

## **ОТЗЫВ**

**научного руководителя на диссертационную работу М.А. Каменщикова  
«Методы построения оптимальных наблюдателей пониженного порядка для  
линейных стационарных динамических систем», представленную на  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.2 «Дифференциальные уравнения и математическая физика»**

Для решения многих задач теории управления зачастую не требуется знать весь фазовый вектор состояния динамической системы, а достаточно располагать информацией лишь о некотором линейном функционале от этого вектора. В этом случае имеет место задача о построении оценки для этого функционала, или, иначе говоря, задача о построении функционального наблюдателя (т.е. системы дифференциальных уравнений, вырабатывающих данную оценку). При этом возникает возможность построения наблюдателя пониженной размерности (в том числе наблюдателя минимального динамического порядка, то есть минимальной размерности). И если подходы к решению задачи для систем без внешних возмущений были известны еще 10-20 лет назад, то задача о синтезе функциональных наблюдателей для линейных стохастических систем (т.е. систем со стохастическими возмущениями) не имеет решения до сих пор.

В диссертационном исследовании Каменщикова М.А. рассматривается задача синтеза оптимальных наблюдателей (фильтров) пониженного порядка для различных классов стохастических управляемых систем, вход которых, кроме управления, содержит в качестве слагаемого аддитивный белый шум; выход системы линеен по фазовому вектору и содержит в качестве слагаемого также аддитивный белый шум. Эта задача находится на пересечении двух классических задач теории управления: задачи оптимального (в смысле фильтрационных свойств) наблюдения полного порядка и задачи о построении функционального наблюдателя для детерминированных систем.

Основная цель диссертации заключается в разработке новых подходов к построению оптимальных наблюдателей пониженного порядка для различных классов управляемых систем, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями, а так же к получению условий, при которых возможно решение задачи.

В рамках диссертации были решены следующие задачи:

- получено обобщение классического условия несмещенности оценки в совместной задаче стабилизации и оптимальной фильтрации и в задаче диагностики неисправностей при наличии дополнительной информации о начальном состоянии системы;
- разработан подход к построению функциональных оптимальных наблюдателей на основе сведения задачи несмещенной фильтрации к задаче нелинейной оптимизации на невыпуклом множестве допустимых параметров, позволяющий получить условия существования оптимальных фильтров различных порядков.
- проведен сравнительный анализ функциональных фильтров различных динамических порядков как по квадратичному критерию оптимальности в установившемся режиме, так и по качеству переходных процессов
- сформулированы необходимых и достаточных условий существования и единственности фильтров различных динамических порядков для некоторых случаев (при некоторых соотношениях порядков системы, выхода, оцениваемого функционала)
- получено явное представление передаточных функций систем в отклонениях в каноническом базисе.

Все результаты, полученные в диссертации, являются новыми.

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

Во введении дается общая характеристика работы и излагаются основные результаты работы, кратко раскрывающие содержание глав диссертации.

Обзор литературы содержит краткую историю развития научных исследований по теме диссертации и реферативное описание имеющихся результатов по теме диссертации.

В первой главе даны постановки задач классической несмещенной фильтрации пониженного порядка; несмещенной оптимальной фильтрации при отсутствии управления в системе и совместной задачи стабилизации и оптимальной фильтрации для стохастических систем как в непрерывном, так и в дискретном времени. Для данных задач были сформулированы и доказаны условия, обобщающие классическое условие несмещенности фильтрации на случай дополнительной информации о начальном состоянии системы. Предложен метод построения оптимальных наблюдателей пониженного порядка, основанный на сведении указанных задач к задачам нелинейной оптимизации, и аналитическом вычислении интегрального квадратичного показателя качества. В конце главы теоретические результаты проиллюстрированы примерами.

Во второй главе рассмотрена задача построения оптимальных наблюдателей различных динамических порядков при условии существования фильтра первого порядка, как для непрерывных, так и для дискретных стохастических систем со скалярным выходом. Сформулированы и доказаны теоремы о передаточных функциях построенных фильтров и систем в отклонениях как для непрерывных, так и для дискретных систем. Доказано, что в этом случае наблюдатели промежуточных порядков обладают теми же фильтрационными свойствами, что и наблюдатель первого порядка.

В третьей главе рассмотрена задача построения оптимальных фильтров второго и третьего порядков в предположении, что фильтров первого порядка не существует, для стохастических объектов управления со скалярным выходом как в непрерывном, так и в дискретном времени. 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. Построен пример системы четвертого порядка, для которого проведено сравнение построенных фильтров второго и третьего порядка по оптимизируемой метрике в установившемся режиме и показано, что фильтрационные свойства в этом случае могут меняться в зависимости от порядка фильтра.

В четвертой главе рассмотрена проблема построения субоптимальных фильтров (оптимальных фильтров пониженного порядка, то есть фильтров для линейных векторных функционалов от фазового вектора системы) для стохастических многосвязных систем с векторным выходом. Представлена структура таких фильтров в каноническом базисе Люенбергера. Предложено явное аналитическое выражение для нахождения общего количества неизвестных параметров субоптимальных фильтров в канонической форме и представлено левое матричное дробное описание передаточной функции для системы в отклонениях. На примерах многосвязных систем седьмого порядка показано, что с помощью предложенного подхода повышается оптимальность фильтров по сравнению с фильтрами на основе скалярных наблюдателей. Кроме того, предложенный подход позволяет синтезировать субоптимальные фильтры, порядок которых меньше, чем гарантированный порядок наблюдателя в задаче синтеза наблюдателя минимального порядка с любой наперед заданной скоростью сходимости.

В заключении подводятся итоги проведенного исследования и приводятся основные результаты. Также обозначаются возможные направления дальнейших исследований.

Работа носит теоретический характер. Результаты работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях по теории фильтрации пониженного порядка. Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью математического аппарата, использованного в основных утверждениях работы.

Результаты, выносимые на защиту, получены М.А. Каменщиковым самостоятельно, являются строго математически обоснованными и аккуратно изложенными. Основные результаты своевременно опубликованы в 5 (пяти) научных работах в рецензируемых журналах, из которых 4 – входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. В

работах, выполненных в соавторстве, вклад соискателя был определяющим. Работа апробировалась на различных семинарах и конференциях, в том числе всероссийских и международных.

На основании вышеизложенного считаю, что рассматриваемая работа отвечает всем требованиям, которые предъявляются в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рекомендую присвоить ее автору, Каменщикову М.А., ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.2 «Дифференциальные уравнения и математическая физика».

Научный руководитель,

доктор физико-математических наук,

профессор, заведующий кафедрой НДСиПУ

факультета ВМК МГУ имени М.В.Ломоносова

Фомичев Василий Владимирович

23.09.2022 г

