

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу **Азанова Валентина Михайловича** «Алгоритмы динамического программирования решения задач оптимального управления дискретной стохастической системой с терминальным вероятностным критерием», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)».

Ряд прикладных задач управления движущимися объектами (в том числе летательными аппаратами) с учетом неконтролируемых факторов допускают математическое представление в форме задачи оптимального управления стохастической дискретной системой с вероятностным критерием. Для решения последней известно небольшое число методов, среди которых фундаментальным является метод динамического программирования. Применение последнего порождает трудности, связанные с анализом рекуррентного соотношения Беллмана. В диссертации рассматривается развитие метода динамического программирования для решения задач стохастического оптимального управления дискретными системами с вероятностным критерием и разработка на этой основе новых алгоритмов оптимальной коррекции траектории летательных аппаратов.

**Основные научные результаты** работы заключаются в следующем:

1. Предложено модифицированное соотношение метода динамического программирования и выражения для оптимального управления для состояний, принадлежащих поверхностям уровня 1 и 0 функции Беллмана.
2. Найдены двусторонние оценки функции Беллмана и функции правой части уравнения метода динамического программирования.
3. Найдено решение задач оптимизации импульсной коррекции с вероятностным критерием для однопараметрической и двухпараметрической постановок.
4. Получены решения ряда модельных задач оптимального управления с вероятностным критерием.

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми, имеют теоретическое и прикладное значение. Работа соответствует паспорту специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)» как по направлению исследований, так и по содержанию.



**Достоверность** научных результатов обеспечена строгим математическим обоснованием предлагаемых подходов. **Практическая значимость** работы определяется решением задач оптимизации импульсной коррекции траектории движения искусственного спутника Земли в окрестности геостационарной орбиты в однопараметрической и двухпараметрической постановках. **Теоретическая значимость** заключается в развитии метода динамического программирования для задач оптимального управления дискретными стохастическими системами с вероятностным критерием, выявления качественных свойств функции правой части соотношений динамического программирования, функции Беллмана и функции оптимального значения вероятностного критерия.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы.

Введение диссертации содержит качественный обзор литературы. Автор проделал большую работу по систематизации результатов исследования задач стохастического оптимального управления системами с вероятностным критерием, сделав упор на обзор решения задач управления марковскими дискретными стохастическими системами с вероятностным терминальным критерием и их приложениям в аэрокосмических системах и капиталовложения с учетом риска, что соответствует поставленной цели и задачам. Также во введении определены цели и задачи диссертационного исследования, приведено краткое содержание работы.

В первой главе рассмотрена задача оптимального управления дискретной стохастической системой с вероятностным терминальным критерием общего вида. Приведены достаточные условия существования оптимального решения в форме метода динамического программирования. Получены рекуррентные соотношения для поверхностей уровня 1 и 0 функции Беллмана, не зависящие от самой функции Беллмана. Доказано, что на некотором фиксированном шаге для состояний, принадлежащих поверхности уровня 1, любое решение соответствующего вероятностного уравнения является оптимальной стратегией, а для состояний, принадлежащих поверхности уровня 0, любое допустимое управление является оптимальным. Получено модифицированное соотношение метода динамического программирования («модифицированное» уравнение Беллмана) и соотношение для поиска субоптимальной стратегии. Далее доказана теорема о двусторонней оценке функции Беллмана. Из нее следует, что нижняя оценка функции Беллмана – это максимальная вероятность попадания траекторией системы на поверхность уровня 1 функции Беллмана на следующем шаге дискретного времени, а

верхняя оценка – максимальная вероятность непопадания траекторией системы на поверхность уровня 0 функции Беллмана на следующем шаге дискретного времени. На основе полученной двусторонней оценки функции Беллмана установлена двусторонняя оценка для функции оптимального значения вероятностного критерия для двух случаев (детерминированного вектора начального состояния и случайного вектора начального состояния с заданным распределением), что позволяет найти оценки для функции оптимального значения вероятностного критерия без использования метода динамического программирования.

Во второй главе рассмотрены две модельные задачи оптимального управления с вероятностным критерием. Получено решение задачи оптимального управления линейной дискретной стохастической системой с вероятностным критерием и нефиксированным временем окончания. Найдены в явном виде поверхности уровня 1 и 0 функции Беллмана и оптимальное управление, представляющее собой линейную функцию состояния системы. Получены условия, при которых найденное управление является оптимальным по квантильному критерию. Рассмотрен частный случай, в котором система управления является двумерной и моделирует управляемое ускорением движение материальной точки со случайным шумом в канале управления. Для указанного случая получено аналитическое решение задачи оптимального управления возмущенным движением материальной точки. Также рассмотрена задача оптимального управления скалярной билинейной системой, моделирующей процесс капиталовложения с учетом риска. Найдены в явном виде поверхности уровня 1 и 0 функции Беллмана, двусторонние оценки для функции Беллмана и функции оптимального значения вероятностного критерия. Выведены условия асимптотической оптимальности некоторой допустимой стратегии. Для случая двумерного вектора управления находятся двусторонние оценки для функции Беллмана и функции оптимального значения вероятностного критерия. Приведено обоснование субоптимальности «рисковой» стратегии и получены условия асимптотической оптимальности рискованной стратегии.

В третьей главе рассмотрена модель однопараметрической коррекции траектории движения искусственного спутника Земли с вероятностным критерием. Для разных распределений случайного возмущения, моделирующего ошибку исполнения корректирующего воздействия, в аналитической форме получены субоптимальное (случай гауссовского распределения) и оптимальное (случай равномерного распределения) управления. Проведено сравнение найденных алгоритмов управления со среднеквадратическим.

В четвертой главе рассмотрена модель двухпараметрической коррекции траектории движения искусственного спутника Земли с вероятностным критерием. Найдены субоптимальные алгоритмы управления для случаев, когда ошибка реализации корректирующего воздействия имеет гауссовский и равномерный законы распределения. С использованием найденных двусторонних границ для функции оптимального значения вероятностного критерия получены численные оценки точности решения для случая двухимпульсной коррекции. Проведено сравнение найденных алгоритмов управления со среднеквадратическим.

В заключительной части перечислены основные положения, выносимые на защиту.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие **замечания**:

1. В диссертационной работе следовало бы рассмотреть более современную модель движения искусственного спутника Земли.
2. Предположение о независимости случайных возмущений, представляющих собой доходности рискованных активов, в постановке задачи оптимального капиталовложения представляется некорректным.
3. В третьей и четвертой главах следовало указать, можно ли обобщить полученные в задаче оптимизации импульсной коррекции с гауссовскими ошибками управления результаты на случай ограниченного управления с детерминированными возмущениями.
4. В диссертации имело бы смысл не повторять основные положения, полученные в работе (или главе), в начале и конце каждой главы, так как они присутствуют во введении и заключении. Данное обстоятельство делает текст диссертации громоздким.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, которая является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне.

Все основные результаты работы опубликованы в журналах из перечня ВАК и баз данных SCOPUS и Web of Science и доложены на научных конференциях. Текст автореферата в целом отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Азанов Валентин Михайлович заслуживает

