

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

В диссертационной работе М.А. Каменщикова рассмотрены задачи построения наблюдателей пониженного порядка для линейных стационарных систем при наличии стохастических возмущений. Рассмотрены системы как в случае непрерывного времени (такие системы названы непрерывными), так и дискретного (соответствующие системы названы дискретными). Стохастические возмущения входят как в систему дифференциальных уравнений, так и в уравнения связи выхода с состоянием. И в том, и в другом случае возмущение представляет собой белый шум. Рассматриваются функциональные линейные наблюдатели, порядок которых меньше порядка динамической системы — так называемые наблюдатели пониженного порядка. Такие наблюдатели дают оценку не состоянию динамической системы, а некоторого линейного оператора от состояния, называемого функционалом. Для функциональных линейных наблюдателей получены условия несмещенности даваемых ими оценок, а также предложены алгоритмы построения.

Диссертационная работа включает введение, обзор литературы, 4 главы, заключение и список литературы по теме. Также в текст включен список работ автора по теме диссертации, список рисунков и таблиц.

Во введении автор приводит общие характеристики выполненного исследования (актуальность темы, цели и задачи работы, ее научная новизна и т.п.). В обзоре литературы описано современное состояние темы диссертации и известные по теме результаты.

В первой главе диссертации дана общая постановка задачи построения функционального наблюдателя для линейной динамической системы со стохастическим возмущением, введен критерий оптимальности для таких наблюдателей, описаны важные понятия (в частности, понятия наблюдаемости и управляемости). Из общей постановки задачи выделены две подзадачи, названные задачей диагностики и задачей стабилизации и наблюдения. Эти две задачи различаются характером управления: в первом случае оно программное (и приравнено нулю), во втором — в виде обратной связи. Ключевым результатом этой главы являются условия несмещенности оценки, которую дает функциональный наблюдатель и которые обобщают известные условия несмещенности при дополнительном требовании наблюдаемости системы. Подобное обобщение расширяет размерность области параметров и тем самым расширяет возможности построения наблюдателей. В этой главе также показано, как задача построения оптимального наблюдателя сводится к задаче нелинейной оптимизации, в которой интегральный критерий оптимальности вычисляется чисто алгебраическими методами. Полученные в главе результаты проиллюстрированы на конкретных примерах.

Во второй главе рассмотрена более детально задача построения оптимальных наблюдателей для линейных динамических систем со скалярным выходом, представленных в каноническом наблюдаемом виде, в условиях, когда существует скалярный функцио-

нальный наблюдатель. Решение задачи базируется на тщательном анализе передаточных функций динамической системы и наблюдателя. Сделан вывод о том, что при наличии скалярного наблюдателя векторные наблюдатели порядков до $n-2$ (n — порядок динамической системы) не дают преимуществ: значение критерия оптимальности у всех этих наблюдателей одинаковое. Представлены не только условия существования таких наблюдателей, но и методы их построения. Техника построения наблюдателей проиллюстрирована примерами.

В третьей главе продолжено исследование векторных наблюдателей для линейных динамических систем со скалярным выходом. Но при этом предполагается, что скалярного наблюдателя не существует. Подробно рассмотрена задача построения наблюдателей 2-го и 3-го порядка как для непрерывных, так и дискретных систем. Как и во второй главе, исследование ведется для динамических систем в канонической наблюдаемой форме. Получены необходимые и достаточные условия существования таких наблюдателей и предложены методы их построения. Результаты этой главы проиллюстрированы примерами.

В четвертой главе рассмотрен случай линейной динамической системы с векторным выходом и векторным функционалом (многосвязной системы). В предположении, что ранг матрицы выхода максимальный, а система наблюдаема, линейная система может быть преобразована в каноническую форму Люенбергера, означающую, что ее можно разделить на несколько независимых подсистем со скалярным выходом. Это позволяет свести анализ таких систем к случаю систем со скалярным выходом, рассмотренному в главах 2 и 3. Приведены необходимые и достаточные условия существования наблюдателя, обеспечивающего несмещенную оценку. Проведен анализ передаточных функций многосвязных систем, результаты проиллюстрированы примерами.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования.

Актуальность темы исследования. Диссертация относится к общей проблеме исследования динамических управляемых систем в условиях неопределенности. Теория стохастических систем — один из подходов к этой общей проблеме. Разумеется, точное знание состояния системы во времени упрощает задачу управления. Наличие неопределенностей может компенсироваться использованием наблюдателей — вспомогательных динамических систем, которые позволяют восстанавливать вектор состояния или некоторую его функцию, достаточную для организации управления. Использование в этой ситуации наблюдателей пониженного порядка позволяет создавать более экономичные и быстродействующие системы управления. Поэтому тема диссертации несомненно актуальна.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация М.А. Каменщикова соответствует специальности ВАК 1.1.2 – «Дифференциальные уравнения и математическая физика» (физико-математические науки) в части задач теории управления (вопросы управляемости, наблюдаемости, стабилизируемости).

Научная новизна результатов исследования. Новым в диссертационной работе являются условия несмещенности оценки, формируемой наблюдателем пониженного порядка. Эти условия получены при отсутствии требования наблюдаемости, а также в более общем случае, когда управление само является случайным процессом (управление в форме обратной связи). Новым также является метод построения оптимальных наблюдателей пониженного порядка, основанный на анализе передаточных функций. В рамках этого метода установлены условия существования наблюдателей, а также алгоритм их построения.

Практическая значимость диссертационной работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, носят в основном фундаментальный характер. Предложены ме-

тоды построения наблюдателей пониженного порядка для линейных систем со стохастическими возмущениями. Результаты могут быть использованы для дальнейших исследований в теории управления и фильтрации.

Достоверность результатов исследования. Текст диссертации построен традиционно для математических наук. Полученные результаты сформулированы в виде теорем и снабжены доказательствами. Все доказательства логически корректны, основаны на достоверных результатах. Они также подтверждены в процессе анализа целого ряда примеров. Таким образом, достоверность полученных результатов сомнений не вызывает.

Апробация результатов. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных журналах. Всего по теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 3 научные статьи проиндексированы в Scopus, 2 научные статьи проиндексированы в RSCI, также есть публикации уровня РИНЦ. Результаты диссертации докладывались на ряде конференций международного и всероссийского уровней, а также на научно-исследовательском семинаре «Нелинейная динамика и управление» МГУ им. М.В. Ломоносова.

Замечания по диссертационной работе. Замечания по тексту диссертации относятся не к содержанию теоретических результатов, а к форме их подачи и стилю изложения.

1. Диссертационное исследование проведено как для динамических систем непрерывного времени, так и для систем дискретного времени. Однако параллельное изложение двух ветвей исследования не выглядит удачным, поскольку затрудняет восприятие результатов работы. Более удачным было бы изложение раздельное, например, сначала для непрерывных систем детально, а затем для дискретных кратко с фиксацией отличий.

2. Не очень четко сформулированы задачи исследования. Основная задача исследования — две постановки, первая — диагностическая, вторая — стабилизационная, но в начале первой главы формулировки иные.

3. Формулировку теоремы 1.1 (в общем, ключевой в диссертации) следует признать неудачной, так как она содержит, во-первых, уже известный результат, который следует рассматривать как исходный факт для обобщения, во-вторых, содержит два утверждения разного характера, соединение которых в одной теореме искусственно, а в-третьих, утверждения в целом недостаточно четкие. Есть аналогичные замечания по формулировкам и других теорем.

4. Текст в целом недостаточно стилистически выдержан: есть неочевидные утверждения, по которым нет разъяснений или ссылок, в то время как некоторые простейшие утверждения излишне подробно разъясняются.

5. В целом задача состояла в поиске наблюдателя, который дает наилучшую оценку функционала от состояния, но сходимость этой оценки к функционалу не исследовалась. Однако в ряде мест появляется условие асимптотической устойчивости в уравнении ошибки, что, по-видимому, должно обеспечивать указанную сходимость. Однако этот вопрос следовало бы обсуждать регулярно или не обсуждать вообще. Спонтанное упоминание об этом выглядит неуместным.

6. Есть замечания по терминологии и обозначениям (передаточная функция — это все-таки функция, а не оператор; функционал — это отображение, функция, а не образ; обозначение $S_e(\omega)$ использовано в двух разных смыслах).

Заключение. Диссертация М.А. Каменщикова представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые научные результаты. Основные результаты диссертации опубликованы в научной печати и апробированы на научных конференциях и научных семинарах. Автореферат и научные публикации автора полностью отражают содержание диссертации. Диссертация соответствует специальности 1.1.2 – «Дифференциальные уравнения и математическая физика».

По актуальности, научному уровню и содержанию диссертационная работа М.А. Каменщикова удовлетворяет требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.2 – «Дифференциальные уравнения и математическая физика» (физико-математические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 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
профессор кафедры «Математическое моделирование»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,
доктор физико-математических наук, доцент

А.Н. Канатников

Тел. (499) 263 63 91,
E-mail: bauman@bmstu.ru.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

05.04.2023 г.