

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертацию Высоцкого Алексея Олеговича

«Нелинейные методы наблюдения

для динамических систем с неопределенностью»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.1.2 – «Дифференциальные уравнения

и математическая физика»

В диссертационной работе А.О. Высоцкого рассмотрена задача построения наблюдателя линейной стационарной системы с двумя скалярными входами и одним скалярным выходом. Один из входов представляет собой известное управление, а второй выход не известен и трактуется как неизвестное аддитивное возмущение. Вся информация о системе определяется коэффициентами системы, управлением и выходом. По этой информации требуется восстановление вектора состояния системы, т.е. построение оценки состояния, которая при неограниченном возрастании времени стремится к состоянию системы. Подобная задача решается путем построения наблюдателя — специальной динамической системы, выход которой рассматривается как оценка состояния рассматриваемой системы. В диссертационной работе предложен каскадный вариант наблюдателя, который строится на основе некоторого скользящего режима (режим “super-twisting”).

Диссертационная работа включает введение, 3 главы, заключение и список литературы по теме. Также в текст включен отдельный список работ автора по теме диссертации.

Во введении автор приводит общие характеристики выполненного исследования (актуальность темы, цели и задачи работы, ее научная новизна и т.п.). Подчеркнуто, что многие алгоритмы управления динамической системой построены на том, что известен полный вектор состояния. Наиболее употребительным подходом к построению асимптотических оценок состояния являются наблюдатели. Наличие неопределенностей (в данном случае в виде аддитивного возмущения) усложняет процедуру оценки и требует нелинейных методов построения наблюдателя.

В первой главе диссертации решается традиционная для задач управления задача преобразования динамической системы к виду, удобному для построения наблюдателя. Она решается в два приема. Первоначально, опираясь на ранговое условие управляемости (по отношению к неизвестному входу), автор приводит систему к канонической форме управляемости, в которой возмущение оказывает влияние только в одном уравнении системы — последнем, а матрица системы приобретает специальный канонический вид. Затем, исходя из канонического управляемого вида, система еще раз преобразуется, в результате чего она разделяется на две подсистемы. Первая подсистема описывает нулевую динамику системы — ту, которая не фиксируется в каком-либо виде заданным выходом, т.е. нулевая динамика здесь — это ненаблюдаемая динамика. Для решения задачи наблюдения в целом необходимо, чтобы нулевая динамика была асимптотически устойчивой. Исследование, приведенное в работе, далее концентрируется на второй подсистеме, порядок которой называют относительным порядком системы.

Во второй главе рассматривается важный частный случай системы относительного порядка 2. Наблюдатель представляет собой систему 2-го порядка, которая получается из рассматриваемой для наблюдения подсистемы добавлением аддитивных слагаемых, связанных с ошибкой наблюдения. Выбран вариант таких слагаемых, известный как алгоритм “super-twisting”. В результате дело сводится к качественному анализу системы 2-го порядка с разрывной правой частью

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - k|e_1|^\alpha, \\ \dot{e}_2 = -\mu|e_1|^0 + \xi(t). \end{cases}$$

Необходимо было исследовать устойчивость нулевого положения равновесия этой системы в зависимости от параметров  $k$  и  $\mu$ . Ранее был исследован частный случай  $\alpha = 0,5$  путем построения функции Ляпунова. В диссертационной работе этот случай исследован более детально. Установлен наихудший вид возмущения, при котором отклонение фазовой точки от нуля наибольшее. Явно построено решение системы для такого возмущения. Основываясь на этом частном случае, автор решил задачу и для других значений  $\alpha \in (0,1)$ .



Также в главе 2 автор исследовал работу наблюдателя при наличии погрешности в измерении выхода, а также в условиях неидеального переключения в разрывных слагаемых.

В главе 3 автор, используя наблюдатель “super-twisting” для систем второго относительного порядка, строит каскадного типа наблюдатель для систем произвольного относительного порядка. Строится вспомогательный наблюдатель с линейными обратными связями. Ошибка этого наблюдателя есть вектор состояния динамической системы  $\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + \xi(t)$ , в которой матрица  $A$  при соответствующем выборе коэффициентов обратных связей оказывается гурвицевой. При ограниченном возмущении это гарантирует ограниченность траектории  $\varepsilon(t)$ . Поэтому отдельные компоненты вектора  $\varepsilon(t)$  можно рассматривать как ограниченное возмущение. В совокупности с оценками для ошибок наблюдения удастся построить каскад наблюдателей 2-го порядка для оценки отдельных компонент вектора ошибки  $\varepsilon(t)$ . Тем самым решена задача построения наблюдателя для динамической системы произвольного относительного порядка.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования.

**Актуальность темы исследования.** Диссертация относится к общей проблеме исследования динамических управляемых систем в условиях неопределенности. Рассмотрены несколько типов таких неопределенностей: наличие аддитивного возмущения; погрешности измерений; неидеальности в реализации переключений при работе наблюдателя. И общая проблема построения наблюдателей, и конкретная задача являются актуальными.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертация А.О. Высоцкого 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 является исследование ST-системы, в частности: получение решения системы в аналитическом виде при «наихудшем» возмущении;

3. При выделении нулевой динамики оговаривается ее устойчивость, но на самом деле имеется в виду асимптотическая устойчивость.

4. Есть мелкие погрешности по тексту и опечатки (например, несогласованность частей речи, потерянные знаки препинания и проч.).

**Заключение.** Диссертация А.О. Высоцкого 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», а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова».

По актуальности, научному уровню и содержанию диссертационная работа А.О. Высоцкого удовлетворяет всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода, а ее автор Высоцкий Алексей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент  
профессор кафедры «Математическое моделирование»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,  
доктор физико-математических наук, доцент

20.10.2024

А.Н. Канатников

Контактные данные:

Тел.: (+7-916-840-2557, email skipper@bmstu.ru

Специальность, по которой оппонент  
05.13.01 – Системный анализ, управление и  
строительство

информатика, маши-

Адрес места работы:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул.  
Тел. (499) 263 63 91, email: bauman@

1. ИД ПЕРСОНАЛ

10. ОБРАЗОВАНИЕ

11.

50-46