

Научная статья

УДК 65.011.56

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-118-128>

EDN:VKMQIQ



Методика обоснования робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности

- ✉ Роман Михайлович Вивчарь¹, vivchar.rm@sut.ru
Михаил Евгеньевич Коваленко², Mikhail.Kovalenko@zyfra.com
Дмитрий Сергеевич Дмитриенко², Dmitriy.Dmitrienko@zyfra.com
Алексей Игоревич Смирнов³, ASmirnov4@phosagro.ru
Сергей Александрович Черкасов³, SCherkasov@phosagro.ru
Алексей Иванович Зайцев¹, cio@sut.ru
Руслан Валентинович Киричек¹, kirichek@sut.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²ООО «Цифра», Москва, 119311, Российская Федерация

³АО «Апатит», Череповец, 162625, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения решений по управлению производством, которые обеспечивают требуемую эффективность его функционирования при воздействии различных возмущающих факторов. **Цель исследования:** изыскание направлений повышения эффективности функционирования производства за счет усовершенствования автоматизированных системы управления им. В ходе исследования с помощью имитационного моделирования процесса функционирования производства и обработки его результатов **методами** Розенблатта – Парзена и численного n -кратного интегрирования определены вероятности достижения комплекса целей. Данные вероятности позволили сформировать область допустимых решений по управлению функционированием производством и с помощью метода центроидов выбрать оптимальное по критерию робастности решение.

Результаты. Разработана методика обоснования робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности. **Новизна.** Предложенная методика отличается от известных использованием для нахождения оптимального решения критерия максимизации показателя робастности, что способствует нахождению решений, обеспечивающих достижение комплекса целей функционирования производства даже при наличии непредвиденных обстоятельств или внешних возмущающих воздействий в будущем. **Практическая значимость.** Реализация предложенной методики в составе существующего математического обеспечения автоматизированной системы управления производством холдинга химической промышленности позволит обеспечить внедрение проактивного подхода в практику управления производством и существенно повысить эффективность этого процесса.

Ключевые слова: автоматизированная система управления производством холдинга химической промышленности, робастность, управление функционированием производства, вероятность достижения комплекса целей функционирования производства

Ссылка для цитирования: Вивчарь Р.М., Коваленко М.Е., Дмитриенко Д.С., Смирнов А.И., Черкасов С.А., Зайцев А.И., Киричек Р.В. Методика обоснования робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 118–128. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-118-128. EDN:VKMQIQ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-118-128>

EDN:VKMQIQ

Methodology for Justifying Robust Solutions for Managing the Production of a Chemical Industry Holding

 **Roman M. Vivchar**¹ ✉, vivchar.rm@sut.ru
 **Mikhail E. Kovalenko**², Mikhail.Kovalenko@zyfra.com
 **Dmitry S. Dmitrienko**², Dmitriy.Dmitrienko@zyfra.com
 **Aleksey I. Smirnov**³, ASmirnov4@phosagro.ru
 **Sergey A. Cherkasov**³, SCherkasov@phosagro.ru
 **Aleksey I. Zaitsev**¹, cio@sut.ru
 **Ruslan V. Kirichek**¹, kirichek@sut.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, 193232, Russian Federation

²Cifra LLC,
Moscow, 119311, Russian Federation

³Apatit JSC,
Cherepovets, 162625, Russian Federation

Annotation

The **relevance** of the study is determined by the need to identify production management solutions that ensure the required efficiency of its functioning under the influence of various disturbing factors.

Research objective: to identify ways to improve production efficiency by upgrading the automated production management system. During the study, simulation modeling of the production process and processing of its results using Rosenblatt – Parzen **methods** and numerical n-fold integration were used to determine the probabilities of achieving a set of objectives. These probabilities made it possible to form a range of acceptable solutions for managing production operations and, using the centroid method, to select the optimal solution in terms of robustness.

Results. A methodology has been developed for justifying robust solutions for managing the production of a chemical industry holding company.

Novelty. The proposed methodology differs from existing ones in that it uses the criterion of maximizing robustness to find the optimal solution, which helps to find solutions that ensure the achievement of a set of production objectives even in the event of unforeseen circumstances or external disturbances in the future.

Practical significance. Implementing the proposed methodology as part of the existing mathematical support for the automated production management system of the chemical industry holding company will enable the introduction of a proactive approach to production management practices and significantly improve the efficiency of this process.

Keywords: automated production management system for the chemical industry holding, robustness, production functioning management, probability of achieving a set of production functioning goals

For citation: Vivchar R.M., Kovalenko M.E., Dmitrienko D.S., Smirnov A.I., Cherkasov S.A., Zaitsev A.I., Kirichek R.V. Methodology for Justifying Robust Solutions for Managing the Production of a Chemical Industry Holding. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025; 11(4):118–128. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-118-128. EDN:VKMQIQ

Введение

Производство в необходимом количестве и с требуемым качеством минеральных удобрений

является одной из ключевых задач, направленных на обеспечение продовольственной безопасности Российской Федерации.

Для решения этой задачи в большинстве ведущих предприятий по производству минеральных удобрений активно внедряются средства автоматизации производства. Одним из таких примеров является акционерное общество «Апатит», входящее в группу компаний «ФосАгро» и использующее разработанную отечественную автоматизированную систему управления производством (АСУП). Качество работы этой системы напрямую определяет достижение целевых показателей производства. Исходя из этого, АО «Апатит» в настоящее время проводит работу по совершенствованию существующей АСУП в области ее математического обеспечения. Ключевым элементом этого совершенствования является замена существующей концепции управления производством на принципиально новую, основанную на использовании проактивного подхода. Его сущность заключается в предвидении и устранении будущих проблем за счет использования совокупности проактивных стратегий управления: превентивной, предиктивной и суперактивной [1].

Реализация проактивного подхода к управлению производством предполагает внедрение в существующее математическое обеспечение АСУП методов обоснования оптимальных проактивных решений, позволяющих обеспечить максимальную вероятность достижения комплекса целей функционирования производства (КЦФП) – $P^{\max}$. Таими целями, например, могут являться обеспечение требуемого качества продукции, оперативности ее выпуска, экономичности и безопасности производства.

В настоящее время существует множество теоретически подкрепленных моделей и методов обоснования решений, позволяющих получить наилучшие результаты с точки зрения обеспечения максимальной вероятности достижения их целей [2–7]. Однако реальные условия функционирования производства характеризуются наличием различного рода возмущающих факторов, которые оказывают влияние на этот процесс и могут существенным образом снижать фактическую вероятность достижения КЦФП. Эти факторы обладают стохастической природой, делаая точное предвидение их воздействия очень затруднительным.

На примере рисунка 1 демонстрируется влияние возмущающего фактора $F^{\text{воз}}$ на вероятность P успешного достижения комплекса заданных целей. Этот фактор вносит изменения в один из параметров производства, например, продолжительность доставки сырья $t_{\text{дос}}$. Допустим, что в результате обоснования решения по управлению производством необходимая продолжительность $t_{\text{дос}}$, позволяющая обеспечить максимальную вероятность достижения КЦФП, получилась равной 100 часам. Следовательно, при выборе поставщика

сырья и параметров логистики его доставки нужно исходить из того, что $t_{\text{дос}} = 100$ ч. Однако в реальной ситуации доставка сырья может столкнуться с непредвиденными задержками (например, из-за задержек при погрузке или аварии транспорта), что приводит к увеличению затрачиваемого на это времени.

На рисунке 1 показано, что оптимальное по критерию максимизации вероятности обеспечения комплекса целей производства решение не всегда является верным, поскольку при воздействии малейшего возмущения $F^{\text{воз}}$, приводящего к изменению $t_{\text{дос}}$, отмечается резкое снижение P ниже допустимого уровня $P^{\text{доп}}$. Рисунок 1 также демонстрирует, как изменится вероятность P в случае изменения $t_{\text{дос}}$ под воздействием возмущения $F^{\text{воз}}$ ($t_{\text{дос}} = 78$ ч., характеризующегося вероятностью $P_2 < P_1$): вероятность P также снизится, но не ниже допустимого значения $P^{\text{доп}}$.

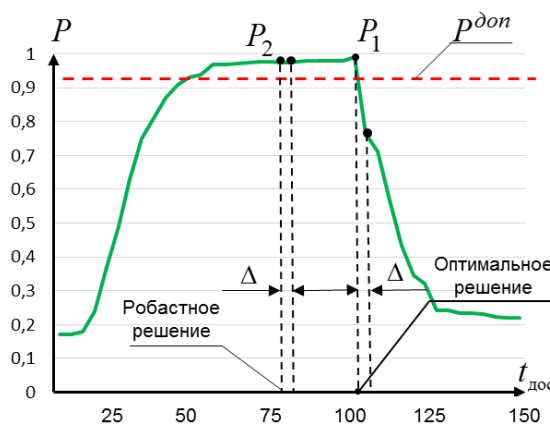


Рис. 1. Изменение вероятности достижения КЦФП при воздействии $F^{\text{воз}}$ при выборе различных решений

Fig. 1. Change in the probability of achieving the Set of Goals under the $F^{\text{воз}}$ Influence when Choosing Different Solutions

Учитывая приведенные случаи, возникает потребность в определении таких решений по управлению производством, которые обеспечивают требуемую вероятность достижения КЦФП даже при воздействии различных возмущающих факторов, то есть обладают свойством робастности (способностью управлять производством, обеспечивая требуемые показатели эффективности функционирования в условиях воздействия на него возмущающих факторов). Такое определение свойства робастности базируется на принципе гарантированного результата, описанном в [8]. Данный принцип предполагает выбор такого варианта решения задачи, который обеспечивает соблюдение всех заданных условий в любой ситуации внешнего воздействия и гарантирует достижение оптимального результата при самом неблагоприятном из возможных внешних воздействий. Вышеизложенные факты подчеркивают важность обоснования робастных решений в процессе функционирования АСУП.

Анализ существующего научно-методического аппарата обоснования робастных решений по управлению функционированием сложных организационно-технических систем

Для обоснования робастных решений по управлению производством в составе математического обеспечения АСУП должен присутствовать соответствующий научно-методический аппарат. Анализ предметной области показал, что вопросы обоснования робастных решений находились в поле видения многих исследователей из различных сфер деятельности, например, работы [9–15], в результате чего была разработана значительная совокупность подходов по обоснованию робастных решений [16–20].

В [16] освещаются различные подходы к процессу принятия управленческих решений в рамках российских промышленных предприятий. Важным аспектом здесь выступает долгосрочная эффективность принятых решений, оцениваемая через их способность обеспечить конкурентное преимущество на протяжении длительного времени. Тем не менее, данный обзор не предлагает конкретных методик или инструментов для реализации этих подходов в условиях определенной организации, также не приводится математической формализации исследуемых концепций.

В публикации [17] описывается методика, нацеленная на оценку показателей устойчивости и робастности экономических систем, способная проводить общий анализ этих показателей, оценивать взаимное влияние различных факторов и их вклад в устойчивость и робастность экономических систем различной степени комплексности. Описанный подход включает в себя формирование интегрированной оценки устойчивости и робастности, опираясь на экономические, экологические и социальные аспекты данной оценки в качестве ключевых параметров. Однако методика имеет ряд ограничений: во-первых, анализ ограничивается всего тремя параметрами, что может не отражать всю полноту картины; во-вторых, не предложен четкий механизм для достижения множества целей системы; в-третьих, отсутствуют разработанные инструменты для восстановления устойчивости и робастности экономических систем при ее нарушении.

В источнике [18] подход к решению задач адаптивного управления в контексте устойчивого развития аграрных предприятий описывается на качественном уровне. Процесс разработки решений для обеспечения устойчивой работы организации не подвергается строгой формализации.

Подход к анализу робастности технических систем, описанный в [19, 20], предоставляет возможность выявить, будет ли система находиться в робастном, в пределе своей робастности, или неробастном состоянии на протяжении заданного временного интервала. Однако авторы не уточняют алгоритм действий, который следует применять при выявлении неустойчивости системы.

Анализ научно-методических подходов в сфере управления устойчивостью и робастностью сложных организационно-технических систем позволяет сделать вывод, что текущие ограничения обуславливают невозможность их использования в составе математического обеспечения АСУП холдинга химической промышленности.

Целью настоящей статьи является представление методики обоснования робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности, реализация основных положений которой станет частью усовершенствования математического обеспечения АСУП для повышения эффективности ее функционирования.

Описание основных этапов методики обоснования робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности

Учитывая, что внешние возмущающие факторы вызывают отклонения параметров производства в обе стороны, робастным считается такое решение $\vec{r}^*$, которое предусматривает, что отклонения данных параметров под влиянием внешних возмущающих факторов, при которых гарантируются достижение КЦФП, принимают максимальные значения.

Формально задача поиска робастного решения по управлению производством холдинга химической промышленности может быть представлена в следующем виде:

$$\vec{r}^* = \underset{\vec{r} \in \Psi}{\operatorname{argmax}} \Delta(\vec{r}), \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – вектор, характеризующий параметры решения по управлению производством холдинга химической промышленности; Δ – показатель робастности, характеризующий максимальное изменение значений параметров производства под воздействием возмущающих факторов, при котором гарантируется достижение КЦФП (2); $\Delta_{r_1}^B, \Delta_{r_1}^H, \dots, \Delta_{r_l}^B, \Delta_{r_l}^H$ – верхние и нижние границы отклонения параметров производства от выбранного решения, при которых вероятность достижения КЦФП лежит в области допустимых требований.

$$\Delta = \min \begin{cases} \min (\Delta_{r_1}^B(\vec{r}), \Delta_{r_1}^H(\vec{r})) \\ \dots \\ \min (\Delta_{r_l}^B(\vec{r}), \Delta_{r_l}^H(\vec{r})) \end{cases}. \quad (2)$$

Анализ результатов решения задачи (1) показал, что оптимальным решением по критерию максимизации запаса робастности будет решение, лежащее в центре области допустимых значений параметров производства. Так как область допустимых значений параметров производства холдинга химической промышленности представляет собой i -мерную фигуру, то центром такой фигуры будет являться центроид, определяемый как точка с координатами, равными средним значениям каждого параметра производства. На рисунке 2 представлен пример центроида для случая двумерного представления области допустимых значений параметров производства, где C – центроид области допустимых значений; $\leftrightarrow$ – допустимое значение параметров производства.

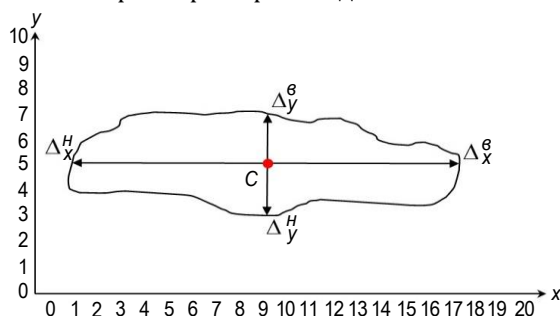


Рис. 2. Положение центроида относительно области допустимых значений вероятности достижения КЦФП

Fig. 2. The Centroid's Position Relative to the Region of Acceptable Values of the Probability of Achieving the Objectives

Задача методики – определить параметры решения по управлению производством холдинга химической промышленности, удовлетворяющие области допустимых значений и позволяющие обеспечить достижение КЦФП с заданной вероятностью $P^{\text{доп}}$, несмотря на внешние возмущения.

Методика обоснования робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности включает в себя 16 этапов. Рассмотрим их более подробно.

Этап 1. Первоначально в рамках изложенной методологии осуществляется определение множества управляемых параметров производства холдинга химической промышленности. Этот этап реализуется на основе анализа данных собираемых специальными модулями разработанной АСУП такими как:

- модуль контроля производственных процессов (продолжительность выполнения операций, технология выполнения процессов и т. д.);
- модуль контроля состояния и распределения ресурсов, а также состояния используемого оборудования (количество находящихся на производстве ресурсов, продолжительности их доставки, надежные характеристики оборудования, параметры стратегий технического обслуживания и ремонта оборудования и т. д.);

- модуль управления персоналом (количество и уровень квалификации персонала);

- модуль управления безопасностью (количество травм и аварий на производстве, параметры программы обеспечения безопасности производства и т. д.).

Модуль контроля производственных процессов (DPU, аббр. от англ. Dispatching Production Units) формирует календарный план производства (учет оперативных планов): объемные и календарные планы производства, производственные графики и календари, планирование производственных и технологических операций. Кроме того, этот модуль отвечает за назначение и контроль выполнения производственных заданий.

Модуль контроля состояния и распределения ресурсов (RAS, аббр. от англ. Resource Allocation and Status), а также состояния используемого оборудования реализует следующий функционал:

1) управление производственными ресурсами:

- регистрация перемещения сырья / материалов между производственными установками / местами хранения;

- учет фактического наличия и движения сырья, материалов, полуфабрикатов, продукции в местах хранения;

- визуализация и предоставление информации о наличии и состоянии производственных ресурсов (сырья, материалов, прочих запасов);

- учет продукции и полуфабрикатов под производственный заказ и сбытовой заказ;

- выполнение операций перемещений ресурсов между производственными участками / цехами, поступления ресурсов и отгрузки готовой продукции;

- инвентаризация запасов (сырья, полуфабрикатов, готовой продукции) в местах хранения.

2) контроль оборудования:

- мониторинг и контроль состояния оборудования с выявлением по конфигурируемым алгоритмам изменения статуса работы производственных установок / линий, производственного оборудования с регистрацией простоев / замедлений / выпуска брака, регистрации нештатных ситуаций.

Модуль управления персоналом (LUM, аббр. от англ. Labor / User Management) реализует следующий функционал:

- объективный контроль рабочего времени;

- учет наличия и квалификации персонала; визуализация и предоставление информации о состоянии персонала требуемой квалификации;

- эффективное управление производством на уровне цеховых служб с целью обеспечения учета и контроля исполнения технологических операций, анализа производительности и качества выполняемых работ конкретным исполнителем (или бригадой).

Модуль управления безопасностью реализует следующий функционал:

- защита информации по отношению ко всем логическим единицам хранения данных, реализуемая согласно политикам безопасности системы;
- управление доступом пользователей к системе, назначения пользователям ролей;
- обеспечение функционала определения доступа одного сервиса (или иного потребителя) к ресурсам другого сервиса;
- обеспечение возможности доступа прикладного сервиса к источникам данных;
- обеспечение механизма протоколирования действий пользователей;
- обеспечение механизма логирования межсервисного взаимодействия;
- поддержка атрибутной модели доступа (*от англ. Attribute Based Access Control*).

Этап 2. Второй этап методики предполагает задание предельно допустимого отклонения между Евклидовыми расстояниями центроидов ($\delta^{\text{доп}}$), требуемых вероятности достижения КЦФП L целей производства ($P^{\text{доп}}$), значений показателей достижения каждой цели производства $\{\Pi_l^{\text{тр}}\}_L$, а также числа повторений ($v^{\text{тр}}$), при которых положения центроида изменяется меньше заданного значения ($\delta^{\text{доп}}$).

Для решения этих задач используются специализированный модуль АСУП «Управление эффективностью производства», а также отобранные эксперты по рассматриваемой предметной области.

$\delta^{\text{доп}}$ устанавливается эмпирическим методом, основываясь на диапазоне допустимых значений управляемых параметров производства.

$P^{\text{доп}}$ зависит от характеристик целей производства, а также степени их важности и определяется с использованием экспертных оценок.

$v^{\text{тр}}$ выявляется на основе проведения вычислительных экспериментов или путем привлечения экспертов. Так, на рисунке 3 представлен алгоритм определения $v^{\text{тр}}$ путем проведения вычислительных экспериментов.

Данный алгоритм включает в себя выполнение следующих шагов:

- выбор геометрической фигуры (прямоугольник, шар, тетраэдр, пентагон-трететраэдр и т. д.) с априорно известным положением центроида;
- задание первоначального значения $v^{\text{тр}}$;
- генерация случайных точек в контуре фигуры;
- вычисление центроида для набора созданных точек;
- вычисление расстояния между крайним и предшествующим ему центроидом d ;
- проверка условия $d \leq \delta^{\text{доп}}$;
- проведение вышеуказанных операций до наступления момента, когда $v = v^{\text{тр}}$;

- определение расстояния между априорным центроидом фигуры и полученным в результате работы алгоритма f ;
- проверка условия $f \leq \delta^{\text{доп}}$.

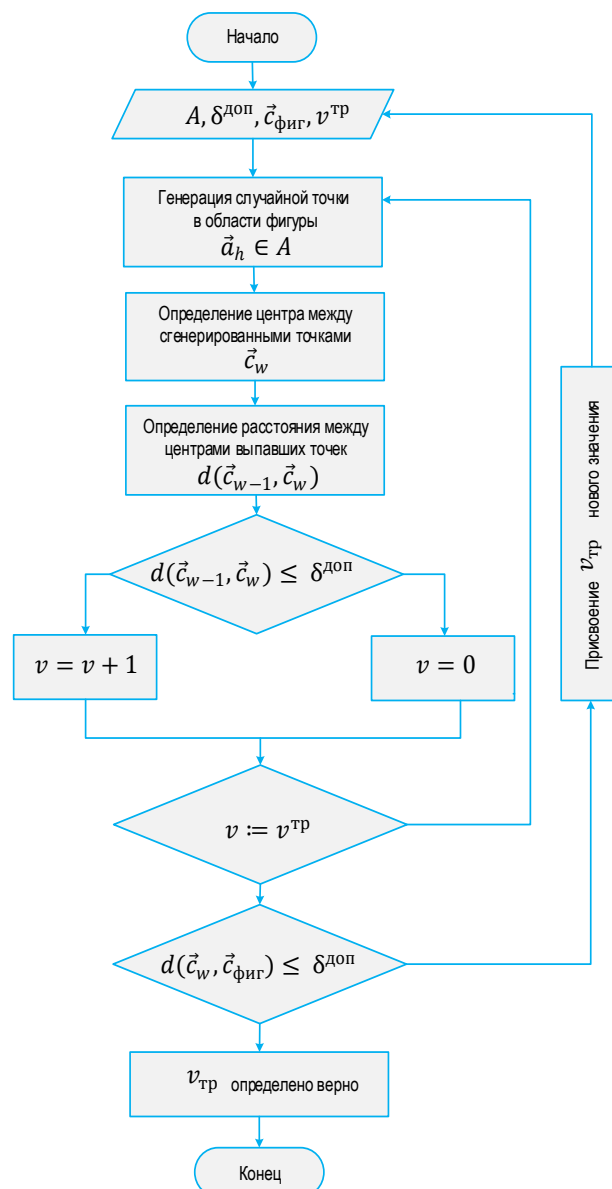


Рис. 3. Алгоритм определения $v^{\text{тр}}$

Fig. 3. $v^{\text{тр}}$ Determining Algorithm

Если условие истинно, это гарантирует правильность задания $v^{\text{тр}}$, в противном случае требуется обновить значение $v^{\text{тр}}$ и проделать все шаги алгоритма заново.

Для верификации корректности определения $v^{\text{тр}}$ необходимо выполнить данный алгоритм для нескольких геометрических фигур с априорно известным расположением центроида.

Этап 3. Для обеспечения адекватного определения робастных решений по управлению производством холдинга химической промышленности необходимо на данном этапе установить область

допустимых значений определенных ранее управляемых параметров производства, на основе которых затем будет сформирован случайный вектор этих параметров.

Эман 4. Учитывая, что диапазоны значений управляемых параметров производства имеют различный масштаб, целесообразно осуществить их нормализацию.

Нормализация параметров производства осуществляется путем использования следующего выражения [21]:

$$r_i^{\circ} = \frac{(r_i - \bar{r})}{\sigma_r}, \quad (3)$$

где r_i° – нормализованное значение i -го управляемого параметра из множества допустимых значений; r_i – значение i -го управляемого параметра из множества допустимых значений; $\bar{r}$ – среднее значение управляемых параметров; σ_r – среднее квадратическое отклонение.

Нормализация значений параметров позволяет повысить точность определения положения центроида.

Эман 5. На этапе 5 из заданной области допустимых значений параметров производства генерируется случайный вектор $\vec{r}$ без применения процедуры нормализации значений его компонентов.

Эман 6. Полученный на этапе 5 вектор $\vec{r}$ выступает в качестве исходных данных для моделирования процесса функционирования производства холдинга химической промышленности, результаты которого позволяют получить выборки модельных значений показателей КЦФП $\{\Pi_{le}^{\square}\}_E$, $e = \overline{1, E}$, $l = \overline{1, L}$.

Полученные выборки позволяют на основе метода Парзена – Розенблатта [22] определить вероятность достижения КЦФП:

$$P^{\text{доп}}(\vec{r}) = \int_0^{\Pi_1^{\text{TP}}} \dots \int_0^{\Pi_L^{\text{TP}}} f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_l, \dots, \Pi_L) d\Pi_L^{\text{TP}} \dots d\Pi_1^{\text{TP}},$$

где $f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_l, \dots, \Pi_L) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E (\prod_{l=1}^L \frac{1}{h_l} Y(\frac{\Pi_l - \Pi_{le}}{h_l}))$ – плотность вероятности системы случайных величин, заданной показателями КЦФП.

Эман 7. Рассчитанная вероятность $P(\vec{r})$ сопоставляется с требуемой $P^{\text{доп}}$.

Если не выполняется условие:

$$P(\vec{r}) \geq P^{\text{доп}}, \quad (4)$$

алгоритм переходит к формированию нового случайного вектора.

В противном случае сгенерированный вектор $\vec{r}$ добавляется ($\vec{r}_w := \vec{r}$) в множество решений U , удовлетворяющих заданным ограничениям (**Эман 8**).

Эман 9. В случае, если после проведения заданного количества итераций генерирования вектора $\vec{r}$ не удастся найти ни одного вектора, соответствующего условию (4), делается вывод об отсутствии решения и необходимости пересмотра исходных данных для использования методики.

Эман 10. Каждый вектор $\vec{r}_w$, соответствующий условию (4), после процесса нормализации значений его компонентов можно представить в виде точки в многомерном пространстве. По мере того, как множество U заполняется векторами, формируется определенная геометрическая фигура. Для определения параметров производства, характеризующих робастное решение по управлению его функционированием, требуется вычислить центроид данной фигуры.

Для определения координат центроида необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$\vec{c}^* = \underset{\vec{c} \in \Delta}{\operatorname{argmin}} \sum_{w=1}^W \left(\sqrt{\sum_i^I (r_{wi} - r_i^c)^2} \right), \quad (5)$$

где $\vec{c}^*$ – вектор параметров производства, характеризующий центроид множества U ; Δ – область заданных ограничений; W – мощность (количество элементов) множества U ; I – количество управляемых параметров производства холдинга химической промышленности; r_{wi} – значение i -го параметра вектора $\vec{r}_w$; r_i^c – значение i -го параметра вектора $\vec{c}$.

Эман 11. Учитывая целочисленный характер некоторых управляемых параметров производства, возможен сценарий, когда определение центроида среди имеющихся данных становится невозможным. В этом случае процесс возвращается к этапу создания случайного вектора $\vec{r}$.

Эман 12. На этом этапе производится расчет расстояния $d(c_{w-1}, c_w)$ между последним вычисленным центроидом c_w и предшествующим ему c_{w-1} .

После этого проверяется соблюдение условия (**Эман 13**):

$$d(c_{w-1}, c_w) \leq \delta^{\text{доп}}. \quad (6)$$

На рисунке 4 представлено графическое отображения процесса нахождения центроида в области допустимых значений вероятности достижения КЦФП в случае двух управляемых параметров производства (глубины месячного и годового обслуживания используемого оборудования). На графиках используются следующие обозначение:

● – начальный центроид между выпавшими точками;

● – точка, являющаяся вектором параметров производства, удовлетворяющих заданным ограничениям;

● – следующий центроид между выпавшими точками;
 d – Евклидово расстояние между начальным и следующим центроидами;
 $\delta_{\text{доп}}$ – допустимая разница между Евклидовым расстоянием центроидов.

Этап 14. Этапы 5–12 повторяются до тех пор, пока количество итераций v , при которых положение центроида изменяется, меньше, чем на $\delta_{\text{доп}}$, не достигнет требуемого значения:

$$v = v^{\text{тр}}. \quad (7)$$

Этап 15. В случае, если после выполнения этапов 5–12 условие (6) не выполняется, то переменная v обнуляется.

После удовлетворения критерия останова, заданного условием (7), происходит расчет центроида для полученной фигуры. Вектор $\vec{r}_w$, наиболее близкий к полученному центроиду, характеризует наиболее робастное решение по управлению производством холдинга химической промышленности.

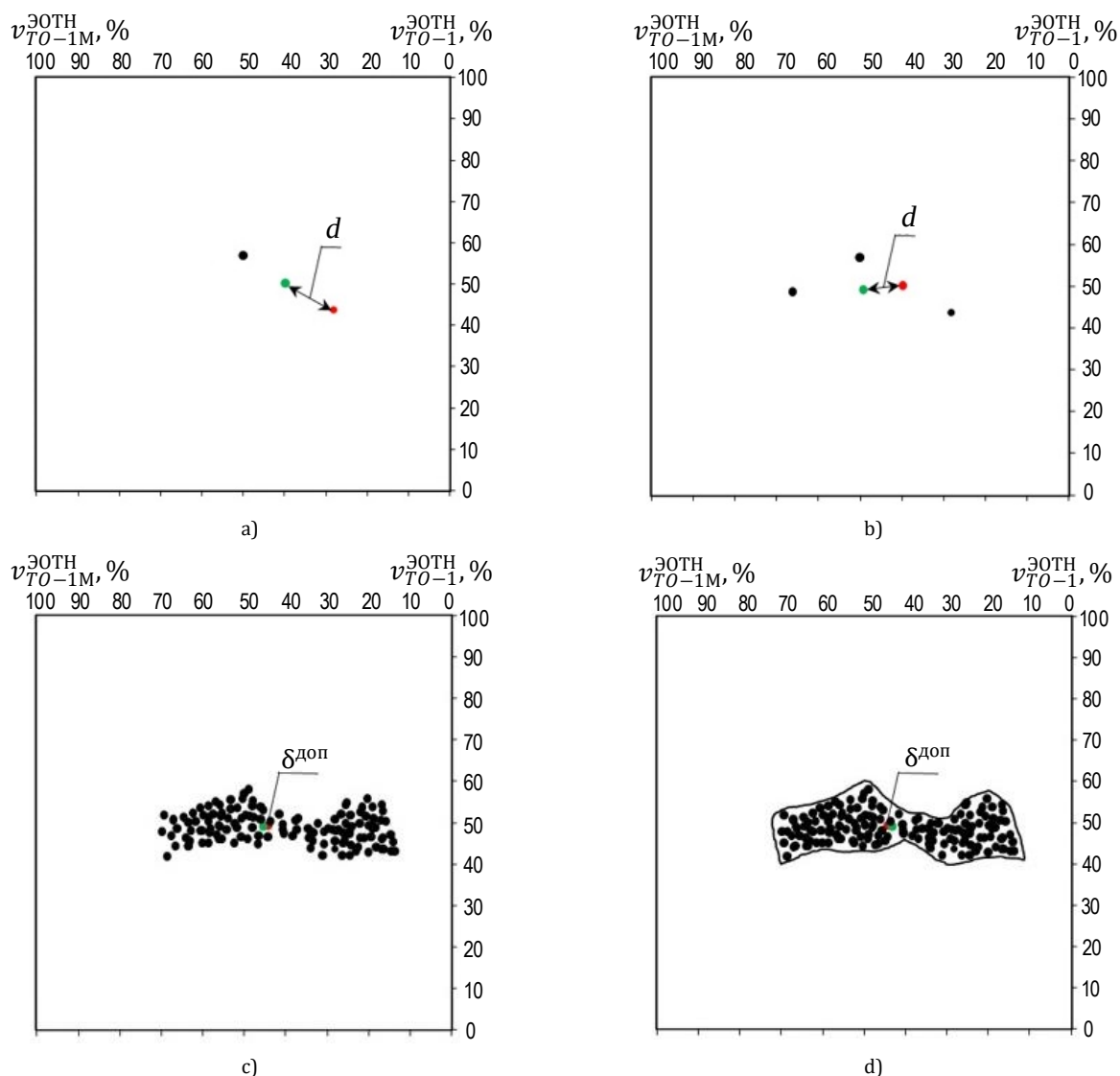


Рис. 4. Нахождение центроида в области допустимых значений вероятности достижения комплекса целей производства:
 а) 2-я итерация; б) 3-я итерация; в) 78-я итерация; д) последняя (90-я) итерация

Fig. 4. Finding a Centroid in the Region of Acceptable Values of the Probability of Achieving the Objectives: а) 2nd Iteration; б) 3rd Iteration; в) 78th Iteration; д) the Last (90th) Iteration

Также следует уделить внимание тому, что при недостатке векторов для адекватного представления формируемой фигуры и при их расположении от центра на расстоянии, превышающем указанную величину $\delta_{\text{доп}}$, предпочтение следует отдать

варианту решения с наибольшей вероятностью достижения КЦФП.

Этап 16. Финальной стадией процедуры выработки робастного к внешним возмущениям решения по управлению производством холдинга хи-

мической промышленности служит разработка методических рекомендаций для лица принимающего решения и вывод их на рабочий интерфейс оператора АСУП.

Разработанная методика представляет собой часть системы поддержки принятия решений в процессе функционирования производства холдинга химической промышленности, реализация которой в составе существующего математического обеспечения АСУП позволит существенно повысить эффективность его функционирования.

Заключение

В ходе аналитического исследования было определено, что эффективное функционирование производства холдинга химической промышленности требует совершенствования существующего математического обеспечения АСУП, позволяющего на основе обработки данных со специализированных модулей этой системы находить управляющие решения, робастные к воздействию внешних возмущений. В рамках такого совершенствования математического обеспечения АСУП холдинга химической промышленности был разработан комплексный научно-методический инструментарий,

фокусирующийся на создании стратегии управления, гарантирующей высокую степень робастности функционирования производства холдинга химической промышленности.

В предложенной методологии нахождения оптимального по критерию максимизации показателя робастности решения используется метод вычисления центроидов сложных многомерных фигур, представляющих собой область допустимых значений вероятности достижения КЦФП. Этот метод основывается на нахождении такой точки в пространстве управляемых параметров производства, где значения каждого из параметров близки к их средним значениям, что способствует нахождению решений по управлению производством холдинга химической промышленности, позволяющих обеспечить достижение КЦФП даже при наличии непредвиденных обстоятельств или внешних возмущающих воздействий в будущем. Реализация предложенной методики в составе существующего математического обеспечения АСУП холдинга химической промышленности позволит обеспечить внедрение проактивного подхода в практику управления производством и существенно повысить эффективность этого процесса.

Список источников

1. Вивчарь Р.М., Друзин И.В., Киричек Р.В., Смирнов А.И., Черкасов С.А. Концепция проактивного управления производством холдинга химической промышленности // Инженерный вестник Дона. 2025. № 8.
2. Морозова О.В. Модели оценки качества многопараметрического управления сложными системами // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2018. № 4(100). С. 161–172. DOI:10.21686/2413-2829-2018-4-161-172. EDN:XWBGXR
3. Озерной Н.А., Дронов В.В., Князев Н.В. Математическая модель поддержки принятия решения на формирование оптимального количества запасных частей защищенных пунктов управления // V Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы инженерно-аэродромного обеспечения базирования авиации в современных условиях и пути их решения» (Воронеж, Российская Федерация, 06–07 октября 2021 г.). Воронеж: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2021. С. 33–38. EDN:YSMAZP
4. Дьяков А.Н. Модель процесса поддержания готовности технологического оборудования с обслуживанием после отказа // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 651. С. 174–179. EDN:WEIZJB
5. Лиференко В.Д., Гураль Д.А., Легков К.Е. Методика оценивания оперативности принятия решения на примере средств зондирования околоземного космического пространства // I-methods. 2021. Т. 13. № 4. С. 4. EDN:BXWC0M
6. Вивчарь Р.М., Решетников Д.В., Герасименко С.Ю. Методика выбора значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-1. С. 32–37. EDN:NOBIRX
7. Клейман Л.А. Методика принятия решений в задаче диагностики элементов информационно-управляющих систем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электроника, информационные технологии, системы управления. 2021. № 38. С. 90–109. DOI:10.15593/2224-9397/2021.2.05. EDN:FUUTHR
8. Резников Б.А. Теория систем и оптимального управления. Часть 3. Принятие решений в условиях неопределенности и адаптация. МО СССР, 1988. 140 с.
9. Ермольев Ю.М., Ястремский А.И. Стохастические модели и методы в экономическом планировании. М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 255 с.
10. Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. Теория систем и оптимального управления. Часть 1. Основные понятия, математические модели и методы анализа систем. Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. 319 с.
11. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. МО СССР, 1990. 522 с.
12. Лучко С.В. Теория автоматического управления: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. 378 с.
13. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

14. Волкова В.Н., Емельянов А.А. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2006. 848 с.
15. Силич В.А., Силич М.П. Теория систем и системный анализ: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 276 с. EDN:RBBTZB
16. Иванов В.А. Эффективные управленческие решения как основа устойчивости управленческой команды // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2010. № 4. С. 64–67. EDN:PAIYAH
17. Лукина А.В. Методика оценки устойчивости экономических систем // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2013. № 7(61). С. 14–20. EDN:QUUQHF
18. Завгородняя А.С. Методика принятия решений в адаптивном управлении устойчивым развитием сельскохозяйственных предприятий // Фундаментальные исследования. 2020. № 9. С. 36–40. DOI:10.17513/fr.42840. EDN:KDFCVI
19. Билятдинов К.З. Методика оценки устойчивости технических систем // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 10. С. 25–28. EDN:LVVDFM
20. Билятдинов К.З. Модель обеспечения и методика оценки устойчивости больших технических систем в процессе эксплуатации // International Journal of Open Information Technologies. 2022. № 9. Т. 10. С. 32–40. EDN:FZTHQT
21. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Нормализация данных в машинном обучении // Информатика. 2021. № 3. Т. 18. С. 83–96. DOI:10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96. EDN:JKAHKM
22. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // The Annals of Mathematical Statistics. 1962. Vol. 33. Iss. 3. PP. 1065–1076. DOI:10.1214/aoms/1177704472

References

1. Vivchar R.M., Druzin I.V., Kirichek R.V., Smirnov A.I., Cherkasov S.A. The concept of proactive production management of the chemical industry holding. *Engineering Bulletin of the Don*. 2025;8. (in Russ.)
2. Morozova O.V. Models of Quality Estimation of Multi-Parametric Management of Complicated Systems. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2018;4(100):161–172. (in Russ.) DOI:10.21686/2413-2829-2018-4-161-172. EDN:XWBGXR
3. Ozernoi N.A., Dronov V.V., Knyazev N.V. Mathematical model of decision support for the formation of the optimal number of spare parts of protected control points. *Proceedings of the Vth All-Russian Scientific and Practical Conference on Current Issues of Engineering and Aerodrome Support for Aviation Basing in Modern Conditions and Ways to Solve Them, 06–07 October 2021, Voronezh, Russian Federation*. Voronezh: Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy; 2021. p.33–38. (in Russ.) EDN:YSMAZP
4. Dyakov A.N. A model of the process of maintaining the readiness of technological equipment with maintenance after failure. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016;651:174–179. (in Russ.) EDN:WEIZJB
5. Liferenko V.D., Gural D.A., Legkov K.E. Methodology for assessing the efficiency of decision-making on the use of near-earth space sensing tools. *I-methods*. 2021;13(4):4. (in Russ.) EDN:BXWCOM
6. Vivchar R.M., Reshetnikov D.V., Gerasimenko S.Yu. Techniyue of selection of parameters of a system of requisition requirements for space application to start. *Modern high technologies*. 2019;10-1:32–37. (in Russ.) EDN:NOBIRX
7. Kleiman L.A. Decision-making technique in the problem of information management systems elements diagnostics. *PNRPU Bulletin. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2021;38:90–109. (in Russ.) DOI:10.15593/2224-9397/2021.2.05. EDN:FUUTHR
8. Reznikov B.A. *Theory of Systems and Optimal Control. Part 3. Decision-Making in Conditions of Uncertainty and Adaptation*. Ministry of Defense of the USSR Publ.; 1988. 140 p. (in Russ.)
9. Ermolyev Yu.M., Yastremsky A.I. *Stochastic Models and Methods in Economic Planning*. Moscow: Glavnaya redakciya fiziiko-matematicheskoy literatury Publ.; 1979. 255 p. (in Russ.)
10. Kalinin V.N., Reznikov B.A., Varakin E.I. *Theory of Systems and Optimal Control. Part 1. Basic Concepts, Mathematical Models and Methods of System Analysis*. Leningrad: Mozhaisky Military Engineering and Space Institute Publ.; 1979. 319 p. (in Russ.)
11. Reznikov B.A. *System Analysis and Methods of System Engineering. Part 1. Methodology of System Research. Modeling of Complex Systems*. Ministry of Defense of the USSR Publ.; 1990. 522 p. (in Russ.)
12. Luchko S.V. *Theory of Automatic Control*. St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy Publ.; 2007. 378 p. (in Russ.)
13. Anfilatov V.S., Yemelyanov A.A., Kukushkin A.A. *System Analysis in Management*. Moscow: Finansy i statistika Publ.; 2002. 368 p. (in Russ.)
14. Volkova V.N., Yemelyanov A.A. *Theory of Systems and System Analysis in the Management of Organizations*. Moscow: Finansy i statistika Publ.; 2006. 848 p. (in Russ.)
15. Silich V.A., Silich M.P. *Theory of Systems and System Analysis*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University Publ.; 2011. 276 p. (in Russ.) EDN:RBBTZB
16. Ivanov V.A. Effective management decisions as the basis for the sustainability management team. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2010;4:64–67. (in Russ.) EDN:PAIYAH
17. Lukina A.V. Methodology for assessing the sustainability of economic systems. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2013;7(61):14–20. (in Russ.) EDN:QUUQHF
18. Zavgorodnyaya A.S. Methods of decision-making in adaptive management of sustainable development of agricultural enterprises. *Fundamental research*. 2020;9:36–40. (in Russ.) DOI:10.17513/fr.42840. EDN:KDFCVI
19. Biliatdinov K.Z. Method of assessment of technical systems' stability. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2020;10:25–28. (in Russ.) EDN:LVVDFM

20. Bilyatdinov K.Z. Model of stability provision and methodology for assessing the stability of big technical systems during operation. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;9(10):32–40. (in Russ.) EDN:FZTHQT
21. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. Data normalization in machine learning. *Informatics*. 2021;3(18):83–96. (in Russ.) DOI:10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96. EDN:JKAHKM
22. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1962;33(3): 1065–1076. DOI:10.1214/aoms/1177704472

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 29.08.2025.

The article was submitted 28.07.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 29.08.2025.

Информация об авторах:

ВИВЧАРЬ
Роман Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-3865-9102>

КОВАЛЕНКО
Михаил Евгеньевич

руководитель отдела разработки и поставки решений ООО «Цифра»
 <https://orcid.org/0009-0005-9447-442X>

ДМИТРИЕНКО
Дмитрий Сергеевич

директор проектов ООО «Цифра»
 <https://orcid.org/0009-0006-8186-2121>

СМИРНОВ
Алексей Игоревич

директор дирекции по экономической безопасности АО «Апатит»
 <https://orcid.org/0009-0006-9993-041X>

ЧЕРКАСОВ
Сергей Александрович

заместитель директора по экономической безопасности АО «Апатит»
 <https://orcid.org/0009-0006-1822-9307>

ЗАЙЦЕВ
Алексей Иванович

проректор по цифровой трансформации и административной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0006-4824-2131>

КИРИЧЕК
Руслан Валентинович

доктор технических наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-8781-6840>

Киричек Р.В. является главным редактором журнала «Труды учебных заведений связи» с 2023 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Kirichek R.V. has been an editor-in-chief of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" since 2023, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.