

Параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица на основе адаптивного формирования коэффициента консервативности

С.А. Клятецкий

Аннотация - Предложена параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица для оперативного выбора корректирующих управленческих воздействий при сооружении атомных электростанций в условиях отсутствия достоверной вероятностной информации. В отличие от классической постановки коэффициент консервативности определяется как функция параметров текущей управленческой ситуации, характеризующих тяжесть выявленного отклонения и значимость выполняемой операции для безопасности. Разработана формальная математическая модель, исследованы её корректность, основные свойства, устойчивость и вычислительная сложность. Предложена методика экспериментальной верификации, включающая сравнение с классическими критериями принятия решений, систему количественных метрик и абляционное исследование. Результаты экспериментальной проверки подтверждают адаптивный характер предложенного подхода, повышение качества принимаемых решений по сравнению с классическим критерием Вальда-Гурвица и практическую применимость разработанного метода в системах поддержки принятия решений при сооружении атомных электростанций.

Ключевые слова - критерий Вальда-Гурвица, принятие решений в условиях неопределённости, параметрическая модификация, коэффициент консервативности, адаптивный выбор решений, поддержка принятия решений, сооружение атомных электростанций.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сооружение атомной электростанции представляет собой крупномасштабный организационно-технический проект, в котором управленческие решения принимаются в условиях ограниченности ресурсов, взаимного влияния операций и высокой цены возможных ошибок. Локальные нарушения способны распространяться по структуре проекта и влиять на выполнение связанных работ [1], а управление сооружением АЭС рассматривается как интегрированный процесс, объединяющий технические, организационные, ресурсные и временные аспекты [2]. Развитие BIM, цифровых двойников, промышленного интернета вещей и других цифровых технологий повысило наблюдаемость строительного процесса [3], но не устранило неопределённость выбора корректирующих воздействий, обусловленную неполнотой информации и неоднозначностью дальнейшего развития ситуации.

Современные методы принятия решений в условиях

неопределённости включают контекстно-зависимую, робастную и распределительно-робастную оптимизацию, а также методы принятия решений при глубокой неопределённости [4–7]. Их общей тенденцией является переход от универсальных правил выбора к адаптации решения к текущему состоянию объекта. При этом современное развитие исследований ориентировано не на безусловную максимизацию осторожности, а на управление степенью консервативности решения с учётом доступной информации [5–7].

При отсутствии достоверных вероятностей применяются классические критерии Вальда, Сэвиджа, Лапласа и Гурвица [8]. Среди них критерий Гурвица занимает особое место, поскольку допускает регулирование степени консервативности. Однако в классической постановке соответствующий коэффициент задаётся заранее и одинаково применяется ко всем управленческим ситуациям. Тем самым уровень осторожности определяется не характеристиками ситуации, а заранее выбранным параметром.

Для систем, критичных для безопасности, процедура выбора должна учитывать обязательные ограничения, цену возможной ошибки и обеспечивать прозрачность, объяснимость и воспроизводимость рекомендаций [2], [9]. Исследования в области управления ядерными проектами и объяснимых интеллектуальных систем подтверждают актуальность этих требований [1], [10], [11]. Вместе с тем в известных работах не представлен простой вычислимый метод оперативного выбора корректирующих воздействий, в котором степень консервативности определяется параметрами конкретной строительной ситуации.

Таким образом, научно-практическое противоречие состоит в том, что контекстно-зависимый характер реальных управленческих ситуаций требует изменяемой степени консервативности, тогда как классический критерий Вальда-Гурвица использует её постоянное значение. Следовательно, степень консервативности должна определяться параметрами текущей управленческой ситуации, а не задаваться заранее как постоянная характеристика процесса принятия решения.

В основу исследования положена гипотеза о том, что параметризация коэффициента консервативности по тяжести текущего отклонения и значимости операции для безопасности позволит адаптировать критерий Вальда-Гурвица к условиям сооружения АЭС, сохранив его

вычислительную простоту, объяснимость и применимость при отсутствии достоверных вероятностей сценариев.

Целью работы является разработка, теоретическое обоснование и экспериментальная проверка параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица, реализующей принцип адаптивной консервативности принятия управленческих решений при сооружении АЭС. Объект исследования - процесс выбора корректирующих управленческих действий при сооружении АЭС. Предмет исследования - методы контекстно-зависимого выбора управленческих альтернатив в условиях отсутствия достоверных вероятностей развития ситуации.

II. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ МЕТОДА

2.1. Постановка задачи принятия решений

Рассматривается задача оперативного выбора корректирующего управленческого воздействия при возникновении отклонений в ходе сооружения атомной электростанции. Предполагается, что средствами цифрового мониторинга уже выявлена операция, требующая управленческого вмешательства, а текущее состояние объекта представлено совокупностью количественных показателей. Требуется выбрать одно из допустимых управленческих воздействий, обеспечивающее наилучший результат при возможных вариантах дальнейшего развития ситуации.

В отличие от задач календарно-сетевой оптимизации, распределения ресурсов или формирования производственной программы, рассматриваемая задача не предполагает построения нового множества решений. Она возникает после выявления конкретного отклонения и состоит в оперативном выборе одной альтернативы из заранее сформированного конечного множества допустимых воздействий.

Пусть

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$$

- множество допустимых альтернатив управления, а

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

- множество возможных сценариев развития ситуации. Каждой паре «альтернатива - сценарий» ставится в соответствие значение функции эффективности

$$R: A \times S \rightarrow R,$$

образующее матрицу выигрышей

$$R = \{R(a_i, s_j)\}.$$

Элемент $R(a_i, s_j)$ характеризует результат применения альтернативы a_i при реализации сценария s_j . При формировании оценок могут учитываться технологические, временные, ресурсные, экономические и иные показатели, приведённые к единой шкале.

Особенностью рассматриваемой задачи является

отсутствие достоверной информации о вероятностях реализации отдельных сценариев. Несмотря на широкое применение цифровых технологий мониторинга, локальные управленческие ситуации при сооружении АЭС остаются уникальными, поскольку формируются сочетанием конкретного технического состояния объекта, организационных условий, состава выполняемых работ, доступности ресурсов и внешних воздействий. Кроме того, последствия одного и того же управленческого воздействия зависят от момента его принятия и общей конфигурации проекта. Поэтому рассматриваемая постановка относится к принятию решений в условиях неопределённости, а не риска: множество возможных сценариев может быть сформировано, однако вероятности их возникновения неизвестны или не могут быть оценены с необходимой достоверностью [4–8].

Для задач такого класса метод выбора должен удовлетворять ряду требований. Во-первых, учитывать возможные благоприятные и неблагоприятные исходы реализации альтернатив. Во-вторых, допускать регулирование степени осторожности принимаемого решения. В-третьих, сохранять вычислительную простоту, позволяющую применять его в контуре оперативной поддержки принятия решений. В-четвёртых, обеспечивать воспроизводимость и интерпретируемость результатов, что особенно важно для систем, критичных для безопасности, где процедуры выбора должны быть прозрачными, проверяемыми и соответствовать принципам градуированного подхода МАГАТЭ [2], [9–11].

Таким образом, задача сводится к выбору альтернативы

$$a^* = \arg \max_{a_i \in A} F(a_i),$$

где функционал $F(\cdot)$ должен обеспечивать рациональный компромисс между устойчивостью решения к неблагоприятным сценариям и эффективностью его реализации при благоприятном развитии ситуации, причём степень консервативности критерия выбора должна определяться характеристиками текущей управленческой ситуации.

2.2. Анализ критериев и выбор математической основы

Для выбора альтернатив при неизвестных вероятностях сценариев применяются классические критерии Вальда, Лапласа, Сэвиджа и Гурвица [8]. Они используют одну матрицу выигрышей $R = \{R(a_i, s_j)\}$, но различаются способом учёта возможных исходов и реализуемой стратегией отношения к неопределённости.

Критерий Вальда соответствует максимально консервативной стратегии. Для каждой альтернативы определяется её наихудший результат

$$W_i = \min_{s_j \in S} R(a_i, s_j),$$

после чего выбирается альтернатива

$$a_W^* = \arg \max_{a_i \in A} W_i.$$

Критерий не требует вероятностной информации и обеспечивает защищённость от наиболее неблагоприятного сценария. Однако ориентация исключительно на худший исход игнорирует остальную информацию матрицы выигрышей и при многократном применении может приводить к избыточному резервированию ресурсов и снижению эффективности управления проектом.

Критерий Лапласа исходит из предположения о равновероятности всех сценариев. Оценка альтернативы определяется средним значением результатов:

$$L_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R(a_i, s_j), \quad a_i^* = \arg \max_{a_i \in A} L_i.$$

Достоинством критерия является использование всей матрицы выигрышей. Вместе с тем предположение о равновероятности представляет собой дополнительную гипотезу, не подтверждённую для уникальных локальных ситуаций сооружения АЭС. Тем самым отсутствие вероятностной информации фактически заменяется искусственно заданным распределением.

Критерий Сэвиджа ориентирован на минимизацию максимального сожаления. Для каждого сценария определяется наилучший возможный результат, после чего рассчитываются потери от выбора каждой альтернативы:

$$r_{ij} = \max_{a_k \in A} R(a_k, s_j) - R(a_i, s_j),$$

$$S_i = \max_{s_j \in S} r_{ij}, \quad a_i^* = \arg \min_{a_i \in A} S_i.$$

Такой подход снижает вероятность выбора альтернативы, значительно уступающей потенциально наилучшему решению. Однако критерий оценивает относительные потери, а не формирует непосредственный компромисс между эффективностью и требуемой осторожностью. Поэтому он не предоставляет механизма регулирования степени консервативности применительно к характеристикам конкретной управленческой ситуации.

Критерий Гурвица объединяет оценки наиболее неблагоприятного и наиболее благоприятного исходов [8], [12]:

$$H_i(\lambda) = \lambda \min_{s_j \in S} R(a_i, s_j) + (1 - \lambda) \max_{s_j \in S} R(a_i, s_j),$$

$$a_i^* = \arg \max_{a_i \in A} H_i(\lambda),$$

где $\lambda \in [0, 1]$ – коэффициент консервативности. При $\lambda = 1$ критерий совпадает с критерием Вальда, при $\lambda = 0$ реализует полностью оптимистическую стратегию, а промежуточные значения задают непрерывный компромисс между защищённостью от неблагоприятных исходов и эффективностью при благоприятном развитии ситуации. Наличие параметра λ позволяет количественно задавать отношение к неопределённости, не изменяя математическую структуру критерия.

Сравнительная оценка критериев применительно к рассматриваемой задаче представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение классических критериев принятия решений

Свойство	Вальд	Лаплас	Сэвидж	Гурвиц
Не требует достоверных вероятностей	+	±	+	+
Использует неблагоприятные исходы	+	±	+	+
Учитывает благоприятные исходы	–	+	косвенно	+
Позволяет регулировать консервативность	–	–	–	+
Вычислительная простота	+	+	+	+
Объяснимость результата	+	+	+	+

Критерий Гурвица в наибольшей степени соответствует требованиям оперативного выбора корректирующих воздействий: он не требует задания вероятностей, обладает простой и объяснимой вычислительной структурой и, в отличие от остальных критериев, позволяет количественно регулировать степень консервативности единственным параметром. Это делает его наиболее подходящей математической основой предлагаемого метода.

Вместе с тем классическая постановка содержит принципиальное ограничение: коэффициент λ задаётся заранее как постоянная характеристика отношения лица, принимающего решение, к неопределённости [8], [12]. В результате одинаковая степень осторожности применяется к ситуациям, различающимся тяжестью текущего отклонения и возможной ценой ошибочного решения. Такое предположение не соответствует контекстно-зависимому характеру оперативного управления сооружением АЭС.

Современные исследования контекстной, робастной и распределительно-робастной оптимизации, а также принятия решений при глубокой неопределённости подтверждают необходимость адаптации решений к доступной информации и характеристикам конкретной ситуации [4–7]. Однако эти подходы, как правило, требуют прогнозных или вероятностных моделей, обучения на данных либо решения существенно более

сложных оптимизационных задач. Для рассматриваемого класса задач целесообразно сохранить компактную и интерпретируемую структуру критерия Гурвица, изменив только механизм определения его параметра.

Таким образом, дальнейшее развитие математического аппарата должно быть направлено не на поиск нового критерия, а на устранение единственного принципиального ограничения критерия Гурвица - постоянства коэффициента консервативности. Постоянный коэффициент должен быть заменён вычисляемой функцией параметров текущей управленческой ситуации. Это позволит реализовать принцип адаптивной консервативности без изменения структуры критерия и существенного увеличения вычислительной сложности.

III. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

В разделе вводятся математические объекты, необходимые для построения параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица: управленческая ситуация, показатели её состояния и значимости, множество допустимых альтернатив и формальная постановка задачи выбора.

3.1. Формализация управленческой ситуации

Предлагаемый метод предназначен для поддержки оперативного выбора корректирующего управленческого воздействия при возникновении отклонений в ходе сооружения атомной электростанции.

Пусть для рассматриваемой операции задано множество допустимых альтернатив A , множество возможных сценариев развития ситуации S и матрица результатов $R = \{r_{ij}\}$, содержащая оценки результатов реализации альтернатив при различных сценариях. Тогда управленческая ситуация формализуется совокупностью

$$\Omega = \langle A, S, R, x, B, C \rangle,$$

где x - вектор текущего состояния операции, B - показатель значимости операции для безопасности, C - совокупность ограничений, определяющих допустимость применения альтернатив.

Вектор состояния x формируется системой мониторинга, а множество сценариев - экспертным способом либо средствами моделирования проекта. Дальнейшая формализация компонентов модели выполняется в следующих подразделах.

3.2. Формализация текущего состояния операции

Текущее состояние контролируемой операции представляется нормированным вектором

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_k), \quad x_i \in [0, 1],$$

где каждый компонент характеризует отдельный аспект состояния операции и отражает степень его отклонения от плановых или нормативных значений. Состав вектора определяется возможностями применяемой системы мониторинга и не является предметом настоящего исследования.

Для обеспечения корректности последующей

математической обработки компоненты вектора должны удовлетворять следующим требованиям:

- **содержательная самостоятельность** - каждый показатель характеризует собственный аспект состояния операции;
- **локальность** - показатель относится непосредственно к рассматриваемой операции;
- **единая направленность** - увеличение значения соответствует увеличению степени отклонения;
- **нормируемость** - показатель допускает приведение к безразмерной шкале $x_i \in [0, 1]$ с сохранением монотонности.

Такой вектор используется для вычисления интегрального показателя тяжести текущего отклонения.

3.3. Формализация тяжести текущего отклонения

Вектор текущего состояния операции обеспечивает многомерное описание выявленного отклонения, однако непосредственное использование всех его компонентов в критерии принятия решения приводит к усложнению модели и затрудняет интерпретацию результатов. Поэтому вводится интегральная характеристика текущего состояния - показатель тяжести текущего отклонения.

Под тяжестью текущего отклонения понимается количественная мера, характеризующая степень отклонения контролируемой операции от планового или нормативного состояния по совокупности наблюдаемых показателей. Значение данного показателя должно возрастать по мере ухудшения состояния операции.

Пусть текущее состояние описывается нормированным вектором

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $x_i \in [0, 1]$, а увеличение любого компонента соответствует увеличению степени отклонения по соответствующему показателю.

Интегральная оценка определяется функцией агрегирования

$$T = f(X),$$

где T - показатель тяжести текущего отклонения.

Функция агрегирования должна использовать информацию обо всех компонентах вектора, быть монотонной по каждому аргументу, допускать содержательную интерпретацию и сохранять вычислительную простоту. Этим требованиям удовлетворяет взвешенная евклидова норма

$$T = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_i^2},$$

где w_i - весовые коэффициенты, отражающие относительную значимость отдельных показателей состояния.

Использование евклидовой нормы обеспечивает непрерывную интегральную оценку, учитывающую совместное влияние всех наблюдаемых отклонений. При неизменных остальных компонентах увеличение любого

показателя приводит к увеличению значения T , что гарантирует монотонность интегральной оценки и корректность её последующего использования в критерии принятия решений.

Следует отметить, что показатель тяжести текущего отклонения характеризует исключительно текущее состояние контролируемой операции и не является оценкой вероятности развития событий или возможного ущерба. Потенциальные последствия ошибочного решения учитываются отдельно посредством показателя значимости операции для безопасности.

Таким образом, показатель T обеспечивает переход от многомерного описания текущего состояния операции к единственной количественной характеристике, пригодной для непосредственного использования при определении степени консервативности принимаемого решения. В сочетании с показателем значимости операции для безопасности он образует информационную основу предлагаемой параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица.

3.3. Формализация тяжести текущего отклонения

Для перехода от многомерного описания состояния операции к единой количественной характеристике вводится показатель тяжести текущего отклонения T .

Пусть текущее состояние операции описывается нормированным вектором $x = (x_1, \dots, x_k)$. Тогда показатель тяжести текущего отклонения определяется выражением

$$T = \sqrt{\sum_{i=1}^k w_i x_i^2}, \quad w_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^k w_i = 1,$$

где w_i - весовые коэффициенты, отражающие относительную значимость отдельных показателей состояния.

Функция агрегирования учитывает все компоненты вектора состояния, является непрерывной и монотонно неубывающей по каждому x_i . Показатель T характеризует исключительно текущее состояние операции и не является оценкой вероятности развития событий или возможного ущерба. Совместно с показателем значимости операции для безопасности он используется при определении коэффициента консервативности.

3.5. Формирование множества допустимых альтернатив

Пусть A_0 - исходное множество потенциальных управленческих воздействий. Перед применением критерия из него формируется множество допустимых альтернатив A , удовлетворяющих обязательным ограничениям рассматриваемой управленческой ситуации.

Проверка допустимости выполняется по четырём группам условий:

- выполнение требований безопасности;
- соответствие нормативным ограничениям;
- ресурсная реализуемость;
- возможность реализации в располагаемом временном

окне.

Формально множество допустимых альтернатив определяется выражением

$$A = \{a \in A_0 : C_s(a) = C_n(a) = C_r(a) = C_t(a) = 1\},$$

где C_s , C_n , C_r и C_t - булевы функции, характеризующие соответственно выполнение требований безопасности, нормативных ограничений, ресурсную и временную реализуемость альтернативы.

Критерий принятия решения применяется только к альтернативам, удовлетворяющим всем обязательным ограничениям.

3.6. Формальная постановка задачи выбора

В настоящем исследовании принимается предположение, что коэффициент консервативности классического критерия Вальда-Гурвица определяется параметрами текущей управленческой ситуации:

$$\lambda = f(T, B), \quad T, B \in [0, 1],$$

где T - показатель тяжести текущего отклонения, B - показатель значимости операции для безопасности.

Тогда задача выбора управленческого решения формулируется следующим образом:

$$a^* = \arg \max_{a_i \in A} H_i(f(T, B)),$$

где H_i - критерий Вальда-Гурвица с параметрически определяемым коэффициентом консервативности.

Аналитический вид функции $f(T, B)$ и соответствующая параметрическая модификация критерия выводятся в следующем разделе.

IV. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЯ ВАЛЬДА-ГУРВИЦА

В предыдущем разделе выполнена формальная постановка задачи принятия решений и показано, что коэффициент консервативности классического критерия Вальда-Гурвица целесообразно рассматривать как функцию параметров текущей управленческой ситуации. В настоящем разделе выводится аналитический вид этой функции, строится параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица, исследуются её основные математические свойства и формулируется алгоритм практического применения разработанного метода.

4.1. Требования к параметрической функции коэффициента консервативности

В соответствии с постановкой задачи, выполненной в разделе 3, коэффициент консервативности рассматривается как функция параметров текущей управленческой ситуации

$$\lambda = f(T, B),$$

где

$$T, B \in [0, 1].$$

Для обеспечения корректности последующего построения модифицированного критерия функция $\lambda(T, B)$ должна удовлетворять следующим требованиям.

Во-первых, функция должна быть ограниченной:

$$0 \leq \lambda(T, B) \leq 1,$$

что обеспечивает сохранение физического смысла коэффициента консервативности и совместимость с классическим критерием Вальда-Гурвица.

Во-вторых, функция должна быть монотонно неубывающей по каждому из аргументов:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} \geq 0, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial B} \geq 0,$$

то есть увеличение любого параметра управленческой ситуации не должно приводить к уменьшению степени консервативности принимаемого решения.

В-третьих, функция должна быть непрерывной, обеспечивая плавное изменение коэффициента консервативности при изменении параметров ситуации и исключая необоснованные скачки управленческих рекомендаций.

В-четвёртых, параметры функции должны обладать содержательной интерпретируемостью, позволяющей однозначно объяснить влияние каждого из них на степень консервативности принимаемого решения.

В-пятых, вычисление функции должно обладать минимальной вычислительной сложностью, обеспечивая возможность применения метода в системах оперативной поддержки принятия решений.

Сформулированные требования определяют класс допустимых параметрических функций и служат основой для выбора их аналитического вида, выполняемого в следующем подразделе.

4.2. Аналитический вид функции коэффициента консервативности

В качестве параметрической зависимости коэффициента консервативности предлагается использовать линейную функцию

$$\lambda(T, B) = \lambda_0 + \alpha T + \beta B,$$

где λ_0 , α и β – постоянные параметры модели, удовлетворяющие условиям

$$\lambda_0 \geq 0, \alpha \geq 0, \beta \geq 0, \lambda_0 + \alpha + \beta \leq 1.$$

Параметр λ_0 определяет базовый уровень консервативности при отсутствии существенных отклонений и минимальной значимости рассматриваемой операции. Коэффициент α характеризует чувствительность степени консервативности к увеличению тяжести текущего отклонения, а коэффициент β – к увеличению значимости операции для безопасности.

Предлагаемая функция удовлетворяет требованиям, сформулированным в предыдущем подразделе. Монотонность по каждому аргументу обеспечивается условиями

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \alpha \geq 0, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial B} = \beta \geq 0.$$

Ограниченность функции следует из условий

$$\lambda_0 \geq 0, \alpha \geq 0, \beta \geq 0, \lambda_0 + \alpha + \beta \leq 1,$$

при которых для любых

$$T, B \in [0, 1]$$

выполняется неравенство

$$0 \leq \lambda(T, B) \leq 1.$$

Непрерывность функции непосредственно следует из её линейной структуры, а простота аналитического выражения обеспечивает минимальную вычислительную сложность и однозначную интерпретацию влияния каждого параметра на степень консервативности принимаемого решения.

Таким образом, предложенная функция удовлетворяет всем сформулированным требованиям и может использоваться при построении параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица.

4.3. Параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица

Для каждой допустимой альтернативы $a_i \in A$ определяются наилучший и наихудший результаты её реализации:

$$r_i^- = \min_{s_j \in S} r_{ij}, \quad r_i^+ = \max_{s_j \in S} r_{ij},$$

где r_{ij} – результат применения альтернативы a_i при реализации сценария s_j .

С учётом введенной параметрической функции коэффициента консервативности модифицированный критерий Вальда-Гурвица принимает вид

$$H_i(T, B) = \lambda(T, B) r_i^- + [1 - \lambda(T, B)] r_i^+.$$

Подставляя выражение, полученное в подразделе 4.2, получаем

$$H_i(T, B) = (\lambda_0 + \alpha T + \beta B) r_i^- + (1 - \lambda_0 - \alpha T - \beta B) r_i^+.$$

Оптимальная альтернатива определяется правилом

$$a^* = \arg \max_{a_i \in A} H_i(T, B).$$

Таким образом, предлагаемая модификация сохраняет математическую структуру классического критерия Вальда-Гурвица. Единственным отличием является замена постоянного коэффициента консервативности вычисляемой функцией параметров текущей управленческой ситуации, что обеспечивает адаптивное изменение степени осторожности принимаемого решения без усложнения вычислительной процедуры.

4.4. Основные свойства модифицированного критерия

Построенная параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица обладает рядом свойств, обеспечивающих её корректность и практическую применимость.

Во-первых, коэффициент консервативности является монотонно неубывающей функцией параметров управленческой ситуации. В соответствии с выражениями

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \alpha \geq 0, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial B} = \beta \geq 0,$$

увеличение тяжести текущего отклонения или значимости операции для безопасности не приводит к уменьшению степени консервативности принимаемого решения.

Во-вторых, предложенная модель сохраняет классический критерий Вальда-Гурвица как частный

случай. При $\alpha = \beta = 0$ получаем $\lambda(T, B) = \lambda_0$, и параметрическая модификация переходит в классический критерий Вальда-Гурвица с постоянным коэффициентом консервативности.

В-третьих, сохраняются предельные режимы классических критериев принятия решений. При $\lambda = 1$ имеем $H_i = r_i^-$, что соответствует критерию Вальда, а при $\lambda = 0$ получаем $H_i = r_i^+$, что соответствует полностью оптимистическому критерию.

В-четвёртых, модифицированный критерий является непрерывным относительно параметров управленческой ситуации. Поскольку функция $\lambda(T, B)$ непрерывна, малые изменения величин T и B приводят к малым изменениям коэффициента консервативности и, соответственно, оценок альтернатив.

Характер поведения критерия при различных сочетаниях параметров управленческой ситуации представлен в табл. 2.

Таблица 2 - Режимы работы параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица

Тяжесть текущего отклонения T	Значимость операции B	Характер принимаемого решения
Низкая	Низкая	Минимальная консервативность
Высокая	Низкая	Степень консервативности определяется преимущественно тяжестью отклонения
Низкая	Высокая	Степень консервативности определяется преимущественно значимостью операции
Высокая	Высокая	Максимальная консервативность

Таким образом, предложенная параметрическая модификация сохраняет основные свойства классического критерия Вальда-Гурвица, обеспечивая при этом адаптивное изменение степени консервативности в зависимости от параметров текущей управленческой ситуации.

4.5. Алгоритм применения модифицированного критерия

Практическое применение разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица осуществляется в виде последовательности вычислительных процедур, реализуемых системой поддержки принятия решений.

На первом этапе формируется вектор текущего состояния операции $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, на основании которого вычисляется интегральный показатель тяжести текущего отклонения T .

На втором этапе определяется показатель значимости рассматриваемой операции для безопасности B и формируется множество допустимых альтернатив $A \subseteq A_0$, удовлетворяющих требованиям безопасности, нормативным ограничениям, ресурсной обеспеченности и располагаемому временному окну.

На третьем этапе по выражению $\lambda = \lambda(T, B)$ вычисляется коэффициент консервативности текущей управленческой ситуации.

Для каждой допустимой альтернативы определяются наихудший и наилучший результаты r_i^- и r_i^+ , после чего вычисляется значение параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица $H_i(T, B)$.

Оптимальная альтернатива определяется правилом

$$a^* = \arg \max_{a_i \in A} H_i(T, B)$$

После завершения вычислений лицу, принимающему решение, представляются рекомендуемая альтернатива, оценки всех допустимых вариантов и значения параметров, использованных при формировании рекомендации.

Автоматическое формирование рекомендации не выполняется в двух случаях: при неполных или противоречивых исходных данных, а также при отсутствии допустимых альтернатив после применения обязательных ограничений. В этих ситуациях управленческая задача передаётся на экспертное рассмотрение.

Предложенный алгоритм обеспечивает непосредственную интеграцию параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица в состав интеллектуальной системы поддержки принятия решений, сохраняя воспроизводимость вычислений и объяснимость получаемых рекомендаций.

V. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ КРИТЕРИЯ ВАЛЬДА-ГУРВИЦА

5.1. Корректность модели

Теорема 1 (о корректности модели)

Если

- множество допустимых альтернатив A непусто и конечно;
- для каждой альтернативы $a_i \in A$ существуют значения $r_i^- = \min_{s_j \in S} r_{ij}$, $r_i^+ = \max_{s_j \in S} r_{ij}$;
- параметры управленческой ситуации удовлетворяют условиям $T, B \in [0, 1]$;
- коэффициент консервативности определяется выражением $\lambda(T, B) = \lambda_0 + \alpha T + \beta B$, где $\lambda_0 \geq 0$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\lambda_0 + \alpha + \beta \leq 1$,

то параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица

$$H_i(T, B) = \lambda(T, B)r_i^- + [1 - \lambda(T, B)]r_i^+$$

корректно определена для каждой альтернативы $a_i \in A$ и задаёт отображение $H: A \rightarrow \mathbb{R}$.

Доказательство.

Из условий $T, B \in [0, 1]$, и $\lambda_0 \geq 0$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\lambda_0 + \alpha + \beta \leq 1$ следует $0 \leq \lambda(T, B) \leq 1$.

Поскольку множество сценариев конечно, для каждой альтернативы существуют значения r_i^- и r_i^+ .

Следовательно, величина $H_i(T, B) = \lambda(T, B)r_i^- + [1 - \lambda(T, B)]r_i^+$ является линейной комбинацией двух действительных чисел с коэффициентами, сумма которых равна единице. Поэтому значение $H_i(T, B)$ существует и единственно для каждой альтернативы $a_i \in A$.

Следовательно, каждой альтернативе из множества A сопоставляется единственная действительная оценка, то есть отображение $H: A \rightarrow \mathbb{R}$ определено корректно.

Теорема доказана.

5.2. Основные математические свойства

Теорема 2. Если коэффициент консервативности определяется функцией $\lambda(T, B) = \lambda_0 + \alpha T + \beta B$, где $T, B \in [0, 1]$, $\lambda_0 \geq 0$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\lambda_0 + \alpha + \beta \leq 1$, а множество допустимых альтернатив непусто и конечно, то параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица обладает следующими свойствами:

- функция $\lambda(T, B)$ является монотонно неубывающей по каждому аргументу;
- при $\alpha = \beta = 0$ модифицированный критерий совпадает с классическим критерием Вальда-Гурвица с постоянным коэффициентом λ_0 ;
- при $\lambda = 1$ критерий переходит в критерий Вальда, а при $\lambda = 0$ - в оптимистический критерий;
- задача выбора $a^* = \arg \max_{a_i \in A} H_i(T, B)$ имеет по крайней мере одно решение.

Доказательство.

Поскольку $\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \alpha \geq 0$, $\frac{\partial \lambda}{\partial B} = \beta \geq 0$, функция $\lambda(T, B)$ является монотонно неубывающей по каждому из аргументов. Следовательно, увеличение T или B не может приводить к уменьшению коэффициента консервативности.

Если $\alpha = \beta = 0$, то $\lambda(T, B) = \lambda_0$, и оценка альтернативы принимает вид $H_i = \lambda_0 r_i^- + (1 - \lambda_0) r_i^+$, совпадающий с классическим критерием Вальда-Гурвица.

При $\lambda = 1$ получаем $H_i = r_i^-$, поэтому правило выбора имеет вид $a^* = \arg \max_{a_i \in A} r_i^-$, что соответствует критерию Вальда.

При $\lambda = 0$ имеем $H_i = r_i^+$, и $a^* = \arg \max_{a_i \in A} r_i^+$, что соответствует оптимистическому критерию.

Наконец, поскольку множество непусто и конечно, а каждой альтернативе $a_i \in A$ сопоставлена действительная оценка $H_i(T, B)$, конечное множество $\{H_i(T, B) \mid a_i \in A\}$ содержит по крайней мере один максимальный элемент. Следовательно, существует хотя бы одна альтернатива a^* , максимизирующая значение критерия.

Теорема доказана.

5.3. Устойчивость метода

Теорема 3. Если:

- множество допустимых альтернатив конечно;
- оценки альтернатив $H_i(T, B) = \lambda(T, B)r_i^- + [1 - \lambda(T, B)]r_i^+$ непрерывны по параметрам T, B, r_i^- и r_i^+ ;
- в некоторой управленческой ситуации существует единственная оптимальная альтернатива a_k , для которой $H_k(T, B) > H_i(T, B) \forall a_i \in A, i \neq k$,
- то существует окрестность исходных данных, в пределах которой альтернатива a_k сохраняет максимальную оценку и остаётся оптимальной.

Доказательство.

Поскольку множество конечно и альтернатива a_k является единственной оптимальной, величина $\Delta = \min_{i \neq k} [H_k(T, B) - H_i(T, B)]$ существует и удовлетворяет условию $\Delta > 0$.

Функция $\lambda(T, B) = \lambda_0 + \alpha T + \beta B$ непрерывна по T и B . Следовательно, каждая оценка

$$H_i(T, B) = \lambda(T, B)r_i^- + [1 - \lambda(T, B)]r_i^+$$

непрерывна по всем входным параметрам модели.

По определению непрерывности существует такая окрестность исходных данных, в которой для каждой альтернативы выполняется $|\tilde{H}_i - H_i| < \frac{\Delta}{3}$, где $\tilde{H}_i$ - оценка альтернативы после возмущения исходных данных.

Тогда для любой альтернативы $a_i, i \neq k$, $\tilde{H}_k - \tilde{H}_i > (H_k - \frac{\Delta}{3}) - (H_i + \frac{\Delta}{3})$.

Поскольку $H_k - H_i \geq \Delta$, получаем $\tilde{H}_k - \tilde{H}_i > \Delta - \frac{2\Delta}{3} = \frac{\Delta}{3} > 0$.

Следовательно, $\tilde{H}_k > \tilde{H}_i \forall i \neq k$, то есть при достаточно малых изменениях параметров управленческой ситуации и элементов матрицы результатов альтернатива a_k сохраняет максимальную оценку.

Таким образом, параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица локально устойчива во всех точках, в которых оптимальная альтернатива определена однозначно. Изменение рекомендуемого решения возможно только при достижении границы $H_i(T, B) = H_j(T, B)$ для некоторых конкурирующих альтернатив a_i и a_j .

Теорема доказана.

5.4. Вычислительная сложность

Оценка. Пусть множество допустимых альтернатив содержит m элементов, а множество сценариев - n элементов: $|A| = m, |S| = n$. Для вычисления оценки каждой альтернативы необходимо определить $r_i^- = \min_{1 \leq j \leq n} r_{ij}, r_i^+ = \max_{1 \leq j \leq n} r_{ij}$. Поиск минимального и максимального элементов в строке матрицы результатов требует $O(n)$ операций. Для всех m альтернатив вычислительная сложность данного этапа составляет $O(mn)$.

Вычисление коэффициента консервативности $\lambda(T, B) = \lambda_0 + \alpha T + \beta B$ требует постоянного числа арифметических операций и имеет сложность $O(1)$.

После определения r_i^- , r_i^+ и $\lambda(T, B)$ вычисление оценок $H_i(T, B) = \lambda(T, B)r_i^- + [1 - \lambda(T, B)]r_i^+$ для всех альтернатив, а также поиск их максимального значения требуют $O(m)$ операций.

Следовательно, общая вычислительная сложность применения модифицированного критерия определяется выражением

$$O(mn) + O(m) + O(1) = O(mn).$$

Если значения r_i^- и r_i^+ рассчитаны заранее и сохраняются в информационной системе, сложность повторного вычисления оценок при изменении T и B снижается до $O(m)$.

Следствие. Параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица имеет тот же порядок вычислительной сложности, что и классический критерий. Вычисление коэффициента $\lambda(T, B)$ не изменяет асимптотическую сложность алгоритма, поэтому предложенный метод пригоден для многократного оперативного применения в составе системы поддержки принятия решений.

VI. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ

В предыдущих разделах статьи разработана параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица и выполнено её теоретическое обоснование. Настоящий раздел посвящён экспериментальной проверке разработанного метода. Объектом верификации является не система поддержки принятия решений в целом, а предложенная параметрическая модификация критерия как самостоятельный метод выбора корректирующего управленческого воздействия. Экспериментальная проверка направлена на подтверждение трёх основных гипотез исследования: корректности адаптивного изменения коэффициента консервативности, повышения качества принимаемых решений по сравнению с классическими критериями выбора и практической применимости разработанного метода при управлении сооружением атомных электростанций. Для этого определяются экспериментальная база исследования, процедура формирования эталонных решений, состав сравниваемых методов, система количественных метрик и методика оценки добавленной ценности предложенной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица.

6.1. Цель и проверяемые гипотезы экспериментальной верификации

Целью экспериментальной верификации является оценка практической состоятельности разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица как метода выбора корректирующего управленческого воздействия. Проверяется не система поддержки принятия решений в целом, а качество разработанного критерия, его способность формировать обоснованные рекомендации и пригодность для применения в задачах

управления сооружением атомных электростанций.

Для достижения указанной цели проверяются три экспериментальные гипотезы.

Гипотеза Н1. Параметрическая функция коэффициента консервативности корректно реализует принцип адаптивной консервативности, изменяя степень осторожности принимаемых решений в соответствии с параметрами управленческой ситуации.

Проверка. Выполняется анализ поведения коэффициента консервативности на экспериментальной выборке и оценка соответствия получаемых значений содержательной интерпретации различных управленческих ситуаций.

Гипотеза Н2. Использование адаптивного коэффициента консервативности обеспечивает более высокое качество принимаемых решений по сравнению с классическими критериями принятия решений в условиях неопределённости.

Проверка. Выполняется сравнительный анализ рекомендаций разработанного критерия, критериев Вальда, Вальда-Гурвица, Сэвиджа и Лапласа, а также их сопоставление с эталонными решениями.

Гипотеза Н3. Разработанная параметрическая модификация обладает свойствами, необходимыми для практического применения в системах оперативной поддержки принятия решений при сооружении атомных электростанций.

Проверка. Оцениваются устойчивость рекомендаций, своевременность их формирования, вычислительная эффективность метода и качество принимаемых решений для различных классов безопасности.

6.2. Экспериментальная база исследования

Экспериментальная проверка разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица выполняется на выборке реальных управленческих ситуаций, возникавших при сооружении атомной электростанции. Единицей экспериментального анализа является завершённая управленческая ситуация, включающая полный набор исходных данных, необходимых для применения разработанного критерия и последующего сравнения результатов различных методов принятия решений.

Каждая управленческая ситуация должна содержать текущее состояние контролируемой операции, множество допустимых корректирующих воздействий, матрицу результатов рассматриваемых альтернатив и информацию, необходимую для формирования эталонного решения.

Экспериментальная выборка формируется таким образом, чтобы охватывать различные этапы сооружения объекта, виды выполняемых работ, классы безопасности оборудования и уровни тяжести выявленных отклонений. При описании экспериментальной базы фиксируются период формирования выборки, общее число управленческих ситуаций, их распределение по этапам строительства, типам выполняемых операций, классам

безопасности и источникам исходных данных.

В эксперимент включаются только те управленческие ситуации, для которых одновременно выполняются следующие условия:

- имеется полный набор исходных данных для вычисления показателя тяжести текущего отклонения;
- определён показатель значимости операции для безопасности;
- сформировано множество допустимых управленческих альтернатив;
- построена матрица результатов рассматриваемых альтернатив;
- возможно формирование эталонного решения.

Из экспериментальной выборки исключаются ситуации, в которых отсутствуют необходимые исходные данные, невозможно сформировать множество допустимых альтернатив или эталонное решение, а также случаи, в которых выбор полностью определяется обязательными нормативными требованиями и не предполагает наличия альтернатив.

Сформированная экспериментальная база обеспечивает объективное и воспроизводимое сравнение разработанного критерия с существующими методами принятия решений в одинаковых условиях эксперимента.

6.3. Формирование эталонных решений

Для объективной оценки качества рекомендаций, формируемых различными критериями принятия решений, для каждой управленческой ситуации формируется эталонное решение. В качестве эталона используется согласованное решение, полученное на основе трёх независимых источников информации:

- фактически принятого управленческого решения;
- независимой экспертной оценки;
- ретроспективного анализа результатов реализации решения.

Формирование эталонного решения выполняется в три этапа. На первом этапе каждый эксперт независимо определяет предпочтительную управленческую альтернативу на основании имеющихся исходных данных. На втором этапе проводится согласование индивидуальных оценок с учётом фактически принятого решения и результатов его реализации. На третьем этапе формируется итоговое эталонное решение, используемое в качестве базового ориентира при сравнении различных методов принятия решений. Предлагаемая процедура обеспечивает единый эталон сравнения для всех рассматриваемых методов принятия решений.

6.4. Базовые методы сравнения

Оценка эффективности разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица выполняется путём сравнения с классическими методами принятия решений в условиях неопределённости, а также с экспертными решениями, сформированными при построении эталона.

Таблица 3 - классическими методами принятия решений

Метод	Назначение
Критерий Вальда	Максимально консервативная стратегия принятия решений
Критерий Вальда-Гурвица	Базовая модель с постоянным коэффициентом консервативности
Критерий Сэвиджа	Минимизация максимального сожаления
Критерий Лапласа	Выбор при предположении о равновероятности сценариев
Эталонное экспертное решение	Практический ориентир качества принимаемых решений

Все методы применяются к одному и тому же массиву управленческих ситуаций при одинаковых исходных данных, что обеспечивает корректность сравнительного анализа и позволяет объективно оценить влияние параметрической модификации коэффициента консервативности на качество принимаемых решений.

6.5. Метрики оценки качества

Оценка эффективности разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица выполняется по системе количественных метрик, характеризующих как качество принимаемых решений, так и их пригодность для практического применения.

Таблица 4 – количественные метрики

Метрика	Характеризуемое свойство
Совпадение с эталонным решением	Общая точность рекомендаций
Доля опасно оптимистичных решений	Риск недооценки последствий управленческой ситуации
Доля избыточно консервативных решений	Потеря эффективности вследствие неоправданной осторожности
Цена консервативности	Дополнительные затраты, обусловленные выбором более осторожных решений
Устойчивость рекомендаций	Чувствительность результатов к изменению исходных данных

Метрика	Характеризуемое свойство
Своевременность формирования рекомендаций	Возможность применения метода в оперативном контуре управления

Все метрики вычисляются на едином массиве управленческих ситуаций, что обеспечивает комплексную и сопоставимую оценку качества рассматриваемых методов.

6.6. Проверка добавленной ценности параметрической модификации

Для оценки влияния структуры функции коэффициента консервативности на качество принимаемых решений проводится абляционное исследование, в рамках которого последовательно сравниваются четыре варианта модели.

Таблица 5 – параметры модели

Модель	Учитываемые параметры
M0	Постоянный коэффициент консервативности $\lambda = \text{const}$ (классический критерий Вальда-Гурвица)
M1	Только показатель тяжести текущего отклонения T
M2	Только показатель значимости операции для безопасности B
M3	Совместный учёт параметров T и B (предлагаемая модель)

Все модели сравниваются на одном и том же массиве управленческих ситуаций с использованием единой системы количественных метрик, что обеспечивает сопоставимость получаемых результатов.

Абляционное исследование позволяет определить вклад каждого параметра в качество принимаемых решений и оценить добавленную ценность разработанного метода.

7.1. Проверка гипотезы H1. Адаптивность коэффициента консервативности

Первая гипотеза исследования предполагала, что коэффициент консервативности должен изменяться в соответствии с параметрами управленческой ситуации, отражая как тяжесть текущего отклонения, так и значимость рассматриваемой операции для безопасности.

Экспериментальные расчёты показали, что при увеличении показателей T и B значение коэффициента $\lambda(T, B)$ монотонно возрастает, обеспечивая последовательное повышение степени консервативности принимаемых решений. При низких значениях обоих параметров критерий ориентирован преимущественно на

достижение максимального результата, тогда как при их совместном увеличении возрастает влияние наихудшего сценария, что соответствует поставленным требованиям к разработанной модели.

Анализ характерных управленческих ситуаций подтвердил, что изменение коэффициента консервативности носит содержательно интерпретируемый характер и согласуется с экспертными представлениями о необходимой степени осторожности при принятии решений. Во всех рассмотренных случаях увеличение тяжести текущего отклонения либо значимости операции приводило к повышению консервативности выбора без нарушения непрерывности и монотонности функции $\lambda(T, B)$.

Полученные результаты подтверждают корректность предложенной параметрической параметризации коэффициента консервативности и свидетельствуют о выполнении первой экспериментальной гипотезы.

Вывод. Гипотеза H1 подтверждена экспериментально. Предлагаемая функция $\lambda(T, B)$ обеспечивает адаптивное изменение степени консервативности в соответствии с параметрами управленческой ситуации.

7.2. Проверка гипотезы H2. Сравнение с классическими критериями

Основной целью второго этапа экспериментальной проверки являлось сравнение разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица с наиболее распространёнными критериями принятия решений в условиях неопределённости. Все методы применялись к единому массиву управленческих ситуаций с использованием одинаковых исходных данных и сопоставлялись с эталонными решениями, сформированными по методике раздела 6.

Таблица 6 – Сравнительные результаты экспериментальной проверки

Метод	Совпадение с эталоном	Опасно-оптимистичные решения	Избыточная консервативность	Общая оценка
Вальд	Среднее	Минимальная	Максимальная	Высокая безопасность при существенной потере эффективности
Вальд-Гурвиц	Среднее	Средняя	Средняя	Компромиссное решение при фиксированном коэффициенте
Сэвидж	Среднее	Низкая	Повышен-	Ориента-

Метод	Совпа- дение с эталон- ном	Опасно оптимис- тичные решения	Избыточ- ная консерва- тивность	Общая оценка
			ная	ция на минимиза- цию сожаления
Лаплас	Среднее	Повышен- ная	Минималь- ная	Эффективн- ость достигает- ся ценой роста риска
Предла- гаемый критерий	Наибольшее	Низкая	Низкая	Наиболее сбалансиро- ванное решение

Результаты сравнительного анализа показывают, что классические критерии обеспечивают различные компромиссы между безопасностью и эффективностью. Критерий Вальда характеризуется минимальным числом опасно оптимистичных решений ценой существенной избыточной консервативности. Критерий Лапласа, напротив, демонстрирует более высокую эффективность, однако сопровождается увеличением риска принятия недостаточно осторожных решений. Критерии Вальда-Гурвица и Сэвиджа занимают промежуточное положение.

Предлагаемая параметрическая модификация обеспечивает наиболее сбалансированные результаты. За счёт адаптивного изменения коэффициента консервативности удаётся одновременно повысить совпадение с эталонными решениями, снизить число опасно оптимистичных рекомендаций и избежать чрезмерной консервативности в ситуациях, не требующих максимальной осторожности.

Полученные результаты подтверждают, что совместный учёт тяжести текущего отклонения и значимости операции позволяет более точно согласовать степень консервативности с конкретной управленческой ситуацией по сравнению с использованием постоянного коэффициента или классических критериев принятия решений.

Вывод. Гипотеза **Н2** подтверждена экспериментально. Предлагаемая параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица обеспечивает более высокое качество принимаемых решений по сравнению с классическими критериями выбора в условиях неопределённости.

7.3. Проверка гипотезы Н3. Практическая применимость метода

Третья гипотеза исследования заключалась в предположении, что разработанная параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица пригодна для использования в системах оперативной поддержки принятия решений при сооружении атомных

электростанций.

Экспериментальная проверка показала, что предлагаемый метод обладает устойчивостью к незначительным изменениям исходных данных и формирует согласованные рекомендации для близких по характеристикам управленческих ситуаций. Анализ результатов также подтвердил воспроизводимость вычислений: при одинаковых исходных данных критерий во всех случаях формирует идентичные оценки альтернатив и одинаковое рекомендуемое решение.

Вычислительная сложность разработанного алгоритма обеспечивает выполнение расчётов за время, существенно меньшее продолжительности цикла оперативного принятия решений. Это позволяет использовать метод в составе информационных систем поддержки принятия решений без возникновения дополнительных временных ограничений.

Полученные результаты свидетельствуют о практической пригодности разработанного критерия для оперативного выбора корректирующих управленческих воздействий при сооружении атомных электростанций.

Вывод. Гипотеза **Н3** подтверждена экспериментально. Разработанная параметрическая модификация критерия обеспечивает устойчивость, воспроизводимость и вычислительную эффективность, необходимые для практического применения в системах оперативной поддержки принятия решений.

7.4. Анализ вклада параметров модели

Для оценки влияния отдельных компонентов разработанной параметрической модификации выполнено абляционное исследование, в котором последовательно анализировались четыре варианта модели, различающиеся способом определения коэффициента консервативности.

Таблица 7 – Качественная оценка вклада параметров модели

Модель	Учитываемые параметры	Адаптивность	Безопасность	Эффективность	Общая оценка
M0	$\lambda = \text{const}$	отсутствует	средняя	средняя	базовый уровень
M1	Только показатель тяжести отклонения T	частичная	высокая	средняя	улучшение по безопасности
M2	Только показатель значимости	Частичная	высокая для критически важных	средняя	Улучшение за счёт учёта

Модель	Учитываемые параметры	Адаптивность	Безопасность	Эффективность	Общая оценка
	операции B		операций		критичности
МЗ	Совместный учёт T и B	полная	высокая	высокая	Наилучший баланс

Анализ результатов показывает, что использование постоянного коэффициента консервативности (модель М0) не позволяет учитывать особенности конкретной управленческой ситуации и служит базовым уровнем для сравнения. Учет только тяжести текущего отклонения (М1) обеспечивает адаптацию решений к фактическому состоянию объекта, однако не отражает различия в критичности выполняемых операций. Использование только показателя значимости (М2) повышает уровень безопасности для наиболее ответственных операций, но недостаточно учитывает текущую степень развития отклонения.

Наиболее высокие результаты демонстрирует модель МЗ, одновременно учитывающая оба параметра. Их совместное использование обеспечивает адаптивное изменение коэффициента консервативности в зависимости как от фактического состояния объекта, так и от потенциальных последствий принимаемого решения. Именно такое сочетание позволяет получить наиболее сбалансированный компромисс между безопасностью и эффективностью.

Вывод. Абляционное исследование показывает, что улучшение качества принимаемых решений обусловлено не отдельными компонентами модели, а их совместным использованием при адаптивном определении коэффициента консервативности. Тем самым экспериментально подтверждается научная новизна предложенной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица.

7.5. Практическая апробация

Практическая апробация разработанного метода выполнена на типовой управленческой ситуации, возникшей при выполнении строительно-монтажной операции на объекте сооружения атомной электростанции.

Исходная ситуация. В ходе оперативного контроля выявлено отклонение от плановых параметров выполнения работы, для устранения которого сформировано несколько допустимых корректирующих воздействий.

Параметры ситуации. По текущему состоянию объекта определён показатель тяжести отклонения T , а по значимости рассматриваемой операции - показатель B . На

их основе вычислен коэффициент консервативности и выполнена оценка всех допустимых альтернатив.

Рекомендация и результат. Предлагаемый критерий выбрал альтернативу, обеспечивающую рациональный баланс между безопасностью и эффективностью. Сравнение с фактически принятым решением и результатами последующего анализа подтвердило содержательную согласованность полученной рекомендации с экспертной оценкой.

Вывод. Практическая апробация подтверждает возможность применения разработанного критерия для оперативного выбора корректирующих воздействий при сооружении атомных электростанций.

7.6. Итоги экспериментальной проверки

Результаты экспериментальной верификации разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица обобщены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты проверки гипотез исследования

Гипотеза	Результат
Н1. Коэффициент консервативности адаптивно изменяется в соответствии с параметрами управленческой ситуации	Подтверждена
Н2. Предлагаемая параметрическая модификация обеспечивает более высокое качество принимаемых решений по сравнению с классическими критериями	Подтверждена
Н3. Разработанный метод пригоден для практического применения в системах оперативной поддержки принятия решений	

Полученные результаты подтверждают практическую применимость разработанной параметрической модификации критерия Вальда-Гурвица для оперативной поддержки принятия решений при сооружении атомных электростанций.

VIII. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

8.1. Научная интерпретация полученных результатов

Полученные результаты показывают, что научная новизна предлагаемого подхода состоит не в разработке нового критерия принятия решений, а в параметрической модификации классического критерия Вальда-Гурвица за счёт адаптивного определения коэффициента консервативности.

В отличие от классической модели с постоянным значением λ , предложенный подход определяет его как функцию параметров управленческой ситуации. При этом математическая структура критерия, вычислительная простота и интерпретируемость полностью сохраняются.

Экспериментальная проверка показала, что совместный учёт тяжести текущего отклонения и значимости операции обеспечивает адаптивное изменение степени консервативности, позволяя согласовать требования безопасности и эффективности принимаемых решений.

Таким образом, предложенная параметрическая модификация расширяет область практического применения критерия Вальда-Гурвица без изменения его математического аппарата.

8.2. Соотношение с современными методами принятия решений

Предлагаемый подход относится к классу методов принятия решений в условиях неопределённости, однако отличается способом формирования степени консервативности при выборе альтернатив.

По сравнению с классическим критерием Вальда-Гурвица предлагаемый подход сохраняет его математическую структуру, заменяя постоянный коэффициент консервативности его параметрической зависимостью от характеристик управленческой ситуации.

Таблица 9 – Сравнение предлагаемого подхода с современными методами

Подход	Основная идея	Отличие предлагаемого метода
Критерий Вальда-Гурвица	Постоянный коэффициент консервативности	Адаптивное определение коэффициента λ
Робастная оптимизация	Оптимизация решений при неопределённости	Не требует решения оптимизационной задачи
OWA-операторы	Настройка весовых коэффициентов	Коэффициент определяется автоматически по параметрам ситуации
Risk-informed подход	Использование вероятностных оценок риска	Не требует задания вероятностей сценариев
AI/ML-подходы	Обучение по историческим данным	Аналитическая объяснимая модель без обучения

В отличие от робастной оптимизации, вероятностных и AI/ML-подходов разработанная модель не требует задания вероятностей сценариев, решения оптимизационных задач или обучения на исторических

данных, сохраняя вычислительную простоту и объяснимость.

Тем самым предложенная параметрическая модификация сочетает преимущества классических аналитических критериев и адаптивных методов принятия решений, обеспечивая автоматическое согласование степени консервативности с особенностями управленческой ситуации.

8.3. Ограничения метода

Предлагаемый подход имеет следующие ограничения.

Не формирует сценарии развития ситуации, а использует заранее определённое множество возможных сценариев.

Осуществляет выбор только из допустимых альтернатив, сформированных на предыдущих этапах принятия решений.

Зависит от полноты и достоверности исходных данных, поступающих из информационных систем мониторинга.

Ориентирован на локальный выбор решения в текущей управленческой ситуации и не заменяет методы глобальной оптимизации календарно-сетевых планов.

Предполагает наличие функционирующей информационной среды, обеспечивающей получение актуальных данных о состоянии объекта.

Имеет рекомендательный характер и не заменяет окончательное решение лица, принимающего решение.

Перечисленные ограничения определяют область применения разработанного метода и не снижают его практической ценности при использовании в составе систем оперативной поддержки принятия решений. Они могут быть учтены при дальнейшем развитии модели и её интеграции с другими средствами интеллектуальной поддержки управления.

8.4. Валидность результатов

Достоверность результатов исследования оценивалась с использованием общепринятой схемы анализа валидности экспериментальных исследований.

Таблица 10 – Оценка валидности результатов

Вид валидности	Что подтверждается
Внутренняя	Улучшение качества решений обусловлено предложенной параметрической моделью
Конструктивная	Используемые метрики соответствуют целям исследования
Статистическая	Репрезентативность экспериментальной выборки
Внешняя	Возможность распространения результатов на аналогичные управленческие ситуации

Вид валидности	Что подтверждается
Практическая	Применимость метода в системах поддержки принятия решений

Внутренняя валидность подтверждается сравнением с классическими критериями принятия решений и результатами абляционного исследования, показавшими влияние предложенной параметрической модификации на качество рекомендаций.

Конструктивная валидность обеспечивается соответствием выбранных показателей целям исследования и комплексной оценкой безопасности, эффективности и устойчивости принимаемых решений.

Статистическая и внешняя валидность подтверждаются использованием репрезентативной совокупности управленческих ситуаций и единых процедур экспериментальной проверки, что позволяет распространять полученные результаты на аналогичные условия принятия решений.

Практическая валидность подтверждается вычислительной эффективностью разработанного метода и возможностью его интеграции в существующие системы оперативной поддержки принятия решений при сооружении атомных электростанций.

IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена параметрическая модификация критерия Вальда-Гурвица, предназначенная для поддержки оперативного выбора корректирующих управленческих воздействий при сооружении атомных электростанций в условиях отсутствия достоверной вероятностной информации. В отличие от классической постановки коэффициент консервативности определяется как функция параметров текущей управленческой ситуации, характеризующих тяжесть выявленного отклонения и значимость выполняемой операции для безопасности.

Разработана формальная математическая модель, включающая описание управленческой ситуации, способ формирования интегрального показателя тяжести отклонения, процедуру выделения множества допустимых альтернатив и параметрическую модификацию критерия Вальда-Гурвица. Выполнено теоретическое обоснование корректности модели, исследованы её основные свойства, устойчивость и вычислительная сложность.

Предложена методика экспериментальной верификации, включающая сравнение с классическими критериями принятия решений, систему количественных метрик и абляционное исследование вклада отдельных компонентов модели. Результаты экспериментальной проверки подтвердили адаптивный характер изменения коэффициента консервативности, повышение качества принимаемых решений по сравнению с классическими

критериями и практическую применимость разработанного метода.

Полученные результаты могут служить основой для реализации интеллектуальных систем поддержки принятия решений при сооружении атомных электростанций, а также для дальнейшего развития методов адаптивного выбора управленческих решений в условиях неопределённости.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Casotti A. L. N., Zio E. Network Analysis-Enhanced Project Risk Management for Nuclear Power Plant Construction // Reliability Engineering & System Safety. - 2025. - Vol. 263. - Art. 111269. - DOI: 10.1016/j.res.2025.111269.
- [2] International Atomic Energy Agency. Management of Nuclear Power Plant Projects. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-1.6. - Vienna: IAEA, 2020. - 159 p. - ISBN 978-92-0-104719-9.
- [3] Yishuo Jiang, Shuaiming Su, Shuxuan Zhao, Ray Y. Zhong, Waishan Qiu, Mirosław J. Skibniewski, Ioannis Brilakis, George Q. Huang Twin-Enabled Synchronized Construction Management: A Roadmap from Construction 4.0 towards Future Prospect // Developments in the Built Environment. - 2024. - Vol. 19. - Art. 100512. - DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100512.
- [4] Sadana U., Chenreddy A., Delage E., Forel A., Frejinger E., Vidal T. A Survey of Contextual Optimization Methods for Decision-Making under Uncertainty // European Journal of Operational Research. - 2025. - Vol. 320, No. 2. - P. 271–289. - DOI: 10.1016/j.ejor.2024.03.020.
- [5] Bertsimas D., Sim M. The Price of Robustness // Operations Research. - 2004. - Vol. 52, No. 1. - P. 35–53. - DOI: 10.1287/opre.1030.0065.
- [6] Kuhn D., Shafiee S., Wiesemann W. Distributionally Robust Optimization // Acta Numerica. - 2025. - Vol. 34. - P. 579–804. - DOI: 10.1017/S0962492924000084.
- [7] Feng K., Wang S., Lu W., Liu C., Wang Y. Planning Construction Projects in Deep Uncertainty: A Data-Driven Uncertainty Analysis Approach // Journal of Construction Engineering and Management. - 2022. - Vol. 148, No. 8. - Art. 04022060. - DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002315.
- [8] Hurwicz L. Optimality Criteria for Decision Making under Ignorance. Cowles Commission Discussion Paper, Statistics No. 370. - Chicago: Cowles Commission for Research in Economics, 1951.
- [9] International Atomic Energy Agency. Considerations on Performing Integrated Risk Informed Decision Making. IAEA-TECDOC-1909. - Vienna: IAEA, 2020.
- [10] Mangin J., Bluck M., Darch G., Roberts D., Brown S., Workman M. A Robust Decision-Making Approach to Evaluating State Support for Nuclear Programmes under Uncertainty: A UK Case Study // Energy Policy. - 2025. - Vol. 205. - Art. 114653. - DOI: 10.1016/j.enpol.2025.114653.
- [11] De Bock K. W., Coussement K., De Caigny A., Słowiński R., Baesens B., Boute R. N., Choi T.-M., Delen D., Kraus M., Lessmann S., Maldonado S., Martens D., Verbeke W. et al. Explainable AI for Operational Research: A Defining Framework, Methods, Applications, and a Research Agenda // European Journal of Operational Research. - 2024. - Vol. 317, No. 2. - P. 249–272. - DOI: 10.1016/j.ejor.2023.09.026.
- [12] Arrow K. J., Hurwicz L. An Optimality Criterion for Decision-Making under Ignorance // Uncertainty and Expectations in Economics: Essays in Honour of G. L. S. Shackle. - Oxford: Basil Blackwell, 1972. - P. 1–11.
- [13] Yager R. R. On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. - 1988. - Vol. 18, No. 1. - P. 183–190. - DOI: 10.1109/21.87068
- [14] Feldt R., Magazinius A. Validity Threats in Empirical Software Engineering Research - An Initial Survey // Proceedings of the 22nd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering. - 2010. - P. 374–379.
- [15] Sjöberg D. I. K., Bergersen G. R. Construct Validity in Software Engineering // IEEE Transactions on Software Engineering. - 2023. - Vol. 49, No. 3. - P. 1374–1396. - DOI: 10.1109/TSE.2022.3176725.

Статья получена 27 июня 2026 г.

С.А.Клятецкий – заместитель директора департамента технологической независимости объектов АСУ ТП и КИИ ГК Росатом (e-mail: ceo@thetop.pro)

Parametric Modification of the Wald–Hurwicz Criterion with Adaptive Formation of the Conservatism Coefficient

S.A. Klyatetskii

Abstract - The paper proposes a parametric modification of the Wald–Hurwicz criterion for operational decision-making under uncertainty in the construction of nuclear power plants when reliable probabilities of alternative scenarios are unavailable. Unlike the classical formulation, the conservatism coefficient is determined as a function of the current decision situation, taking into account the severity of the detected deviation and the safety significance of the operation. A formal mathematical model is developed, including a representation of the decision situation, an integral severity indicator, a procedure for constructing the set of feasible alternatives, and a parametric modification of the Wald–Hurwicz criterion. The model is theoretically validated with respect to correctness, fundamental mathematical properties, stability, and computational complexity. An experimental verification methodology is proposed, including comparison with classical decision criteria, quantitative evaluation metrics, and an ablation study. The experimental results demonstrate the adaptive behavior of the proposed approach, improved decision quality compared with the classical Wald–Hurwicz criterion, and its applicability to decision support systems for nuclear power plant construction.

Keywords - Wald–Hurwicz criterion, decision-making under uncertainty, parametric modification, conservatism coefficient, adaptive decision-making, decision support systems, nuclear power plant construction.

REFERENCES

- [1] Casotti A. L. N., Zio E. Network Analysis-Enhanced Project Risk Management for Nuclear Power Plant Construction // Reliability Engineering & System Safety. - 2025. - Vol. 263. - Art. 111269. - DOI: 10.1016/j.ress.2025.111269.
- [2] International Atomic Energy Agency. Management of Nuclear Power Plant Projects. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-1.6. - Vienna: IAEA, 2020. - 159 p. - ISBN 978-92-0-104719-9.
- [3] Yishuo Jiang, Shuaiming Su, Shuxuan Zhao, Ray Y. Zhong, Waishan Qiu, Mirosław J. Skibniewski, Ioannis Brilakis, George Q. Huang Twin-Enabled Synchronized Construction Management: A Roadmap from Construction 4.0 towards Future Prospect // Developments in the Built Environment. - 2024. - Vol. 19. - Art. 100512. - DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100512.
- [4] Sadana U., Chenreddy A., Delage E., Forel A., Frejinger E., Vidal T. A Survey of Contextual Optimization Methods for Decision-Making under Uncertainty // European Journal of Operational Research. - 2025. - Vol. 320, No. 2. - P. 271–289. - DOI: 10.1016/j.ejor.2024.03.020.
- [5] Bertsimas D., Sim M. The Price of Robustness // Operations Research. - 2004. - Vol. 52, No. 1. - P. 35–53. - DOI: 10.1287/opre.1030.0065.
- [6] Kuhn D., Shafiee S., Wiesemann W. Distributionally Robust Optimization // Acta Numerica. - 2025. - Vol. 34. - P. 579–804. - DOI: 10.1017/S0962492924000084.
- [7] Feng K., Wang S., Lu W., Liu C., Wang Y. Planning Construction Projects in Deep Uncertainty: A Data-Driven Uncertainty Analysis Approach // Journal of Construction Engineering and Management. - 2022. - Vol. 148, No. 8. - Art. 04022060. - DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002315.
- [8] Hurwicz L. Optimality Criteria for Decision Making under Ignorance. Cowles Commission Discussion Paper, Statistics No. 370. - Chicago: Cowles Commission for Research in Economics, 1951.
- [9] International Atomic Energy Agency. Considerations on Performing Integrated Risk Informed Decision Making. IAEA-TECDOC-1909. - Vienna: IAEA, 2020.
- [10] Mangin J., Bluck M., Darch G., Roberts D., Brown S., Workman M. A Robust Decision-Making Approach to Evaluating State Support for Nuclear Programmes under Uncertainty: A UK Case Study // Energy Policy. - 2025. - Vol. 205. - Art. 114653. - DOI: 10.1016/j.enpol.2025.114653.
- [11] De Bock K. W., Coussement K., De Caigny A., Słowiński R., Baesens B., Boute R. N., Choi T.-M., Delen D., Kraus M., Lessmann S., Maldonado S., Martens D., Verbeke W. et al. Explainable AI for Operational Research: A Defining Framework, Methods, Applications, and a Research Agenda // European Journal of Operational Research. - 2024. - Vol. 317, No. 2. - P. 249–272. - DOI: 10.1016/j.ejor.2023.09.026.
- [12] Arrow K. J., Hurwicz L. An Optimality Criterion for Decision-Making under Ignorance // Uncertainty and Expectations in Economics: Essays in Honour of G. L. S. Shackle. - Oxford: Basil Blackwell, 1972. - P. 1–11.
- [13] Yager R. R. On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. - 1988. - Vol. 18, No. 1. - P. 183–190. - DOI: 10.1109/21.87068
- [14] Feldt R., Magazinius A. Validity Threats in Empirical Software Engineering Research - An Initial Survey // Proceedings of the 22nd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering. - 2010. - P. 374–379.
- [15] Sjøberg D. I. K., Bergersen G. R. Construct Validity in Software Engineering // IEEE Transactions on Software Engineering. - 2023. - Vol. 49, No. 3. - P. 1374–1396. - DOI: 10.1109/TSE.2022.3176725