

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
Каменщикова Михаила Александровича  
на тему: «Методы построения оптимальных наблюдателей  
пониженного порядка для линейных стационарных динамических систем»  
по специальности 1.1.2 «Дифференциальные уравнения и математическая физика»**

В диссертации Каменщикова М.А. рассматривается задача построения функционального оптимального наблюдателя пониженного порядка для линейной динамической системы с аддитивными белыми шумами. Под функциональным наблюдателем понимается линейная динамическая система, которая по известному скалярному или векторному входу и выходу исходной системы дает несмещенную оптимальную оценку скалярного или векторного функционала состояния. При этом критерием оптимальности в задаче является установившаяся среднеквадратическая ошибка наблюдения. Данная задача имеет важное значение для решения различных прикладных задач управления линейными системами со случайными возмущениями. В частности, при решении задачи стабилизации системы с использованием динамической обратной связи требуется информация о некотором линейном функционале от фазового вектора системы. Для этого вместо наблюдателя, формирующего оценку полного вектора состояния системы, предлагается строить функциональный наблюдатель, имеющий пониженную размерность. Это позволяет понизить как требования к ресурсам вычислительного устройства, на котором реализуется функциональный наблюдатель, так и время вычисления желаемой оценки. Кроме того, более низкий порядок наблюдателя позволяет упростить анализ динамической системы.

Целью данной диссертации является разработка алгоритмов построения оптимальных наблюдателей пониженного порядка для различных классов линейных стационарных динамических систем со стохастическими возмущениями: как непрерывных, так и дискретных, как со скалярными, так и с векторными измеряемым выходом и оцениваемым функционалом.

Научная новизна диссертации связана с тем, что автор в своей работе впервые использовал методы интегральных квадратичных оценок качества и приведения к каноническому виду, что позволило уменьшить порядок построенной модели фильтра по сравнению с существующими методами фильтрации и оценки состояния.

Все положения, выносимые на защиту, являются новыми. Их обоснованность и достоверность обеспечиваются использованием строгих математических формулировок и доказательств. Работа прошла широкую апробацию, все основные результаты опубликованы в рецензированных журналах.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и библиографии.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследования, обсуждена научная новизна полученных результатов и показана их практическая значимость. Кроме того, во введении представлены выносимые на защиту научные положения.

Обзор литературы содержит реферативное описание имеющихся результатов по теме диссертации, приводятся ссылки на ключевые работы и монографии, позволяющие составить представление о текущем состоянии исследуемой области.

В первой главе рассмотрены постановки задач несмещенной фильтрации пониженного порядка, диагностики и совместной задачи стабилизации и оптимальной фильтрации как для непрерывных, так и для дискретных стохастических систем. Для данных задач сформулирована и доказана теорема об условиях, обобщающих

классическое условие несмещенности фильтрации. Предложен метод построения фильтров пониженного порядка, основанный на сведении указанных задач к задачам нелинейной оптимизации и аналитическом вычислении интегрального квадратичного показателя качества. Проведены вычислительные эксперименты для иллюстрации теоретических результатов и предложенного подхода к численному моделированию непрерывных стохастических систем.

Во второй главе рассмотрены функциональные фильтры различных динамических порядков, начиная с первого порядка и до одного из представителей повышенного порядка, как для непрерывных, так и для дискретных стохастических систем со скалярным выходом. Используя предположение о том, что оцениваемый скалярный функционал имеет специальный вид, позволяющий построить фильтр первого порядка, была представлена структура функциональных фильтров в канонической форме наблюдаемости. Сформулированы и доказаны теоремы о передаточных функциях построенных фильтров и систем в отклонениях как для непрерывных, так и для дискретных систем. Для сравнения построенных фильтров по среднеквадратической ошибке наблюдения в установившемся режиме и моделирования переходных процессов проведены вычислительные эксперименты.

В третьей главе рассмотрены функциональные фильтры второго и третьего порядков в предположении, что фильтров первого порядка не существует, как для непрерывных, так и для дискретных стохастических систем со скалярным выходом. Представлена структура функциональных фильтров второго и третьего порядков в каноническом базисе. Сформулированы и доказаны теоремы о необходимых и достаточных условиях существования фильтров второго и третьего порядков и о передаточных функциях систем в отклонениях. Для сравнения между собой фильтров второго и третьего порядков по среднеквадратической ошибке наблюдения в установившемся режиме проведены вычислительные эксперименты, в которых применяется метод интегральных квадратичных показателей качества, представленный в первой главе, и изображены траектории последовательных приближений численного метода оптимизации.

В четвертой главе рассмотрена задача построения оптимальных фильтров для стохастических многосвязных как непрерывных, так и дискретных объектов управления с векторным выходом и векторным функционалом, подлежащим восстановлению. Представлена структура таких фильтров в каноническом базисе Люенбергера. Предложена формула для нахождения общего количества неизвестных параметров оптимальных фильтров в канонической форме и представлено левое матричное дробное описание передаточной функции для системы в отклонениях. Приведены результаты численных экспериментов, иллюстрирующих полученные теоретические результаты.

В заключении подводятся итоги проведенной работы и кратко формулируются основные результаты. Также обозначаются возможные направления дальнейших исследований.

**Замечания по диссертации:** к недостаткам работы можно отнести отсутствие примеров прикладного характера, а также некоторая громоздкость изложения. Например, на стр. 17-18 формулировка Задачи 1 состоит из одного предложения, которое включает в себя описание исходной системы, определение функционального наблюдателя, все необходимые предположения об этих системах, а также определение критерия оптимальности.

Однако, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.2 «Дифференциальные уравнения и математическая физика» (по физико-математическим

наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Каменщиков Михаил Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.2 «Дифференциальные уравнения и математическая физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений ФГБУН Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук

Асеев Сергей Миронович

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Губкина, д.8.

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН,

Отдел дифференциальных уравнений,

Тел: 7(495)9848141 \* 3775, e-mail: aseev@mi-ras.ru

Подпись сотрудника МИАН С.М. Асеева удостоверяю:

Ученый секретарь МИАН

С. А. Поликарпов

дата

05.04.2023