

Отзыв официального оппонента  
о диссертации Хартовского Вадима Евгеньевич  
«Управляемость линейных динамических систем с последствием:  
качественный анализ и построение регуляторов», представленной на  
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические  
системы и оптимальное управление

**Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите, со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утвержденного ВАК**

В диссертация Хартовского В.Е. «Управляемость линейных динамических систем с последствием: качественный анализ и построение регуляторов» развивается математическая теория анализа и синтеза линейных динамических систем с последствием. Рассмотрены задачи стабилизации систем, задачи приведения к конечному спектру и управления спектром, задачи получения асимптотических и точных оценок решения по наблюдаемому выходу. Результаты работы ориентированы на линейные системы нейтрального типа и линейные вполне регулярные дифференциально-алгебраические системы с запаздыванием. Диссертационная работа представляет собой развитие теории функционально-дифференциальных систем. Поэтому содержание диссертации соответствует специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление.

#### **Актуальность темы диссертации**

Поведение сложных объектов биологической, физической и другой природы зачастую описывается системой дифференциальных уравнений. При этом в большинстве моделей для их адекватного описания следует учитывать предысторию процесса. Так, при управлении технологическими процессами, особенно в химической, нефтехимической и биотехнической промышленности встречаются объекты, у которых запаздывающими являются как управляющая, так и промежуточная координаты. Типичным примером является цепочка последовательно работающих химических реакторов, где запаздывание определяется как временем движения по трубопроводам исходного сырья, так и временем перемещения промежуточных продуктов. Системы с последствием широко используются также при описании динамических процессов в механике деформируемого твердого тела, в электродинамике, в экологии, в медицине, в экономике. Поэтому системы с последствием занимают важное место в моделировании реальных процессов в природе и деятельности человека.



В отличие от конечномерных систем, задачи управляемости и наблюдаемости систем с последействием изучаются в бесконечномерных пространствах, что значительно усложняет теорию управления такими системами. В настоящее время к наиболее изученным динамическим системам с запаздыванием можно отнести линейные автономные дифференциально-разностные системы запаздывающего типа. Имеющиеся в литературе результаты исследования более сложных объектов, в частности, систем нейтрального типа в значительной степени не завершены. Наиболее сильно это ощущается в исследованиях проблемы проектирования регуляторов, являющейся важнейшей задачей теории систем автоматического управления. Принцип обратной связи, как отметил Р. Калман в своей известной монографии, «составляет основу всей автоматики» и включает «наиболее важную идею управления». Широкая пропаганда принципа обратной связи принадлежит Р. Беллману, К основополагающим работам в области систем с запаздыванием можно отнести исследования Н.Н. Красовского, Ю.С. Осипова и других ученых. Перечисленные обстоятельства делают актуальной теорию, представленную в диссертационной работе Хартовского В.Е. и посвященную исследованию проблемы построения регуляторов для линейных систем нейтрального типа и вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с запаздыванием.

#### **Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту**

В диссертации В.Е. Хартовского предложен подход к построению регуляторов, в основе которого лежит идея использования регуляторов гибридной структуры, представляющих собой три последовательно соединенных контура. Используя свойства гибридных регуляторов, соискатель решает классические задачи управляемости для новых объектов. Дальнейшая модификация этой идеи для решения проблемы наблюдения позволила в диссертационном исследовании разработать новые типы наблюдателей и получить условия их существования.

Разработанная теория построения регуляторов представлена в виде следующих научных результатов: для линейных автономных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями сформулированы и доказаны критерии разрешимости задач 0-управляемости, спектральной приводимости, слабой спектральной приводимости, модальной управляемости, слабой модальной управляемости, существования регулятора успокоения решения; для линейных автономных систем нейтрального типа получены критерии и условия существования асимптотических наблюдателей, критерии



существования финитных наблюдателей, сформулирована процедура асимптотической оценки и условия ее реализуемости.

Следует отметить, что в диссертации В.Е. Хартовского решены некоторые задачи, являющиеся вспомогательными в контексте диссертационного исследования, однако представляющие собой самостоятельный интерес в теории управления. Сюда следует отнести критерии полной 0-управляемости и финитной наблюдаемости для линейных автономных дифференциально-разностных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями. Также отдельный интерес в теории управления представляют результаты, полученные соискателем при исследовании дескрипторного разностного уравнения с дискретным временем.

Анализ положений, выносимых на защиту, показывает, что диссертация В.Е. Хартовского является научным исследованием, содержащим оригинальные результаты, представляющие значительный научный интерес и имеющие важное значение для дальнейшего развития теории управления.

### **Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Результаты диссертационного исследования В.Е. Хартовского представлены в виде строгих математических утверждений и доказаны при помощи математического аппарата. Поэтому их достоверность не вызывает сомнений. Кроме того, все утверждения не противоречат известным фактам теории управления и имеющимся в литературе результатам.

### **Научная, практическая, экономическая и социальная значимость научных результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию**

Результаты, представленные в диссертации, содержат новый подход к анализу и синтезу регуляторов и наблюдателей и применимы при проектировании систем автоматического управления, при решении задач управления в процессе моделирования различных физических, экономических, биологических и др. процессов, описываемых линейными автономными системами нейтрального типа и вполне регулярными дифференциально-алгебраическими системами с запаздыванием.

Результаты диссертационного исследования допускают дальнейшее развитие на более сложные системы и могут служить отправной точкой для продолжения исследований в процессе написания магистерских и

кандидатских диссертаций. Их также следует использовать в учебном процессе при чтении спецкурсов для соответствующих специальностей.

### **Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

Результаты диссертации представлены в 86 научных работах. Среди этих работ 1 единолично написанная монография, 25 статей в научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь и в зарубежных научных журналах, 7 статей в других научных изданиях, 28 статей в сборниках материалов научных конференций; 25 тезисов докладов. 20 статей диссертации опубликованы в журналах, индексируемых в таких базах данных, как Scopus и Web of Science, а 18 из них переизданы в переводных версиях журналов.

### **Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями инструкции ВАК Республики Беларусь.

### **Замечания**

Несмотря на довольно частое употребление понятия \*структурные свойства (характеристики) систем\* оно в диссертации не определено, что иногда вызывает затруднения при чтении работы.

### **Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует**

Методы и результаты диссертационного исследования говорят о том, что квалификация В.Е. Хартовского соответствует ученой степени доктора физико-математических наук.

### **Вывод**

Диссертационная работа Хартовского Вадима Евгеньевича соответствующим требованиям, установленным главой 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. В.Е. Хартовскому следует присудить ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.01.02 – дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление за развитие математической теории проектирования регуляторов для линейных динамических систем с запаздыванием, представленное в виде научных результатов, являющихся крупным достижением в математической теории управления:



- критерии разрешимости задачи 0-управляемости и способы построения программных управлений, реализующих успокоение решения для линейных автономных дифференциально-разносных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями;
- критерии существования и способы построения регуляторов успокоения решения для линейных автономных дифференциально-разносных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями;
- критерии разрешимости задач спектральной приводимости и слабой спектральной приводимости и способы построения регуляторов, приводящих линейные автономные дифференциально-разносные системы нейтрального типа и линейные автономные вполне регулярные дифференциально-алгебраические системы с соизмеримыми запаздываниями к конечному спектру;
- условия разрешимости задач модальной управляемости и слабой модальной управляемости в классах интегральных и дифференциально-разностных регуляторов, а также способы построения регуляторов указанных типов, обеспечивающих заданный спектр для линейных автономных дифференциально-разносных систем нейтрального типа и линейных автономных вполне регулярных дифференциально-алгебраических систем с соизмеримыми запаздываниями;
- условия существования и способы построения различных типов асимптотических наблюдателей, а также разработку процедуры нахождения асимптотической оценки для линейных автономных дифференциально-разносных систем нейтрального типа;
- критерии существования и способы построения для линейных автономных дифференциально-разносных систем нейтрального типа финитных наблюдателей,

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

отдела нелинейного и стохастического анализа

Института математики НАН Беларуси

В.Т. Борухов

*Подпись Борухова В.Т. заверяю*  
*ученый секретарь* / *Лешин В.В.*

