы для планирования ресурсов цеха и анализа отклонений. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1641> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.017

Development of a mivar expert system for planning shop resources and analysis of deviations

O.O. Varlamov^{1,2}✉, Xiangqian Zhang¹, A.V. Baldin^{1,2},
K.S. Myshenkov^{1,2}, E.V. Sidorenko³

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation*

²*Kartsev Research Institute of Computing Complexes, Moscow, the Russian Federation*

³*Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation*

Abstract. To create mechanical engineering artificial intelligence, mivar technologies of logical artificial intelligence are used. The production process is often accompanied by a large number of events, and various types of deviations and interference directly or indirectly affect the stable and efficient operation of production, and also lead to a decrease in product quality. Predicting variances and disturbances in production planning is a research problem that is the basis of resource planning for production systems. There is a known approach to solving optimization problems of resource allocation of production systems based on the construction of logical inference in a mivar knowledge base, which represents a resource allocation plan. This paper analyzes the deviations and/or disturbances caused by production interference on the shop floor, namely materials, personnel, equipment, processes, and so on, and proposes a definition of production interference in the shop floor production environment. A significant degree of interference results in delays in product deliveries, reductions in quality levels and other deviations from the planned production plan. A mivar expert system has been developed to predict deviations in production processes after planning workshop resources. The expert system was developed using the software package KESMI Wi!Mi "Razumator". Deviations in the production environment were analyzed, a system of factors influencing deviations was established, and a corresponding mivar model for predicting production deviations in the workshop was built. The use of a mivar expert system effectively and quickly solves the problem of decision support based on flexible complex calculations when calculating weights. Therefore, the mivar expert system plays a critical role in predicting interference in the planning of workshop operations, significantly increasing the efficiency of the entire enterprise management system.

Keywords: mivar networks, mivar expert system, decision support system, KESMI, Razumator, big knowledge, optimization, distribution of production resources of the workshop, deviations in production processes.

For citation: Varlamov O.O., Zhang X., Baldin A.V., Myshenkov K.S., Sidorenko E.V. Development of a mivar expert system for workshop resource planning and deviation analysis. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1641> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.017 (In Russ.).

Введение

Как известно, производственный процесс часто сопровождается большим количеством событий, а различные виды отклонений и помех влияют на стабильную и эффективную работу производства и приводят к снижению качества продукции. В рамках работ по созданию машиностроительного [1] искусственного интеллекта (МСИИ) [2] можно выделить отдельный класс решения задач распределения ресурсов производственных систем (РРПС) [1–2]. РРПС относится к научной области оптимального планирования, которой посвящено большое количество как зарубежных [3–6], так и отечественных работ [7–15]. В работе [3] предложена, схема классификации задач теории расписаний, называемая сейчас «нотация Грэхема».

В зарубежных работах дан обзор результатов анализа [4] вычислительной сложности задач планирования [5], а также результатов построения приближенных методов их решения [6]. Большой вклад внесли отечественные авторы [7]. Например, в [8] провели исследование теории расписаний для одностадийных систем, в [9] приведены новые модели и методы решения задач теории расписаний. Для создания программных средств отечественные ученые предложили в своих работах: метод декомпозиций для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения

ресурсов [10], метод комбинирования эвристик для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов [11]. Также Прилуцкий М.Х. исследовал распределение однородного ресурса [12] и многокритериальные многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования [13]. Создана теория и разработаны программные средства для решения задач планирования с использованием [14] миварных технологий [15] логического искусственного интеллекта [16]. Однако, в цеховом производственном процессе сложность планирования остается высокой, т. к. этот процесс имеет сложный технологический маршрут, включает в себя множество дискретных производственных процессов и требует огромных производственных ресурсов. Многочисленные производственные элементы связаны друг с другом, что затрудняет точную характеристику сбоев (отклонений) в производстве в случае их возникновения.

Поэтому актуальной является задача анализа отклонений и/или нарушений, вызванных вмешательствами в производственный процесс в цехе. Эти вмешательства относятся к помехам в производственной среде цеха, на которые влияют: материалы, персонал, оборудование, процессы и др. Значительная степень вмешательства, например, выражается в задержках поставок продукции, снижении уровня качества и других отклонениях от запланированного производственного плана.

От описания проблемной области перейдем к краткому обзору предлагаемых методов решения задач. Миварные технологии продолжают активно развиваться и расширять области своего применения [17], например, в робототехнике предложено создавать системы принятия решений [18] для планирования маршрутов [19] и сложных действий [20] на основе миварных баз знаний [21]. Миварные экспертные системы (МЭС) применяются для подбора лекарственных форм в медицине [22], для создания комплексных систем с распознаванием образов [23] и в других задачах интеллектуальной деятельности [24]. Миварный подход отличается линейной вычислительной сложностью [25] относительно правил, что позволяет создавать системы моделирования процессов жизненного цикла [26], распознавать образы [27], улучшать обеспечение информационной безопасности [28], оптимально распределять ресурсы производственных систем [29] даже при неполноте данных [30], разрабатывать новые обучающие системы [31] и тренажеры [32], способствовать обеспечению психологической безопасности студентов [33], а также множество других применений [34]. Важно отметить, что миварные технологии уже успешно применялись [14] в решении различных задач планирования производственных процессов [29–30].

Миварный подход обладает свойством эволюционного развития и поэтому всегда можно добавить или изменить правила в миварных экспертных системах [14–33]. МЭС, упомянутые выше [17–34], были разработаны с использованием программного комплекса КЭСМИ Wi!Mi «Разуматор», который позволяет разработчикам создавать базы знаний и обрабатывать знания на основе фактов и правил. Таким образом, тема работы актуальна и имеет важное значение для решения поставленной новой научной задачи планирования производственных процессов с учетом отклонений от плана и возможных нарушений.

Теоретический анализ. Формализованное описание предметной области

Целью создания миварной экспертной системы является эффективное и быстрое решение задачи поддержки принятия решений на основе проведения гибких сложных вычислений при расчетах для прогнозирования возможных производственных отклонений и помех (на примере предприятий Китая). МЭС должна выполнять критически важную роль в прогнозе помех планирования цеховых операций, значительно повышая эффективность работы всей системы управления предприятием.

Тогда, в результате использования миварной экспертной системы для оценки производственных отклонений в конкретных производственных условиях можно предсказывать степень производственных отклонений до начала фактического производства. Это позволит прогнозировать долю дефектной продукции, на основании чего можно будет планировать ресурсы для производства продукции и избегать ненужной траты производственных ресурсов, что актуально и практически полезно как для экономики Китая, так и для промышленных производств и экономики России.

Рассмотрим особенности проблемы планирования цеха, которые включают следующее:

1) Вычислительная сложность. Вычислительная сложность проявляется в двух аспектах: построение математической модели и оптимизация алгоритмов. Во-первых, заготовки, оборудование, квалификация операторов и другие элементы цеха должны быть точно выражены с помощью математической логики, учитывая также внешние факторы, такие как время захвата заготовок, время запуска машин и т. д. Во-вторых, при ограничениях различных факторов, планирование цеха по существу является проблемой с объединением уравнений и неравенств, и сложность вычислений растет экспоненциально с увеличением количества заготовок и машин, что делает планирование цеха классической NP-полной задачей.

2) Множественность целей. На производстве желательно достичь оптимизации многих целей, таких как сокращение максимального времени завершения, минимизация производственных затрат, снижение энергопотребления и т. д. Однако эти цели часто противоречат друг другу и не могут быть оптимизированы одновременно. Поэтому основным направлением исследований является поиск типовых решений с помощью алгоритмов и выбор подходящего производственного плана в соответствии с конкретными потребностями завода.

3) Дискретность. В реальном производстве стоимость и энергетические затраты на обработку заготовок в разное время могут быть разными, и время прибытия заготовок, время нагрева машин и т. д. является дискретным. Поэтому планирование цеха имеет типичную дискретность.

4) Неопределенность. Во время работы завода окружение цеха имеет много неопределенностей, таких как задержка времени прибытия заготовок, различие во времени обработки машин, непредвиденные обстоятельства, такие как добавление производственного плана, отмена заказа, срочность, поломки машин и т. д.

Производственный процесс часто сопровождается большим количеством событий. Различные виды помех и отклонений прямо или косвенно влияют на стабильную и эффективную работу производства, а также приводят к снижению качества продукции. Цеховой производственный процесс имеет сложный технологический маршрут, включает в себя множество дискретных производственных процессов и требует огромных производственных ресурсов. Многочисленные производственные элементы связаны друг с другом, что затрудняет точную характеристику сбоев и отклонений в производстве в случае их возникновения. В настоящее время в исследованиях нет единого взгляда на определение и классификацию производственных отклонений и составляющих их факторов.

Например, в типичной среде штамповки временные изменения, которые приводят к заметным или незначительным изменениям в процессе производства, называются нарушениями производства штамповки. Типичная среда штамповки означает, что все составляющие элементы соответствуют требованиям к производству штамповки, а временные изменения могут быть вызваны износом оборудования, человеческими ошибками, низким качеством материалов и другими факторами. Степень влияния

производственных помех проявляется в задержке сроков поставки продукции, снижении качества, что отклоняется от запланированных производственных целей.

Системный анализ предметной области и возможных отклонений и помех в производстве в цехе позволил выделить следующие факторы: материалы, персонал, оборудование, процессы производства и так далее. На основании этого анализа построена следующая система индексов оценки для прогнозирования возможных производственных отклонений [35]:

1. Технический уровень человеческих ресурсов. Персонал производственного процесса будет постоянно подвергаться воздействию производственного оборудования и связанных с ним производственных материалов. Уровень работы персонала в определенной степени будет влиять на точность технологического оборудования и расход материалов, тем самым влияя на качество и стоимость перерабатываемой продукции. Если технический рейтинг оператора «старший», количественный признак $X1=0$, если технический рейтинг оператора «средний», количественный признак $X1=1$, если технический рейтинг оператора «младший», количественный признак $X1=2$.

2. Факторы ресурса оборудования. Влияние производственного оборудования на производство в основном отражается в следующих трех аспектах:

– Уровень обслуживания ресурсов оборудования: в основном относится к состоянию обслуживания производственного оборудования. Уровень его обслуживания влияет на вероятность выхода оборудования из строя. Если уровень обслуживания оборудования «отлично», количественная оценка $X2=0$; если уровень обслуживания оборудования «хорошо», количественная оценка $X2=1$; если уровень обслуживания оборудования «удовлетворительно», количественный знак $X2=2$.

– Нагрузочная способность оборудования: в основном относится к определенной способности оборудования производить определенный продукт или определенный процесс в течение определенного периода времени в ходе производственного процесса. Нагрузочная способность оборудования влияет на вероятность возникновения аномалий продукции. Если нагрузочная способность оборудования превышает 90%, то признак (флаг) количественного определения $X3=0$, если нагрузочная способность оборудования превышает 80%, и менее 90%, то признак количественного определения $X3=1$; оборудование менее 70%, признак количественного определения $X3=2$.

– Оценка состояния ресурса оборудования: в основном это относится к снижению производственной мощности ресурсов оборудования по мере увеличения общего времени работы оборудования, что оказывает определенное влияние на качество перерабатываемой продукции. Если наработка оборудования меньше 1000 часов, то признак (флаг) количественной оценки $X4=0$, если наработка оборудования более 1000 часов и менее 2000 часов, то признак количественной оценки $X4=1$, если наработка оборудования, срок службы оборудования превышает 2000 часов, то признак количественной оценки $X4=2$.

3. Факторы процесса. Изделия, обработанные разными процессами, имеют различия в точности, шероховатости, производительности и так далее, что является одним из факторов, вызывающих производственные отклонения. Степень обновления процессов в основном относится к доле новых процессов в производстве. Чем выше степень технологического обновления, тем качественнее будут продукты переработки. Если степень обновления процесса больше 10%, то количественный признак (флаг) $X5=0$; если степень обновления процесса больше 5% и меньше 10%, то количественный признак $X5=1$; если степень обновления процесса равна или менее 5%, то количественный признак $X5=2$. Показатели оценки возникновения производственных отклонений: $X=X1+X2+X3+X4+X5$.

4. Факторы материальных ресурсов. Уровень технологичности различных видов материальных ресурсов, используемых в процессе производства, напрямую влияет на конечный уровень качества продукции. Как правило, чем выше уровень технологичности ресурсов, тем выше качество продукции и тем меньше вероятность производственных нарушений. Если уровень обрабатываемости материала «отлично», количественный признак (флаг) $K=1$. Если класс технологичности материала «хорошо», то количественный признак $K=2$. Если уровень технологичности материала «удовлетворительно», то количественный признак $K=4$. Конечным ответом на вмешательство в производство является доля бракованной продукции в изделии $Y/1000$: $Y=KX+0.5$. Среди них 0,5 – процент брака продукции, вызванный другими непредсказуемыми факторами. Согласно требованиям к продукции, доля бракованной продукции должна быть менее 0,005, то есть значение Y должно быть менее 5.

Создание и тестирование миварной экспертной системы

В результате для создания миварной базы знаний получены следующие основные объекты, показанные в Таблице 1, и правила принятия решений, показанные в Таблице 2.

Таблица 1 – Классы и параметры в миварной базе знаний (фрагмент)

Table 1 – Classes and parameters in the mivar knowledge base (fragment)

Класс	Параметры
Человеческие ресурсы	Технический уровень оператора
Ресурсы оборудования	Время работы оборудования (час)
	Грузоподъемность оборудования
	Уровень обслуживания оборудования
Факторы технологии обработки	Степень обновления процесса
Обработка материальных факторов	Уровень технологичности материала
Прогнозирование сбоев в производстве	Технический уровень оператора
	Время работы оборудования (час)
	Грузоподъемность оборудования
	Уровень обслуживания оборудования
	Степень обновления процесса
	Уровень технологичности материала
	Прогнозирование сбоев в производстве
Доля бракованной продукции (/1000)	

После ввода всех правил в миварную экспертную систему она тестируется. Определенные ранее подзадачи могут выполняться одновременно или по отдельности.

Таблица 2 – Описание правил в миварной базе знаний (фрагмент)

Table 2 – Description of the rules in the mivar knowledge base (fragment)

№	Вход	Выход	Действие
1	Технический уровень оператора $a1$	Технический уровень оператора $X1$	$var a1, X1;$ $if(a1=="старший"){X1=0;}$ $if(a1=="средний"){X1=1;}$ $if(a1=="младший"){X1=2;}$

Таблица 2 (продолжение)
Table 1 (continued)

2	Время работы оборудования (час) a2	Время работы оборудования (час) X2	var a2, X2; if(a2>2000){X2=2;} else {if(a2<1000){X2=0;} else {X2=1;}}
3	Грузоподъемность оборудования a3	Грузоподъемность оборудования X3	var a3, X3; if(a3>0.9){X3=0;} else {if(a3<0.7){X3=2;} else {X3=1;}}
4	Уровень обслуживания оборудования a4	Уровень обслуживания оборудования X4	var a4, X4; if(a4=="отлично"){X4=0;} if(a4=="хорошо"){X4=1;} if(a4=="удовлетворительно") {X4=2;}
5	Степень обновления процесса a5	Степень обновления процесса X5	var a5, X5; if(a5>0.1){X5=0;} else {if(a5<0.05){X5=2;} else {X5=1;}}
6	Уровень технологичности материала a6	Уровень технологичности материала K	var a5, X6; if(a5=="отлично"){K=1;} if(a5=="хорошо"){K=2;} if(a5=="удовлетворение") {K=4;}
7	X1, X2, X3, X4, X5	Прогнозирование сбоев в производстве – X	$X=X1+X2+X3+X4+X5$
8	K, X	Доля бракованной продукции (/1000) – Y	$Y=K*X+0.5$

На Рисунке 1 показано, как проводилось тестирование системы. Значения, вычисленные во время работы алгоритма, выделены красным цветом. На значении (в поле) для расчета, которое необходимо найти, ставится галочка, и система начинает поиск расчета в соответствии с уже заданными правилами, созданными в МЭС.

Результаты первого тестирования (Рисунок 1) показывают, что величина отклонений в производстве равна 4, а соответствующая доля бракованной продукции составляет 4,5 на тысячу, что меньше заданной доли бракованной продукции 5 на тысячу. Результаты такого распределения ресурсов соответствуют ожиданиям, следовательно, производство может продолжаться. На Рисунке 2 показан автоматически построенный алгоритм – граф решения для первого тестирования, полученный в КЭСМИ Wi!Mi «Разуматор».

На Рисунке 3 слева результаты второго тестирования показывают, что значение производственных отклонений составляет 4, а соответствующая доля бракованной продукции составляет 8,5 на тысячу, что превышает заданную долю бракованной продукции 5 на тысячу. Результат этого распределения ресурсов не удовлетворяет поставленным условиям, следовательно, ресурсы необходимо перераспределить.

Name	Type	status производства
▼ статус производ...		▼ Прогнозирование сбоев в производстве
▼ Прогнозирование сбоев в производстве		Время работы оборудования
○ Время работы оборудования	123	1 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Грузоподъемность оборудования	123	Грузоподъемность оборудования
○ Доля бракованной продукции(/1000)	123	0 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Прогнозирование сбоев в производст...	123	Доля бракованной продукции(/1000)
○ Степень обновления процесса	123	4.5 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Технический уровень человеческих р...	123	Прогнозирование сбоев в производстве
○ Уровень обслуживания оборудования	123	4 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Уровень технологичности материала	123	Степень обновления процесса
○ Степень обновления процесса	123	2 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Технический уровень человеческих р...	123	Технический уровень человеческих ресурсов
○ Уровень обслуживания оборудования	123	0 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Факторы производственного процесса	123	Уровень обслуживания оборудования
○ Степень обновления процесса	123	1 <input checked="" type="checkbox"/>
○ человеческие ресурсы	123	Уровень технологичности материала
○ Технический уровень человеческих р...	123	1 <input checked="" type="checkbox"/>
○ Факторы производственных ресурсов	123	▼ Факторы производственных ресурсов
○ Грузоподъемность оборудования	123	Время работы оборудования (Час)
○ Уровень обслуживания оборудования	ABC	1500 <input type="checkbox"/>
○ Уровень технологичности материала	ABC	Грузоподъемность оборудования
○ Степень обновления процесса	123	0.95 <input type="checkbox"/>
○ человеческие ресурсы	123	Уровень обслуживания оборудования
○ Технический уровень человеческих р...	123	хорошо <input type="checkbox"/>
○ Факторы производственного процесса	123	▼ Факторы производственного процесса
○ Степень обновления процесса	123	Уровень технологичности материала
○ человеческие ресурсы	123	отлично <input type="checkbox"/>
○ Технический уровень человеческих р...	123	▼ Факторы производственного процесса
○ Степень обновления процесса	123	Степень обновления процесса
○ человеческие ресурсы	123	0.02 <input type="checkbox"/>
○ Технический уровень человеческих р...	123	▼ человеческие ресурсы
○ Степень обновления процесса	123	Технический уровень человеческих ресурсов
○ человеческие ресурсы	123	старший <input type="checkbox"/>

Рисунок 1 – Классы и параметры в КЭСМИ Wi!Mi «Разуматор»
Figure 1 – Classes and parameters in KESMI Wi!Mi "Razumator"

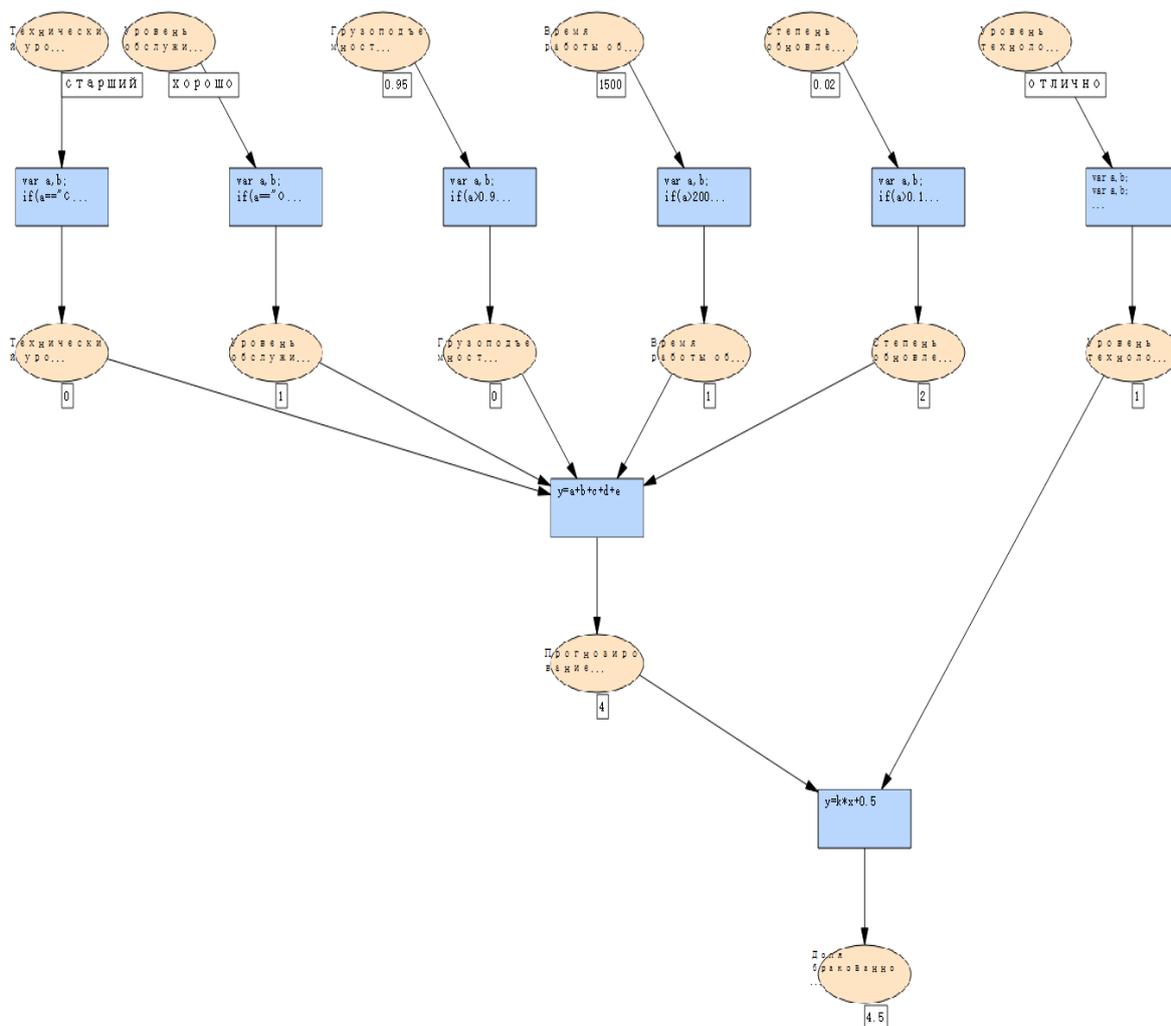


Рисунок 2 – Граф решения первого тестирования, полученный в Wi!Mi «Разуматор»
Figure 2 – Graph of the solution of the first test, obtained in Wi!Mi "Razumator"

На Рисунке 3 справа результаты третьего тестирования показывают, что значение производственных отклонений составляет 6, а соответствующая доля бракованной продукции составляет 12,5 на тысячу, что превышает заданную долю бракованной продукции 5 на тысячу. Результат этого распределения ресурсов не удовлетворяет поставленным условиям, следовательно, ресурсы снова необходимо перераспределить.

▼ статус производства		▼ статус производства	
▼ Прогнозирование сбоев в производстве		▼ Прогнозирование сбоев в производстве	
Время работы оборудования (час)	0 <input checked="" type="checkbox"/>	Время работы оборудования (час)	2 <input checked="" type="checkbox"/>
Грузоподъемность оборудования	2 <input checked="" type="checkbox"/>	Грузоподъемность оборудования	2 <input checked="" type="checkbox"/>
Доля бракованной продукции(/1000)	8.5 <input checked="" type="checkbox"/>	Доля бракованной продукции(/1000)	12.5 <input checked="" type="checkbox"/>
Прогнозирование сбоев в производстве	4 <input checked="" type="checkbox"/>	Прогнозирование сбоев в производстве	6 <input checked="" type="checkbox"/>
Степень обновления процесса	1 <input checked="" type="checkbox"/>	Степень обновления процесса	0 <input checked="" type="checkbox"/>
Технический уровень оператора	1 <input checked="" type="checkbox"/>	Технический уровень оператора	1 <input checked="" type="checkbox"/>
Уровень обслуживания оборудования	0 <input checked="" type="checkbox"/>	Уровень обслуживания оборудования	1 <input checked="" type="checkbox"/>
Уровень технологичности материала	2 <input checked="" type="checkbox"/>	Уровень технологичности материала	2 <input checked="" type="checkbox"/>
▼ Ресурсы оборудования		▼ Ресурсы оборудования	
Время работы оборудования (час)	500 <input type="checkbox"/>	Время работы оборудования (час)	2500 <input type="checkbox"/>
Грузоподъемность оборудования	0.65 <input type="checkbox"/>	Грузоподъемность оборудования	0.65 <input type="checkbox"/>
Уровень обслуживания оборудования	отлично <input type="checkbox"/>	Уровень обслуживания оборудования	хорошо <input type="checkbox"/>
▼ факторы обработки материалов		▼ факторы обработки материалов	
Уровень технологичности материала	хорошо <input type="checkbox"/>	Уровень технологичности материала	хорошо <input type="checkbox"/>
▼ Факторы технологии обработки		▼ Факторы технологии обработки	
Степень обновления процесса	0.06 <input type="checkbox"/>	Степень обновления процесса	0.12 <input type="checkbox"/>
▼ человеческие ресурсы		▼ человеческие ресурсы	
Технический уровень оператора	средний <input type="checkbox"/>	Технический уровень оператора	средний <input type="checkbox"/>

Рисунок 3 – Результаты второго и третьего экспериментов тестирования
Figure 3 – Results of the second and third testing experiments

На Рисунке 4 слева результаты четвертого тестирования и эксперимента показывают, что величина производственных отклонений равна 0, а соответствующая доля бракованной продукции составляет 0,5 на тысячу, что меньше заданной доли бракованной продукции 5 на тысячу. Результаты такого распределения ресурсов соответствуют ожиданиям и условиям, а производство может продолжаться.

На Рисунке 4 справа результаты пятого четвертого тестирования и эксперимента показывают, что величина производственных отклонений равна 1, а соответствующая доля бракованной продукции составляет 4,5 на тысячу, что меньше заданной доли бракованной продукции 5 на тысячу. Результаты такого распределения ресурсов соответствуют ожиданиям и поставленным условиям, следовательно, производство может продолжаться. В результате проведенных экспериментов получаем, что применение миварной экспертной системы позволяет решать в реальном времени задачу поддержки принятия решений на основе выполнения гибких сложных вычислений при расчете весов. Таким образом, для повышения эффективности работы всей системы управления предприятием критически важную роль в прогнозе помех планирования цеховых операций играет разработанная миварная экспертная система.

Результаты

При создании МСИИ выделяют класс решения задач распределения производственных ресурсов. В формализме миварных сетей задачи РРПС описываются набором причинно-следственных правил (процессов) формата «Если – То» с выделением двух типов вершин и ребер двудольного ориентированного графа [14–16].

Четвертый эксперимент		Пятый эксперимент		
▼ статус производства				
▼ Прогнозирование сбоев в производстве				
Время работы оборудования (час)	0	<input checked="" type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Грузоподъемность оборудования	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input checked="" type="checkbox"/>
Доля бракованной продукции(/1000)	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	4.5	<input checked="" type="checkbox"/>
Прогнозирование сбоев в производстве	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	<input checked="" type="checkbox"/>
Степень обновления процесса	0	<input checked="" type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Технический уровень оператора	0	<input checked="" type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Уровень обслуживания оборудования	0	<input checked="" type="checkbox"/>	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Уровень технологичности материала	1	<input checked="" type="checkbox"/>	4	<input checked="" type="checkbox"/>
▼ Ресурсы оборудования				
Время работы оборудования (час)	800	<input type="checkbox"/>	800	<input type="checkbox"/>
Грузоподъемность оборудования	0.96	<input type="checkbox"/>	0.89	<input type="checkbox"/>
Уровень обслуживания оборудования	отлично	<input type="checkbox"/>	отлично	<input type="checkbox"/>
▼ факторы обработки материалов				
Уровень технологичности материала	отлично	<input type="checkbox"/>	удовлетворе	<input type="checkbox"/>
▼ Факторы технологии обработки				
Степень обновления процесса	0.15	<input type="checkbox"/>	0.20	<input type="checkbox"/>
▼ человеческие ресурсы				
Технический уровень оператора	старший	<input type="checkbox"/>	старший	<input type="checkbox"/>

Рисунок 4 – Результаты четвертого и пятого экспериментов
Figure 4 – Results of the fourth and fifth experiments

С повышением качества производственного оборудования и растущими требованиями рынка (на примере рынка Китая), эффективное распределение ресурсов стало ключевым для развития предприятий. Поэтому в миварной экспертной системе построена прогнозная модель отклонений, помех и нарушений производства. Создание прогноза помех и отклонений производства предсказывает брак производимой продукции, что позволяет разумно планировать цеховые операции, избегать ненужного расхода производственных ресурсов и является ключевым элементом планирования цеховых операций.

В результате использования миварной экспертной системы оценки производственных отклонений в конкретных производственных условиях можно предсказать степень производственных отклонений до фактического производства, тем самым прогнозируя долю дефектной продукции, что позволяет планировать ресурсы для производства продукции и избегать ненужной траты производственных ресурсов.

Заключение

Практическая полезность миварной экспертной системы оценки производственных отклонений и нарушений состоит в том, что она будет подсказывать в конкретных производственных условиях степень производственных отклонений до фактического производства, тем самым поддерживая принятие решений на основе прогноза доли дефектной продукции, что позволяет руководству предприятия планировать ресурсы для производства продукции и избегать ненужной траты производственных ресурсов.

Применение миварной экспертной системы эффективно решает задачу проведения сложных вычислений при расчете весов и играет критически важную роль в прогнозе помех планирования цеховых операций, значительно повышая эффективность работы всей системы управления предприятием.

Миварный подход обладает свойством эволюционного развития и поэтому всегда можно добавить или изменить правила [17–33] в миварной экспертной системе, чтобы адаптироваться к изменяющимся потребностям производства и требованиям клиентов, что может помочь руководителям предприятий лучше управлять производственным процессом, повысить эффективность производства и удовлетворенность клиентов. Более

полное решение сформулированных проблем и учет других условий производственных процессов и отклонений требует дополнительного научного исследования и планируется к выполнению в следующих работах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Варламов О.О., Кривошеев О.В., Трищенко А.В. и др. Машиностроительный искусственный интеллект как новое направление для СПЖЦ. В сборнике: *МИВАР'22: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2022. С. 363–369.
Varlamov O.O., Krivosheev O.V., Trischenkov A.V. et al. Mechanical engineering artificial intelligence as a new direction for full product life cycle systems. In: *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2022. pp. 363–369. (In Russ.).
2. Варламов О.О., Кривошеев О.В., Трищенко А.В. и др. Цифровизация агропромышленного комплекса и машиностроительный ИИ. В сборнике: *МИВАР'22: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2022. С. 390–398.
Varlamov O.O., Krivosheev O.V., Trischenkov A.V. et al. Digitalization of the agro-industrial complex and mechanical engineering AI. In: *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2022. pp. 390–398. (In Russ.).
3. Graham R.L., Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G. Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. *Annals of Discrete Mathematics*. 1979;5:287–326. [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70356-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70356-X)
4. Gairing M., Lücking T., Mavronicolas M., Monien B. Computing Nash Equilibria for Scheduling on Restricted Parallel Links. In: *STOC '04: Proceedings of the thirty-sixth annual ACM symposium on Theory of computing, 13–16 June 2004, Chicago, IL, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2004. pp. 613–622. <https://doi.org/10.1145/1007352.1007446>
5. Chen B., Potts C.N., Woeginger G.J. A Review of Machine Scheduling: Complexity, Algorithms and Approximability. In: *Handbook of Combinatorial Optimization*. Boston: Springer; 1998. pp. 1493–1641. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0303-9_25
6. Gunawan A., Ng K.M., Poh K.L. Solving the Teacher Assignment-Course Scheduling Problem by a Hybrid Algorithm. *International Journal of Computer and Information Engineering*. 2007;1(2):137–142.
7. Танаев В.С., Шкурба В.В. *Введение в теорию расписаний*. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука»; 1975. 256 с.
Tanaev V.S., Shkurba V.V. *Vvedenie v teoriyu raspisaniy*. Moscow: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury izd-va "Nauka"; 1975. 256 p. (In Russ.).
8. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М. *Теория расписаний. Одностадийные системы*. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы; 1984. 384 с.
Tanaev V.S., Gordon V.S., Shafranskii Ya.M. *Teoriya raspisaniy. Odnostadiinnye sistemy*. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury; 1984. 384 p. (In Russ.).
9. Лазарев А.А. Модели и методы решения задач теории расписаний. *Автоматика и телемеханика*. 2014;(7):14–16.
Lazarev A.A. Models and solution methods for problems in theory of scheduling. *Avtomatika i telemekhanika*. 2014;(7):14–16. (In Russ.).
10. Батищев Д.И., Гудман Э.Д., Норенков И.П., Прилуцкий М.Х. Метод декомпозиций для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов. *Информационные технологии*. 1997;(1):29–33.

- Batishchev D.I., Gudman E.D., Norenkov I.P., Prilutskii M.Kh. Metod dekompozitsii dlya resheniya kombinatornykh zadach uporyadocheniya i raspredeleniya resursov. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 1997;(1):29–33. (In Russ.).
11. Батищев Д.И., Гудман Э.Д., Норенков И.П., Прилуцкий М.Х. Метод комбинирования эвристик для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов. *Информационные технологии*. 1997;(2):29–32.
Batishchev D.I., Gudman E.D., Norenkov I.P., Prilutskii M.Kh. Metod kombinirovaniya evristik dlya resheniya kombinatornykh zadach uporyadocheniya i raspredeleniya resursov. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 1997;(2):29–32. (In Russ.).
12. Прилуцкий М.Х. Распределение однородного ресурса в иерархических системах древовидной структуры. В сборнике: *Идентификация систем и задачи управления SICPRO '2000: Труды международной конференции, 26–28 сентября 2000 года, Москва, Россия*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2000. С. 2038–2049.
Prilutsky M.Kh. Distribution of a homogeneous resource in hierarchical systems of a tree-like structure. In: *System Identification and Control Problems SICPRO '2000: Proceedings of the International Conference, 26–28 September 2000, Moscow, Russia*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2000. pp. 2038–2049. (In Russ.).
13. Прилуцкий М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2007;(1):83–87.
Prilutskii M.Kh. Multicriterial multi-index resource scheduling problems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2007;46(1):78–82. <https://doi.org/10.1134/S1064230707010091>
14. Варламов О.О., Кривошеев О.В. Применение миварных технологий логического искусственного интеллекта для решения задач распределения ресурсов производственных систем. *Системы управления и информационные технологии*. 2022;(1):49–56. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.87.1.011>
Varlamov O.O., Krivosheev O.V. Application of mivar technologies of logical artificial intelligence to solve problems of resource allocation of production systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2022;(1):49–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.87.1.011>
15. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. *Миварное информационное пространство*. Москва: Радио и связь; 2002. 286 с.
Varlamov O.O. *Evolutsionnye bazy dannykh i znaniy dlya adaptivnogo sinteza intellektual'nykh sistem. Mivarnoe informatsionnoe prostranstvo*. Moscow: Radio i svyaz'; 2002. 286 p. (In Russ.).
16. Коценко А.А., Горячкин Б.С., Базанова А.Г., Марущенко А.В., Варламов О.О. Модель описания миварных сетей в формате двудольных и трехдольных ориентированных графов для принятия решений и обработки информации в машиностроительном ИИ. *Динамика сложных систем – XXI век*. 2024;18(1):5–17.
Kotsenko A.A., Goryachkin B.S., Bazanova A.G., Marushchenko A.V., Varlamov O.O. Model for describing mivar networks in the format of bipartite and tripartite oriented graphs for decision-making and information processing in machine-building AI. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek = Dynamics of Complex Systems – XXI Century*. 2024;18(1):5–17. (In Russ.).

17. Варламов О.О. Большие знания: расширение областей применения миварных технологий логического ИИ. В сборнике: *МИВАР'23: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2023. С. 591–597.
Varlamov O.O. Big knowledge: expanding the applications of mivar technologies of logic AI. In: *MIVAR'23: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2023. pp. 591–597. (In Russ.).
18. Варламов О.О., Коценко А.А., Аладин Д.В., Желтова А.А., Марущенко А.В. *Миварные системы принятия решений роботов. РобоРазум*. Москва: ИНФРА-М; 2024. 549 с.
Varlamov O., Kotsenko A., Aladin D., Zheltova A., Marushchenko A. *Mivar robot decision making systems. RoboMind*. Moscow: INFRA-M; 2024. 549 p. (In Russ.).
19. Коценко А.А., Козырев С.А., Тодуа Д.Г., Марущенко А.В., Варламов О.О. Исследование применения миварных технологий для планирования маршрутов робототехнических комплексов в трехмерном логическом пространстве. *Естественные и технические науки*. 2024;(2):190–196. <https://doi.org/10.25633/ETN.2024.02.12>
Kotsenko A.A., Kozyrev S.A., Todua D.G., Marushchenko A.V., Varlamov O.O. Research on the application of mivar technologies for planning routes of robotic complexes in three-dimensional logical space. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2024;(2):190–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.25633/ETN.2024.02.12>
20. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Machine Intelligence Research*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11633-023-1473-1>
21. Варламов О.О. Подготовка исходных данных для миварных БЗ СПР роботов. В сборнике: *МИВАР'23: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2023. С. 545–551.
Varlamov O.O. Preparing initial data for creating mivar knowledge bases decision-making systems of robots. In: *MIVAR'23: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2023. pp. 545–551. (In Russ.).
22. Честнова Е.А., Федосеева Е.Ю., Ваганов Д.Д. и др. Разработка базы знаний МЭС по подбору лекарственных форм для антибиотиков и антимикотиков. *Естественные и технические науки*. 2023;(5):29–33. <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.05.01>
Chestnova E.A., Fedoseeva E.Yu., Vaganov D.D. et al. Development of the MES knowledge base for the selection of dosage forms for antibiotics and antimycotics. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2023;(5):29–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.05.01>
23. Желтова А.А., Варламов О.О. Комплексный ИИ: анализ распознавания знаков на фотографиях. В сборнике: *МИВАР'23: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2023. С. 412–417.
Zheltova A.A., Varlamov O.O. Complex AI: car sign recognition analysis in photos. In: *MIVAR'23: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2023. pp. 412–417. (In Russ.).
24. Максимов Н.В., Варламов О.О. Большие знания: модели и средства представления, поиска и обработки знаний в задачах интеллектуальной деятельности. В сборнике: *МИВАР'23: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2023. С. 579–590.
Maksimov N.V., Varlamov O.O. Big knowledge: models and tools for representation, search, and processing of knowledge in tasks of intellectual activity. In: *MIVAR'23: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2023. pp. 579–590. (In Russ.).

25. Варламов О.О. Создание больших знаний и расширение областей применения миварных технологий логического искусственного интеллекта. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2023;(4):30–41. <https://doi.org/10.25729/ESI.2023.32.4.003>
Varlamov O.O. Creating Big Knowledge and expanding the applications of mivar technologies of logical artificial intelligence. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2023;(4):30–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.25729/ESI.2023.32.4.003>
26. Баканов С.В., Осипов В.Г., Варламов О.О. О применении миварных технологий ИИ для систем моделирования процессов жизненного цикла – BPMS. *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2022;(14):227–229.
Bakanov S.V., Osipov V.G., Varlamov O.O. On the application of mivar AI technologies for systems of modeling processes of product life cycle – BPMS. *Informatsiya i obrazovanie: granitsy kommunikatsii = Information and Education: Borders of Communications*. 2022;(14):227–229. (In Russ.).
27. Volkov A., Varlamov O. Method of creation of a two-level neural network structure for solving problems in mechanical engineering. In: *Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021): Journal of Physics: Conference Series: Volume 2131, 31 May – 06 June 2021, Gelendzhik, Russia*. IOP Publishing; 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032003>
28. Маматкулов У.Б., Кесель С.А., Семенов Д.В. и др. Миварная интеллектуализация SGRC-платформ информационной безопасности. В сборнике: *МИВАР'22: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2022. С. 269–275.
Mamatkulov U.B., Kesel S.A., Semenov D.V. et al. Mivar intellectualization of SGRC information security platforms. In: *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2022. pp. 269–275. (In Russ.).
29. Варламов О.О., Кривошеев О.В. Использование миварных сетей для РППС. В сборнике: *МИВАР'22: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2022. С. 376–382.
Varlamov O.O., Krivosheev O.V. The use of mivar networks for resource allocation of production systems. In: *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2022. pp. 376–382. (In Russ.).
30. Варламов О.О., Кривошеев О.В. Применение комбинированного алгоритм РППС при неполноте данных. В сборнике: *МИВАР'22: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2022. С. 383–389.
Varlamov O.O., Krivosheev O.V. Application of a combined algorithm for allocating resources of production systems with incomplete data. In: *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2022. pp. 383–389. (In Russ.).
31. Блохина С.В. и др. О проблемах образования, целевом образе «школы будущего», информатизации и перспективных информационных технологиях образования. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2007;(5):195–200.
Blokhhina S.V. et al. O problemakh obrazovaniya, tselevom obraze "shkoly budushchego", informatizatsii i perspektivnykh informatsionnykh tekhnologiyakh obrazovaniya. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2007;(5):195–200. (In Russ.).
32. Подкосова Я.Г., Васюгова С.А., Варламов О.О. Новые возможности и ограничения технологий виртуальной реальности для проведения научных исследований, трехмерной визуализации результатов моделирования и создания миварных обучающих систем и тренажеров. *Труды Научно-исследовательского института*

- радио. 2011;(2):13–23.
Podkosova Ya.G., Vasyugova S.A., Varlamov O.O. Novye vozmozhnosti i ogranicheniya tekhnologii virtual'noi real'nosti dlya provedeniya nauchnykh issledovaniy, trekhmernoй vizualizatsii rezul'tatov modelirovaniya i sozdaniya mivarnykh obuchayushchikh sistem i trenazherov. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*. 2011;(2):13–23. (In Russ.).
33. Адамова Л.Е., Варламов О.О. Обеспечения психологической безопасности студентов при пандемии и цифровизации. В сборнике: *МИВАР'22: Сборник научных статей*. Москва: ИНФРА-М; 2022. С. 315–322.
Adamova L.E., Varlamov O.O. Ensuring the psychological safety of students during the pandemic and digitalization. In: *MIVAR'22: Sbornik nauchnykh statei*. Moscow: INFRA-M; 2022. pp. 315–322. (In Russ.).
34. Терехов В.И., Горячкин Б.С. Развитие актуальных научных направлений как продолжение научных школ кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Динамика сложных систем – XXI век*. 2023;17(3):25–33.
Terekhov V.I., Goryachkin B.S. Development of relevant scientific areas as a continuation of the scientific schools of the department "Information processing and management systems" of The Bauman Moscow State Technical University. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek = Dynamics of Complex Systems – XXI Century*. 2023;17(3):25–33. (In Russ.).
35. Чжан С., Правдина А.Д., Тимофеев В.Б., Варламов О.О. МЭС планирования ресурсов цеха и анализа отклонений. В сборнике: *Международная Научная Конференция Молодежной Школы «МИВАР'24»: МИВАР'24: Сборник научных статей, 18–20 апреля 2024 года, Москва, Россия*. Москва: ИНФРА-М; 2024. С. 112–117.
Zhang S., Pravdina A.D., Timofeev V.B., Varlamov O.O. MES for planning workshop resources and analyzing deviations. In: *Mezhdunarodnaya Nauchnaya Konferentsiya Molodezhnoi Shkoly "MIVAR'24": MIVAR'24: Sbornik nauchnykh statei, 18–20 April 2024, Moscow, Russia*. Moscow: INFRA-M; 2024. pp. 112–117. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Варламов Олег Олегович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева, Москва, Российская Федерация.

e-mail: ovar@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-2858-1383](https://orcid.org/0000-0002-2858-1383)

Чжан Сянцян, аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

e-mail: chzhans6@student.bmstu.ru

Балдин Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, Московский

Oleg O. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University; Chief Researcher, Kartsev Research Institute of Computing Complexes, Moscow, the Russian Federation.

Zhang Xiangqian, graduate student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, the Russian Federation.

Alexander V. Baldin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State

государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева, Москва, Российская Федерация.

e-mail: bal@bmstu.ru

Мышенков Константин Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева, Москва, Российская Федерация.

e-mail: k.myshenkov@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-9406-2135](https://orcid.org/0000-0002-9406-2135)

Сидоренко Евгений Васильевич, аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: sidorenko1003@mail.ru

Technical University; Chief Researcher, Kartsev Research Institute of Computing Complexes, Moscow, the Russian Federation.

Konstantin S. Myshenkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University; Chief Researcher, Kartsev Research Institute of Computing Complexes, Moscow, the Russian Federation.

Evgeniy V. Sidorenko, postgraduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 22.07.2024; одобрена после рецензирования 02.08.2024; принята к публикации 08.08.2024.

The article was submitted 22.07.2024; approved after reviewing 02.08.2024; accepted for publication 08.08.2024.