

70
лет

**ТЕОРИИ
ИНВАРИАНТНОСТИ**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В. А. ТРАПЕЗНИКОВА

**70 ЛЕТ
ТЕОРИИ
ИНВАРИАНТНОСТИ**

Под редакцией С. Н. Васильева

Составитель А. П. Курдюков



URSS
МОСКВА

Труды Научного семинара «70 лет теории инвариантности». Москва,
2 июня 2008 г. / Под ред. С. Н. Васильева; Сост. А. П. Курдюков. — М.:
Издательство ЛКИ, 2008. — 256 с.

В настоящий сборник вошли доклады семинара, посвященного деятельности выдающегося отечественного ученого Г. В. Щипанова. Доклады имели своей целью не только почтить его память, отдать дань научной и научно-организационной деятельности Г. В. Щипанова, но и проанализировать то огромное влияние на теорию управления, которое оказала теория инвариантности, а также осветить современное состояние этой теории. Авторами сборника являются известные ученые в области теории управления.

Книга, несомненно, будет полезна научным работникам, аспирантам, а также всем читателям, интересующимся историей науки об управлении.

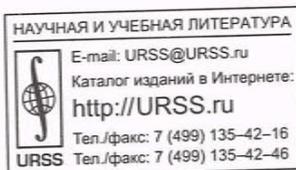
Труды Семинара утверждены к печати Программным комитетом Семинара.

*Семинар проведен при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 08-08-06022).*

Издательство ЛКИ. 117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 9.
Формат 60x90/16. Печ. л. 16. Зак. № 3173.
Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО ПФ «Полиграф-Книга».
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3.

ISBN 978-5-382-00878-3

© Институт проблем управления
РАН, 2008
© Издательство ЛКИ, 2008



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.

Программный комитет

С.Н. Васильев
В.М. Кунцевич
М.Ш. Мисриханов
В.Г. Пешехонов
Л.И. Розоноэр
В.Ю. Рутковский
Р.М. Юсупов

Организационный комитет

С.Н. Васильев
Д.А. Гольдин
Е.Ф. Жарко
А.П. Курдюков
М.В. Пятницкая
В.Н. Рябченко
К.Р. Чернышев

Оглавление

<i>С.Н. Васильев.</i> Предисловие	5
<i>З.М. Лезина, Г.В. Щипанов.</i> Этапы жизненного пути (опыт биографии)	13
<i>В.Ю. Рутковский.</i> Выдающиеся ученые В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин, Б.Н. Петров и теория инвариантности	26
<i>Л.И. Розоноэр.</i> О так называемом «парадоксе Г.В. Щипанова»	45
Комментарии В.Ю. Рутковского к работе Л.И. Розоноэра ..	52
<i>В.М. Кунцевич.</i> К истории развития теории инвариантности систем управления: взгляд из Киева ..	54
<i>В.М. Кунцевич.</i> Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления	61
<i>А.Г. Бутковский.</i> Взгляд на идеи Г.В. Щипанова через много лет	91
<i>А.В. Проскурников, В.А. Якубович.</i> Синтез регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы управления	102
<i>Э.М. Солнечный.</i> Современное развитие идей Г.В. Щипанова	121
<i>С.Ф. Коновалов.</i> Г.В. Щипанов и кафедра «Авиационные приборы» МВТУ им. Н.Э. Баумана	147
<i>М.Ш. Мисриханов.</i> От теории инвариантности к практике современных технических систем	156
Фотографии	233
Сведения об авторах	253

Предисловие

С.Н. Васильев

Имя Георгия Владимировича Щипанова, талантливого инженера, выдающегося ученого-исследователя, крупного организатора научного и учебного процессов, одаренного педагога и учителя, вновь привлекает к себе внимание специалистов по теории автоматического управления. Идеи Г.В. Щипанова, высказанные им в различные периоды своей творческой деятельности, снова вызывают интерес не только у историков науки, но и дают новый импульс дальнейшим исследованиям в теории и практике автоматического управления.

В 2008 году исполняется 105 лет со дня рождения Георгия Владимировича. В этом же году исполняется 70 лет со дня выхода из печати книги Г.В. Щипанова «Гирроскопические приборы слепого полета» (Оборонгиз, 1938 г.). В 2008 году также исполняется 70 лет с момента создания им так называемой теории компенсации, которая в дальнейшем стала называться теорией инвариантности. Основные идеи этой теории были опубликованы годом позже, в 1939 г., в первом номере журнала «Автоматика и телемеханика», в статье «Теория и методы проектирования автоматических регуляторов». В книге Г.В. Щипанова «Гирроскопические приборы слепого полета» была сформулирована задача компенсации вынужденной составляющей движения объекта, а в статье были сформулированы «условия полной компенсации

вления возмущающей силы на регулируемый параметр». Наконец, в 2008 году исполняется 70 лет со дня создания в МВТУ им. Н.Э. Баумана кафедры «Авиационные приборы», созданной под руководством первого заведующего кафедрой Г.В. Щипанова.

Все эти знаменательные даты решено отметить проведением Семинара «70 лет теории инвариантности». Этот семинар имеет своей целью не только почтить память известного ученого, отдать дань его научной и научно-организационной деятельности, но проанализировать то огромное влияние на теорию управления, которое оказала теория инвариантности, а также проанализировать современное состояние этой теории в наши дни.

В 2004 году в издательстве «Физматлит» вышла замечательная книга «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)» (составители З.М. Лезина, В.И. Лезин, научный редактор Э.М. Солнечный). В этой книге впервые были представлены не только уникальные материалы о жизни и деятельности Г.В. Щипанова, представлена научная и политическая дискуссия по работам выдающегося ученого, но и опубликована считавшаяся утерянной книга самого Георгия Владимировича «Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов». Это уникальное издание стало возможным благодаря архиву одного из старейших сотрудников Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН Марка Ароновича Айзермана. В своем архиве М.А. Айзерман с большим риском для себя и близких много лет сохранял папку под названием «Г.В. Щипанов», в которой были материалы, вошедшие в книгу.

Настоящее издание материалов Семинара (сборник) может служить неким дополнением к указанной выше книге «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)». В сбор-

ник вошли в основном новые материалы, посвященные жизни и деятельности Г.В. Щипанова, а также развитию его идей в теории автоматического управления. Исключение составляет только статья Л. И. Розоноэра, вошедшая в книгу и публикуемая в сборнике с любезного разрешения как самого Л.И. Розоноэра, так и с разрешения составителей вышеупомянутой книги.

Георгий Владимирович Щипанов первым предложил проектировать системы автоматического регулирования на основе математического описания элементов системы. Как пишет в предисловии к книге Лев Ильич Розоноэр, «тем самым в теории автоматического регулирования был сделан следующий после Максвелла и Вышнеградского принципиальный шаг: была показана возможность не только анализа, но и синтеза систем управления, основанного на теоретическом (математическом) описании системы».

Г.В. Щипанов является одним из основоположников метода структурных схем, позволяющих представить системы регулирования как последовательность соединенных друг с другом динамических вход-выходных звеньев.

На протяжении всей своей научной и педагогической деятельности Георгий Владимирович проявил себя как специалист высочайшего уровня. С 1925 года, когда он поступил на работу на московский завод «Авиаприбор» в качестве старшего инженера-конструктора, и вплоть до 1949 года, когда Г.В. Щипанов оставил свою работу в Московском авиационном институте им. Серго Орджоникидзе, им выполнено множество оригинальных научных исследований и практических разработок. Г.В. Щипанов работал приват-доцентом в Ленинградском институте Гражданского Воздушного Флота, в разное время был создателем и руководителем двух кафедр (в МВТУ им. Н.Э. Ба-

умана и в МАИ им. Серго Орджоникидзе). По предложению Научного Комитета Управления Военно-Воздушных Сил Г.В. Щипанов организовал опытный отдел. В 1938 году Г.В. Щипанова приглашают на работу во вновь организованный Комитет автоматике и телемеханики, преобразованный в 1939 году в Институт автоматике и телемеханики АН СССР. За большую работу в годы Великой Отечественной войны Г.В. Щипанов награждается орденом Красной Звезды.

Более подробно с биографией Георгия Владимировича можно ознакомиться по материалам статьи Б.А. Рябова «Георгий Владимирович Щипанов (краткий биографический очерк)» в сборнике «Теория инвариантности в системах автоматического управления», Трудах совещания, состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 года (М.: Наука, 1964. С. 19-21), и перепечатанной в книге «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)», а также по материалам З.М. Лезиной «Г.В. Щипанов. Этапы жизненного пути» и М.Ш. Мисриханова, опубликованным в настоящем сборнике.

В настоящем сборнике опубликована очень интересная статья Владислава Юльевича Рутковского, посвященная краткому описанию жизни и деятельности выдающихся ученых В.С. Кулебакина, Н.Н. Лузина и Б.Н. Петрова, а также их огромной роли в деле отстаивания идей Г.В. Щипанова и развития направления теории автоматического управления, называемого сейчас теорией инвариантности.

Доклад Льва Ильича Розоноэра рассказывает о так называемом «парадоксе Щипанова» и представляет различные точки зрения на этот парадокс, не столько противоречащие, сколько дополняющие друг друга.

В сборнике представлены две статьи Всеволода Михайлови-

ча Кунцевича. В первой статье, касающейся развития теории инвариантности систем управления, раскрываются предпосылки и история проведения совещаний по теории инвариантности в Киеве, роль украинских – ученых академика НАНУ А.И. Кухтенко, члена-корреспондента НАНУ А.Г. Ивахненко, академика АН СССР А.Ю. Ишлинского – в организации и проведении этих совещаний. Дана краткая характеристика работ украинской школы по теории инвариантности. Во второй статье В.М. Кунцевич излагает свой взгляд на проблему теории инвариантности систем управления с высоты сегодняшнего уровня общей теории управления, включая такие, ставшие уже самостоятельными научными направлениями, как теория идентификации, адаптации и робастной устойчивости, и с учетом тех возможностей компьютерной техники, которыми сегодня располагает конструктор систем управления. Эти новые возможности, появившиеся в конце прошлого и в начале нынешнего столетия, открывают, по мнению автора, новые области применения идей теории инвариантности систем управления.

В статье Анатолия Григорьевича Бутковского представлен его взгляд на идеи Г.В. Щипанова по теории компенсации (теории инвариантности). Автор делает попытку объяснить, почему ученые в конце 30-х - 40-х годов прошлого века не приняли гениальную для того времени догадку Г.В. Щипанова. Статья А.Г. Бутковского интересна еще и тем, что в ней ставятся новые задачи, решение которых позволит еще дальше развить идеи теории автоматического управления, высказанные Г.В. Щипановым.

В статье Антона Викторовича Проскурникова и Владимира Андреевича Якубовича приводятся условия существования и полное конструктивное описание универсальных регуляторов в

задаче об инвариантности для линейных систем достаточно общего вида (включающих, в частности, системы, рассмотренные Г.В. Щипановым). Показано, что классическая задача об абсолютной инвариантности разрешима, если выполнено условие, близкое к минимальнофазовости объекта управления, и внешнее воздействие измеряется. В случае, когда объект минимальнофазовый, но внешнее воздействие не измеряется, инвариантность возможно обеспечить лишь приближенно (с произвольной наперед заданной точностью), если внешнее воздействие или одна из его производных – ограниченная функция.

В статье Энгеля Михайловича Солнечного определено место работы Г.В. Щипанова в проблеме синтеза систем управления. Перечислены основные положения теории инвариантности, являющиеся значительным вкладом в теорию автоматического управления. Приведены ошибочные, по мнению автора, положения теории инвариантности Щипанова – неучет возможных отклонений реальной системы от расчетных значений. В заключении автор приводит примеры практического использования идей Г.В. Щипанова и обсуждает перспективы этого использования.

В статье заведующего кафедрой «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., профессора Сергея Феодосьевича Коновалова излагается история образования кафедры «Авиационные приборы» прослеживаются основные этапы ее развития, отмечается большая роль выпускников кафедры (в том числе и аспирантов Г.В. Щипанова) в развитии отечественного авиационного приборостроения и анализируется современное состояние кафедры в свете преемственности традиций кафедры.

В докладе Мисрихана Шапиевича Мисриханова дан крат-

кий анализ идей теории инвариантности, которые были известны в литературе до их формулировки Г.В. Щипановым. Представлены основные этапы становления и развития теории инвариантности в России, проанализированы вклады известных ученых в эту теорию. Проанализированы основные направления развития идей теории инвариантности на практике. Проведена классификация современных систем управления, использующих принципы теории инвариантности.

Представляется, что сборник окажется полезным как для специалистов по теории управления (которые смогут найти в ней еще неисследованные проблемы теории инвариантности), так и всем, интересующимся историей отечественной науки, включая студентов и преподавателей вузов, где рассматриваются вопросы теории управления.

Книга подготовлена к изданию благодаря помощи Российского фонда фундаментальных исследований, который также оказал финансовую помощь в подготовке семинара «70 лет теории инвариантности».

Мне хочется поблагодарить А.П. Курдюкова и всех сотрудников Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, сотрудников кафедр ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана и 301 кафедры МАИ им. Серго Орджоникидзе, принявших активное участие в подготовке данного издания.

Хотелось бы завершить предисловие, процитировав финальные фразы Зои Марковны Лезиной, Вячеслава Ивановича Лезина, составителей книги «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)»: «Мы надеемся, что за сложностью судьбы Георгия Владимировича Щипанова читатель увидит необычайно интересного человека и поймет, почему мы так пристально всматриваемся сейчас, по прошествии стольких лет, в его творче-

ство и его судьбу, стараемся понять, чем интересны полученные им научные результаты и почему именно сегодня и именно нам необходимы опыт и достижения тех трудных лет».

Г.В. Щипанов. Этапы жизненного пути (опыт биографии)

З.М. Лезина

В 2008 году исполняется 105 лет со дня рождения Георгия Владимировича Щипанова. Жизнь Георгия Владимировича была наполнена яркими и очень бурными событиями, так же как и тот период развития страны, в который ему пришлось жить и работать. В его жизни и деятельности удивительно все, - и теория, которая развивалась очень медленно и лишь после 1958 года стала широко известна как теория инвариантности, и предложенная к публикации в 1939 году, но изданная лишь в 2004 году книга Георгия Владимировича, полностью посвященная теории инвариантности, и личность самого Георгия Владимировича Щипанова, талантливого первопроходца с очень непростым характером и сложной судьбой. В его жизни переплелось все - революция, гражданская и отечественная войны, огромный математический талант и стремление к научной деятельности, равно как и ловкое манипулирование людьми со стороны чиновников и искренние разногласия ученых, создание им нового научного направления и невозможность работы над его развитием и внедрением.

Георгий Владимирович Щипанов родился 28 июня 1903 году в г. Бугульме в семье акцизного чиновника (см. Б.А. Рябов. «Георгий Владимирович Щипанов (Краткий биографический

очерк)» (в сб. «Теория инвариантности в системах автоматического управления». Труды совещания. М.: Наука, 1964. С. 19-21)). В связи с переводом отца, в 1910 году семья переехала в Самару. Там, в Первой Самарской гимназии, с 1910 по 1918 годы он получал начальное образование.

В 1918 году, в бурное и очень тяжелое для всего Поволжья в целом и для Самары в частности время, Георгий Щипанов ушел добровольцем в Красную Армию. Ему тогда исполнилось пятнадцать лет. И на протяжении двух лет, с 1918 по 1920 годы он служил в артиллерийских частях 5-й армии. Демобилизован Г.В. Щипанов в апреле 1920 года как не достигший 18-летнего возраста, и в том же году он вернулся в Самару для окончания средней школы.

Осенью 1920 года Г.В. Щипанов поступил на физико-математический факультет Самарского государственного университета, а в 1922 году перевелся на физико-технический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. По окончании этого Института в 1925 году ему было присвоено звание инженера-физика. И по рекомендации его научного руководителя проф. А.А. Фридмана, Г.В. Щипанов получил приглашение на работу в Институте для научно-педагогической деятельности. Однако, в связи со смертью проф. А.А. Фридмана, он ушел из Института и поступил на завод «Авиаприбор» (Москва). В том же году в журнале «Прикладная физика» (т. 1, вып. II, 1925 г.) вышла в свет его первая научная работа «Расчет маятниковых уклономеров».

Г.В. Щипанов проработал на этом заводе в должностях старшего инженера-конструктора, затем начальника научно-конструкторского бюро с августа 1925 по август 1927 года.

В 1927 году он перешел на работу в Научно-испытательный

Институт Военно-Воздушных Сил, где работал в должности старшего инженера и начальника группы летных испытаний. Здесь он создал и внедрил ряд новых приборов и установок.

В 1929 году в связи с болезнью Георгий Владимирович возвратился на завод «Авиаприбор» на должность заведующего конструкторским отделом. Затем по предложению Научного Комитета Управления Военно-Воздушных сил он организовал новый опытный отдел. Он руководил разработкой новых конструкций в качестве начальника этого отдела и главного конструктора завода. Именно здесь, в этом отделе впервые, им были поставлены научные исследования по авиационным приборам.

В 1932 году Г.В. Щипанов был назначен сначала заместителем технического директора, а затем и начальником отдела технического контроля. В том же году им написана работа «Металлические диафрагмы и анероидные коробки» (Журнал точной индустрии. 1932, № 3, 4). Осенью того же года он был приглашен в Ленинградский Институт Гражданского Воздушного Флота на должность приват-доцента. Там он читал курс «Авиационные приборы».

В 1933 году Георгий Владимирович был назначен начальником Особого конструкторского отдела завода «Метрон». И в том же году в «Журнале точной индустрии» он опубликовал свою новую работу «Монтажные детали авиационных приборов» (1933. № 3-6). Одновременно в 1933 году он был избран по конкурсу на должность доцента на Факультет точного приборостроения Московского Высшего Технического Училища им. Н.Э. Баумана. Там, начиная с 1933 года, Щипанов работал над кандидатской диссертацией. С 1934 года, в связи с обострением болезни легких, он полностью перешел на работу в МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1935 году завершил работу над кандидатской

диссертацией. Она вышла из печати книгой «Теория и расчет авиационных приборов» и была утверждена в качестве учебника.

За эту работу Ленинградский Политехнический институт присудил Г.В. Щипанову ученую степень кандидата технических наук. В период с 1935 по 1937 годы Георгий Владимирович организовал новую кафедру, разрабатывал и читал новые курсы и одновременно работал над докторской диссертацией «Гироскопические приборы слепого полета». Эта диссертация была издана в виде книги в 1938 году. По решению Высшей аттестационной комиссии Г.В. Щипанову было присуждено звание профессора.

В 1938 году Г.В. Щипанова пригласили на работу в недавно организованный Комитет автоматики и телемеханики Академии наук СССР, который весной 1939 года был преобразован в Институт автоматики и телемеханики АН СССР. В 1939 году он был назначен на должность руководителя лаборатории Автоматического регулирования этого Института. Там, в этой лаборатории, и развернулись основные работы по теории автоматического регулирования.

Щипанов начал изучать проблемы регулирования в терминах структурной схемы системы регулирования и дифференциальных уравнений, описывающих эти структурные схемы, а не в терминах механики, как это было до него. Именно такой подход и позволил Щипанову отойти от известных схем регулирования и, в частности, рассмотреть в общем виде «многоступенчатые регуляторы» с внутренними обратными связями.

Георгий Владимирович Щипанов был необыкновенно яркой личностью. Он обладал помимо выдающихся способностей умением увлекать и вести за собой других. В его увлеченности и

необыкновенной работоспособности было что-то, что привлекало к нему талантливую молодежь. Так, он стал одним из научных руководителей М.А. Айзермана (вторым руководителем был Н.Н. Лузин), чья дипломная работа в МВТУ была рекомендована для защиты в качестве кандидатской диссертации.

В те годы взаимоотношения между диссертантом и его руководителем напоминали скорее взаимоотношения Учителя и ученика. Эти ученые не просто руководили работой своих учеников, они вели их по жизни, учили, тщательно, как драгоценность, шлифуя грани их талантов и характеров. Они учили их своим трудом, своими поступками, своим творчеством - всей своей жизнью.

Там, в лаборатории Института автоматики и телемеханики, и была завершена Г.В. Щипановым работа по созданию принципиально нового подхода к анализу и разработке новых систем регулирования, результаты которой он и представил в своей новой книге «Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов» в 1939 году. В этой книге Георгий Владимирович приводит результаты по математическому анализу систем регулирования и, в частности, его знаменитый принцип компенсации. Однако, книга не получила положительных отзывов и была отклонена. В том же 1939 году директору ИАТА удалось получить разрешение на издание журнала «Автоматика и телемеханика». И в первом номере этого издания была опубликована статья Г.В. Щипанова «Теория, методы проектирования автоматических регуляторов» (см. журнал «Автоматика и телемеханика», 1939, № 1). Статья содержала вкратце основные положения запрещенной к изданию книги и носила то же название.

Появление в печати работы Щипанова привлекло внимание

к автору и полученным им результатам, а также вызвало бурную научную дискуссию. В этой дискуссии приняли участие такие видные математики, как Л.Н. Михайлов, С.Л. Соболев, Ф.Р. Гантмахер, С.А. Христианович, Н.О. Вознесенский, Л.О. Николаи и др. Первое время эта дискуссия, несмотря на остроту, носила чисто научный характер. Однако, 16 мая 1941 года в своей передовой статье «Наука и промышленность» газета «Правда» неожиданно обрушилась с острой критикой на научно-исследовательские учреждения. В частности, там говорилось, что эти учреждения «сплошь и рядом оторваны от нужд народного хозяйства, в некоторых из них господствует рутинная, застойная, гнездится лженаука».

Вот, например, Институт автоматики и телемеханики Академии Наук СССР. Здесь долгое время гуляла лженаучная, абсурдная теория в области автоматики регулирования... И далее «надо полагать, что актив Академии наук, который соберется в ближайшие дни, будет способствовать развертыванию самокритики и поможет приблизить институты Академии Наук к запросам социалистической экономики»...

Щипанова обвинили в том, что он пытается «путем математических спекуляций создать фантастический «универсальный и идеальный» регулятор - нечто вроде вечного двигателя». Видимо, эта статья привлекла внимание, и была создана специальная Комиссия Президиума Академии наук СССР по обсуждению и оценке работы Г.В. Щипанова. Руководителем этой комиссии был назначен вице-президент АН СССР академик О.Ю. Шмидт.

В 1941 году в № 2 журнал «Автоматика и телемеханика» опубликовал выводы этой Комиссии и предложения директора ИАТ АН СССР академика В.С. Кулебакина по изменению формулировки, а также особое мнение академика Н.Н. Лузина,

считавших «необходимым дальнейшие изыскания» (Автоматика и телемеханика, 1941, № 2, с. 131-132).

К сожалению, точку на этом поставить не удалось. В журнале «Большевик» (№ 9, 1941, с. 90-96) появилась статья под названием «Лженаучные работы Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР». Один из выводов этой статьи гласит: «Лженаучная деятельность Института автоматики и телемеханики в области теории регулирования приносит огромный вред нашей стране. Эта деятельность дезориентирует инженеров-практиков, мешает развитию теории регулирования и дискредитирует советскую науку и высшее научное учреждение страны – Академию наук СССР. Не пора ли положить предел этой деятельности Института автоматики и телемеханики».

В результате все этой «деятельности» лаборатория Г.В. Щипанова была ликвидирована, документы и материалы изъяты, а сам Г.В. Щипанов тяжело заболел и оставил работу в Институте автоматики и телемеханики. Неопубликованный труд Г.В. Щипанова считался безвозвратно утерянным.

Однако, судьба этой книги, где были подробно изложены все результаты автора в области теории инвариантности (более подробно и чем в статье в первом номере журнала «Автоматика и телемеханика», 1939 г.), заслуживает того, чтобы о ней рассказать отдельно.

В 1992 году, будучи уже тяжело больным, М.А. Айзерман полностью разобрал все материалы, письма, документы, хранившиеся в его архиве. Среди всех этих материалов он выделил в особую папку и оставил на видном месте, на своем письменном столе, те материалы, на которые он хотел обратить особое внимание своих близких и коллег.

Там находились те научные труды, которые представлялись

М.А. Айзерману наиболее ценными, основополагающими для науки, а также материалы и документы, связанные с судьбами их авторов и объясняющие всю сложность обстановки, в которой они работали. Важное место среди этих документов занимала папка под названием «Г.В. Щипанов». Тексты некоторых документов и материалов, которые хранились в этой папке, было нелегко разобрать. Основной труд Георгия Владимировича Щипанова был перепечатан на простой пишущей машинке тех лет, а формулы вписывались от руки и не полностью - чаще всего только начало, а затем - многоточие и конец формулы. Видимо, предполагалось, что читать будут профессионалы, а они во всем разберутся. Копировать, а уж тем более хранить такую научную литературу - своеобразный научный «самиздат» - было настолько рискованно, что даже самые близкие люди не всегда о ней знали.

Кроме неизданной книги Щипанова, в этой папке хранились также материалы дискуссии, которая развернулась, начиная с 1939 года, на страницах научных журналов, и в которой приняли участие многие известные ученые. Там также были копии материалов и документов, непосредственно связанных с работой двух комиссий Президиума АН СССР по «Щипановскому вопросу», и с теми страшными днями, когда научная дискуссия приняла идеологический оттенок и вылилась на страницы общеполитических газет и журналов. Именно эти документы и материалы, уходя из жизни, приводил в порядок Марк Аронович Айзерман, уже твердо веря, что откроется реальная возможность для их издания. Несмотря на то, что многие из этих материалов были опубликованы ранее, они никогда не издавались отдельной книгой. А поиск по различным научным изданиям даже и сегодня довольно сложен и отнимает много времени и сил. М.А. Айзер-

ман понимал, что сам это сделать уже не сможет, и оставлял родным, друзьям и коллегам сохраненный им труд Георгия Владимировича Щипанова. Лишь на краткий миг пересеклись их судьбы, всего несколько месяцев, а след от этой встречи остался на всю жизнь. Разница в их возрасте была невелика - всего 10 лет.

А в том далеком 1941 году они расстались. Айзерман, будучи докторантом и имея «броню», ушел добровольцем на фронт, а Щипанов, несмотря на тяжелую болезнь, вновь приступил к работе. В декабре 1941 года он участвовал в организации приборного факультета Московского авиационного института и стал первым деканом этого факультета. Тогда же им была создана новая кафедра Авиационного приборостроения и автоматики. За большую работу в эти годы Г.В. Щипанов был награжден Орденом Красной Звезды. Там же, в Московском авиационном институте, Г.В. Щипанов, кроме чтения новых курсов, проводит ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с реализацией принципа инвариантности.

В конце 1949 года проф. Г.В. Щипанов оставил работу в Московском авиационном институте им. Серго Орджоникидзе. Последние годы он тяжело болел. Однако, по свидетельству Б.А. Рябова, «не было дня, чтобы к нему не приходили его ученики, и у постели больного не обсуждались бы самые острые проблемы молодой науки».

Георгий Владимирович Щипанов ушел из жизни весной 1953 года, не дожив несколько недель до своего пятидесятилетия.

Но сложная судьба книги, равно как и всей теории Щипанова, продолжалась. На Втором Всесоюзном совещании по автоматическому регулированию в 1953 году проходили активные прения, в которых В.С. Кулебакин и Б.Н. Петров вновь

привлекли внимание ученых к «опальной» теории Щипанова. Выступление Б.Н. Петрова в прениях на этом совещании было очень ярким и запомнилось многим. (Академик В.С. Кулебакин еще в 1948 году опубликовал статью, в которой стремился привлечь внимание ученых к результатам, полученным проф. Г.В. Щипановым.) А в 1955 году в сборнике Научного студенческого общества была опубликована статья студента-старшекурсника Л.И. Розоноэра, по работе, выполненной им под руководством проф. Е.Г. Дудникова. Она называлась «Некоторые вопросы связного регулирования», которая посвящена, в частности, «устойчивости систем с компенсацией».

Постепенно эта тема привлекала к себе все больше исследователей. И уже в 1958 году в Киеве состоялось Совещание по теории инвариантности и ее применению в автоматических устройствах (Киев, 16-20 октября 1958 г.). Это Совещание выработало и опубликовало Решение Совещания (см. «Труды Совещания по теории инвариантности и ее применению в автоматических устройствах». М., 1959, с. 375-377). В пункте 7 этого документа говорится: «В связи с тем, что решение Президиума Академии наук СССР от 1 апреля 1941 г. о выводах специальной комиссии по работе проф. Г.В. Щипанова задержало развитие теории и практики построения автоматических систем, использующих компенсацию возмущающих воздействий и различные принципы инвариантности и не способствует должному и необходимому прогрессу этого важного раздела автоматики в настоящее время, просить Президиум Академии наук СССР пересмотреть свое решение в части ошибочных заключений упомянутой комиссии».

И в результате, была назначена вторая комиссия по «Щипановскому вопросу». Она называлась «Комиссия в связи с

дискуссией по теории инвариантности». В эту комиссию были назначены академики А.А. Дородницын, А.Ю. Ишлинский, член-корреспондент Б.Н. Петров. В Заключении, выработанном этой комиссией (от 21 мая 1959 г.), в частности, говорилось: «Таким образом, сформулированное проф. Г.В. Щипановым «условие компенсации» или «условие инвариантности» явилось новым расчетным соотношением, которое с успехом может использоваться при проектировании определенного класса динамических систем». Именно на основании этого Заключения Бюро Президиума Академии наук приняло Постановление «О решении Совещания по теории инвариантности и ее применению в автоматических устройствах» (от 12 февраля 1960 г. № 134), где, в частности, говорится: «Одобрить Заключение Комиссии Президиума АН СССР ...». И, наконец, в 1966 году в Комитете по делам изобретений и открытий при Совете министров СССР было зарегистрировано открытие на имя Г.В. Щипанова. Свидетельство на открытие имеет приоритет открытия «Апрель 1939 г.» (№ 44, заявка № ОТ-14-10-131 от 11 июня 1966 года). Неизданную при жизни автора книгу «Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов» удалось, в силу многих сложных обстоятельств, издать только в 2004 году. Она вошла в монографию «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)» (М.: Физматлит, 2004, с. 20-140). К сожалению, она уже не несет в себе научной новизны и принципиальных не опубликованных ранее открытий. Однако, она, несомненно, интересна и полезна всем, кто серьезно интересуется историей развития науки.

Список литературы

- [1] Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 4-37.
- [2] Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы) / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004. 428 с.
- [3] Рябов Б.А. Георгий Владимирович Щипанов (краткий биографический очерк) // В в сб.: «Теория инвариантности в системах автоматического регулирования». М.: Наука, 1964. С. 19-21.
- [4] Розоноэр Л.И. Айзерман и работы Г.В. Щипанова // В кн.: «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)». М.: Физматлит, 2004.
- [5] Айзерман М.А. Теория автоматического регулирования и управления в Институте автоматике и телемеханики - Институте проблем управления (1939-74 гг.). (Очерк развития основных идей) // Проблемы управления. Сб. статей. М.: Институт проблем управления, 1975.
- [6] Выписка из протокола заседания Президиума Академии наук СССР от 1 апреля 1941 года // Автоматика и телемеханика. 1941. № 2. С. 131.
- [7] Выводы комиссии Президиума Академии наук СССР по обсуждению и оценке работы профессора Г.В. Щипанова «Авторегулирование систем с несколькими степенями свободы» // Автоматика и телемеханика. 1941. № 2. С. 131-132.

- [8] Решение совещания по теории инвариантности и ее применению в автоматических устройствах (Киев, 16-20 октября 1958 г.) // В сб.: «Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах». Труды совещания. М., 1959. С. 375-377.
- [9] Постановление Президиума академии наук Союза ССР // Там же. С. 379.
- [10] Заключение комиссии в связи с дискуссией по теории инвариантности // Там же. С. 380-382.

Выдающиеся ученые В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин, Б.Н. Петров и теория инвариантности

В.Ю. Рутковский

В 1938 г. вышла книга Георгия Владимировича Щипанова «Гироскопические приборы слепого полета» [1], в 1939 г. в первом номере журнала «Автоматика и телемеханика» была опубликована его статья «Теория и методы проектирования автоматических регуляторов» [2]. В книге сформулирована задача компенсации вынужденной составляющей движения объекта, в статье были сформулированы «условия полной компенсации влияния возмущающей силы на регулируемый параметр». Хорошо известна более чем жесткая критика условий компенсации Г.В. Щипанова. Одним из первых ученых, кто понял идею условий компенсации, и первым, кто встал на защиту Г.В. Щипанова, был основатель Института автоматики и телемеханики АН СССР (ныне Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН) академик В.С. Кулебакин.

Виктор Сергеевич Кулебакин (1891-1970) родился в Москве в семье учителей [3]. Он окончил коммерческое училище (1909 г.) с золотой медалью и поступил в МВТУ. Здесь он встретился с Карлом Адольфовичем Кругом, который на многие годы стал его учителем и определил основные научные интересы всей последующей деятельности Виктора Сергеевича. После окончания

МВТУ в 1914 г. Виктор Сергеевич был оставлен в училище на преподавательскую и научную работу. Но началась война. Виктора Сергеевича призвали в армию. Он поступил Гатчинскую школу пилотов и, окончив ее, получил «Права пилота-авиатора». Так они тогда назывались. Виктор Сергеевич был одним из первых военных летчиков в России, и как летчик участвовал в первой мировой войне.

Еще будучи в армии, Виктор Сергеевич по приглашению Николая Егоровича Жуковского начал преподавать на теоретических курсах авиации.

В 1918 г. Кулебакин вернулся в МВТУ. После выделения из МВТУ Энергетического института Кулебакин перешел на работу в этот новый институт, организовал там кафедру и лабораторию. Эту кафедру окончили студенты, многие из которых стали впоследствии крупными учеными и инженерами. Среди них был Борис Николаевич Петров, будущий вице-президент АН СССР.

В.С. Кулебакин оказал также большое влияние на становление и развитие Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского, где он создал факультет и кафедру, с которой он был тесно связан до конца своей жизни.

Активное участие В.С. Кулебакин принимал в решении многих практически важных задач. Он участвовал в электрооборудовании Подмосквовного каменноугольного бассейна, выполнял ряд важных заданий по разработке плана ГОЭЛРО, принимал участие в налаживании производства электрооборудования для самолетов, состоял постоянным членом Научно-технического комитета Военно-воздушного флота и др.

Первые работы Виктора Сергеевича по теории автоматического регулирования [4] появились в 1930-1940 гг. Он предложил

теорию вибрационных регуляторов для электрических машин, ввел в рассмотрение простейшую интегральную оценку в задаче исследования качества процессов регулирования и дал метод ее вычисления, впервые поставил и решил задачу выбора коэффициентов регулятора из условия заданных значений корней характеристического уравнения. Таким образом, в то время, когда все специалисты по управлению (как в нашей стране, так и за границей) рассматривали лишь задачу «устойчивости системы регулирования», В.С. Кулебакин поставил задачу синтеза регулятора.

Институт автоматики и телемеханики В.С. Кулебакин создал в 1939 г. Нужны были огромная энергия В.С. Кулебакина, его талант, его высокий авторитет в Академии Наук, а в тот год он был избран академиком, чтобы решить задачу создания нового института в те сложные для страны предвоенные годы.

Первые годы становления Института оказались очень сложными. В то время было очень мало специалистов по автоматическому управлению. С целью подготовки кадров по управлению В.С. Кулебакин пригласил на работу в Институт крупного математика академика Н.Н. Лузина (1880-1950).

Николай Николаевич Лузин родился в Томске [5]. Окончил Московский Университет и долгое время работал в этом Университете сначала приват-доцентом, а затем профессором. По ходатайству Университета был командирован в Геттинген и Париж. В 1929 г. был избран действительным членом Академии наук СССР. Научные работы Н.Н. Лузина относятся к метрической теории функций, к теории функций комплексного переменного, к области дескриптивной теории множеств, к теории Рикье-Жане в дифференциальных уравнениях. Н.Н. Лузиным проведены также интересные исследования по решению

векового уравнения, по приближенному интегрированию дифференциальных уравнений и др.

В 1936 г. Н.Н. Лузин был объявлен «врагом в советской маске» [6]. Скорее всего, непосредственно это было связано со следующими событиями. В 1930 г. Н.Н. Лузин возвратился в Союз из Сорбонны в ореоле мировой славы. В это время в СССР только что прошел процесс над Промпартией, и высокие правительственные и партийные деятели решили использовать авторитет Н.Н. Лузина. Они предложили ему осудить в печати участников Промпартии. В то время считалось необходимым, чтобы свое осуждение врагам народа в печати выразили колхозники, рабочие, ученые и т.д. Н.Н. Лузин отказался сделать это, ссылаясь на то, что он долгое время отсутствовал в СССР, и поэтому не знает их враждебной деятельности. Вскоре многие наши видные математики и физики написали гневное письмо ученым Франции, в котором осуждали империалистов Франции, якобы готовивших интервенцию в СССР. Н.Н. Лузин отказался подписать и это письмо. По-видимому, эти поступки Н.Н. Лузина и припомнили ему в 1936 г., когда началась травля создателя Московской математической школы – «Лузитании», как тогда ее называли.

От физического уничтожения этого «врага народа» спас, по-существу, председатель созданной по делу Н.Н. Лузина специальной комиссии Г.М. Кржижановский. Однако Лузина отовсюду уволили, и он попал в тяжелое материальное положение.

В.С. Кулебакин, хорошо понимая, что развитие теории управления (тогда автоматического регулирования) не может быть успешным без высокой математической подготовки ученых в области автоматики, принял Н.Н. Лузина в организованный им Институт, несмотря на категорические возражения высоких пар-

тийных органов. На такой поступок В.С. Кулебакину надо было иметь гражданское мужество. Как уже было сказано выше, В.С. Кулебакин первым встал на защиту идеи Г. В. Щипанова о компенсации влияния возмущений на регулируемую координату системы управления. В статьях, опубликованных им в 1940 г. в журнале «Автоматика и телемеханика» [7], [8], которые были подвергнуты разгромной критике в журнале «Большевик» [9], В.С. Кулебакин сделал попытку дать некоторое обоснование «условиям компенсации» Г.В. Щипанова. Однако, как и автор идеи о компенсации, В.С. Кулебакин рассматривал точное выполнение условий компенсации в системах, построенных по принципу отклонения.

Н.Н. Лузин, по его собственным словам, ничего не понимающий в технике, видел, что В.С. Кулебакин в связи с дискуссией по условиям компенсации и защитой им Г.В. Щипанова оказался в тяжелой ситуации. Пытаясь помочь В.С. Кулебакину, он в статье [5] с безупречной математической строгостью рассматривает систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, в первом уравнении которой в правой части стоит произвольная аналитическая функция времени, и находит необходимые и достаточные условия независимости первой координаты системы от этой функции. Эти условия – аналог условий компенсации Г.В. Щипанова – автор называет «критерием абсолютной инвариантности». Таким образом, Н.Н. Лузин вводит термин «инвариантность». Впоследствии именно этот термин получил широкое распространение, а раздел теории управления, посвященный системам с компенсацией возмущений, получил название теории инвариантности.

Следует заметить, что работа Н.Н. Лузина переросла свою первоначальную задачу и явилась фундаментальной работой в

области матричной теории дифференциальных уравнений. Работа Н.Н. Лузина была весьма актуальна. В то время многие авторы применяли символический метод решения дифференциальных уравнений, не заботясь о его корректности, распространяли этот метод на особые случаи, и даже на случаи, когда исходная система вырождалась в другую. По-видимому, авторы помнили «шутливое замечание Хависайда о том, что незнание всех тонкостей пищеварения не заставляет его отказываться от хорошего обеда» [11].

Как известно, Комиссия Президиума АН СССР под председательством вице-президента О.Ю. Шмидта пришла к выводу, что условие компенсации Г.В. Щипанова «математически приводит к абсурдным выводам и не соответствует никаким реально осуществимым регуляторам» [12]. В.С. Кулебакин предложил другую формулировку этой фразы, которую Комиссия зафиксировала как особое мнение. «Враг в советской маске» Н.Н. Лузин не побоялся новых гонений, и в результате в выводах Комиссии было записано: «Присоединяюсь к особому мнению академика В.С. Кулебакина, считаю по пункту 2 необходимыми дальнейшие изыскания – академик Н.Н. Лузин» [12]. Надо отметить, что Н.Н. Лузин и В.С. Кулебакин эти изыскания выполнили.

В 1946 г. Н.Н. Лузин совместно с П.И. Кузнецовым поставил и решил задачу об инвариантности с точностью до *epsilon* [13]. При этом авторы связали величину *epsilon* с высотой многочлена, который соответствует минору, определяющему условия абсолютной инвариантности. Понятие «инвариантность с точностью до *epsilon*» сыграло огромную роль в развитии теории инвариантности и ее применении при синтезе систем автоматического управления.

В 1948 г. В.С. Кулебакин опубликовал работу «О приме-

нимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах» [14]. В этой статье автор поставил вопрос о том, можно ли в реальных физических системах «создать условия инвариантности» или это условие «в действительности невыполнимо и представляет лишь математическую абстракцию». Автор доказал, что эти условия не абстракция, они лежат в основе принципа, на котором построены и действуют многие системы в измерительной технике и автоматике. К числу таких систем, как было указано В.С. Кулебакиным, относятся компенсационные и электрические мостиковые схемы. В этой же работе В.С. Кулебакин, развивая идеи Н.Н. Лузина, поставил вопрос о нахождении условий, при выполнении которых любая координата в линейной системе становится независимой от одного, нескольких или всех одновременно действующих на систему возмущений.

Следующей вехой в развитии теории инвариантности явилось выступление Б.Н. Петрова в прениях по докладу В.С. Кулебакина [15] на II Всесоюзном совещании по теории автоматического регулирования, состоявшемся в 1953 г.

Ученик В.С. Кулебакина и Н.Н. Лузина, впоследствии академик и вице-президент АН СССР, Борис Николаевич Петров (1913-1980) родился в Смоленске [16]. Его родители умерли рано. Заботы о воспитании Бориса Николаевича в значительной мере легли на сестер его родителей. После окончания школы Б.Н. Петров сначала работал некоторое время счетоводом в колхозе, затем в Москве – токарем. Высшее образование он получил, окончив в 1939 г. Московский энергетический институт, где он встретился с В.С. Кулебакиным. По предложению В.С. Кулебакина Борис Николаевич был направлен на работу в Комитет телемеханики и автоматики АН СССР, на базе которого несколь-

ко позже В.С. Кулебакиным был создан Институт автоматики и телемеханики. В этом Институте Б.Н. Петров работал до последних дней своей жизни.

Первые работы молодого ученого были посвящены автоматизации процесса непрерывной разливки металла из мартена, автоматической браковки гильз. Б.Н. Петров создал метод преобразования структурных схем систем управления, им были проведены интересные исследования в области интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, в области нелинейных сервомеханизмов. Под его руководством и при его непосредственном участии развивалась теория систем с переменной структурой, теория адаптивных систем с моделью, теория координатно-параметрического управления, теория бортовых терминальных систем, теория управления деформируемыми космическими аппаратами.

В течение всей своей творческой жизни ученого и инженера Б.Н. Петров уделял пристальное внимание проблемам управления двигательными установками баллистических ракет и ракет-носителей. Работы в этой области ввели его в круг творцов практической космонавтики. Полученные им и его учениками результаты носили основополагающий характер, были реализованы, а созданные на их основе системы управления стали составной частью всех крупных жидкостных ракет разработки Главных конструкторов С.П. Королева, М.К. Янгеля, В.Н. Челомея, В.Ф. Уткина.

Теоретические результаты Б.Н. Петрова нашли применение при создании адаптивных систем управления ракет Главного конструктора И.С. Селезнева, при создании систем предварительного успокоения искусственных спутников Земли с гравитационной системой ориентации, при создании систем управле-

ния спутников связи на геосинхронной орбите серии «Радуга», «Горизонт» и спутников непосредственного телевидения серии «Экран».

Существенный научный вклад внес Б.Н. Петров в создание многоместных пилотируемых кораблей-спутников, автоматических станций, запускаемых к Луне, систем мягкой посадки автоматических аппаратов на Луну, а также в осуществление международного проекта «Союз-Аполлон» (СССР-США). Б.Н. Петров был одним из организаторов и первым председателем Совета «Интеркосмос».

Итак, в 1953 г. Б.Н. Петров в работе [15] решает вопрос о необходимых (но не достаточных) условиях реализации условий абсолютной инвариантности. Он приходит к выводу, что для этого нужно иметь в системе управления, по крайней мере, два канала воздействия между точками приложения возмущения и измерения регулируемой координаты. Следует заметить, что представить этот результат, известный теперь как «принцип двухканальности Б.Н. Петрова», на указанном выше Советании в качестве доклада не удалось. Это было результатом опасения со стороны Оргкомитета Советания обсуждать «крамольную» тему. В связи с этим Б.Н. Петров взял на себя смелость выступить в прениях, и его выступление, вызвавшее «бурю» в кулуарах советания, Оргкомитет вынужден был опубликовать в Трудах Советания.

Статьи В.С. Кулебакина [14] и Б.Н. Петрова [15] опровергли утверждения критиков теории инвариантности о лженаучном ее характере и открыли возможность развития этой теории, возможность ученым публиковать новые результаты, касающиеся этой теории в научных изданиях, открыли возможность организации советаний по теории инвариантности.

Первое Советание по теории инвариантности состоялось в Киеве в 1958 г. В его организации помимо В.С. Кулебакина и Б.Н. Петрова приняли активное участие академик А.Ю. Ишлинский и академики Украинской академии наук А.И. Кухтенко, А.Г. Ивахненко, а также ряд других известных ученых. Советание обратилось в Президиум АН СССР с просьбой пересмотреть свое решение от 1 апреля 1941 г. В результате была создана комиссия в составе А.А. Дородницына, А.Ю. Ишлинского и Б.Н. Петрова, которая объективно оценила работу Г.В. Щипанова. Заключение комиссии было одобрено Президиумом АН СССР 12 февраля 1960 г. В 1966 г. работа Г.В. Щипанова была признана открытием с приоритетом от апреля 1939 г.

Начиная с 1958 г. теория инвариантности начала быстро развиваться. Остановимся здесь только на работах В.С. Кулебакина и Б.Н. Петрова.

Развивая постановку задачи об инвариантности, В.С. Кулебакин сформулировал понятие избирательной (или селективной) инвариантности. Как показал автор, принцип избирательной инвариантности лежит в основе систем так называемого автономного регулирования. Но при этом, поскольку при автоматическом управлении многими координатами в системах, в основу которых положен принцип избирательной инвариантности, каждая регулируемая координата освобождается от влияния лишь некоторых возмущений, а не всех, то, естественно, эти системы должны иметь еще и регуляторы, действующие по отклонению. В связи с этим В.С. Кулебакин ставит вопрос о создании комбинированных систем, работающих по замкнутому и разомкнутому циклам. Автор дал глубокий анализ достоинств и недостатков регуляторов, работающих только по принципу отклонения, и регуляторов, работающих только по разомкнутому

циклу. Затем им были подробно рассмотрены вопросы теории комбинированных систем и показано, что введение дополнительных воздействий по нагрузке не нарушает условий устойчивости замкнутой системы. Автором было показано, что в системах с комбинированным принципом управления в результате дополнительного воздействия по возмущению может быть значительно повышено быстродействие, сохранена устойчивость и достигнуто лучшее качество процессов регулирования. Свои теоретические исследования В.С. Кулебакин иллюстрировал на примере системы управления авиационным двигателем. При применении винта изменяемого шага техника пилотирования упростилась и стала возможной работа винтомоторной группы на оптимальных режимах. Применение регуляторов, действующих лишь по принципу отклонения, вызывало появление опасных кратковременных повышений скорости при резкой подаче газа и не обеспечивало необходимой приемистости двигателя. Когда же была установлена связь между винтом и сектором газа, т.е. введено воздействие по нагрузке, удалось получить достаточно совершенную систему регулирования, устранить «забросы» скорости, добиться требуемой приемистости двигателя.

Развивая идеи инвариантности, В.С. Кулебакин предложил новый тип условий инвариантности, когда минор, соответствующий рассматриваемому возмущению (или операторный полином при возмущении $f(t)$, обозначенный через $X(D)$, $D = \frac{d}{dt}$), не равен нулю, а произведение $X(D)$ на $f(t)$ равняется нулю. Это возможно, когда $f(t)$ – заданная функция времени. На этой основе автор предложил и развил теорию $K(D)$ -изображения функций.

В одной из последних работ В.С. Кулебакина по теории инвариантности, написанной им совместно с О.И. Ларичевым, содер-

жалось обобщение понятия селективной инвариантности. Было введено понятие полиинвариантности, под которой понималась инвариантность нескольких координат от одного возмущения или одной координаты от нескольких возмущений. Авторы доказали, что в линейной системе n -го порядка возможно обеспечить инвариантность одной координаты относительно $(n - 2)$ возмущений или $(n - 2)$ координат относительно одного возмущения.

Б.Н. Петров, несмотря на огромную занятость, связанную с проектированием систем управления ракет и объектов космической техники, в течение всей своей жизни уделял большое внимание развитию теории инвариантности [18].

В работах Б.Н. Петрова рассмотрена возможность реализации условий инвариантности в нелинейных системах, относящихся к классу двух- и многоканальных систем. Показано, что в некоторых частных, но широко распространенных случаях наличие нелинейностей и переменных параметров в любых участках системы, кроме параллельных каналов, не влияет на выполнение условий инвариантности. Если нелинейную характеристику имеет один из элементов, входящий в параллельный канал, то инвариантность можно обеспечить, введя нелинейную обратную связь.

В ряде работ получены условия инвариантности и исследована возможность их физической реализуемости в системах с запаздыванием. Доказано, что при синтезе систем регулирования взаимосвязанных координат принцип инвариантности может быть применен при выборе параметров перекрестных обратных связей и воздействий на регуляторы по несобственным регулируемым координатам и при выборе параметров цепей дополнительных воздействий на регуляторы по собственным возмущениям. Рассмотрена задача инвариантности в системах с

косвенным измерением возмущений. Показано, что вывод об эквивалентности систем с косвенным измерением возмущения («вилкой») и комбинированных систем (двухканальных) является несостоятельным.

С позиций теории инвариантности Б.Н. Петровым совместно с А.И. Кухтенко были рассмотрены многомерные системы, использующие принцип регулирования по отклонениям. Показано, что и в многомерных системах идея двух каналов является руководящей при создании инвариантных и автономных систем.

Б.Н. Петровым и В.Ю. Рутковским был определен новый класс систем, обладающих двукратной инвариантностью. Это системы, в которых условия инвариантности по отношению к возмущению одновременно являются условиями инвариантности по отношению к параметрическим возмущениям объекта управления.

Б.Н. Петровым совместно с его многочисленными учениками получены основополагающие результаты по синтезу алгоритмов управления с учетом условий инвариантности для многих классов систем управления. В частности, предложены методика синтеза основного контура адаптивных систем с моделью и алгоритмы управления, обеспечивающие в данном классе систем свойство двукратной инвариантности. Рассмотрены настраиваемая и асимптотически настраиваемая инвариантность в теории адаптивных систем, задачи инвариантности в теории систем с переменной структурой, в информационной теории управления, в теории измерительной техники.

Новые типы системы управления, созданные на основе теории инвариантности под руководством Б.Н. Петрова и при его непосредственном участии, реализованы в промышленности.

В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин и Б.Н. Петров, сыгравшие клю-

чевую роль в реабилитации и развитии идеи Г.В. Щипанова о компенсации возмущений в системах управления, ныне уже ушли из жизни. Мне хотелось бы сказать несколько слов о замечательных человеческих качествах этих прекрасных ученых.

С Виктором Сергеевичем Кулебакиным я встречался в связи с подготовкой второго, третьего и четвертого Совецаний по теории инвариантности и при редактировании трудов этих Совецаний. Это был высокообразованный, интеллигентный и очень добрый человек. Он говорил всегда негромко, речь его была безукоризненно правильной. Он мне много рассказывал о дискуссии по статье Г.В. Щипанова. Я слушал его выступление на эту же тему на первом Совецании по теории инвариантности. Меня поразило, как мягко, без озлобления он говорил о тех критиках, которые преподнесли ему так много неприятностей, угрожающих в то время расстрелом. И один эпизод, характеризующий его как учителя, как воспитателя. После завершения III Всесоюзного совещания по теории инвариантности участники собрались в ресторане на товарищеский ужин. Виктор Сергеевич произнес тост за здоровье и успехи своего ученика Бориса Николаевича Петрова. При этом он сказал, что он счастлив, что Борис Николаевич как ученый перерос его, сделал для развития науки о регулировании больше, добился в жизни большего. И в этом тосте человека, который всегда говорил искренне и никогда не кривил душой, ярко отразилось отеческое отношение Виктора Сергеевича к своим многочисленным ученикам.

Николая Николаевича Лузина мне не представилась возможность знать лично. Однако известные мне факты говорят о многом. Николай Николаевич, как и В.С. Кулебакин, любил своих учеников. Он буквально пестовал студентов и молодых ученых в «Лузитании». По воспоминаниям М.А. Айзермана на

заседании Ученого совета, посвященном 30-летию Института, Н.Н. Лузин в течение двух лет занимался с ним математикой персонально, приглашал его для занятий к себе домой. Но, к сожалению, еще до начала войны их отношения изменились, и занятия были прекращены.

Н.Н. Лузин был учителем Б.Н. Петрова. После женитьбы Борису Николаевичу фактически негде было жить (он жил с сестрой в очень маленькой комнате, отгороженной от кухни коммунальной квартиры временной перегородкой). Николай Николаевич отдал Борису Николаевичу комнату в своей трехкомнатной квартире.

Сохранилось письмо Н.Н. Лузина от 23 августа 1949 г., в котором он писал Борису Николаевичу: «Не получая от Вас столь долгое время известий, я уже начал думать, что административная жизнь (Борис Николаевич возглавлял в то время Институт автоматики и телемеханики, а Николай Николаевич летом жил на даче) отнесла Вас от научного углубления, и искренне пожалел Вас, ибо администрирование сушит людей и старит их не по годам, тогда как научное и художественное творчество молодит. А ведь Вы молоды». Это письмо ярко характеризует Н.Н. Лузина как человека, как педагога.

Бориса Николаевича Петрова многие из тех, кто еще до настоящего времени работает в институтах, конструкторских бюро, промышленных организациях, помнят очень хорошо. Мне выпало счастье быть студентом, аспирантом Бориса Николаевича, иметь его научным консультантом по докторской диссертации и работать с ним в течение 28 лет.

Невозможно перечислить всех, кому в жизни помог Борис Николаевич. Он устраивал на работу заканчивающих институты студентов, родители которых были репрессированы, очень

многим помог решить вопросы прописки в Москве, получения квартиры, устроить больных коллег или их родственников в больницу и т. д.

С 1947 по 1951 гг. Б.Н. Петров был директором Института автоматики и телемеханики. Уже с 1947 г. в СССР началась борьба с «космополитами». Во многих академических и учебных институтах под этим предлогом были уволены многие ученые и инженерно-технические сотрудники. Но пока Б.Н. Петров был директором, из Института автоматики и телемеханики под предлогом борьбы с «космополитизмом» не был уволен ни один сотрудник. В 1951 г. М.А. Айзерман был отстранен от заведования лабораторией № 1, и приказом директора Института В.А. Трапезникова новым заведующим был назначен Б.Н. Петров. В последующие 1951-1953 годы, когда в Институте автоматики и телемеханики шли увольнения, из лаборатории № 1 ни один сотрудник в связи с борьбой с космополитизмом не был уволен. Как вспоминал М.А. Айзерман, только Борис Николаевич смог сохранить лабораторию в полном составе.

Б.Н. Петров был очень мягким, добрым человеком, но в то же время очень мужественным и смелым, когда надо было защищать людей, попавших в трудные жизненные ситуации.

И еще несколько слов о традиции старых Учителей, Учителей с большой буквы, помогать своим ученикам. Елена Карловна Круг рассказывала мне один эпизод. В начале гражданской войны царского летчика В.С. Кулебакина собирались арестовать и, возможно, расстрелять, о чем ему стало известно. Он приехал на дачу к своему учителю К.А. Кругу, и тот долгое время скрывал на даче своего ученика, естественно, с риском для своей жизни.

Заканчивая эту статью, хочу отметить, что В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин, Б.Н. Петров строго придерживались прекрасной

традиции помогать своим ученикам и коллегам.

Список литературы

- [1] Щипанов Г.В. Гироскопические приборы слепого полета. М.: Оборонгиз, 1938.
- [2] Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 4-37.
- [3] Фролов В.С. Виктор Сергеевич Кулебакин. М.: Наука, 1980.
- [4] Рутковский В.Ю. Работы академика В.С. Кулебакина в области теории автоматического регулирования // В сб.: «Автоматика и электромеханика». М.: Наука, 1973.
- [5] Н.Н. Лузин. Материалы к библиографии ученых СССР. Серия математики. Вып. 3. 1948.
- [6] Дело академика Николая Николаевича Лузина / Отв. Ред.: С.С. Демидов, Б.В. Левшин. Ин-т истории Естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН; Архив РАН. С-Пб. РХГИ. 1999.
- [7] Кулебакин В.С. Общие основы автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1940. № 4.
- [8] Кулебакин В.С. Об определении основных параметров автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1940. № 6.

- [9] Соболев С., Винтер А., Христианович С., Вознесенский И., Гантмахер Ф. Лженаучные работы Института автоматизации и телемеханики Академии наук СССР // Большевик. 1941. № 9.
- [10] Лузин Н.Н. К изучению матричной теории дифференциальных уравнений // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5.
- [11] Рябов Б.А. Возникновение, развитие и состояние теории инвариантности // В кн.: «Теория инвариантности в системах автоматического управления. Тр. Второго Всесоюзного совещания, состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 года». М.: Наука, 1964.
- [12] Выводы комиссии Президиума Академии наук СССР по обсуждению и оценке работы профессора Г.В. Щипанова «Авторегулирование систем с несколькими степенями свободы» // Автоматика и телемеханика. 1941. № 2.
- [13] Лузин Н.Н., Кузнецов П.И. К абсолютной инвариантности и инвариантности до ϵ в теории дифференциальных уравнений // Докл. АН СССР. 1946. Т. 51, № 4, 5; 1951. Т. 80, № 3.
- [14] Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // Докл. АН СССР. 1948. Т. 60. № 2.
- [15] Петров Б.Н. О применимости условий инвариантности // Тр. II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. Изд-во АН СССР. 1955. Т. II. С. 241-246.
- [16] Б.Н. Петров. Материалы к библиографии ученых СССР. Серия технических наук. Механика. Вып. 16. М.: Наука, 1984.

- [17] Вице-президент Академии наук СССР академик Борис Николаевич Петров // В сб.: «Конференция по теории управления, посвященная памяти академика Бориса Николаевича Петрова». Программа и тезисы докладов. Москва, 11 марта 2003 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
- [18] Петров Б.Н. Избранные труды. Т. 1. Теория автоматического управления. М.: Наука, 1983.

О так называемом «парадоксе Г.В. Щипанова»

Л.И. Розоноэр¹

Разрабатывая методы проектирования регуляторов, Г.В. Щипанов рассматривал сразу, вообще говоря, многоконтурные системы («многостепенные регуляторы»), не ограничиваясь, как это делали до него, рассмотрением одной обратной связи.

Интересно и не случайно, что рассмотрение многоконтурных систем сразу же привело к необходимости разобраться в парадоксальном явлении, вызвавшем бурную дискуссию, - явном несоответствии теоретического результата ожидаемому с точки зрения физики и здравого смысла (речь идет о возможности физической реализации так называемых условий компенсации). «Парадокс Щипанова» заключается в том, что при абсолютно точном выполнении условий компенсации из уравнений системы регулирования следует полное отсутствие отклонения регулируемой величины от заданного значения, что представляется невозможным при регулировании с обратной связью без прямого измерения возмущающих воздействий, поскольку сама возможность регулирования по принципу обратной связи основана на измерении отклонения регулируемой величины: если отклонения нет, то регулятор вообще не получает сигнала и не может

¹ Публикуется по книге «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)» / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004.

поэтому работать. Дальнейшее изложение посвящено рассмотрению этого «парадокса Щипанова». Возможны различные точки зрения на этот парадокс, не столько противоречащие, сколько дополняющие друг друга. Настоящее изложение основывается на соображениях, высказанных впервые М.А. Айзерманом в письме академику О.Ю. Шмидту [1], и на результатах работы [2]. «Парадокс Щипанова» в некотором разъясняемом далее смысле является следствием системного эффекта, характерного именно для сложных многоконтурных систем.

Следует сразу же подчеркнуть хорошо известный ныне факт: как показал впервые В.С. Кулебакин [3], выполнение условий компенсации в системах, в которых возмущение измеряется (например, в мостиковых схемах), имеет очень простой и наглядный физический смысл. Парадокс возникает лишь при попытке выполнить условия компенсации в системах, в которых возмущающее воздействие не измеряется. Теория инвариантности систем с регулированием по возмущению была развита затем Б.Н. Петровым [4]. Систему регулирования, в которой возмущающее воздействие не измеряется, а условие компенсации выполнено, назовем одноканальной абсолютно инвариантной системой.

Работа В.С. Кулебакина [3] фактически продемонстрировала, что одни и те же условия компенсации могут быть выполнены в совершенно различных структурах, хотя и описываемых одинаковыми уравнениями. Физическая нереализуемость абсолютной инвариантности в одноканальных системах подчеркивалась Б.Н. Петровым [4]. Тем самым, структурная схема дает дополнительную (по сравнению с записью уравнений) информацию о системе. В частности, структурная схема дает информацию о том, какие переменные являются входными и выходными для звеньев системы. Эта информация важна при учете физически воз-

можных «малых» отклонений в описании звеньев структурной схемы. Так, малые запаздывания от входа к выходу возможны, а малые опережения - нет. По сути дела, структурная схема указывает, какие малые отклонения в уравнениях, ее описывающих, физически возможны. Тем самым, в математическое описание структурной схемы должны входить не только идеализированные уравнения, но и указания на физически возможные «окрестности» этих уравнений (более подробно см. [2]). Разные структурные схемы, описываемые одинаковыми уравнениями, различаются «окрестностями» уравнений.

Для разрешения «парадокса Щипанова» следует ответить на два вопроса. Первый вопрос: что означает с физической точки зрения точное выполнение условий компенсации в одноканальной абсолютно инвариантной системе? Второй вопрос: что произойдет, если мы попытаемся технически реализовать одноканальную абсолютно инвариантную систему регулирования? На первый вопрос исчерпывающий ответ дал М.А. Айзерман [1] в процессе дискуссии о работе Щипанова. Коротко говоря словами самого Марка Ароновича, этот ответ заключается в следующем:

«Таким образом, выполнение условий компенсации проф. Щипанова означает увод в ∞ частоты периодической составляющей или скорости аperiodической составляющей свободных колебаний и, следовательно, и теоретически, и практически компенсация возможна в той же самой мере, в какой мыслима либо осуществима бесконечно большая частота или скорость. Математика же дала ответ совершенно точный: если бы можно было предположить осуществление бесконечно больших частот (или скоростей), то в такой же мере можно было бы осуществить и полную компенсацию. Ответ строгий, логичный и, разумеется, не парадоксальный» ([1], с. 267).

В процессе дискуссии по работам Г.В. Щипанова неоднократно отмечалось, что даже в одноконтурной системе полная компенсация возмущения была бы возможна, если бы можно было реализовать бесконечно большой коэффициент усиления. Следует отметить, что идея «бесконечно большого коэффициента усиления» успешно развивалась в работах М.В. Меерова (см., например, [5]), посвященных построению систем, устойчивых при сколь угодно больших коэффициентах усиления. Идея этих работ заключается в построении такой структуры регулятора, при которой увеличение коэффициента усиления до ∞ обеспечивает «увод в ∞ » корней характеристического уравнения, оставляя их в левой полуплоскости. Ответ на второй вопрос - что произойдет, если попытаться технически реализовать абсолютно инвариантную одноканальную систему, - не имел ответа в течение еще многих лет. Казалось бы, если каждое звено структурной схемы достаточно точно описывает реальный объект, а соединение звеньев точно воспроизводит реальную структуру соединений, то можно ожидать, что решение уравнений должно достаточно точно описывать поведение реальной схемы. Поэтому, казалось бы, нет никаких препятствий технической реализации систем, в которых выполнены условия компенсации. Однако здесь возможно проявление системного эффекта, заключающегося в следующем. Математическое описание реальных объектов, полученное для определенных условий их работы, может стать неадекватным, если делается попытка использовать его в других условиях. В частности, если получены уравнения, вполне адекватно описывающие некоторые объекты, взятые по отдельности, то, вообще говоря, нет гарантий, что эти уравнения пригодны и для описания функционирования тех же объектов в составе сложной системы. Те «малые» несоответствия между

математическим описанием и реальностью, которые выглядят ничтожными для объектов, взятых по отдельности, могут играть решающую роль при рассмотрении системы в целом и могут приводить даже к качественному расхождению математического описания и реального поведения системы, т. е. система может оказаться негрубой.

Предположение о том, что при реализации одноканальных абсолютно инвариантных систем следует учитывать малые отклонения в описании звеньев, было, по-видимому, впервые высказано в [6]. В докладе на семинаре М.А. Айзермана в Институте проблем управления в 1963 году автором настоящей заметки было показано, что абсолютно инвариантная одноканальная система регулирования является негрубой по отношению к сколь угодно малым чистым запаздываниям (с некоторыми добавлениями, касающимися уточнения понятия грубости динамических систем, этот доклад был повторен на семинаре М.А. Красносельского в 1983 году). Доказательство негрубости одноканальной абсолютно инвариантной системы по отношению к малым чистым запаздываниям содержится в статье «М.А. Айзерман и работы Г.В. Щипанова» [7]. Обсуждение проблемы грубости одноканальных инвариантных систем можно найти в книге [8]. Общая постановка проблемы грубости (учет малых параметров при рассмотрении устойчивости системы) была дана в [2], где на основании полученного в этой работе критерия грубости была доказана, в частности, негрубость абсолютно инвариантных одноканальных систем регулирования.

Однако следует иметь в виду, что применение специальных мер стабилизации может сделать негрубую систему устойчивой с приближенным сохранением ее полезных свойств (см. об этом [8]). Поэтому вопрос о практической работоспособности

одноканальных систем (без измерения возмущения), в которых условия компенсации выполнены приближенно, до сих пор остается открытым. Целесообразным представляется экспериментальное исследование этого вопроса с помощью аналоговых ЭВМ. Первые попытки такого исследования, не давшие, однако, окончательного результата, были сделаны еще в 1960-х годах М.В. Рыбашовым (личное сообщение).

Список литературы

- [1] Айзерман М.А. Письмо вице-президенту АН СССР академику О. Ю. Шмидту // В кн. «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы) / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004.
- [2] Браверман М.Э., Розоноэр Л.И. О грубости линейных динамических систем. I, II // Автоматика и телемеханика. 1991. № 11. С. 17-23; 1992. № 1. С. 41-52.
- [3] Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физически реальных системах // Докл. АН СССР. 1948. Т. 60, № 2. С. 231-234.
- [4] Петров Б.Н. О применении условий инвариантности // Труды II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 2. С. 241-246.
- [5] Мееров М.В. О системах авторегулирования, устойчивых при сколь угодно больших коэффициентах усиления // Автоматика и телемеханика. 1947. № 4. С. 215-242.

- [6] Розоноэр Л.И. Некоторые вопросы теории связанного регулирования // Сборник статей НСО МЭИ. 1955. С. 35-72.
- [7] Розоноэр Л.И. М.А. Айзерман и работы Г.В. Щипанова // В кн.: «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)» / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004. С. 414-421.
- [8] Солнечный Э.М. Вырожденные системы и их использование в задаче синтеза заданного поведения. М: Наука, 1989.

Комментарии В.Ю. Рутковского к работе Л.И. Розоноэра

Следует заметить, что в [1] опубликовано письмо М.А. Айзермана вице-президенту АН СССР академику О.Ю. Шмидту, на которое ссылается Л.И. Розоноэр. Л.И. Розоноэр пишет [2], что «для разрешения «парадокса Щипанова» следует ответить на два вопроса. Первый вопрос: что означает с физической точки зрения точное выполнение условия компенсации в одноканальной абсолютно инвариантной системе? ... На этот вопрос исчерпывающий ответ дал М.А. Айзерман [1] в процессе дискуссии по работе Г.В. Щипанова».

Однако М.А. Айзерман в дискуссии по работе Г.В. Щипанова непосредственно не участвовал, его письмо О.Ю. Шмидту опубликовано лишь в 2004 г. и никак не повлияло на бескомпромиссный ход дискуссии. К сожалению, М.А. Айзерман в дальнейшем не участвовал ни в одном из семи совещаний по теории инвариантности, которые проводились в СССР в период с 1958 г. по 1987 г.

Список литературы

- [1] Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы) / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004. С. 261-269.

- [2] Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы) / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004. С. 401.

К истории развития теории инвариантности систем управления: взгляд из Киева

В.М. Кунцевич

Судьба сложилась так, что в истории послевоенного развития теории инвариантности систем управления Киеву была отведена важная роль.

Как известно, Совещание по теории инвариантности и ее применению в системах управления, оказавшее большое влияние на весь последующий ход событий в этой области, состоялось осенью 1958 г. в Киеве. Такой выбор места для его проведения был не случаен.

В первые послевоенные годы усилиями академика АН СССР В.С. Кулебакина и тогда еще только лишь член-корр. АН СССР Б.Н. Петрова велись активные поиски примеров практического использования теории инвариантности для решения практических задач.

Примеры успешного применения этой теории для решения важных прикладных задач в народном хозяйстве страны дали бы основание обратиться в Президиум АН СССР с аргументированной просьбой о пересмотре еще довоенного решения Комиссии Президиума АН СССР, признавшей наличие якобы «ошибок», допущенных в работе профессора Г.В. Щипанова, и «вредность для нужд социалистического строительства его работы».

Ключевую роль в подготовке к проведению этого Совещания в Киеве сыграли академик АН СССР В.С. Кулебакин и член-корр. АН СССР Б.Н. Петров. Активную роль в подготовке и проведении Совещания сыграли также и профессор А.Г. Ивахненко, академик АН Украины А.Ю. Ишлинский, профессор А.И. Кухтенко и ряд других ее участников.

На выбор Киева как места проведения Совещания, безусловно, повлияло и то обстоятельство, что здесь в 50-х годах прошлого столетия в Институте электротехники АН Украины А.Г. Ивахненко был успешно проведен большой цикл теоретических и экспериментальных исследований, убедительно продемонстрировавших эффективность использования дополнительных компенсирующих связей, что позволило на практике доказать возможность достижения эффекта инвариантности в промышленном образце системы управления скоростью асинхронного двигателя. Важность этого результата состояла в том, что в то время это был одним из немногих примеров реализации «в железе» идей теории инвариантности, в чем тогда так остро нуждались ее сторонники.

Не в последнюю очередь при выборе места проведения Совещания сыграла свою роль и отдаленность Киева от места пребывания наиболее ярых блюстителей «идеологической чистоты советской науки», продолжавших считать теорию инвариантности отлученной от настоящей науки.

Хотя масштабы этого Совещания и были весьма скромные: на нем было заслушано лишь около 15-20 докладов, но значение этого Совещания в развитии последовавших за ним событий оказалось большим.

На основании принятого Совещанием решения от имени академика-секретаря Отделения технических наук АН СССР

академика В.С. Кулебакина, поддержанного также член-корр. АН СССР Б.Н. Петровым, в Президиум АН СССР последовало обращение с просьбой создать комиссию о пересмотре решения еще довоенной комиссии Президиума АН СССР о работе профессора Г.В. Щипанова. Вскоре после этого Президиум АН СССР признал решение своей прежней комиссии ошибочным и отменил его. Тем самым доброе имя Г.В. Щипанова было восстановлено и одновременно с этим было снято «табу» с теории инвариантности систем управления.

Следующей важной вехой в истории развития теории инвариантности стало проведение в 1962 г. в Киеве Второго, теперь уже Всесоюзного, Совещания по теории инвариантности систем управления и ее применениям. По своему масштабу Второе Всесоюзное Совещание уже существенно превосходило предыдущее. В нем приняло участие уже около 200 человек, представлявших научные, конструкторско-производственные организации и высшие учебные заведения Москвы, Ленинграда, Киева, Свердловска, Минска, Баку, Харькова и ряда других городов. Его работа проходила в течение нескольких дней в параллельно работающих секциях. Всего на Втором Всесоюзном Совещании было представлено свыше 50 докладов, опубликованных впоследствии в прекрасно изданных его Трудах [1].

Поскольку это была, в сущности, первая научная конференция, посвященная этой проблеме, то неизбежным оказалось повторение близких или почти одинаковых результатов, представленных различными авторами, охватывавших разные сферы применения идей теории инвариантности. Широко были представлены работы с результатами использования идей теории инвариантности при решении задач управления в авиации, энергетике, на транспорте и еще в целом ряде других областей

экономики страны. С этим уже нельзя было не считаться.

Как участник этого Второго Совещания, свидетельствую, что его работа проходила в творческой обстановке, часто возникали довольно бурные дискуссии между его участниками.

Главные итоги состоявшегося Второго Совещания можно сформулировать следующим образом: было доказано и убедительно продемонстрирована эффективность основного результата теории инвариантности – разработка метода структурного и параметрического синтеза регуляторов, обеспечивающих при соблюдении определенных условий достижения эффекта инвариантности. Определение этих условий было сформулировано Б.Н. Петровым в форме его «принципа двухканальности», допускающего наглядную физическую интерпретацию, а именно: для получения эффекта инвариантности необходимо наличие двух (или более) идентичных по своим динамическим характеристикам каналов распространения возмущения, в результате чего достигается компенсация его влияния на объект управления.

К сожалению, в тот период эйфории и увлечения возможностями улучшения качества функционирования систем управления, создаваемых с использованием рекомендаций теории инвариантности, как-то почти незамеченным оказалось то, что инвариантные системы управления – системы негрубые по Андронову со всеми вытекающими из признания этого факта последствиями. Как известно, эффект инвариантности достигается при выполнении строго равенства между соответствующими дифференциальными операторами или передаточными функциями, в состав которых входят как математические модели объекта, так и операторы самого объекта управления. При этом по умолчанию принималось, что математическая модель объекта конструктору системы управления известна исчерпывающим об-

разом. В то время даже сама мысль о том, что между моделью объекта и самим объектом возможны какие-то различия, воспринималась как еретическая.

Часто в некоторых докладах в подтверждение правильности полученных расчетным путем результатов приводились «экспериментальные» данные, но их получали на электронных аналоговых моделях, на которых как модели самих объектов, так и необходимые их «модели», набирались с помощью тех же самых блоков моделирующих установок. Поэтому предсказания теории блестяще подтверждались «экспериментами».

Справедливости ради нужно признать, что такие «псевдо-эксперименты» проводятся и сегодня с тем лишь отличием, что место аналоговых моделей заняли компьютерные программы.

Очевидно, что при наличии некоторой параметрической неопределенности в описании объекта управления нельзя рассчитывать на получение эффекта инвариантности для всего семейства объекта, заданного оценками параметров. В этом случае, естественно, речь может идти лишь об эффекте квазиинвариантности. Но такие богохульные мысли было не принято высказывать вслух.

Все стремились к недостижаемому в реальных условиях идеалу: абсолютной инвариантности.

После Второго Всесоюзного Совецания в Киеве в 1962 году на протяжении еще нескольких лет был проведен еще ряд таких Всесоюзных Совецаний, так что на некоторое время Киев превратился в своего рода Мекку сторонников этого научного направления.

Оглядываясь на несколько десятилетий назад, по моему мнению, Второе Совецание по теории инвариантности 1962 года оказалось вершиной того пути, по которому далее уже отчасти по

инерции продолжалось развитие этой теории. Очень скоро стало заметным отсутствие новых идей, развитие пошло не вглубь, а вширь.

Возможно, одной из причин того, что Всесоюзное Совецание по теории инвариантности, проведенное в Баку, оказалось последним не только потому, что в своей классической постановке идея инвариантности уже, по-существу, исчерпала себя, но также и потому, что преждевременно трагически ушел из жизни академик Б.Н. Петров, безусловно, бывший главной движущей силой в организации и проведении исследований в этом направлении. Но, как бы там ни было, с конца 70-х годов прошлого столетия статьи, посвященные тематике теории инвариантности и ее применениям в системах управления, перестали появляться на страницах наших журналов.

Как известно, теория инвариантности была разработана для класса линейных стационарных систем. Технические возможности реализации ее рекомендаций для решения задач управления объектами с переменными во времени параметрами в те годы еще отсутствовали. До наступления эпохи широкой компьютеризации систем управления оставалось еще несколько десятилетий.

По мнению автора, достигнутый в настоящее время уровень наших знаний в решении задач параметрической идентификации, робастной устойчивости и адаптации в сочетании с возможностями современной компьютерной техникой управления могут помочь обрести теории инвариантности «второе дыхание», охватив новые области применения ее основных результатов.

Список литературы

- [1] Теория инвариантности в системах автоматического управления. Труды Второго Всесоюзного Совещания. Киев, 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964. 503 с.

Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления

В.М. Кунцевич

1 Введение

В этом году исполняется 105 лет со дня рождения одного из наиболее оригинальных исследователей в области теории управления первой половины XX века профессора Г.В. Щипанова, выступившего в 1938 году с дерзкой (в то время оцененной как еретической) идеей создания «универсального регулятора» [1], [2].

Предложенный им метод структурного и параметрического синтеза «универсального регулятора», обеспечивавшего инвариантность регулируемой координаты относительно неконтролируемого ограниченного возмущения, в общем случае в силу ряда ограничений и, в первую очередь, ограничений физической реализуемости не обеспечивал достижение поставленной им цели, что никак не умаляет значимости полученного Г.В. Щипановым результата.

Личная судьба Г.В. Щипанова и судьба созданной им теории инвариантности систем управления оказалась трагична. Достаточно подробно почти детективная история, а точнее говоря,

доведенные до абсурда поклонниками «идеологической чистоты» науки нападки на Г.В. Шипанова обстоятельно изложена в статье профессора Б.А. Рябова [3]. В этом же сборнике трудов Второго Всесоюзного совещания по теории инвариантности в системах автоматического управления приведены тексты докладов этого Совещания и ряд документов, связанных с историей зарождения и развития теории инвариантности систем управления, лишней раз подтверждающих горькую истину о том, что нет пророка в своем отечестве.

Основоположник теории инвариантности систем управления Г.В. Шипанов и его последователи Н.Н. Лузин, В.С. Кулебакин, Б.Н. Петров, А.Г. Ивахненко, А.И. Кухтенко и многие другие сформулировали и решили задачу инвариантности для непрерывных стационарных линейных систем, принимая при этом по умолчанию предположение о том, что описание математической модели объектов управления задано исчерпывающим образом. Основной результат теории инвариантности систем управления состоит в постановке и решении задачи структурного и параметрического синтеза замкнутой системы управления, обеспечивающей инвариантность заданной управляемой координаты относительно произвольно изменяющегося возмущения, имеющего некоторое число ограниченных производных. Следует отметить, что задача управления была поставлена в наиболее общей из возможных форм.

В более узкой постановке задача о «селективной инвариантности» была поставлена и решена В.С. Кулебакиным [4-6], который предложил использование «анигилирующего оператора», воздействие которого на заданного вида возмущение, как функцию времени, обращает ее в ноль (метод « $K(D)$ -изображений»).

Однако в последние несколько десятилетий стало все более

очевидным, что предположение об исчерпывающем знании математической модели объекта при решении многих реальных задач управления не может быть принято безоговорочно. Как результат признания этого факта в теории управления возникло и уже сформировалось как самостоятельное научное направление теория робастной устойчивости, исследующая асимптотическую устойчивость не одной фиксированной системы, а некоторого семейства таких систем, для параметров которых заданы лишь их множественные оценки.

Инвариантные системы управления – системы негрубые по Андронову, и если действительные значения параметров объекта управления отличаются от их расчетных значений, то это влечет за собой исчезновение хрупкого эффекта абсолютной инвариантности, существующего лишь на кончике пера исследователя. Но негрубая система – еще не бесполезная система. Можно привести много примеров негрубых систем управления, нашедших тем не менее широкое применение. Достаточно вспомнить, например, фильтр Калмана, который лишь благодаря его различным модификациям становится работоспособным.

Если для параметров объекта управления заданы лишь их оценки, например, множественные оценки, то, очевидно, что о достижении эффекта инвариантности для всего заданного таким образом семейства объектов управления говорить не приходится. Но при соблюдении некоторых условий, на которых мы остановимся ниже, можно говорить о достижении частичной компенсации возмущений, действующих на объект управления, т.е. о квазинвариантности.¹⁾ Это, естественно, было очевидным

¹ Предпочтение отдается именно этому термину, предложенному О.М. Крыжановским еще в 50-х годах прошлого столетия, а не уже существующему термину «инвариантность до ϵ », поскольку этот ϵ так и оставался

еще полстолетия тому назад, но существовавший тогда уровень развития теории управления не позволял сделать конструктивных выводов из признания этого факта. Теория идентификации и робастной устойчивости еще лишь ожидали своего рождения, да и общая теория решения оптимизационных задач и технические возможности их решения в то время были еще недостаточно развиты.

Целью настоящей работы является попытка взглянуть на проблему теории инвариантности систем управления с высоты сегодняшнего уровня общей теории управления, включая такие, ставшими уже самостоятельными научными направлениями, как теория идентификации, адаптации и робастной устойчивости, с учетом тех возможностей компьютерной техники, которыми сегодня располагает конструктор систем управления. Эти новые возможности, появившиеся в конце прошлого и в начале нынешнего столетия, открывают, по нашему мнению, новые области применения идей теории инвариантности систем управления.

2 Квазиинвариантность систем управления со связями по возмущениям

Рассмотрим линейную стационарную систему управления с дополнительной компенсирующей связью по возмущению $f(t)$, структурная схема которой приведена на рис. 1, и приведем в операторной форме систему дифференциальных уравнений, описывающих ее функционирование.

неопределенным.

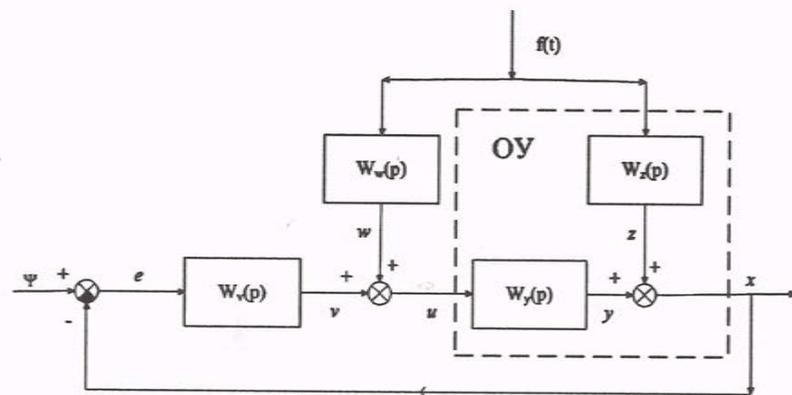


Рис. 1. ОУ - объект управления

Уравнение объекта управления

$$A_y(p)y(t) = B_y(p)u(t), \quad p = \frac{d}{dt}, \quad (1)$$

$$A_z(p)z(t) = B_z(p)f(t), \quad (2)$$

$$x(t) = y(t) + z(t), \quad (3)$$

где

$$A_y(p) = \sum_{i=0}^k a_{yi}p^i, \quad B_y(p) = \sum_{j=0}^l b_{yj}p^j, \quad k > l. \quad (4)$$

$$A_z(p) = \sum_{i=0}^q a_{zi}p^i, \quad B_z(p) = \sum_{j=0}^r b_{zj}p^j, \quad q > r. \quad (5)$$

Без потери общности примем, что $a_{zq} = b_{zr} = 1$, $a_{yk} = b_{yl} = 1$.

Уравнение управляющего устройства (регулятора):

$$A_v(p)e(t) = B_v(p)v, \quad (6)$$

где

$$A_v(p) = \sum_{i=0}^m a_{vi}p^i, \quad B_v(p) = \sum_{j=0}^n b_{vj}p^j, \quad m > n; \quad (7)$$

$$a_{vm} = b_{vn} = 1.$$

Уравнение обратной связи

$$e(t) = \psi(t) - x(t), \quad (8)$$

и уравнение связи по возмущению

$$A_w(p)w(t) = B_w(p)f(t), \quad (9)$$

$$A_w(p) = \sum_{i=0}^c a_{wi}p^i, \quad B_w(p) = \sum_{j=0}^s b_{wj}p^j, \quad c > s; \quad (10)$$

$$a_{wc} = b_{ws} = 1.$$

По смыслу рассматриваемой далее задачи управления принимается, что для однородного уравнения $A_w(p)w(t) = 0$ все корни λ_i ; $i = \overline{1; c}$ его характеристического уравнения $A_w(\lambda) = A_w(p)|_{p=\lambda}$ для однородного уравнения $A_w(p)w(t) = 0$ удовлетворяют неравенству $Re\lambda_i < 0$.

Результирующее управление $u(t)$ равно

$$u(t) = v(t) + w(t). \quad (11)$$

Из (1)-(11) получаем уравнение замкнутой системы управления

$$[1 + W_y(p)W_v(p)]x(t) = W_f(p)f(t), \quad (12)$$

где

$$W_f(p) = W_y(p)W_w(p) + W_z(p), \quad (13)$$

$$W_y(\cdot) = \frac{B_y(\cdot)}{A_y(\cdot)}; \quad W_v(\cdot) = \frac{B_v(\cdot)}{A_v(\cdot)};$$

$$W_z(\cdot) = \frac{B_z(\cdot)}{A_z(\cdot)}; \quad W_w(\cdot) = \frac{B_w(\cdot)}{A_w(\cdot)}.$$

На выборе полиномов $A_v(p)$ и $B_y(p)$ в законе управления (6), обеспечивающем получение желаемых свойств замкнутой системы управления и, в частности, ее асимптотическую устойчивость мы здесь останавливаться не будем.

Рассматриваемая система впервые была подробно исследована А.Г. Ивахненко [7-9] и реализована им в системе регулирования угловой скорости асинхронного двигателя. Он показал, что при выборе оператора дополнительной связи по возмущению $W_w(p)$ в виде

$$W_w(p) = -\frac{W_z(p)}{W_y^*(p)}, \quad (14)$$

где $W_y^*(p)$ – точная модель оператора $W_y(p)$ объекта управления, оператор $W_f(p)$ в уравнении (12) обращается в ноль и, следовательно, равенство (14) есть условие инвариантности регулируемой координаты относительно возмущения $f(t)$.

Условием физической реализуемости дифференциального оператора $W_w(p)$ является выполнение известной системы неравенств

$$\beta_z + \alpha_y < \alpha_z + \beta_y, \quad \beta_z < \alpha_z; \quad \beta_y < \alpha_y, \quad (15)$$

где α_z , α_y , β_y , β_z , – соответственно степени полиномов $A_z(\cdot)$, $A_y(\cdot)$, $B_y(\cdot)$, $B_z(\cdot)$.

Нетрудно показать, что при определенном соотношении этих величин система неравенств (15) – совместная. Действительно, примем, что $\beta_z = \alpha_z - \delta_z$, где $\delta_z \geq 1$; $\beta_y = \alpha_y - \delta_y$, где $\delta_y \geq 1$. Тогда неравенство (15) справедливо, если $\delta_z > \delta_y$.

Содержательная интерпретация выполнения условия (14) означает возможность создания двух идентичных по своим характеристикам каналов передачи возмущения с последующей взаимной компенсацией их воздействия на объект управления. Впоследствии этот результат был распространен и обобщен на существенно более широкий класс систем Б.Н. Петровым, получившим название «принцип двухканальности Б.Н. Петрова» [10-13].

Отметим, что эффект инвариантности координаты $x(t)$ относительного произвольного ограниченного возмущения $f(t)$ достигнут благодаря сокращению дифференциальных операторов $A_y^*(p)$, $A_y(p)$ и $B_y(p)$, $B_y^*(p)$ в числителе и знаменателе дифференциального оператора

$$W_w(p)W_y(p) = \frac{B_z(p)A_y^*(p)B_y(p)}{A_z(p)B_y^*(p)A_y(p)}.$$

В результате этого при условии, что $B_y^*(p) \equiv B_y(p)$ и $A_y^*(p) \equiv A_y(p)$ частные решения неоднородных дифференциальных уравнений

$$A_z(p)z(t) = B_z(p)f(t)$$

и

$$B_y^*(p)A_y(p)A_z(p)y(t) = B_y(p)A_y^*(p)B_z(p)f(t)$$

тождественны, чего нельзя сказать о решениях соответствующих однородных уравнений

$$A_z(p)z(t) = 0, \quad B_y^*(p)A_y(p)A_z(p)y(t) = 0. \quad (16)$$

Из (16) следует, что для того, чтобы решения этих однородных уравнений асимптотически стремились к нулю, необходимо, чтобы корни полиномов

$$A_z(\lambda) = A_z(p)|_{p=\lambda} = 0,$$

$$A_y(\lambda) = A_y(p)|_{p=\lambda} = 0$$

$$B_y(\lambda) = B_y(p)|_{p=\lambda} = 0$$

имели отрицательные вещественные части, а это возможно исключительно лишь в том случае, когда объект управления, описываемый уравнением (1), – минимально-фазовый, т.е. все корни λ_i уравнения $B_y(\lambda) = 0$, как уже сказано, удовлетворяют условию $Re\lambda_i < 0$, $i = \overline{1; l}$.

Подчеркнем здесь еще раз недопустимость для неминимально-фазового объекта управления сокращения общих сомножителей в числителе и знаменателе дифференциального оператора $W_w(p)W_y(p)$ при исследовании синтезируемой системы управления, так как это ведет к понижению порядка соответствующего дифференциального уравнения и это не позволяет обнаружить неустойчивость системы.

Эффект инвариантности, здесь лучше сказать, абсолютной инвариантности, достигается лишь благодаря полной идентичности модели $W_w^*(p)$ оператора объекта и самого оператора объекта $W_y(p)$. Но из этого никак не следует поспешный вывод о якобы бесполезности теории инвариантности систем управления для нужд практики. Польза этой теории состоит прежде всего в возможности обобщения ее результатов на задачи управления с использованием более адекватных моделей объектов управления, учитывающих наличие той или иной степени неопределенности относительно их параметров.

Откажемся теперь от предположения о том, что нам известны истинные значения параметров математической модели объекта управления и примем, что для них заданы лишь их множественные оценки.

Введем векторы параметров (коэффициентов) полиномов $A_y(p)$, $B_y(p)$ и $A_z(p)$, $B_z(p)$

$$\bar{A}_y = \|a_{yi}\|_{i=0}^{c-1}; \quad \bar{B}_y = \|b_{yj}\|_{j=0}^{s-1};$$

$$\bar{A}_z = \|a_{zi}\|_{i=0}^{q-1}; \quad \bar{B}_z = \|b_{zj}\|_{j=0}^{r-1}$$

и примем, что для этих векторов заданы их оценки

$$\bar{A}_y \in A_y; \quad \bar{B}_y \in B_y; \quad \bar{A}_z \in A_z; \quad \bar{B}_z \in B_z. \quad (17)$$

Для упрощения чисто технической стороны исследования примем, что все эти множества – интервальные, и каждое из них принадлежит лишь одному октанту пространства параметров. Примем далее, что

$$a_{zi} = \overset{\circ}{a}_{zi} + \Delta a_{zi}, \quad (18)$$

где

$$\Delta a_{zi} \in \delta \alpha_{zi} = \{\Delta a_{zi} : \bar{\Delta} a_{zi} \leq \Delta a_{zi} \leq \underline{\Delta} a_{zi}\}; \quad i = \overline{0}; \quad c-1;$$

$$b_{zj} = \overset{\circ}{b}_{zj} + \Delta b_{zj}, \quad (19)$$

где

$$\Delta b_{zj} \in \delta \beta_{zj} = \{\Delta b_{zj} : \bar{\Delta} b_{zj} \leq \Delta b_{zj} \leq \underline{\Delta} b_{zj}\}; \quad i = \overline{0}; \quad r-1.$$

Структуру оператора $W_w(p)$ связи по возмущению сохраним в виде (14).

Для подлежащих определению коэффициентов полиномов $A_y^*(p)$ и $B_y^*(p)$ введем векторы их варьируемых коэффициентов

$$\bar{A}_y^* = \left\| \overset{*}{a}_{yi} \right\|_{i=0}^{c-1}; \quad \bar{B}_y^* = \left\| \overset{*}{b}_{yj} \right\|_{j=0}^{s-1}.$$

Поскольку порядок дифференциального оператора $A_y(p)$ равен k , то из этого следует, что порядок оператора $A_w(p)$ равен $s = q - k$, а порядок оператора $B_w(p)$ равен $c = r - l$.

Выполнив операции произведения полиномов оператора $W_1(p)$, где

$$W_1(p) = \frac{B_1(p)}{A_1(p)} = \frac{W_z^*(p)}{W_y^*(p)} W_y(p) = \frac{B_z^*(p) A_y^*(p) B_y(p)}{A_z^*(p) B_y^*(p) A_y(p)}, \quad (20)$$

из уравнений (1), (2), (9) получим

$$w(t) = W_1(p) f(t) = \frac{B_z^*(p) A_y^*(p) B_y(p)}{A_z^*(p) B_y^*(p) A_y(p)} f(t), \quad (21)$$

где $A_1(p) = \sum_{i=0}^{\sigma} a_{1i} p^i$, $B_1(p) = \sum_{j=0}^{\eta} b_{1j} p^j$; $\sigma = \alpha_z + 2\alpha_y - \delta_y$; $\eta = \alpha_z + 2\alpha_y - (\delta_z + \delta_y)$.

В общем случае вид функций $a_{1i} = f_i(\bar{A}_z^*, \bar{A}_y, \bar{B}_y^*)$, $i = \overline{0}, \sigma$ и $b_{1j} = \varphi_j(\bar{A}_y^*, \bar{B}_y, \bar{B}_z^*)$, $j = \overline{0}, \eta$ достаточно громоздок и поэтому здесь не приводится, но в каждом конкретном случае их получение элементарно.

Из коэффициентов $a_{1i} = f_i(\bar{A}_z^*, \bar{B}_y^*, \bar{A}_y)$, $i = \overline{0}, \sigma$ полинома $A_1(p)$ и коэффициентов $b_{1j} = \varphi_j(\bar{B}_z^*, \bar{A}_y^*, \bar{B}_y)$; $j = \overline{0}, \eta$ полинома $B(p)$ образуем векторы

$$\bar{A}_1 = \|f_i(\cdot)\|_{i=0}^{\sigma} = F(\bar{A}_z^*, \bar{B}_y^*, \bar{A}_y), \quad (22)$$

$$\bar{B}_1 = \|\varphi_j(\cdot)\|_{j=0}^{\eta} = \Phi(\bar{B}_z^*, \bar{A}_y^*, \bar{B}_y).$$

Из уравнений (3), (11) и (21) получаем

$$A(p)x(t) = B(p)f(t), \quad (23)$$

где

$$A(p) = A_z(p)A_1(p); \quad B(p) = B_z(p)A_1(p) - B_1(p)A_z(p); \quad (24)$$

$$A(p) = \sum_{i=0}^{\tau} a_i p^i; \quad B(p) = \sum_{j=0}^{\theta} b_j p^j;$$

$$\tau = 2(\alpha_y + \alpha_z) - \delta_y; \quad \theta = 2(\alpha_y + \alpha_z) - (\delta_y + \delta_z).$$

В общем случае вид функций $a_i = \psi_i(\bar{A}_z^*, B_y^*, \bar{A}_y)$; $i = \overline{0, \tau}$ и $b_j = \gamma_j(\bar{B}_z^*, \bar{A}_y^*, \bar{A}_z, \bar{A}_y, \bar{B}_y, \bar{B}_z, \bar{B}_y^*)$; $j = \overline{0, \theta}$ достаточно громоздок и поэтому здесь также не приводится, но получить эти функции в каждом конкретном случае не составит труда.

Из коэффициентов полиномов $A(p)$ и $B(p)$ образуем векторы $\bar{A} = \bar{A}(\bar{A}_z^*; \bar{A}_y; \bar{B}_z^*)$ и $\bar{B} = \bar{B}(\bar{A}_y; \bar{A}_y^*; \bar{B}_y; \bar{B}_y^*; \bar{B}_z; \bar{B}_z^*)$.

Искомый вектор параметров дополнительной связи по возмущению $\bar{B}(\cdot)$ следовало бы определить из условия минимизации суммы коэффициентов полинома $B(p)$ в левой части уравнения (23), т.е. из решения задачи

$$\min_{\substack{\bar{A}_y^*, \bar{B}_y^* \\ \bar{A}_z^*, \bar{B}_z^*}} \left\{ \left\| \bar{B}(\bar{B}_z; \bar{B}_z^*; \bar{A}_y; \bar{A}_y^*; \bar{B}_y; \bar{B}_y^*) \right\| \right\} = b^*.$$

Если имеют место равенства $\bar{A}_y^* = \bar{A}_y$; $\bar{B}_y^* = \bar{B}_y$; $\bar{A}_z^* = \bar{A}_z$; $\bar{B}_z^* = \bar{B}_z$, то нетрудно убедиться в том, что при этом $b^* = 0$, т.е. оператор $B(p) = 0$, и следовательно, при этом достигается эффект инвариантности. Но так как для векторов

\bar{A}_y ; \bar{B}_y ; \bar{A}_z ; \bar{B}_z заданы лишь их оценки, то такая задача – некорректная. Поэтому доопределим ее и для получения гарантированного результата искомые векторы варьируемых параметров найдем из решения задачи

$$\min_{\substack{\bar{A}_y^*; \bar{B}_y^* \\ \bar{A}_z^*; \bar{B}_z^*}} \max_{\substack{\bar{A}_y \in A_y; \bar{B}_y \in B_y \\ \bar{A}_z \in A_z; \bar{B}_z \in B_z}} \left\| \bar{B}(\bar{A}_z^*; \bar{B}_z^*; \bar{A}_y; \bar{B}_y; \bar{A}_z; \bar{B}_z) \right\|. \quad (25)$$

$$\left\| \bar{A}_y^*; \bar{B}_y^*; \bar{A}_y; \bar{B}_y; \bar{A}_z; \bar{B}_z \right\|.$$

Введем обозначения

$$\bar{A}_y = \bar{A}_y^0 + \Delta \bar{A}_y; \quad \bar{B}_y = \bar{B}_y^0 + \Delta \bar{B}_y;$$

$$\bar{A}_z = \bar{A}_z^0 + \Delta \bar{A}_z; \quad \bar{B}_z = \bar{B}_z^0 + \Delta \bar{B}_z,$$

где

$$\Delta \bar{A}_y \in \delta A_y; \quad \Delta \bar{B}_y \in \delta B_y; \quad \Delta \bar{A}_z \in \delta A_z; \quad \Delta \bar{B}_z \in \delta B_z.$$

Центры множеств δA_y , δB_y , δA_z и δB_z принадлежат началу координат соответствующих пространств параметров.

Перепишем теперь задачу (25) в виде

$$\min_{\substack{\bar{A}_y^*; \bar{B}_y^* \\ \bar{A}_z^*; \bar{B}_z^*}} \max_{\substack{\Delta \bar{A}_y \in \delta A_y; \Delta \bar{B}_y \in \delta B_y \\ \Delta \bar{A}_z \in \delta A_z; \Delta \bar{B}_z \in \delta B_z}} \left\| \bar{B} \left[(\bar{A}_z^0 + \Delta A_z), (\bar{B}_y^0 + \Delta B_y), (\bar{A}_z + \Delta A_z)(\bar{B}_y^0 + \Delta B_y), \bar{A}_y^*, \bar{B}_y^*, \bar{A}_z^*, \bar{B}_z^* \right] \right\|. \quad (26)$$

Приведем без доказательства

Утверждение. Решение задачи (26) имеет вид

$$\bar{A}_y^* = \bar{A}_y^0; \quad \bar{B}_y^* = \bar{B}_y^0; \quad \bar{A}_z^* = \bar{A}_z^0; \quad \bar{B}_z^* = \bar{B}_z^0. \quad (27)$$

Из (14), (18), (19) и (26) следует, что если

$$\delta A_y = \emptyset; \delta B_y = \emptyset; \delta A_z = \emptyset; \delta B_z = \emptyset,$$

то так как $\dot{b} = 0$, то при этом достигается эффект инвариантности.

Замечание. Из (26) следует, что выбор варьируемых векторов осуществляется из условия минимизации в равной мере воздействия как самого возмущения $f(t)$, так и его производных. Если необходимо минимизировать воздействия возмущения и его производных с разными весами, то тогда искомые векторы следует искать из решения задачи

$$\min_{\bar{A}_y^*; \bar{B}_y^*} \max_{\Delta \bar{A}_y \in \delta A_y; \Delta \bar{B}_y \in \delta B_y} \|D\bar{B}(\cdot)\|,$$

$$\min_{\bar{A}_z^*; \bar{B}_z^*} \max_{\Delta \bar{A}_z \in \delta A_z; \Delta \bar{B}_z \in \delta B_z}$$

где $D = \text{diag} \{d_i\}_{i=0}^{\theta}$; $0 \leq d_i \leq 1$.

Синтезированная выше система управления с дополнительной компенсирующей связью по возмущению работоспособна лишь при условии робастной устойчивости системы

$$A_1(p)x(t) = 0, A_1(p) = A_z^*(p)A_y(p)B_y^*(p), \quad (28)$$

при оценке вектора $\bar{A}_y \in A_y$ и векторах \bar{A}_z^* и \bar{B}_y^* , найденных из решения задачи (27), т.е. при $\bar{A}_z^* = \bar{A}_z^0$ и $\bar{B}_y^* = \bar{B}_y^0$.

Если хоть один из полиномов $A_z(p)$ или $A_y(p)$ – полином не ниже третьего порядка, то при произвольных множествах A_z или A_y , расположенных в положительных октантах соответствующих пространств параметров, в общем случае уже нельзя гарантировать сохранение робастной устойчивости системы (28). Таким образом, решение проблемы достижения квазиинвариантности системы управления самым непосредственным образом

связано с робастной устойчивостью ее отдельной подсистемы, или, говоря другими словами, в условиях параметрической неопределенности квазиинвариантность невозможна без робастной устойчивости. Подробнее об условиях робастной устойчивости см. в [14].

Естественно, что степень компенсации действия возмущения $f(t)$ неодинакова для каждого из объектов управления, входящих в семейство таких объектов, заданное оценками (17).

3 Квазиавтономность и квазиинвариантность многосвязных систем управления

При синтезе управления многосвязными объектами, т.е. объектами с несколькими взаимосвязанными регулируемыми координатами, наряду с обеспечением устойчивости замкнутой системы управления часто возникает задача придания ей свойства автономности. Такую задачу еще в конце 30-х годов прошлого столетия поставил и решил профессор И.Н. Вознесенский [15], используя при этом, в сущности, те же приемы, что и при решении задач инвариантности систем управления.

Рассмотрим систему управления многосвязным объектом, структурная схема которой приведена на рис. 2, на котором все переменные – векторы, и запишем в векторно-матричной операторной форме ее уравнения.

Уравнение объекта управления

$$X(t) = H(p)U(t), \quad p = \frac{d}{dt}, \quad (29)$$

где $X \in R^m$ – вектор регулируемых координат, $U \in R^m$ – вектор управления, $H(p)$ – операторная матрица ($m \times m$).

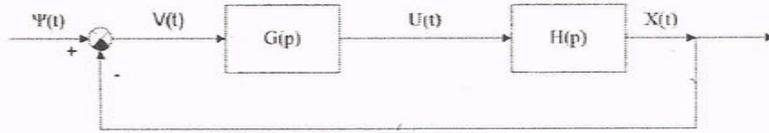


Рис. 2. ОУ - объект управления

Уравнение многомерного регулятора

$$U(t) = G(p)V(t), \quad (30)$$

где $G(p)$ – операторная матрица ($m \times m$),

$$V(t) = \Psi(t) - X(t), \quad (31)$$

$\Psi(t) \in R^m$ – вектор заданий.

Из (29)-(31) получаем

$$[I + H(p)G(p)] V(t) = \Psi(t). \quad (32)$$

И.Н. Вознесенский задачу автономности для многосвязного объекта управления сформулировал таким образом: при $\Psi(t) = 0$ определить такую операторную матрицу $G(p)$ регулятора, чтобы при этом в замкнутой системе управления, описывающая ее система однородных дифференциальных уравнений

$$[I + H(p)G(p)] V(t) = 0, \quad (33)$$

образовывала систему из m независимых друг от друга скалярных уравнений, т.е. чтобы выполнялось равенство

$$I + H(p)G(p) = D_1(p), \quad (34)$$

где $D_1(p) = \text{diag} \{D_{1i}(p)\}_{i=1}^m$.

Но так сформулированную задачу синтеза можно, не меняя ее содержания, переформулировать в следующем эквивалентном виде: при $\Psi(t) = 0$ определить матрицу $G(p)$ так, чтобы движение i -ой компоненты $v_i(t)$ вектора $V(t)$ не зависело бы от движений всех остальных компонент $v_j(t)$ этого вектора, где $j = \overline{1; m}$; $j \neq i$, т.е. было бы инвариантным относительно $v_j(t)$.

Нетрудно убедиться в том, что решение поставленной в двух эквивалентных формах задачи синтеза достигается при выполнении условия

$$I + H(p)G(p) = D_1(p), \quad (35)$$

где $D_1(p) = \text{diag} \{D_{1i}(p)\}_{i=1}^m$.

Из (35) искомую матрицу $G(p)$ получаем в виде

$$G(p) = H^{-1}(p)\tilde{D}_1(p), \quad (36)$$

где $\tilde{D}_1(p) = D_1(p) - I$.

В конце 40-х годов прошлого столетия американские исследователи Боксенбум и Худ, не упоминая о работе И.Н. Вознесенского, задачу автономности многосвязной следящей системы рис. 2 сформулировали иначе: определить матрицу $G(p)$ так, чтобы изменение i -го входа системы, т.е. координаты $\psi_i(t)$, приводило бы к изменению только координаты $e_i(t)$ вектора $V(t)$.

Из (32) получаем

$$V(t) = [I + H(p)G(p)]^{-1} \Psi(t). \quad (37)$$

Поставленная ими цель достигается, если матрица $G(p)$ выбрана так, что выполняется равенство

$$[I + H(p)G(p)]^{-1} = D_2(p), \quad (38)$$

где $D_2(p) = \text{diag} \{d_{2i}(p)\}_{i=1}^m$.

Из (38) получаем

$$G(p) = H_0^{-1}(p)\tilde{D}_2(p), \quad (39)$$

где $\tilde{D}_2(p) = D_2(p) - I$,

что с точностью до обозначений совпадает с (36).

Для того, чтобы в наиболее наглядной форме показать, что условие (36) (как и (39)) выполняется благодаря эффекту сокращения общих сомножителей в числителях и знаменателях соответствующих дифференциальных операторов, перейдем к записи дифференциальных уравнений в виде системы скалярных уравнений и для упрощения всех выкладок ограничимся рассмотрением объекта с двумя взаимосвязанными координатами, т.е. примем, что $m = 2$. При этом имеем

$$H(p) = \left\| \begin{array}{cc} H_{11}(p) & H_{12}(p) \\ H_{21}(p) & H_{22}(p) \end{array} \right\|; G(p) = \left\| \begin{array}{cc} G_{11}(p) & G_{12}(p) \\ G_{21}(p) & G_{22}(p) \end{array} \right\| \quad (40)$$

где

$$H_{ij}(p) = \frac{B_{hij}(p)}{A_{hij}(p)}; \quad i, j = \overline{1; 2}; \quad (41)$$

$$G_{ij}(p) = \frac{B_{gij}(p)}{A_{gij}(p)}; \quad i, j = \overline{1; 2}.$$

Здесь $B_{hij}(\cdot)$, $B_{gij}(\cdot)$, $A_{hij}(\cdot)$, $A_{gij}(\cdot)$ – полиномы соответствующих степеней p , аналогичные полиномам (7), (10) и структурная схема рис. 2 приобретает вид, показанный на рис. 3. Для матриц $H(p)$ и $G(p)$, заданных в виде (40), уравнение (33),

записанное в виде системы скалярных уравнений, имеет вид

$$\left. \begin{array}{l} [1 + H_{11}(p)G_{11}(p) + H_{12}(p)G_{21}(p)] v_1(t) + \\ + [H_{11}(p)G_{12}(p) + H_{12}(p)G_{22}(p)] v_2(t) = 0; \\ [H_{21}(p)G_{11}(p) + H_{22}(p)G_{21}(p)] v_1(t) + \\ + [1 + H_{21}(p)G_{12}(p) + H_{22}(p)G_{22}(p)] v_2(t) = 0. \end{array} \right\} \quad (42)$$

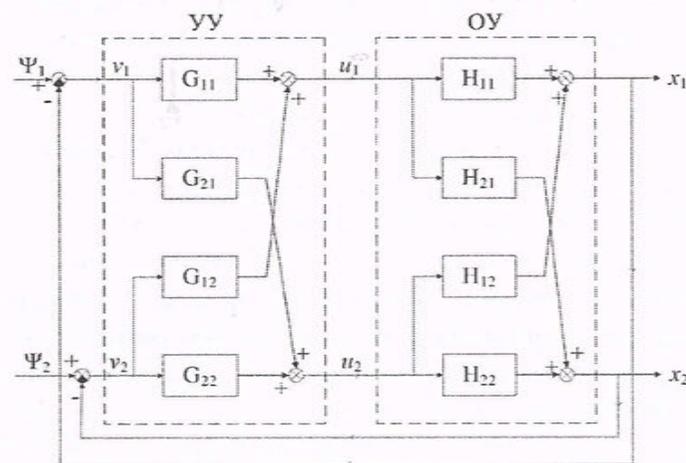


Рис. 3. ОУ - объект управления

Если операторы $G_{12}(p)$ и $G_{21}(p)$ выбраны так, что

$$G_{12}(p) = -H_{11}^{-1}(p)H_{12}(p)G_{22}(p), \quad (43)$$

и

$$G_{21}(p) = -H_{22}^{-1}(p)H_{21}(p)G_{11}(p), \quad (44)$$

то система уравнений (42) вырождается в систему двух независимых друг от друга уравнений, т.е. достигается автономность по И.Н. Вознесенскому.

Из (42)-(44) и рис. 3 следует, что эффект автономности достигнут благодаря идентичности свойств двух каналов, по которым распространяется воздействие координаты $e_2(t)$ на величину $x_1(t)$ (и наоборот: воздействие координаты $e_1(t)$ на координату $x_2(t)$). Также как и рассмотренная выше система с дополнительной связью по возмущению инвариантная по отношению к внешнему возмущению, автономная (инвариантная) система управления многосвязным объектом – негрубая по Андронову система. Но, как уже подчеркивалось выше, это не означает, что она бесполезна для практики.

То, что было сказано выше об ограничениях физической реализуемости операторов $G_{12}(p)$ и $G_{21}(p)$ в полной мере сохраняет свою силу и при решении рассматриваемой задачи.

Напомним здесь еще раз о недопустимости для неминимально-фазовых объектов сокращения общих сомножителей в числителях и знаменателях соответствующих дифференциальных операторов на этапе исследования создаваемой системы управления, так как это приводит к понижению порядка соответствующих дифференциальных уравнений, и это не позволяет обнаружить факт неустойчивости системы управления.

Рассмотрим теперь тот случай, когда для операторных многочленов (41) заданы лишь их оценки, например, в виде множеств. Тогда вместо (43), (44) будем иметь

$$G_{12}(p) = -\tilde{H}_{11}^{-1}(p)\tilde{H}_{12}(p)G_{22}(p),$$

и

$$G_{21}(p) = -\tilde{H}_{22}^{-1}(p)\tilde{H}_{21}(p)G_{11}(p);$$

где $\tilde{H}_{11}(\cdot) \neq H_{11}(\cdot)$; $\tilde{H}_{12}(\cdot) \neq H_{12}(\cdot)$; $\tilde{H}_{22}(\cdot) \neq H_{22}(\cdot)$; $\tilde{H}_{21}(\cdot) \neq$

$H_{21}(\cdot)$ и, следовательно, эффект автономности системы в строгом смысле этого слова исчезает и речь может идти лишь о квазиавтономности.

Далее выбор параметров операторов $G_{12}(p)$ и $G_{21}(p)$ из условия получения гарантированного результата в условиях параметрической неопределенности в задаче получения квазиавтономности проводится по уже описанной выше схеме с использованием результатов **Утверждения** о решении соответствующей минимаксной задачи. Поэтому подробнее останавливаться на этом здесь мы не будем. Отметим только, что, так же как и выше при рассмотрении задачи о компенсации действия возмущения на объект управления, решение задачи обеспечения квазиавтономности оказывается непосредственно связанным с задачей робастной устойчивости.

Параметры оставшихся еще неопределенными блоков $G_{11}(p)$, $G_{22}(p)$ выбираются из условия придания замкнутой системе управления заданных свойств и, в частности, обеспечения ее робастной устойчивости.

4 Некоторые обобщения и заключение

Теория инвариантности систем управления была разработана для стационарных линейных систем, сначала для непрерывных, а впоследствии, и для дискретных систем. Современная компьютерная техника позволяет расширить область применения методов, развитых этой теорией для стационарных систем, на некоторые классы линейных нестационарных систем. Для иллюстрации открывающихся здесь возможностей рассмотрим дискретный аналог системы управления многосвязным объектом, структурная схема которой приведена на рис. 2. Динамика

такой системы, поведение которой в дискретные моменты времени $t_n = nT$, где время $T = const$ – время шага (цикла), $n = 0, 1, 2, \dots$, описывается векторно-матричным разностным уравнением с переменными во времени коэффициентами

$$[I + H(E, n)G(E, n)] V(t) = \Psi(t), \quad (45)$$

где E – оператор сдвига $Ex_n = x_{n+1}$, $\Psi_n \in R^m$ – вектор задания. Уравнение нестационарного объекта управления

$$X_n = H(E, n)U_n, \quad (46)$$

где $X_n, U_n \in R^m$,

$$H(E, n) = \|H_{ij}(E)\|_{i,j=1}^m, \quad (47)$$

$$H_{ij}(E, n) = \frac{B_{ij}(E, n)}{A_{ij}(E, n)}; \quad A_{ij}(E, n) = \sum_{k=0}^{m_{ij}} a_{ijk}(n)E^k; \quad (48)$$

$$B_{ij}(E, n) = \sum_{q=0}^{l_{ij}} b_{ijq}(n)E^q.$$

Уравнение многомерного цифрового регулятора

$$U_n = G(E, n)V_n, \quad (49)$$

где

$$G(E, n) = \|G_{ij}(E, n)\|_{i,j=1}^m, \quad (50)$$

$$G_{ij}(E, n) = \frac{C_{ij}(E, n)}{S_{ij}(E, n)}; \quad S_{ij}(E, n) = \sum_{r=0}^{d_{ij}} s_{ijr}(n)E^r, \quad (51)$$

$$C_{ij}(E, n) = \sum_{p=0}^{b_{ij}} c_{ijp}(n)E^p.$$

Уравнение ошибки

$$V_n = \Psi_n - X_n. \quad (52)$$

Из переменных во времени коэффициентов полиномов $A_{ij}(\cdot)$, $B_{ij}(\cdot)$ и $S_{ij}(\cdot)$, $C_{ij}(\cdot)$ составим векторы

$$\bar{A}_{ij}(n) = \|a_{ijk}(n)\|_{k=0}^{m_{ij}}; \quad \bar{B}_{ij}(n) = \|b_{ijq}(n)\|_{q=0}^{l_{ij}}; \quad i, j = \overline{1; m};$$

$$\bar{S}_{ij}(n) = \|s_{ijr}(n)\|_{r=0}^{d_{ij}}; \quad \bar{C}_{ij}(n) = \|c_{ijp}(n)\|_{p=0}^{b_{ij}}; \quad i, j = \overline{1; m};$$

Примем, что для этих векторов при $n = 0$ априорные оценки

$$\bar{A}_{ij}(0) \in A_{ij}^0; \quad \bar{B}_{ij}(0) \in B_{ij}^0; \quad \bar{S}_{ij}(0) \in S_{ij}^0; \quad (53)$$

$$\bar{C}_{ij}(0) \in C_{ij}^0.$$

Относительно векторов $\bar{A}_{ij}(n)$, $\bar{B}_{ij}(n)$ и $\bar{S}_{ij}(n)$, $\bar{C}_{ij}(n)$ как функций дискретного времени n известно только то, что скорости их изменений, т.е. первые разности величин $\Delta \bar{A}_{ij}(n)$, $\Delta \bar{B}_{ij}(n)$ и $\Delta \bar{S}_{ij}(n)$, $\Delta \bar{C}_{ij}(n)$, ограничены

$$\|\Delta \bar{A}_{ij}(n) = \bar{A}_{ij}(n+1) - \bar{A}_{ij}(n)\| \leq \Delta a_{ij} = const, \quad (54)$$

$$i, j = \overline{1; m};$$

$$\|\Delta \bar{B}_{ij}(n) = \bar{B}_{ij}(n+1) - \bar{B}_{ij}(n)\| \leq \Delta b_{ij} = const, \quad (55)$$

$$i, j = \overline{1; m};$$

$$\|\Delta \bar{S}_{ij}(n) = \bar{S}_{ij}(n+1) - \bar{S}_{ij}(n)\| \leq \Delta s_{ij} = const, \quad (56)$$

$$i, j = \overline{1; m};$$

$$\|\Delta \bar{C}_{ij}(n) = \bar{C}_{ij}(n+1) - \bar{C}_{ij}(n)\| \leq \Delta c_{ij} = \text{const}, \quad (57)$$

$$i, j = \overline{1; m}.$$

На содержательном уровне задача синтеза матрицы $G(E, n)$ цифрового регулятора формулируется так: ее требуется выбрать из условия выполнения автономности (квазиавтономности) по И.Н. Вознесенскому (34) в каждый n -ый момент времени.

Для решения так поставленной задачи синтеза матрицы $G(E, n)$ прежде всего необходимо в каждый момент времени $n \in [0; \infty)$ располагать теми или иными оценками векторов $\bar{A}_{ij}(n)$ и $\bar{B}_{ij}(n)$, где $i, j = \overline{1; m}$.

В [16], [17] достаточно подробно описан алгоритм решения задачи идентификации для переменных во времени параметров, скорости изменения которых ограничены заданными константами. Поэтому останавливаться здесь на изложении этих результатов не будем.

При условии, что вектор состояния X_n измеряется полностью, но при наличии ограниченных помех, рекуррентная обработка последовательности входных U_n и выходных величин X_n объекта управления, выполняемая в реальном масштабе времени (режим "on-line"), позволяет получить в каждый данный момент времени $n \in [0; \infty)$ гарантированные оценки интересующих векторов параметров в виде

$$\bar{A}_{ij}(n) \in A_{ij}^{(n)}; \quad \bar{B}_{ij}(n) \in B_{ij}^{(n)}; \quad i, j = \overline{1; m}; \quad (58)$$

$$\bar{S}_{ij}(n) \in S_{ij}^{(n)}; \quad \bar{C}_{ij}(n) \in C_{ij}^{(n)}; \quad i, j = \overline{1; m}. \quad (59)$$

В [16], [17] показано как от величин ограниченных помех измерения вектора состояния X_n и допустимых скоростей изменения (дрейфа) параметров зависят радиусы этих множеств.

Дальнейшее изложение процедуры параметрического синтеза функционирования цифрового регулятора, решающего задачу выполнения квазиавтономности, продолжим на рассмотренном выше примере объекта управления при $m = 2$ (см. рис. 3).

При наличии точных значений всех параметров объекта управления для выполнения условий автономности должны быть реализованы следующие дискретные аналоги соотношений (43), (44)

$$G_{12}(E, n) = -H_{11}^{-1}(E, n)H_{12}(E, n)G_{22}(E, n), \quad (60)$$

$$G_{21}(E, n) = -H_{22}^{-1}(E, n)H_{21}(E, n)G_{11}(E, n). \quad (61)$$

Не повторяя всего того, что было сказано в разделе 2 о процедуре решения задачи параметрического синтеза в условиях неопределенности, напомним лишь, что для того, чтобы воспользоваться аналогом приведенного выше **Утверждения** о решении соответствующей минимаксной задачи, множества (58), (59) в режиме "on-line" нужно представить в центрированной форме

$$\bar{A}_{ij}(n) = \bar{A}_{ij}^0(n) + \delta \bar{A}_{ij}^{(n)}, \quad (62)$$

$$\bar{B}_{ij}(n) = \bar{B}_{ij}^0(n) + \delta \bar{B}_{ij}^{(n)}, \quad (63)$$

$$\bar{S}_{ij}(n) = \bar{S}_{ij}^0(n) + \delta \bar{S}_{ij}^{(n)}, \quad (64)$$

$$\bar{C}_{ij}(n) = \bar{C}_{ij}^0(n) + \delta \bar{C}_{ij}^{(n)}, \quad (65)$$

где $\delta \bar{A}_{ij}(n)$, $\delta \bar{B}_{ij}(n)$, $\delta \bar{S}_{ij}(n)$, $\delta \bar{C}_{ij}(n)$ – множество с центрами в начале координат.

Здесь $\bar{A}_{ij}^0(n)$, $\bar{B}_{ij}^0(n)$, $\bar{S}_{ij}^0(n)$, $\bar{C}_{ij}^0(n)$ – центры сфер минимальных радиусов, описанных вокруг соответствующих множеств.

В [18] описан алгоритм определения интересующих нас множеств.

Тогда на основании аналога упомянутого Утверждения полиномы, представленные в соответствующих соотношениях (60), (61), имеют вид

$$A_{ij}(E, n) = \sum_{k=0}^{m_{ij}} \overset{\circ}{a}_{ijk}(n) E^k; \quad i, j = \overline{1; 2}; \quad (66)$$

$$B_{ij}(E, n) = \sum_{q=0}^{l_{ij}} \overset{\circ}{b}_{ijq}(n) E^q; \quad i, j = \overline{1; 2}; \quad (67)$$

$$S_{ij}(E, n) = \sum_{r=0}^{d_{ij}} \overset{\circ}{s}_{ijr}(n) E^r; \quad i, j = \overline{1; 2}; \quad (68)$$

$$C_{ij}(E, n) = \sum_{p=0}^{b_{ij}} \overset{\circ}{c}_{ijp}(n) E^p; \quad i, j = \overline{1; 2}; \quad (69)$$

Здесь $\overset{\circ}{a}_{ijk}(n)$, $\overset{\circ}{b}_{ijq}(n)$, $\overset{\circ}{s}_{ijr}(n)$ и $\overset{\circ}{c}_{ijp}(n)$ – элементы соответствующих векторов $\overline{A}_{ij}(n)$, $\overline{B}_{ij}(n)$, $\overline{S}_{ij}(n)$, $\overline{C}_{ij}(n)$.

Таким образом, использование результатов текущей идентификации параметров нестационарного объекта управления позволяет подстраивать (адаптировать) нужные значения параметров цифрового регулятора для поддержания условий квазиавтономности режима функционирования замкнутой системы управления.

Формирование механизма адаптации, сохраняющего в каждый n -ый момент времени соотношения, обеспечивающие выполнение условий квазиинвариантности, еще не разрешает полностью проблем синтеза цифрового регулятора. Остается еще

нерешенной задача синтеза оставшихся блоков цифрового регулятора, призванных обеспечить остальные требуемые свойства замкнутой системы управления, в частности, ее робастную устойчивость при изменении параметров объекта управления во времени. Проблема робастной стабилизируемости систем с переменными во времени параметрами еще далека от своего разрешения.

Выше уже отмечалось, что в реальных условиях, т.е. при наличии некоторой параметрической неопределенности в объекте управления, строго говоря, эффекта абсолютной инвариантности достичь невозможно, но это еще не основание для отказа от использования эффекта квазиавтономности (квазиинвариантности).

Современный уровень развития теорий идентификации, робастной устойчивости и адаптации в сочетании с возможностями компьютерной техники, используемой в системах управления, позволяют по-новому оценить и найти новые применения основным идеям теории инвариантности систем управления. Возможности существенного обобщения основных результатов этой теории на класс объектов управления, к которым принцип суперпозиции неприменим, т.е. на класс нелинейных систем, представляются весьма сомнительными. Во всяком случае за исключением нескольких работ Л.И. Розоноэра и Э.М. Солнечного автору неизвестны удачные попытки получить конструктивные результаты на этом пути.

Список литературы

- [1] Щипанов Г.В. Гироскопические приборы слепого полета. М.: Оборонгиз, 1938.

- [2] Щипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1.
- [3] Рябов Б.А. Возникновение, развитие и состояние теории инвариантности // В сб.: «Теория инвариантности в системах автоматического управления. Труды Второго Всесоюзного совещания, состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [4] Кулебакин В.С. Об изображении функций интегралами дифференциальных уравнений // Труды ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1952. Вып. 433.
- [5] Кулебакин В.С. Операторное $K(D)$ -изображение функций и его практическое применение // Труды ВВИА Н.Е. Жуковского, 1958. Вып. 695.
- [6] Кулебакин В.С. Теория инвариантности автоматически регулируемых и управляемых систем // Труды I Международного конгресса ИФАК (теория непрерывных систем, специальные математические проблемы). Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- [7] Ивахненко А.Г. Теория компаундирующих регуляторов // Сб. трудов Института электротехники АН УССР. 1951. Вып. 6; 1953. Вып.10.
- [8] Ивахненко А.Г. О способах устранения установившейся составляющей ошибки системы автоматического регулирования // Докл. АН СССР. 1952. Т. 87, № 6.
- [9] Ивахненко А.Г. Электроавтоматика. ГТИ УССР / Изд. I, 1954; Изд. II, 1957.

- [10] Петров Б.Н. О реализуемости условий инвариантности // Сб. «Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах. Труды совещания, состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [11] Петров Б.Н. О применении условий инвариантности // Труды II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
- [12] Петров Б.Н. Принцип инвариантности и условия его применения при расчете линейных и нелинейных систем // Труды I Международного конгресса ИФАК. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- [13] Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Структура абсолютно инвариантных систем и условия их физической осуществимости // Труды Второго Всесоюзного совещания по теории инвариантности в системах автоматического управления, состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [14] Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
- [15] Вознесенский И.Н. О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1-5.
- [16] Kuntsevich V.M. Set-Value Estimation of State and Parameter Vectors within Adaptive Control Systems // Bounding approaches to system identification / Eds: M. Milanese, J. Norton, H.-Piet Lahanier and E. Walter. New York, London: Plenum Press, 1996.

- [17] Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006. 258 с.
- [18] Shor N.Z., Berezovski O.A. New algorithms for constructing optimal circumscribed and inscribed ellipsoid // Optimization Methods and Software. 1992. Vol. 1. P. 283-299.

Взгляд на идеи Г.В. Щипанова через много лет

А.Г. Бутковский

Одна из основных идей Единой геометрической теории управления (ЕГТУ) [1] состоит в том, что в ней рассматриваются математические структуры, которые по закону «100 % эффективности математики»¹ только приближенно описывают реальность. Если мы наблюдаем эти структуры в реальности (описываемые, например, системами математических уравнений, тождеств, неравенств, включений) на каком-то заметном интервале времени, то они, эти структуры, должны как-то сохраняться, сохраняя определенную точность описания этой реальности. Калибровочный, или компенсирующий, принцип современной теоретической физики подсказывает, что средство или метод поддержания структур основан на обратной связи, т.е. должен работать регулятор или система автоматического регулирования (управления) по принципу обратной связи. Такой регулятор должен «наблюдать» рассогласования между реально наблюдаемыми (измеряемыми) величинами и требуемыми величинами.

¹ В соответствии с этим законом, для любой реальности существует математическая структура, которая описывает ее не хуже, чем с наперед заданной, сколь угодно малой, но не нулевой ошибкой. И обратно, какова бы ни была сколь угодно сложная математическая структура, для нее существует реальность, описываемая этой структурой с любой наперед заданной степенью точности.

Далее регулятор должен сформировать «ошибки» регулирования, если говорить в терминах теории управления. Поскольку ошибки вызываются внешними возмущающими (разрушающими) воздействиями (или помехами), то желательно наблюдать помехи, ибо лучше нейтрализовать причину ошибок, чем ждать их заметного проявления, пока ошибка не достигнет значительной величины. В криминалистике это называется профилактика правонарушений. Здесь подходящее место напомнить положение, из которого следуют два принципа построения регуляторов. Первый и наиболее очевидный из них состоит в следующем.

Если мы наблюдаем (измеряем) возмущения (помехи), действующие на структуру, то регулирующие и поддерживающие структуру воздействия могут быть «быстро» вычислены, например, в силу знания уравнений, описывающих поддерживающую структуру. Таким образом, компенсирующее управляющее воздействие на структуру тем самым обеспечит компенсацию «помех», и структура будет сохраняться, что и требуется. Это – обратная связь, но только по помехам. В теории управления такой способ называется регулированием по возмущению. Недостатки этого способа регулирования очевидны: надо довольно много знать об объекте регулирования, измерять или вычислять.

Но был найден принципиально другой способ компенсации помех. В XIX в. Уатт изобрел регулятор хода паровой машины, основанный на принципе обратной связи, но уже по ошибке регулирования величины. Это величайшее, эпохальное изобретение, обогатившее человечество не только мощнейшим практическим ускорителем цивилизации, но обогатившее и наши теоретические, философские воззрения. Глубина принципа обратной связи еще далеко не исчерпана. Суть этого принципа состоит в формировании обратной связи (регулятора) по ошибке,

т.е. по рассогласованию между требуемой и истинной величиной. Здесь самое трудное в общем случае – это: 1) описать вид и меру этого рассогласования и 2) описать способ управления, минимизирующий меру рассогласования. Эта задача, пожалуй, одна из самых фундаментальных задач кибернетики.

Могут быть и комбинированные способы поддержания структуры и по наблюдению за помехами, и по наблюдению за ошибками.

В связи со вторым способом регулирования (обратная связь по ошибке) сделаем, на наш взгляд, важное и принципиальное замечание. Оно связано с проблемой построения эффективных высококачественных регуляторов и систем автоматического регулирования.

Непонимание, с нашей точки зрения, именно теоретической, т.е. математической, сути дела привело к нагромождению серьезных недоразумений, имевших драматические последствия. Здесь имеются в виду события, начавшиеся в 1939 году и связанные с именем выдающегося инженера и ученого Г.В. Щипанова, который выдвинул принцип идеального регулирования и идеального регулятора обратной связи, использующего ошибку, т.е. расхождение между действительным и желаемым (заданным) значениями регулируемой величины. Дискуссия вокруг этого принципа длилась с переменной интенсивностью на протяжении нескольких десятилетий. Этому посвящено много литературы. Мы укажем только на [2]- [6], где можно найти много других ссылок. Конечно, можно сказать, что в конце 30-х годов прошлого века теория управления только начала зарождаться, а теория «скользящих режимов» и «систем с переменной структурой» начала развиваться лишь в 60-х годах XX века. Как выяснилось, идея систем с переменной структурой, скользящие режимы и

большие коэффициенты усиления начали проливать свет на те принципы, которые предлагал Г.В. Щипанов [2]. Поучительно, что даже выдающиеся ученые (см. авторов [5]) не восприняли идеи Г.В. Щипанова.

Тогда идея Г.В. Щипанова представлялась парадоксальной и непонятной. Действительно, парадоксальность и непонятность состояли в том, что по Щипанову, как это понимали и толковали тогда его критики, ошибка регулирования (обозначим ее Δ) равнялась нулю тождественно. Иными словами, $\Delta = 0$, и саму ошибку Δ понимали как классическую непрерывную функцию от непрерывного аргумента, роль которого играло время t , т.е. $\Delta(t) = 0$ при $t > t_0$.

Именно «сигнал» $\Delta(t) = 0$ воспринимал «наблюдатель» в виде сигнала от регулятора (обратной связи), и на «его основе» (по этой «информации») он должен был выработать свое управление, которое компенсировало помехи, т.е. поддерживало бы все время $\Delta(t) = 0$.

Возник совершенно законный вопрос: Что это за чудо? Действительно, регулятор независимо от вида помех поддерживает одну и ту же ошибку $\Delta(t) = 0$. Раз ошибка одна и та же, т.е. $\Delta(t) = 0$, то регулятор, по крайней мере, его вход, на который поступает сигнал ошибки Δ , может быть вообще отключен от объекта. Таким образом, парадоксально, но регулятор, не получая (!) никакой информации от объекта, вместе с тем идеально справляется со своей работой. Он идеально компенсирует любые помехи, которые пытаются расстроить работу объекта. Отсюда делался вывод: никаких идеальных регуляторов Щипанова существовать не может, они противоречат элементарному «здравому смыслу» это идеализм, мистицизм, лженаука и т.д. и т.п. [5].

Все эти тривиальные соображения против идей Щипанова,

для которых не было нужно даже никаких теорий и никакой математики, были верны лишь при одном предположении, т.е. лишь при условии, что ошибки $\Delta(t)$ есть непрерывная функция времени t , тождественно равная нулю.

Однако, в то время никому не пришло в голову, что в принципе или, по крайней мере, для широкого класса «случаев» тождество $\Delta(t) = 0$ может пониматься лишь как некоторый предел, возможно, и не достижимый абсолютно точно, но достижимый приближенно и со сколь угодно высокой, но не 100 %-й точностью. Такой нуль можно образно назвать как «шероховатый нуль».

Можно сформулировать ответ критикам Щипанова тех времен и сказать им через несколько десятилетий: «Вы не правы, ибо вместо идеального нуля ошибки $\Delta(t)$, который вы имели в виду, критикуя Щипанова, на самом деле, образно говоря, имеет место «шероховатый нуль» ошибки Δ , который в действительности есть предел и, в этом смысле, идеальный, абстрактный математический объект, который образно можно себе представить как «пилу», которая на каждом сколь угодно малом участке своей длины имеет бесконечное число зубцов, каждый из которых имеет бесконечно малую высоту».

Таким образом, ненулевая ошибка регулирования почти всегда есть, но она «очень» маленькая, исчезающее маленькая. Именно она несет информацию, столь необходимую для работы всей системы поддержания структуры в целом. Последнее обстоятельство – малость ошибки – влечет за собой необходимость иметь в регуляторе усилители с очень большими коэффициентами усиления, в пределе – бесконечно большими, чтобы произведение ошибки на коэффициент усиления оказалось конечной величиной, способной привести к нужному конечному

изменению других величин системы (уже регулярных).

Реальный усилитель всегда имеет ограничения. Эти ограничения стали моделировать с помощью идеального релейного элемента, который имеет бесконечно большой коэффициент усиления, но в бесконечно малой окрестности точки переключения. «Шероховатый нуль» заставляет это реле очень часто срабатывать, в пределе частота его переключений стремится к бесконечности, оно работает в «вибрационном режиме», а регулятор работает в «скользящем режиме».

Наличие большого коэффициента усиления порождает другую фундаментальную проблему – проблему устойчивости.

Из теории линейных конечномерных и сосредоточенных систем известно, что при достаточно больших коэффициентах усиления системы, как правило, теряют устойчивость, становятся неработоспособными, и, как следствие этого, соответствующая структура разрушается. Синтезировать систему на «скользящем режиме» дело не простое и требует большого искусства в смысле нахождения компромисса между противоречивыми требованиями высокой точности и высокой степени устойчивости. Например, такие требования предъявляются к решающим усилителям, используемым, в частности, в аналоговых вычислительных устройствах. Кроме того, структура может содержать «малые параметры», учесть которые очень трудно. Для систем с распределенными параметрами, включая поля и сплошные среды, эти проблемы представляют собой очень трудные математические и инженерные проблемы. В [1], в частности, показано, как, используя такие принципы регулирования, можно решать новые нетривиальные краевые задачи для систем с распределенными параметрами.

До сих пор теория таких режимов достигла заметных успехов

только для тех объектов, которые достаточно точно аппроксимируются линейными сосредоточенными объектами невысокого порядка.

Однако, многие важные процессы технологии (плазма, композиты и др.) требуют создания *распределенных регуляторов*, которые поддерживают, сохраняют не одну или несколько скалярных величин, а распределения, т.е. функции (отображения), которые в большинстве случаев и описывают достаточно точно структуры, нуждающиеся в сохранении.

По аналогии с сосредоточенными системами здесь, прежде всего, нужно понять, что такое «шероховатая поверхность» размерности $n \geq 2$, и лишь затем приступить к синтезу «пространственно многомерного распределенного скользящего режима», обеспечивающего достаточно высокую точность регулирования. При этом регулятор, обеспечивающий «пространственно распределенный скользящий режим», должен обеспечивать и устойчивость всей системы в целом.

Такие задачи встречаются, в частности, при попытке интегрирования *неинтегрируемых* уравнений с частными производными, например, простейший случай интегрирования системы уравнений для неизвестной функции $Q(x, y)$ с заданными $a(x, y)$ и $b(x, y)$:

$$\frac{\partial Q(x, y)}{\partial x} = a(x, y), \quad \frac{\partial Q(x, y)}{\partial y} = b(x, y), \quad (1)$$

$$(x, y) \in D \subset \mathbb{R}^2,$$

где

$$\frac{\partial a(x, y)}{\partial y} \neq \frac{\partial b(x, y)}{\partial x}, \quad (2)$$

или соответствующей вариационной задачи (оптимального управления): найти функцию $Q(x, y)$, минимизирующую интеграл I :

$$I = \iint_D \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - a(x, y) \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - b(x, y) \right)^2 \right] dx dy. \quad (3)$$

Очевидно, в случае классической интегрируемости системы (1), интеграл в точности равен нулю. При отсутствии классической интегрируемости системы (1) возникает вопрос: «Какого типа здесь можно предложить минимизирующие процедуры и последовательности и в каком классе функций, как понимать их пределы?» Это и будет пространственно многомерный «скользящий режим».

В общем случае интересно и важно математически точно определить «скользящие n -мерные режимы», $n = 1, 2, 3, \dots$ как некоторый новый «неклассический» класс «обобщенных» функций.

Такие объекты, возможно, будут двойственны в каком-то смысле к классическим нерегулярным обобщенным функциям, например, типа δ -функций.

На сегодня нет такой более-менее общей теории систем с распределенными параметрами, которая имела бы достаточно хорошо разработанные методы построения таких режимов (регуляторов) для разных ситуаций. Это трудные математические задачи, которые подчас даже трудно поставить, не говоря об их решении.

Эти принципы реализуются, например, в задачах каскадного регулирования, когда в сложном объекте «локальные» регуляторы поддерживают некоторые «локальные» (внутренние, промежуточные) величины, тем самым существенно уменьшая

их вредные возмущающие воздействия на главные регулируемые величины, что облегчает работу регуляторов этих величин. «Локальные сосредоточенные регуляторы» должны работать очень быстро, их время регулирования должно быть на порядки меньше времен, допустимых для регулирования на «глобальном» уровне. «Большая» (глобальная) система регулирования должна как бы «расслаиваться» на «малые» (локальные) системы регулирования. Поэтому для современной теории управления столь важен математический аппарат современной геометрии – аппарат теории расслоений. Локальные регуляторы можно толковать как регуляторы, служащие для обеспечения «локальной калибровочной инвариантности», или «локальной компенсации» возмущений. Роль такого реализатора расслоений (декомпозиции) может играть подвижное управление [6] как в системах с сосредоточенными, так и распределенными параметрами. Другими словами, подвижное управление именно за счет своей точности и подвижности может оказывать регулирующие воздействия локально, независимо от других точек.

В теории управления сосредоточенными «много связными» системами такой прием назывался развязыванием сложной много связной системы и состоял в «фиксации» некоторой части или даже всех переменных, от которых зависят ошибки регулирования. Их фиксация (инвариантность) должна достигаться за счет работы локальных регуляторов.

Здесь уместно снова напомнить в несколько более развернутом виде об «Управленческой парадигме Мира» [1].

Она состоит в том, что всякая без исключений, наблюдаемая в Мире (природе или обществе) структура существует, проявляется и функционирует (в виде закона природы или общества), лишь пока и поскольку она устойчиво поддерживается на опре-

деленном интервале времени посредством одного или нескольких регуляторов, сосредоточенных или распределенных. При этом наблюдаемые в Мире (живой, неживой, искусственной природе или обществе) *флуктуации* всех без исключения наблюдаемых величин (например, не обязательно физических) есть не что иное, как *ошибки регулирования* этих систем управления, которые используются регулятором обратной связи для выработки управляющих воздействий, поддерживающих структуры объекта регулирования. Это – новое толкование флуктуаций.

Таким образом, возникает нетрадиционная «управленческая» точка зрения на устройство Мира, которая, прежде всего, поражает нас своей определенностью (например, существованием «Законов Природы») и устойчивостью этих определенностей, хотя всегда имеются флуктуации, которые мы толкуем как ошибки регулирования. Воистину, порядок надо не наводить, а поддерживать так, как это делается в Природе. За определенность в Природе побеспокоилась сама Природа, она создала регуляторы, обеспечивающие поддержание ее Законов.

Список литературы

- [1] Бабичев А.В., Бутковский А.Г., Похйолаинен С. К единой геометрической теории управления. М.: Наука, 2001. 352 с.
- [2] Емельянов С.В. Системы автоматического регулирования с переменной структурой. М.: Наука, 1967.
- [3] Кухтенко А.И. Основные этапы формирования теории инвариантности // Автоматика и телемеханика. Ч. I. 1984. № 2. С. 3-13; Ч. II. 1985. № 2. С. 3-14.

- [4] Г.В. Шипанов и теория инвариантности. Труды и документы / Составители З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004. 428 с.
- [5] Соболев С.Л. и др. Лженаучные работы Института автоматизации и телемеханики АН СССР // Большевик. 1941. № 5. С. 90-96.
- [6] Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1980.

Синтез регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы управления

А.В. Проскурников, В.А. Якубович

В 1939 г. Г.В. Щипановым [1] была поставлена задача построения регуляторов, обеспечивающих независимость выхода системы управления от внешнего воздействия («идеальных универсальных регуляторов» в терминологии Щипанова). Широко известность данная задача получила под названием задачи об абсолютной инвариантности системы управления (это название было предложено Н.Н. Лузиным). Близкую проблематику ранее рассматривали также Н. Минорский [2] и И.Н. Вознесенский [3]. Работа Г.В. Щипанова была не только одной из первых работ, в которых рассматривался синтез регуляторов для объектов управления общего вида, она также открыла, по существу, новую проблематику в теории управления. Полученные Г.В. Щипановым выводы о возможности достижения инвариантности системы были предметом длительной дискуссии в 1940-60-е гг. ([4–15] и др.), и которая принимала иногда недостойные формы. Историю вопроса, а также обзор последующего развития теории абсолютной инвариантности можно найти в [16–19] (см. также многочисленные ссылки в указанных обзорах). Данная тематика, несмотря на то, что ей посвящена обширная литература, не теряет актуальности, в ней все еще остаются нерешенные задачи.

В частности, несмотря на большое количество результатов для конкретных объектов управления, вплоть до последнего времени фактически не было получено общих критериев разрешимости задачи абсолютной инвариантности для многомерных систем. В данной статье, суммирующей результаты предыдущих работ авторов [20–28], приводятся условия существования и полное конструктивное описание универсальных регуляторов в задаче об инвариантности для линейных систем достаточно общего вида (включающих, в частности, системы, рассмотренные Г.В. Щипановым). Показано, что классическая задача об абсолютной инвариантности разрешима, если выполнено условие, близкое к минимальнофазовости объекта управления и внешнее воздействие измеряется. В случае, когда объект минимальнофазовый, но внешнее воздействие не измеряется, инвариантности невозможно достигнуть точно, однако возможно ее достигнуть приближенно (с произвольной наперед заданной точностью), если внешнее воздействие или одна из его производных – ограниченная функция. Эти результаты позволяют по-новому взглянуть на упомянутую дискуссию о достижимости инвариантности и показывают, что в этой дискуссии в определенной степени правы обе стороны. Критикующая сторона права, поскольку в широком классе случаев и, в частности, в конкретных исследуемых системах абсолютная инвариантность невозможна, – она вступает в противоречие с устойчивостью замкнутой системы. Г.В. Щипанов прав, поскольку для минимальнофазовой системы возможна приближенная абсолютная инвариантность со сколь угодно малой, заранее заданной границей ошибки. Сейчас, спустя почти 70 лет, роль Г.В. Щипанова в развитии теории автоматического управления представляется бесспорной.

1 Постановка задачи

Рассмотрим объект управления вида

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + F(s)\varphi(t), \quad (1)$$

где $s = \frac{d}{dt}$, A , B , F – матричные полиномы с вещественными коэффициентами размеров $n \times n$, $n \times m$, $n \times l$ соответственно, $\det A(\lambda) \neq 0$; $y(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $\varphi(t) \in \mathbb{R}^l$ – выход, вход и внешнее воздействие (вообще говоря, неизвестное). Под *стабилизирующим регулятором* всюду ниже мы будем понимать закон управления вида

$$D(s)u(t) = C(s)y(t) + G(s)\varphi(t), \quad (2)$$

где D , C , G – матричные полиномы размеров $m \times m$, $m \times n$, $m \times l$, такие что $\det D \neq 0$ и замкнутая система (1), (2) устойчива. Последнее означает, что матричный полином

$$\Xi(\lambda) = \begin{bmatrix} A(\lambda) & -B(\lambda) \\ -C(\lambda) & D(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3)$$

гурвицев – то есть $\det \Xi(\lambda) \neq 0$ при $Re \lambda \geq 0$. В задаче об инвариантности требуется для заданного объекта управления (1) построить стабилизирующий регулятор (2), который обеспечивает инвариантность выхода $y(t)$ от внешнего воздействия $\varphi(t)$: для любой функции $\varphi(\cdot)$ и любого решения системы (1), (2) выполнено

$$|y(t)| \rightarrow 0 \quad \text{при } t \rightarrow +\infty.$$

Следуя [21], будем называть регулятор с указанными свойствами I -универсальным (универсальным по свойству инвариантности).

Замечание. Г.В. Щипанов [1] не требовал выполнения условия $\det D \neq 0$, что и явилось основной причиной критики его работы. «Регулятор» с условием $\det D \equiv 0$, как правило, непригоден на практике по двум причинам [4–6, 8]: Во-первых, при выполнении критерия Щипанова замкнутая система (1), (2) с $\det D \equiv 0$, как правило, становится неустойчивой при сколь угодно малом отклонении параметров регулятора или объекта управления – по существу этот вывод сделал М.А Айзерман в Письме вице-президенту АН СССР Шмидту О.Ю., опубликованном в [19]. Во-вторых, уравнение (2) либо не имеет решений (что имеет место при почти любой правой части), либо оно неоднозначно разрешимо относительно $u(t)$. Следует отметить, однако, возросший в последние годы (прежде всего, в западной литературе) интерес к подобным вырожденным, системам, называемым дескрипторными (descriptor systems). Вполне допустимыми регуляторы Щипанова с $\det D \equiv 0$ являются также и с точки зрения общего «поведенческого» подхода Виллемса [34]. Мы, однако, ограничимся только стабилизирующими в указанном выше смысле регуляторами. Для практических целей желательно строить регуляторы, обладающие свойством строгой реализуемости. Следуя [20], регулятор (2) будем называть строго реализуемым, если $\det D \neq 0$, $\det \Xi \neq 0$ и все элементы трех матриц

$$D^{-1}(\lambda)C(\lambda), \quad D^{-1}(\lambda)G(\lambda), \quad \Xi^{-1}(\lambda) \begin{bmatrix} F(\lambda) \\ G(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_y(\lambda) \\ W_u(\lambda) \end{bmatrix}$$

являются правильными рациональными функциями (степень числителя меньше либо равна степени знаменателя). Здесь W_y , W_u – передаточные матрицы от $\varphi(\cdot)$ к $y(\cdot)$, и от $\varphi(\cdot)$ к $u(\cdot)$ соответственно. Для строго реализуемого регулятора $u(t)$ выра-

жается через свертку с вектором $[y(t), \varphi(t)]$, а вектор $[y(t), u(t)]$ выражается через свертку с $\varphi(\cdot)$.

2 Критерий существования и полное описание класса I-универсальных регуляторов

Следующая простая лемма [21, 25] позволяет получить необходимые и достаточные условия разрешимости поставленной выше задачи об инвариантности.

Лемма 1 Для стабилизирующего регулятора (2) следующие три утверждения равносильны:

1. регулятор I-универсален;
2. $W_y \equiv 0$ (откуда следует, что $D^{-1}G = W_u$, $BW_u = -F$);
3. $F + BD^{-1}G \equiv 0$.

Отметим, что условие из пункта 2 совпадает с «условием компенсации» предложенным Г.В. Щипановым, а равносильность пп.1,2 была, по-существу, установлена Н.Н. Лузиным [7, 10].

Следствие 1 При $F \neq 0$ для разрешимости задачи об инвариантности необходима возможность измерять внешний сигнал: для I-универсального регулятора (2) имеем $G \neq 0$.

Следствие 1 обосновывает подтвержденное многими примерами [17, 18] убеждение, что без измерения внешнего воздействия инвариантность и устойчивость системы несовместны.

Следствие 2 Для существования I-универсального регулятора необходимо существование рациональной матрицы $S(\lambda)$, аналитичной при $Re \lambda \geq 0$, такой что

$$B(\lambda)S(\lambda) + F(\lambda) = 0. \quad (4)$$

Для существования строго реализуемого I-универсального регулятора должна найтись правильная матрица $S(\lambda)$ с указанным свойством. Если левосторонний наибольший общий делитель B и F есть неособая при $Re \lambda \geq 0$ матрица, то должно выполняться условие

$$rk B(\lambda) = n = \dim y \quad (5)$$

при $Re \lambda \geq 0$ (в частности, $\dim u \geq \dim y$).

При $\dim y = \dim u$ условие (5), которое таким образом практически необходимо для разрешимости задачи об инвариантности, представляет собой условие минимальнофазовости объекта (1): $B(\lambda)$ – гурвицев матричный полином. При $m > n$ условие (5) равносильно [28] существованию $(m - n) \times m$ -матричного полинома $B^+(\lambda)$, для которого матричный полином

$$\Sigma = \begin{bmatrix} B^+ \\ B \end{bmatrix}. \quad (6)$$

гурвицев. Отсюда следует, что выполнение (5) автоматически влечет разрешимость уравнения (4): можно взять $S = \Sigma^{-1} \begin{bmatrix} Y \\ F \end{bmatrix}$, где $Y(\lambda)$ – произвольная рациональная матрица размера $(m - n) \times l$, аналитичная при $Re \lambda \geq 0$ (в случае $m = n$ имеем $S = B^{-1}F$). Далее нам понадобится следующее вспомогательное понятие. Регуляторы $D_1(s)u(t) = C_1(s)y(t) + G_1(s)\varphi(t)$ и $D_2(s)u(t) = C_2(s)y(t) + G_2(s)\varphi(t)$ назовем H-эквивалентными

(гурвиц-эквивалентными), если найдутся устойчивые матричные полиномы H_1, H_2 , такие что $H_1^{-1}D_1 = H_2^{-1}D_2, H_1^{-1}C_1 = H_2^{-1}C_2, H_1^{-1}G_1 = H_2^{-1}G_2$. Очевидно, Н-эквивалентные регуляторы – одновременно стабилизирующие или нет, и для таких регуляторов совпадают передаточные матрицы W_y и W_u . В частности, эквивалентные регуляторы – одновременно I-универсальны или нет. Следующая теорема, а также следствия к ней суммируют результаты работ [25, 27].

Теорема 1 Для существования I-универсального регулятора (2) необходимо и достаточно, чтобы уравнение (4) имело решение $S(\lambda)$, аналитичное при $\operatorname{Re} \lambda \geq 0$, и для некоторых матричных полиномов C_0, D_0 матричный полином $\Xi_0 = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C_0 & D_0 \end{bmatrix}$ был гурвицев. При выполнении этих условий I-универсален любой регулятор (2) с коэффициентами вида

$$C = rA + RC_0, D = rB + RD_0, G = -RD_0S - rF. \quad (7)$$

Здесь S – любое решение уравнения (4) указанного вида, а r, R – матричные полиномы размеров $m \times n$ и $m \times m$ соответственно, такие что R – гурвицев, $\det D \neq 0$ и RD_0S – полином. Для регулятора (7) имеем $D^{-1}G = W_u = S$. Любой I-универсальный регулятор эквивалентен при подходящих R, r и S одному из регуляторов вида (7), причем можно взять $R = \rho I_m$, где ρ – скалярный гурвицев полином. Регулятор (7) строго реализуем тогда и только тогда, когда S и $D^{-1}C$ – правильные рациональные матрицы.

Замечание. Покажем, что если S – правильная матрица, то среди регуляторов (7) заведомо есть строго реализуемые. Введем предварительно обозначения. Степенью функции $f(\lambda) = \frac{b(\lambda)}{a(\lambda)}$, где $a(\lambda), b(\lambda)$ – полиномы, назовем число $\deg f = \deg b - \deg a$.

Степенью рациональной матрицы $W(\lambda) = \|W_{ij}(\lambda)\|$ назовем число $\deg W = \max_{i,j} \deg W_{ij}(\lambda)$. Для любых рациональных матриц $W_1(\lambda), W_2(\lambda)$ имеем $\deg(W_1W_2) \leq \deg W_1 + \deg W_2$. Если $W_1(\lambda) = U\lambda^d + O(\lambda^{d-1})$ при $\lambda \rightarrow \infty$, где U – постоянная квадратная матрица и $\det U \neq 0$, то $\deg W_1 = d, \deg W_1^{-1} = -d$ и $\deg(W_1W_2) = d + \deg W_2$. Произведя при необходимости над уравнениями объекта (1) равносильные преобразования, можно считать матричный полином $A(\lambda)$ верхнетреугольным

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad a_{jj} \neq 0 \text{ при всех } j. \quad (8)$$

Очевидно, что для любого матричного полинома $R(\lambda)$ размера $m \times n$ найдется такой матричный полином $r(\lambda)$, что $\deg(rA + R) < \nu$, где $\nu = \max_{1 \leq j \leq n} \deg a_{jj}$. Возьмем теперь гурвицев матричный полином $R(\lambda)$, такой что $\deg(R^{-1}) < -\deg(T_0^{-1}) - \nu - \max(\deg(A^{-1}B), 0)$, и определим r так, что $\deg C < \nu$. Положим $T_0 = D_0 - C_0A^{-1}B$. Тогда имеем из (7):

$$D^{-1}C = (RT_0 + CA^{-1}B)^{-1}C = T_0^{-1}R^{-1}(I + CA^{-1}BT_0^{-1}R^{-1})^{-1}C,$$

откуда в силу $\deg(CA^{-1}BT_0^{-1}R^{-1}) < 0$ имеем $\deg D^{-1}C \leq \deg(T_0^{-1}) + \deg(R^{-1}) + 1 + \nu \leq 0$. ■ Наиболее простой вид параметризация I-универсальных регуляторов принимает в случае минимальнофазового объекта (в этом случае можно взять $C_0 = I, D_0 = 0$).

Следствие 3 Пусть $n = \dim y = \dim u = m$ и $B(\lambda)$ – гурвицев матричный полином. Пусть $r(\lambda)$ – произвольный $m \times m$ -матричный полином, $\det r \neq 0$, а $R(\lambda)$ – произвольный

$m \times m$ -матричный гурвицев полином. Тогда регулятор (2), для которого

$$D(\lambda) = r(\lambda)B(\lambda), \quad C(\lambda) = r(\lambda)A(\lambda) - R(\lambda), \quad (9)$$

$$G(\lambda) = -r(\lambda)F(\lambda),$$

является I -универсальным. Любой I -универсальный регулятор H -эквивалентен одному из регуляторов вида (9), причем можно взять $R(\lambda) = \rho(\lambda)I_m$, ρ - скалярный гурвицев полином.

Аналогичный результат справедлив и для произвольного объекта со свойством (5):

Следствие 4 Пусть $m > n$ и для некоторого B^+ матричный полином (6) - гурвицев. Тогда I -универсален любой регулятор (2) для которого

$$D = rB + R \begin{bmatrix} 0 \\ B^+ \end{bmatrix}, \quad C = rA + R \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$G = -R \begin{bmatrix} 0 \\ B^+ \end{bmatrix} S - rF, \quad G = -R \begin{bmatrix} 0 \\ B^+ \end{bmatrix} S - rF.$$

Здесь $r(\lambda) = \begin{bmatrix} r_1(\lambda) \\ r_2(\lambda) \end{bmatrix}$, r_1, r_2 - матричные полиномы размеров $n \times n$ и $(m-n) \times m$, $\det r_1 \neq 0$, и R - гурвицев матричный полином размера $m \times m$. Любой другой I -универсальный регулятор H -эквивалентен при подходящих R, r_1, r_2 одному из регуляторов указанного вида, при этом можно взять $R = \rho_0 I_m$, где ρ_0 - скалярный гурвицев полином.

Из приведенных выше результатов следует, в согласии с [4-15], что нельзя достичь инвариантности без измерения внешнего воздействия. Однако, ниже будет показано, что для минимальнофазового объекта можно добиться приближенной (с

произвольной точностью) инвариантности и без измерения внешнего воздействия, если передаточную функцию сделать в определенном смысле близкой к нулю. Отметим также, что если инвариантность требуется не по измеряемому выходу $y(t)$, а по некоторому другому выходу, то и точная инвариантность может быть достигнута без измерения внешнего воздействия [29, 33].

3 Приближенное решение задачи абсолютной инвариантности без измерения внешнего воздействия

Выше было показано, что I -универсальный регулятор (2) с $G \equiv 0$ не может существовать. Как правило, однако, внешнее возмущение недоступно для измерения, но удовлетворяет некоторым ограничениям (сколь угодно сильные возмущения компенсировать в принципе невозможно, поскольку ресурс управления всегда ограничен). Разумным поэтому является вопрос о возможности достижения приближенной инвариантности в классе ограниченных в том или ином смысле внешних воздействий. В качестве класса допустимых внешних воздействий далее рассматривается класс

$$\Phi_M^q = \{\varphi(\cdot) : |\varphi^{(q)}(t)| \leq M \text{ почти всюду}\}$$

. Следуя [22], назовем зависящий от параметра $\varepsilon > 0$ регулятор

$$D_\varepsilon(s)u(t) = C_\varepsilon(s)y(t) \quad (11)$$

приближенно I -универсальным в классе Φ_M^q , если при малых $\varepsilon > 0$ он стабилизирует систему и найдется постоянная $K > 0$, такая

что при всех $\varphi(\cdot) \in \Phi_M^q$ и малых $\varepsilon > 0$ имеем

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |y(t)| \leq K\varepsilon. \quad (12)$$

Предполагается, что объект (1) дан, требуется построить приближенно I-универсальный в классе Φ_M^q регулятор (11). Как и в случае точной инвариантности, условие обобщенно минимальнофазовости оказывается в общей ситуации почти необходимым для разрешимости задачи [26]:

Лемма 2 Если левосторонний наибольший общий делитель B и F есть неособая при $\operatorname{Re} \lambda \geq 0$ матрица, то для существования приближенно I-универсального регулятора должно выполняться условие (5).

Оказывается, что условие (5) – и достаточно для существования приближенно I-универсальных в классе Φ_M^q регуляторов. Мы ниже приведем только конструкцию регулятора для минимальнофазового объекта (B – квадратный гурвицев матричный полином), поскольку в общем виде это построение громоздко. Построение приближенно I-универсальных в классе Φ_M^q регуляторов сводится к описанию специального класса функций. Будем говорить, что функция $f(\lambda, \varepsilon)$ является \mathcal{F} -ограниченной, если при малых $\varepsilon > 0$ функция $f(\lambda, \varepsilon)$ принадлежит пространству Харди H^2 и обратное преобразование Фурье от функции $f(i\omega, \varepsilon)$, равное $k_\varepsilon(t)$ при малых $\varepsilon > 0$, ограничено по L^1 -норме: $\int_0^\infty |k_\varepsilon(t)| dt < C = \text{const}$. Матричную функцию $W(\lambda, \varepsilon)$ назовем \mathcal{F} -ограниченной, если \mathcal{F} -ограничены все ее элементы. Следующее простое утверждение доказано в [22, 24]:

Лемма 3 Стабилизирующий при малых $\varepsilon > 0$ регулятор (11) приближенно I-универсален в классе Φ_M^q тогда и только тогда,

когда передаточная матрица замкнутой системы имеет вид $W_y(\lambda, \varepsilon) = \varepsilon \lambda^q W(\lambda, \varepsilon)$, где $W(\lambda, \varepsilon)$ – \mathcal{F} -ограниченная матричная функция.

Отметим, что даже в классе непрерывных периодических функций $\varphi(t)$ малость передаточной функции системы в смысле H^∞ -нормы не является достаточной для малости установившегося выхода [27]. (Это обстоятельство означает, что к выводам теории H^∞ -оптимизации надо относиться с осторожностью.) Для построения приближенно I-универсальных регуляторов с помощью леммы 3 нам понадобится достаточно широкий класс \mathcal{F} -ограниченных функций. Будем говорить, что полином $p(\lambda, \varepsilon) = \varepsilon^k a_n(\varepsilon) \lambda^n + \varepsilon^{k-1} a_{n-1}(\varepsilon) \lambda^{n-1} + \dots + \varepsilon a_{n-k+1}(\varepsilon) \lambda^{n-k+1} + a_{n-k}(\varepsilon) \lambda^{n-k} + a_{n-k-1}(\varepsilon) \lambda^{n-k-1} + \dots + a_0(\varepsilon)$ принадлежит классу \mathcal{R}_k , $k \geq 1$, если полиномы

$$p(\lambda, 0) = a_{n-k}(0) \lambda^{n-k} + \dots + a_1(0) \lambda + a_0(0) \quad (13)$$

$$a_{n-k}(0) + a_{n-k+1}(0) \lambda + \dots + a_n(0) \lambda^k \quad (14)$$

– гурвицевы (все их корни лежат в левой полуплоскости). Предполагается, что все $a_j(\cdot)$ – функции, непрерывные при $\varepsilon = 0$ и $a_n(0) \neq 0$. Полином из класса \mathcal{R}_0 – это просто полином вида $p(\lambda, 0) = a_n(\varepsilon) \lambda^n + a_{n-1}(\varepsilon) \lambda^{n-1} + \dots + a_0(\varepsilon)$, где $a_i(\cdot)$ непрерывны в 0, $a_n(0) \neq 0$ и $p(\lambda, 0)$ – гурвицев. У полинома из \mathcal{R}_k ровно k корней уходят на бесконечность при $\varepsilon \rightarrow +0$, причем при малых $\varepsilon > 0$ полином – гурвицев. Точнее, справедливо следующее утверждение [23, 30, 32, 33]:

Лемма 4 Полином принадлежит \mathcal{R}_k тогда и только тогда, когда он представим в виде

$$p(\lambda, \varepsilon) = a_n(\varepsilon) (\varepsilon \lambda - w_1(\varepsilon)) \dots \times \quad (15)$$

$$\times \dots (\varepsilon\lambda - w_k(\varepsilon))(\lambda - w_{k+1}(\varepsilon)) \dots (\lambda - w_n(\varepsilon))$$

где $a_n(\varepsilon)$, а также все $w_j(\varepsilon)$ – непрерывные при $\varepsilon = 0$ функции, причем $a_n(0) \neq 0$, а $\operatorname{Re} w_j(0) < 0$. Если коэффициенты вещественны, то $w_j(\varepsilon)$ должны входить сопряженными парами. В частности, полином принадлежит \mathcal{R}_{k+m} тогда и только тогда, когда он представим в виде произведения полинома из \mathcal{R}_k на полином из \mathcal{R}_m .

Исходя из полиномов класса \mathcal{R}_k , мы можем построить весьма широкий и достаточный для приближенного решения задачи об инвариантности класс \mathcal{F} -ограниченных функций. Пусть \mathcal{M}_k обозначает класс функций $f(\lambda, \varepsilon) = \frac{b(\lambda, \varepsilon)}{a(\lambda, \varepsilon)}$, где $\deg a(\lambda, \varepsilon) = n$, $a(\lambda, \varepsilon) \in \mathcal{R}_k$, а $b(\lambda, \varepsilon) = \varepsilon^{k-1} \hat{b}_{n-1}(\varepsilon) \lambda^{n-1} + \varepsilon^{k-2} \hat{b}_{n-2}(\varepsilon) \lambda^{n-2} + \dots + \varepsilon \hat{b}_{n-k+1}(\varepsilon) \lambda^{n-k+1} + b_{n-k}(\varepsilon) \lambda^{n-k} + \dots + b_0(\varepsilon)$. Предполагается, что $k \geq 1$, все \hat{b}_i, b_j непрерывны в 0 и могут обращаться в 0 при $\varepsilon = 0$. Определим еще класс \mathcal{M}_0 : для этого класса $a(\lambda, \varepsilon) \in \mathcal{R}_0$, а $b(\lambda, \varepsilon)$ – произвольный полином с непрерывными при $\varepsilon = 0$ коэффициентами, $\deg b(\lambda, \varepsilon) \leq n - 1$. Следующее утверждение [23, 26, 33] является основным.

Лемма 5 Пусть $f(\lambda, \varepsilon) = \frac{b(\lambda, \varepsilon)}{a(\lambda, \varepsilon)}$. Тогда если $f(\lambda, \varepsilon) \in \mathcal{M}_k$ ($k \geq 0$), то $f(\lambda, \varepsilon)$ является \mathcal{F} -ограниченной функцией.

Перейдем непосредственно к построению строго реализуемых приближенно I-универсальных в классе Φ_M^q регуляторов (11) для минимальнофазового объекта. Предположим дополнительно для сокращения записи, что старший коэффициент $A(\lambda)$ – неособая матрица. Справедлива теорема, доказанная в [26].

Теорема 2 Предположим, что матричный полином $B(\lambda)$ гурвицев, старший коэффициент $A(\lambda)$ обратим, $q \geq 0$ – целое

число, $\deg A \geq \deg F$, причем $q + \deg A > \deg F$. Возьмем $\rho(\lambda, \varepsilon) \in \mathcal{R}_k$, $\deg \rho = N$, где $N = q + \deg A + k - 1$. Существует единственный матричный полином $r(\lambda, \varepsilon)$ степени $k-1$, такой что $\deg(\varepsilon r(\lambda, \varepsilon) \lambda^q A(\lambda) - \rho(\lambda, \varepsilon) I) \leq N - k$. Тогда регулятор (11) с коэффициентами

$$C_\varepsilon(\lambda) = \varepsilon r(\lambda, \varepsilon) \lambda^q A(\lambda) - \rho(\lambda, \varepsilon) I, \quad (16)$$

$$D_\varepsilon(\lambda) = \varepsilon r(\lambda, \varepsilon) \lambda^q B(\lambda)$$

является приближенно I-универсальным в классе Φ_M^q при любом $M > 0$. Если $k \geq \deg A + \deg(B^{-1})$, то регулятор – строго реализуем.

Доказательство теоремы основано на том, что передаточная функция замкнутой системы имеет вид $W_y(\lambda) = \varepsilon \lambda^q r(\lambda, \varepsilon) F(\lambda) / \rho(\lambda, \varepsilon)$, причем, как легко проверить, функция $rF/\rho \in \mathcal{M}_k$, откуда и следует приближенная I-универсальность. Регулятор – стабилизирующий, поскольку для него характеристический полином замкнутой системы (3) имеет определитель $\rho(\lambda, \varepsilon)^m \det B(\lambda)$, и в силу леммы 4 является гурвицевым. Строгая реализуемость вытекает из простого подсчета степеней: имеем $\deg D_\varepsilon^{-1} = \deg B^{-1} - q - (k - 1)$, $\deg C_\varepsilon \leq N - k = q + \deg A - 1$. Отсюда при $k \geq \deg A + \deg(B^{-1})$ получим, что $D_\varepsilon^{-1} C_\varepsilon$ – правильная рациональная матрица-функция. $W_y = \deg \frac{\lambda^q r F}{\rho} = q + \deg r + \deg F - \deg \rho = q + (k - 1) + \deg F - (q + k - 1 + \deg A) = \deg F - \deg A \leq 0$. Отсюда $\deg W_u = \deg(D^{-1} C W_y) \leq \deg(D^{-1} C) + \deg W_y \leq 0$. Это и доказывает строгую реализуемость регулятора. ■ Отметим, что близкие конструкции приближенно инвариантных систем для объектов малого порядка предлагал Мееров [30, 31]. Следует отметить также, что достижение приближенной инвариантности

обеспечивается за счет того, что $D_\epsilon^{-1}C_\epsilon$ при малых ϵ становится очень большим по норме. (Это так называемая «сильная обратная связь») Недостатком такого регулятора является, как и при измерении производных, значительное усиление малых гармонических возмущений при $\epsilon \approx 0$. Подчеркнем, что условие неособости старшего коэффициента $A(\lambda)$ может быть снято, а результат теоремы 2 расширен на любые объекты со свойством (5). Резюмируя изложенное, мы видим, что верна и осуществима «ключевая» идея Г.В. Щипанова – обеспечить инвариантность системы требованием малости передаточной функции W_y . Только эту малость следует понимать в специальном, описанном выше смысле. Отметим, что аналогичные результаты о синтезе стабилизирующих регуляторов, решающих задачу об инвариантности, можно получить для систем с запаздываниями [27] и для дискретных систем.

Список литературы

- [1] Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 4-37.
- [2] Minorsky N. Directional Stability of Automatically Steering Bodies // J. Amer. Soc. Naval Eng. 1922. Vol. 34, N 2. P. 280-309.
- [3] Вознесенский И.Н. К вопросу о выборе схемы регулирования теплофикационных турбин // За советское энергооборудование. 1934. Вып. 6. С. 58-65.

- [4] Михайлов А.В. О методе проектирования регуляторов, предложенном Г.В. Щипановым // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5. С. 129-143.
- [5] Михайлов Л.Н. Некоторые замечания относительно теории полной компенсации возмущений // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5. С. 145-154.
- [6] Христианович С.А., Гантмахер Ф.Р. Анализ основных положений работы Г.В. Щипанова «Теория и методы построения автоматических регуляторов» // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5. С. 41-49.
- [7] Лузин Н.Н. К изучению матричной теории дифференциальных уравнений // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5. С. 3-66.
- [8] Николаи Е.Л. О работе Г.В. Щипанова // Прикладная математика и механика. 1942. Т. 6, вып. 1. С. 11-23.
- [9] Вознесенский И.Н. О причинах и схемах автоматического регулирования // Прикладная математика и механика. 1942. Т. 6. С. 101-110.
- [10] Лузин Н.Н., Кузнецов П.И. К абсолютной инвариантности и инвариантности до ϵ в теории дифференциальных уравнений. Ч. 1, 2 // ДАН СССР. 1946. Т. 51, № 4. С. 247-250; № 5. С. 331-334.
- [11] Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физически реальных системах // ДАН СССР. 1948. Т. 60, № 2. С. 231-234.

- [12] Кулебакин В.С. Высококачественные инвариантные системы регулирования // В сб.: «Труды Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применениям в автоматических устройствах». Киев: Изд-во АН УССР, 1959.
- [13] Кулебакин В.С. Теория инвариантности автоматически регулируемых и управляемых систем // В сб.: «Труды I Международного конгресса ИФАК». М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- [14] Петров Б.Н. О реализуемости условий инвариантности // В кн.: «Труды Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применениям в автоматических устройствах». Киев: Изд-во АН УССР, 1959. С. 59-80.
- [15] Петров Б.Н. Принцип инвариантности и его применимость при расчете линейных и нелинейных систем // В кн.: «Тр. I Международного конгресса ИФАК». М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- [16] Рябов Б.А. Возникновение, развитие и состояние теории инвариантности // В сб. «Теория инвариантности в системах автоматического управления». М.: Наука, 1964. С. 10-18.
- [17] Кухтенко А.И. Проблема инвариантности в автоматике. Киев: Техника, 1963. 270 с.
- [18] Кухтенко А.И. Основные этапы формирования теории инвариантности // Автоматика. 1984. № 2. С. 3-13; 1985. № 2. С. 3-14; 1985. № 6. С. 3-14.
- [19] Лезина З.М., Лезин В.И. (сост.) Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы). М.: Физматлит, 2004.

- [20] Якубович В.А. Оптимизация и инвариантность линейных стационарных систем управления // Автоматика и телемеханика. 1984. № 8. С. 5-44.
- [21] Якубович В.А. Универсальные регуляторы в задачах инвариантности и отслеживания // Доклады РАН. 1995. Т. 343, № 2. С. 172-175.
- [22] Якубович В.А. Синтез стабилизирующих регуляторов, обеспечивающих независимость выходной переменной системы управления от внешнего воздействия // Докл. РАН. 2001. Т. 380, № 1. С. 27-30.
- [23] Проскурников А.В. О построении регуляторов, обеспечивающих почти инвариантность системы управления // Вестник СПбГУ. 2002. Вып. 4. С. 37-43.
- [24] Проскурников А.В. О свойствах системы управления, обеспечивающих малость установившегося выхода // Вестник СПбГУ, 2004. Вып. 1. С. 43-49.
- [25] Проскурников А.В., Якубович В.А. Задача об инвариантности системы управления // Доклады РАН. 2003. Т. 389, № 6. С. 742-746.
- [26] Проскурников А.В., Якубович В.А. Приближенное решение задачи об инвариантности системы управления // Доклады РАН. 2003. Т. 392, № 6. С. 750-754.
- [27] Проскурников А.В., Якубович В.А. Задача об абсолютной инвариантности для систем управления с запаздываниями // Доклады РАН. 2004. Т. 397, № 5. С. 610-614.

- [28] Проскурников А.В., Якубович В.А. Синтез стабилизирующего регулятора в задаче отслеживания // Доклады РАН. 2005. Т. 404, № 3. С. 321-325.
- [29] Проскурников А.В., Якубович В.А. Задача об инвариантности системы управления по части выходных переменных // Доклады РАН. 2006. Т. 406, № 1. С. 30-34.
- [30] Мееров М.В. Синтез структур автоматического регулирования высокой точности. М.: Физматгиз, 1959.
- [31] Мееров М.В. Системы многосвязного регулирования. М.: Наука, 1985.
- [32] Фрадков А.Л. Адаптивная стабилизация минимальнофазового объекта с векторным входом без измерения производных выхода // Доклады РАН. 1994. Т. 337, № 5. С. 592-594.
- [33] Проскурников А.В. Развитие теории универсальных регуляторов в задачах инвариантности и отслеживания. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. СПб, 2005.
- [34] Polderman J.W., Willems J.C. Introduction to Mathematical Systems Theory: A Behavioral Approach. Springer, 1998.

Современное развитие идей Г.В. Щипанова

Э.М. Солнечный

1. Задачи синтеза систем управления естественно разбиваются на два класса, различающиеся по целям синтеза:

- задачи синтеза заданного поведения, когда требуется обеспечить наличие у замкнутой системы управления некоторых заданных свойств;
- оптимальные задачи, когда требуется минимизировать (или максимизировать) некоторый критерий качества работы замкнутой системы.

Задачи одного класса могут переходить в задачи другого класса: например, если невозможно решить задачу придания системе заданных свойств, можно поставить задачу наилучшего (в некотором смысле) приближения к этим свойствам; и наоборот, если, решая задачу наилучшего приближения к заданным свойствам, мы получим оптимум в виде нулевого отклонения от этих свойств, это означает, что мы решили задачу из первого класса.

Поставленная Г.В. Щипановым в [1], [2] задача обеспечения абсолютной инвариантности регулируемой величины по отношению к неизмеряемому внешнему возмущению (т.е. независимости

поведения регулируемой величины от этого возмущения) относится к первому классу задач синтеза. По-видимому, в наше время следует расширить постановки задач теории инвариантности до постановок задач синтеза заданного поведения.

2. Основными заслугами Г.В. Щипанова перед теорией управления следует считать:

- постановку задачи компенсации внешних неизмеряемых возмущений, действующих на объект; до Щипанова в теории управления ставилась только задача обеспечения устойчивости системы, т.е. затухания свободного движения системы, вызванного начальными отклонениями от установившегося режима;
- расширение класса регуляторов, в котором решается задача синтеза; до Щипанова регулятор, решающий поставленную задачу синтеза, искался в классе детектирующих звеньев; каждое такое звено реализует некоторый оператор, переводящий отклонение регулируемой величины в управляющее воздействие.

Г.В. Щипанов показал в [1], [2], что в классе детектирующих звеньев поставленную им задачу обеспечения абсолютной инвариантности решить как правило невозможно (кроме довольно редких случаев наличия в самом объекте двух или более каналов распространения воздействия). Но Щипанов показал и возможность решения задачи в классе регуляторов, состоящих как минимум из двух детектирующих звеньев. Это позволило использовать в качестве регулятора так называемые *вырожденные системы* (см. ниже). Использование таких систем позволило решить не только поставленную Щипановым задачу обеспечения

абсолютной инвариантности, но и вообще существенно расширило класс разрешимых задач синтеза заданного поведения.

3. Этот сделанный Щипановым шаг к расширению класса регуляторов потребовал вообще по-новому подойти к понятию *системы*. Если раньше под *системой* понималось именно детектирующее звено, реализующее некоторый оператор вход-выход (входами и выходами могут быть либо постоянные величины, либо функции времени), то для того, чтобы включить в рассмотрение вырожденные системы, мы должны считать, что система S задается некоторым множеством M_S возможных ее состояний (или поведений, если это динамическая система). Под «состоянием» здесь может пониматься вектор, состоящий из элементов самой разнообразной физической природы. *Управляемая система* S определяется зависимостью множества $M_S(f)$ ее возможных состояний (или поведений) от некоторого внешнего по отношению к системе воздействия f . Воздействие f является элементом некоторого класса X_S *допустимых* для системы S воздействий, т.е. тех воздействий, для которых определено множество $M_S(f)$.

Далее, пусть имеется некоторый класс Σ управляемых систем и некоторый общий класс X возможных воздействий. Тогда [3] те системы S , для которых класс X_S допустимых воздействий совпадает со всем классом X , будем называть *невырожденными*, а те системы S , для которых X_S строго уже класса X_S , – *вырожденными*.

Примером вырожденной системы может служить система S , реализующая *вырожденную* систему из n линейных алгебраических уравнений, т.е. систему с равным нулю определителем. Такая система совместна (т.е. имеет непустое множество решений) лишь в том случае, когда, согласно теореме Кронекера-Капелли,

столбец ее правых частей входит в линейную оболочку столбцов матрицы системы; таким образом, класс X_S допустимых для такой системы воздействий является лишь подпространством всего пространства возможных правых частей, т.е. пространства R^n .

Класс невырожденных (в частности, детектирующих) систем оказывается не замкнутым относительно операции взятия операции обратной связи: из невырожденных систем можно составить вырожденную систему.

Могло бы показаться, что вырожденные системы с их узким классом допустимых входов никому не нужны. Но Г.В. Щипанов понял, что именно такую систему можно использовать в качестве регулятора для решения задачи обеспечения абсолютной инвариантности. Основная его идея синтеза опирается на следующий, по сути дела, тривиальный факт: если система S имеет класс X_S допустимых входов x , то для *любого* возможного состояния (или поведения) некоторой системы S_1 , содержащей S в качестве подсистемы, вход необходимо будет принадлежать классу X_S . Поэтому, выбрав в качестве регулятора вырожденную систему S , на вход которой подается регулируемая величина x , а класс допустимых для S входов состоит из узкого класса X_S допустимых значений ее входа, где X_S входит в множество $M_{Ж}(f)$ желаемых значений (или поведений) регулируемой величины x (например, только из нулевой величины или функции времени), и обеспечив *невырожденность* замкнутой системы S_1 объект + регулятор по отношению к внешнему воздействию $f \in X$, мы получим *абсолютно инвариантную* систему S_1 , в которой регулируемая величина независимо от значения воздействия $f \in X$ будет принадлежать узкому классу X_S , т.е. желаемому множеству $M_{Ж}(f)$.

Эту простую идею и положил в основу своего подхода к

задаче синтеза Г.В. Щипанов. И хотя сам он в качестве математического описания регулятора брал только линейные системы с матрицами, состоящими из полиномов второго порядка, и с нулевым определителем, совместные лишь при нулевом значении входа, т.е. регулируемой величины, мы видим, что этот подход равно годится и для любых линейных, и для нелинейных систем. Эту идею можно считать одним из принципов кибернетики.

4. В развитие этой идеи Г. В. Щипанова в настоящее время разработаны [3] постановка и решение задачи системы управления, обеспечивающей заданное поведение замкнутой системы, т.е. принадлежность состояния (или поведения) замкнутой системы заданному множеству $M_{Ж}(f)$. Исследуются следующие виды постановок задачи синтеза:

- *Статическая* постановка задачи синтеза системы управления (не учитывающая динамики системы) формулируется на теоретико-множественном уровне следующим образом: Свойства объекта управления (неизменяемой части синтезируемой системы) характеризуются, для каждого значения внешнего воздействия $f \in X$, множеством $M_0(f)$ возможных значений вектора $(x u)^T$, где x – вектор координат состояния объекта, u – управляющее воздействие на объект.

К замкнутой системе предъявляются следующие требования:

1. замкнутая система объект + регулятор должна быть невырожденной, т.е. иметь при любом $f \in X$ непустое множество возможных состояний;
2. проекция $Pr_o W$ этого множества на $\Pi_0 = \Pi_{об} \times \Pi_y$ (где $\Pi_{об}$ – множество возможных значений векто-

ра x координат состояния объекта, Π_y – множество возможных значений управляющего воздействия u) должна при любом $f \in X$ входить в заданное множество $M_{\text{ж}}(f)$, желаемых при воздействии f значений вектора $(xu)^T$.

Регулятор, решающий задачу синтеза, ищется в классе систем, состоящих из конечного числа *детектирующих звеньев*, т.е. в классе систем, описываемых уравнениями вида

$$\xi_k = F_k(x_{\text{и}}, f_{\text{и}}, \xi_j, j \in [1+n] \setminus k) \quad k = 1 \div n, \quad (1)$$

где $\xi_k (k = 1 \div m, m \leq n)$ – управляющие воздействия на объект (компоненты вектора u), $\xi_k (k = m+1 \div n)$ – внутренние координаты регулятора (выходы звеньев, не подаваемые на объект), $x_{\text{и}}, f_{\text{и}}$ – измеряемые составляющие векторов соответственно x и f , которые могут служить входами регулятора, $F_k (k = 1 \div n)$ – некоторые отображения со значениями в заданных множествах Π_{pk} .

В такой постановке задачи синтеза учитываются возможная неопределенность наших знаний о свойствах объекта, а также ограниченные возможности измерения координат объекта для подачи их на вход регулятора; в то же время учитывается возможность измерения некоторых компонент вектора f для подачи их на вход регулятора; эти компоненты объединяются в вектор $f_{\text{и}}$.

Теорема 1 *Необходимым и достаточным условием разрешимости задачи синтеза в приведенной постановке*

является непустота, для каждого $f \in X$, множества $Z(f) = (Pr_u M_o(f)) \setminus \Psi(f_u)$. Здесь $\Psi(f_u) = \bigcup_{\varphi \in \Phi(f_u)} Pr_u(M_o(\varphi) \setminus M_{\text{жс}}(\varphi))$, Pr_u – оператор проектирования на $\Pi_u = \Pi_{ou} \times \Pi_y$, Π_{ou} – множество возможных значений вектора x_u , $\Phi(f_u) = Pr_{\vartheta_u}^{-1}(f_u)$, Pr_{ϑ_u} – оператор проектирования X на множество возможных значений вектора f_u измеряемых воздействий. Если весь вектор f неизмеряем, то вектор f_u считается принимающим лишь одно-единственное значение, и тогда $\Phi(f_u)$ совпадает со всем X .

При доказательстве теоремы используются аксиома выбора и эквивалентная ей возможность полного упорядочения множества Π_y возможных значений управления u . Благодаря этому за счет введения в регулятор *внутренних звеньев*, не действующих непосредственно на объект, для любого выбора по одному элементу из множеств $Z(f)$ при фиксированном $f_{\text{и}}$ можно составить систему уравнений вида (1), у которой множество $Pr_{\Pi}(M_p(f_{\text{и}}))$ совпадает с множеством $Y(f_{\text{и}}) \subseteq \Pi_{\text{и}}$, полученным в результате такого выбора. (Здесь $M_p(f_{\text{и}})$ – множество решений системы (1) относительно вектора $(x \xi)^T$ при фиксированном $f_{\text{и}}, \xi$ – вектор $(\xi_k, k = 1 \div n)$).

Описанная постановка задачи синтеза допускает дальнейшее развитие, а именно – наложение дополнительных ограничений на класс регуляторов: требование отсутствия у регулятора внутренних координат или требование, чтобы регулятор был детектирующим звеном, т.е., описывался уравнением вида

$$u = F(x_{\text{и}}, f_{\text{и}}). \quad (2)$$

Для каждого из этих вариантов постановки задачи синтеза получено необходимое и достаточное условие разрешимости, состоящее в дополнительных требованиях к семейству множеств $\{Z(f), f \in X\}$.

- Постановка задачи синтеза динамической системы управления, в которой состояние x , управление u , внешнее воздействие f , а также внутренние координаты регулятора (если они есть) являются функциями времени T (где T – некоторое фиксированное множество вещественной оси R^1 , может быть двух основных типов:

1. Задача синтеза системы управления, удовлетворяющей заданным ограничениям на состояние: для любой пары $(\tilde{f}, t) \in \tilde{X} \times T$ (где \tilde{X} – множество возможных воздействий \tilde{f} как функций от $t \in T$) и для любого из возможных, при воздействии \tilde{f} , поведений \tilde{w} замкнутой системы вектор $Pr_O \tilde{w}(t)$ должен входить в множество $M_{\text{ж}}(\tilde{f}(t), t)$, где $M_{\text{ж}}(f, t)$ – заданное, для данного $(f, t) \in X \times T$, множество желаемых значений вектора $(x \ u)^T$ в Π_O .
2. Общая задача синтеза динамической системы управления, обладающей свойством сильной причинности и обеспечивающей желаемое поведение $(x \ u)^T$ как функции времени $t \in T$ при любых воздействиях f из заданного класса \tilde{X} возможных воздействий – функций времени $t \in T$.

Используемое здесь понятие сильной причинности некоторого отображения $A : \tilde{M}_1 \rightarrow \tilde{M}_2$ (где $\tilde{M}_i, i = 1, 2$ – заданные множества функций времени $t \in T$) означает

следующее свойство отображения $A : \text{из } x_1|_t = x_2|_t \text{ следует } A(x_1)|_t = A(x_2)|_t$; здесь $x_i (i = 1, 2)$ – две различных функции из множества $\tilde{M}_1, x_i|_t$ – сужение x_i как функции от $\tau \in T$ на промежуток $\bar{T}_t = \{\tau \in T : \tau \leq t\}$ ($t > \inf T$). (Понятие сильной причинности отражает физическое представление о том, что следствие, в данном случае изменение $A(x_i)$, не может опережать причину – изменение функции x_i).

Задача синтеза динамической системы управления типа 2 решается в двух вариантах: когда множество T имеет последний элемент ($s \in T$, где $s = \sup T$), и когда оно не имеет последнего элемента ($s \notin T$).

При постановке задачи синтеза этого типа к замкнутой системе предъявляются следующие требования:

- (желаемое поведение): проекция множества $\tilde{M}(f)$ всех возможных, при воздействии $f \in \tilde{X}$, поведений замкнутой системы на множество $\tilde{\Pi}_O$ возможных поведений вектор-функции $(x \ u)^T$ должна входить в заданное множество $\tilde{M}_{\text{ж}}(f)$;
- (свойство причинности): должно существовать множество G сильно причинных отображений g , определенных на \tilde{X} , для которого $\tilde{M}(f) = \bigcup_{g \in G} g(f)$;
- (свойство продолжимости): множество $\tilde{M}(f, \bar{T}_t)$ возможных, при воздействии $f|_t \in \tilde{X}|_t$, поведений замкнутой системы на \bar{T}_t должно совпадать с множеством $\tilde{M}(f)|_t$ сужений на \bar{T}_t всех функций из $\tilde{M}(f)$.

Искомый регулятор должен состоять из причинных детектирующих звеньев, т.е. описываться уравнениями вида (1)

или (2), где теперь ξ_k , x_H и f_H – функции времени $t \in \mathbf{T}$, а F_k – сильно причинные отображения.

Для каждого из приведенных вариантов задачи синтеза динамической системы управления: тип 1 или 2, случай $s \in \mathbf{T}$ или $s \notin \mathbf{T}$, регулятор вида (1) или (2) – получено необходимое и достаточное условие разрешимости задачи, выраженное в виде дополнительных требований к семейству множеств функций времени $\{\tilde{Z}(f), f \in \tilde{X}\}$.

Перечисленные возможные постановки задачи синтеза применяются, в частности, к нелинейному объекту, описываемому обыкновенным дифференциальным уравнением

$$\dot{x} = \Phi(x, u, f, t), \quad (3)$$

где $x \in \mathbf{R}^n$, $u \in \mathbf{R}^m$, $f \in \mathbf{R}^s$ – значения соответственно состояния объекта, управления и внешнего воздействия в момент времени t . (Некоторые частные случаи таких постановок задачи синтеза рассмотрены в [4], [5]).

5. Для линейных динамических систем управления достаточно широкого класса в [3] разработаны постановки и методы решения задачи синтеза, имеющие геометрический, а во многих случаях и аналитический, смысл. В линейной постановке математическая модель объекта задается в виде линейных соотношений:

$$D_H x_H + D_H x_H = M u + \Phi_H f_H + \Phi_H f_H, \quad (4)$$

где $x = (x_H \ x_H)^T$, $u, f = (f_H \ f_H)^T$ – векторы соответственно состояния объекта, управления и внешнего воздействия (элементы этих векторов считаются обобщенными функциями, определенными на фиксированном открытом множестве вещественной оси

времени; вектор-функции x_H , x_H , u , f_H и f_H – элементы линейных пространств соответственно \tilde{P}_{OH} , \tilde{P}_{OH} , \tilde{P}_y , \tilde{X}_H и \tilde{X}_H ; x_H и f_H – измеряемые вектор-функции, используемые в качестве входов регулятора, x_H и f_H – неизмеряемые вектор-функции); D_H , $D_{H,M}$, Φ_H и Φ_H – заданные линейные отображения, переводящие пространства соответственно \tilde{P}_{OH} , \tilde{P}_{OH} , \tilde{P}_y , \tilde{X}_H и \tilde{X}_H в некоторое линейное пространство \tilde{P}_Ω обобщенных функций времени.

Требования к замкнутой системе формулируются в виде соотношения

$$P_H x_H + P_H x_H = S u + Q_H f_H + Q_H f_H, \quad (5)$$

которому должны удовлетворять вектор-функции x и u при любом $f \in \tilde{X}$ ($\tilde{X} = \tilde{X}_H \times \tilde{X}_H$). Здесь P_H , P_H , S , Q_H и Q_H – также заданные линейные отображения из пространств соответственно \tilde{P}_{OH} , \tilde{P}_{OH} , \tilde{P}_y , \tilde{X}_H и \tilde{X}_H в некоторое линейное пространство \tilde{P}_G .

Замкнутая система при любом воздействии $f \in \tilde{X}$ должна иметь непустое множество $\tilde{M}(f)$ возможных поведений, удовлетворяющих (5), и должна обладать уже упоминавшимся свойством причинности. Однако, при оперировании с обобщенными функциями, задаваемыми на открытых множествах оси времени, вместо вводившейся в разделе 4 сильной причинности приходится использовать понятие *слабой причинности* линейного отображения $A : \tilde{M}_1 \rightarrow \tilde{M}_2$, (где $\tilde{M}_i, i = 1, 2$ – заданные множества обобщенных функций времени): из условия $f)_t = 0$ ($f \in \tilde{M}_1$) вытекает равенство $(Af))_t = 0$ (здесь $f)_t$ – сужение обобщенной функции f , заданной на \mathbf{T} , на $\bar{T}_t = \{\tau \in \mathbf{T} : \tau < t\}, t > \inf \mathbf{T}$).

Регулятор ищется также в классе линейных систем, описы-

ваемых уравнениями вида,

$$\begin{cases} Nu = Kx_H + Lf_H + B_y\beta, \\ B\beta = K_B x_H + L_B f_H + N_B u, \end{cases} \quad (6)$$

где β – вектор-функция внутренних координат регулятора; $N, K, L, B_y, B, K_B, L_B$ и N_B – искомые отображения; при этом матрица $\begin{pmatrix} N \\ B \end{pmatrix}$ должна быть квадратной и иметь в качестве диагональных элементов тождественные отображения линейных пространств $\tilde{\Pi}_{pk}$ ($k = 1 \div n$). (Вектор u входит в произведение $\tilde{\Pi}_{pk}$ по $k = 1 \div m$, вектор β – в произведение $\tilde{\Pi}_{pk}$ по $k = m+1 \div n$).

Теорема 2 *Необходимым и достаточным условием разрешимости задачи синтеза в линейной постановке является выполнение следующих двух требований:*

1. ядро отображения $\Omega_n = (D_n \quad -\Phi_n)$ должно входить в ядро отображения $G_n = (P_n \quad -Q_n)$; во многих случаях это условие эквивалентно условию существования отображения C из $\tilde{\Pi}_\Omega$ в $\tilde{\Pi}_G$, для которого

$$G_n = C\Omega_n; \quad (7)$$

2. ядро отображения $W_\alpha = \begin{pmatrix} -\Phi_\alpha & D_u & D_n & -M \\ -Q_\alpha & P_u & P_n & -S \end{pmatrix}$ ($\alpha = u, n$) из $\tilde{\Pi}_O \times \tilde{X}_\alpha$ (где $\tilde{\Pi}_O = \tilde{\Pi}_{O_u} \times \tilde{\Pi}_{O_n} \times \tilde{\Pi}_y$) в $\tilde{\Pi}_\Omega \times \tilde{\Pi}_G$ должно содержать в себе график некоторого слабо причинного отображения g_α из \tilde{X}_α в $\tilde{\Pi}_O$.

При выполнении условий теоремы можно записать общий вид уравнений регулятора, решающего задачу синтеза:

$$R_p \varphi_p = 0. \quad (8)$$

Здесь $\varphi_p = (x_H \quad u \quad \beta \quad f_H)^T$ ($\varphi_p \in \tilde{\Pi}_H$, $\tilde{\Pi}_H = \tilde{\Pi}_{O_H} \times \tilde{\Pi}_y \times \tilde{\Pi}_B \times \tilde{X}_H$), $R_p = \Gamma \begin{pmatrix} G_p - C\Omega_p \\ R_d \end{pmatrix}$, $\Omega_p = (D_H \quad -M \quad 0 \quad -\Phi_H)$, $G_p = (P_H \quad -S \quad 0 \quad -Q_H)$, C – отображение, удовлетворяющее соотношению (7), R_d – отображение из $\tilde{\Pi}_H$ в некоторое линейное пространство $\tilde{\Pi}_d$, Γ – отображение из $\tilde{\Pi}_G \times \tilde{\Pi}_d$ в $\tilde{\Pi}_p$ – произведение пространств $\tilde{\Pi}_{pk}$ по $k = 1 \div n$.

Число $b = n - m$ (количество внутренних координат регулятора), пространство $\tilde{\Pi}_d$, отображения R_d и Γ должны быть выбраны так, чтобы удовлетворить следующим требованиям:

1. отображение Γ должно иметь инъективное сужение на образе отображения $\begin{pmatrix} G_p - C\Omega_p \\ R_d \end{pmatrix}$ (т.е. из (8) должно следовать $\begin{pmatrix} G_p - C\Omega_p \\ R_d \end{pmatrix} \varphi_p = 0$);
2. диагональные элементы матрицы $\begin{pmatrix} N \\ B \end{pmatrix}$ из представления (6) для общего вида (8) должны быть тождественными отображениями в $\tilde{\Pi}_{pk}$;
3. ядро отображения $W = \begin{pmatrix} \Omega_p & \Omega_n \\ G_p & G_n \\ R_d & 0 \end{pmatrix}$ должно содержать в себе график некоторого слабо причинного отображения $g: \tilde{X} \rightarrow \tilde{\Pi}_\Omega \times \tilde{\Pi}_G \times \tilde{\Pi}_d$.

(Приведенная общая постановка линейной задачи синтеза может быть использована, например, для решения задачи обеспечения заданного поведения линейного распределенного объекта).

Для частного, но широко распространенного класса систем, состоящих из линейных динамических звеньев с конечномерным пространством состояний и постоянными параметрами, условия разрешимости задачи синтеза (4)-(6) принимают особенно простой вид:

1. строки матрицы $G_H = (P_H \quad -Q_H)$ должны линейно зависеть от системы строк матрицы $\Omega_H = (D_H \quad -\Phi_H)$;

2. столбцы матрицы $W = \begin{pmatrix} \Phi_H & \Phi_H \\ Q_H & Q_H \end{pmatrix}$ должны линейно зависеть от системы столбцов матрицы $\begin{pmatrix} D_H & D_H & M \\ P_H & P_H & S \end{pmatrix}$;

3. ранг матрицы R_P (ее блочное представление, соответствующее уравнениям (6) имеет вид $R_P = \begin{pmatrix} -K & N & -B_y & -L \\ -K_B & -N_H & B & -L_B \end{pmatrix}$) должен быть равен рангу матрицы $\begin{pmatrix} G_P - C\Omega_P \\ R_D \end{pmatrix}$;

4. блоки N и B должны иметь единичные диагональные элементы;

5. столбцы матрицы $\begin{pmatrix} \Phi_H & \Phi_H \\ Q_H & Q_H \\ -R_{до} & 0 \end{pmatrix}$ должны линейно зависеть от системы столбцов матрицы $\begin{pmatrix} D_H & D_H & M & 0 & \Phi_H \\ P_H & P_H & S & 0 & Q_H \\ R_{дн} & 0 & R_{ду} & R_{дв} & 0 \end{pmatrix}$; здесь $(R_{дн} \ R_{ду} \ R_{дв} \ R_{дни})$ – блочное представление матрицы

R_D , соответствующее представлению пространства $\tilde{\Pi}_H$ в виде произведения пространств: $\tilde{\Pi}_H = \tilde{\Pi}_{OH} \times \tilde{\Pi}_y \times \tilde{\Pi}_B \times \tilde{X}_H$.

(Вопросы синтеза линейных конечномерных систем управления рассматриваются также, например, в [6], [7].)

6. Принципиальной *ошибкой* теории синтеза, развитой Г.В. Щипановым, следует считать неучет ею возможных (и неизбежных на практике) *отклонений параметров* регулятора от их расчетных значений (в частности, от неточности настройки регулятора на вырожденность), т.е. неучет необходимости обеспечения *грубости* синтезируемой системы. Проблема грубости (а в наше время и робастности) стоит, конечно, всегда при синтезе системы управления, но именно для предложенного Щипановым метода синтеза она оказалась особенно острой. (По-видимому, первым, кто поставил вопрос о необходимости учета отклонения параметров регулятора в «щипановской» системе, был М.А. Айзерман [8] (с. 265-269).)

Отсюда вытекает и *вторая ошибка* Щипанова – чрезмерная категоричность его оценки своего подхода к решению задачи синтеза: в [2] (с. 164), он заявил, что конструкции регуляторов, не удовлетворяющие полученным им условиям инвариантности, «должны считаться негодными».

7. Неизбежные на практике неточности реализации управляющих устройств, а также неточности наших знаний о свойствах объекта, заставляют нас не ограничиваться расчетной схемой замкнутой системы управления и математическим описанием ее элементов, заложенными в постановку задачи синтеза и полученными при расчете, – так сказать, «*макроописанием*» системы, – но и, прежде чем приступить к ее реализации, исследовать и «*микроописание*», более точную математическую модель системы, учитывающую наиболее естественные, при выбранном спо-

собе физической реализации регулятора, отклонения параметров системы от их расчетных значений, заложенных в «микроописание». (Нужно иметь в виду, что эти отклонения параметров могут иметь не только числовую или векторную, но и функциональную, и операторную природу.) Понятно, что только малость расхождений свойств этих двух описаний замкнутой системы может служить обоснованием работоспособности синтезируемой системы управления.

Необходимость исследования свойств микроописания и его отличий от макроописания ставит проблему *грубости*, т.е. непрерывности, поведения замкнутой системы как функции отклонений параметров. Конечно, факт наличия или отсутствия *грубости* в таком понимании существенно зависит от выбранных топологий в пространстве отклонений параметров и в пространстве поведений системы (при выбранном способе его математического описания). Выбор этих топологий определяется практикой – характером выбранных для исследования отклонений параметров и способом оценки величины отклонений поведения замкнутой системы от расчетного. Понятие *грубости* динамической системы было введено А.А. Андроновым и Л.С. Понтрягиным [9]. Они использовали это понятие для исследования изменения фазового портрета системы 2-го порядка при малых изменениях правой части ее дифференциального уравнения. В наше время проблема *грубости* линейных динамических систем разрабатывается, например, в [3], [10]. В частности, в [3] под *грубостью* системы понимается ее *метрическая грубость*, т.е. непрерывность отклонения движения системы от невозмущенного движения по отношению к изменению какого-либо параметра. (Это понятие аналогично понятиям устойчивости по Ляпунову и устойчивости при постоянно действующих возмущениях [11].)

Результат исследования системы на *грубость* существенно зависит от выбора параметров, по отношению к которым исследуется *грубость* (т.е. параметров, включаемых в микроописание системы). А поскольку все возможные виды отклонений параметров учесть невозможно, отсюда следует, что последнее слово все равно остается за практикой. Исследование каждого конкретного микроописания может либо обнадеживать нас (в случае положительного ответа на вопрос о наличии *грубости*), либо предостерегать (в случае отрицательного ответа), хотя здесь тоже иногда есть возможность обеспечения работоспособности системы например, за счет режима создания мягкого режима автоколебаний, т.е. автоколебаний с приемлемой для практики малой амплитудой.

8. Одним из основных обвинений, выдвигавшихся против идей Г. В. Шипанова в дискуссиях 1939-1940 годов и в послевоенное время, был кажущийся парадокс: если уже реализована абсолютная инвариантность регулируемой величины x по отношению к неизмеряемому внешнему воздействию f , то, значит, на вход регулятора не поступает никакого сигнала; откуда же регулятор «знает» об изменениях воздействия f и что заставляет его мгновенно вырабатывать управляющее воздействие u , компенсирующее воздействие f ? Ответ на этот вопрос может быть получен именно с помощью микроописания [12] (с. 303). Действительно, неизбежное наличие отклонений параметров регулятора никогда практически не позволит достичь абсолютной инвариантности; но тогда, значит, на вход регулятора будет поступать сигнал, регулятор будет работать и вырабатывать воздействие u . Нужно только суметь обеспечить *грубость* микроописания, и тогда отклонение поведения системы от абсолютной инвариантности будет мало, а только это и нужно для практики.

Здесь есть аналогия с задачей обеспечения астатизма системы по отношению к неизменяемому постоянному во времени внешнему воздействию f [12] (с. 304). Если интересоваться только установившимися режимами работы системы, то тоже может показаться странным: ведь на входе регулятора (а он обычно содержит интегрирующее звено) на каждом таком режиме сигнал равен нулю; откуда же регулятор «знает» об изменениях f , и что заставляет его изменять управляющее воздействие u , чтобы компенсировать изменение f ? Ответ, конечно, простой: ведь при изменении f возникает переходный процесс; следовательно, сигнал на входе регулятора появится, и регулятор будет работать и изменять воздействие u . И если мы обеспечим устойчивость этого переходного процесса, то он со временем затухнет и мы получим практическую инвариантность выхода системы по отношению к постоянному воздействию f .

Описанная аналогия объясняется тем, что интегрирующее звено с точки зрения установившихся режимов также является вырожденной системой: он может вырабатывать постоянное во времени управляющее воздействие только при нулевом значении входа.

Нужно также иметь в виду, что выдвигавшееся против идеи Шипанова обвинение о кажущемся нарушении причинно-следственных связей в системе, построенной по этой идее, основано на том, что мы привыкли считать все звенья детектирующими, т.е. однозначно определяющими выход по входу. На самом деле всегда есть обратное влияние выхода на вход. Очень часто уравнения, входящие в макроописание, устанавливаются лишь соотношения между средними физическими величинами (это, например, законы газовой динамики, термодинамики, электротехники), и в разных ситуациях одна и та же величина может

служить причиной или следствием. Поэтому следует сказать, что язык уравнений, соотношений между величинами следует признать более общим, чем привычный нам язык структурных схем, состоящих из детектирующих звеньев.

9. Начиная с 50-х годов 20-го века в нашей стране предпринимались исследования «щипановской» системы на грубость, и первые результаты таких исследований были разочаровывающими: А.И. Кухтенко и Б.Н. Петровым в [13] была показана негрубость этой системы по отношению к простейшему отклонению параметров – к неточности настройки регулятора на вырожденность. Затем в [14] была показана негрубость этой системы по отношению к чистым запаздываниям в звеньях системы.

Однако, в 60-х годах 20-го века появились сообщения [15]- [17] (А.Г. Ивахненко, Г.Ф. Зайцев, Б. А. Комаров) об экспериментах со «щипановской» системой на аналоговых моделях, где была получена практически полная инвариантность. В связи с этим были предприняты более подробные исследования поведения «микроописания» такой системы при учете различных малых параметров. Результаты этих исследований представлены, например, в [6], [3], [19]. В частности, в [3] такое исследование проведено с учетом как неточности настройки на инвариантность, так и малых инерционностей и малых чистых запаздываний в звеньях системы.

Конечно, выводы предыдущих исследований [13], [14] о негрубости «щипановской» системы остаются справедливыми; однако, эта система обладает *условной грубостью*. Под этим термином понимается грубость в надлежащем образом суженном пространстве возможных отклонений параметров. Это означает существование в пространстве P отклонений параметров та-

кой области U , примыкающей к точке 0 пространства P (но не содержащей эту точку), в пределах которой имеет место непрерывность поведения системы по отношению к отклонениям параметров, т.е. возможность беспредельного уменьшения отклонения поведения системы от абсолютной инвариантности при приближении к точке 0 пространства P в пределах области U . При каждом конкретном уровне возможных отклонений параметров мы получим, конечно, лишь приближенную инвариантность; но с прогрессом техники, когда достижимый уровень точности выдерживания нужных значений параметров будет расти, принципиально возможно получение сколь угодно малых отклонений от абсолютной инвариантности.

Факт наличия условной грубости характерен вовсе не только для «щипановской» системы. К этому явлению часто приводит «борьба» не учитываемых в макроописании дестабилизирующих факторов (таких, как чистое запаздывание) и стабилизирующих факторов (таких, как малые инерционности) (см., например, [20]). На этот факт указывал, в частности, Л.И. Розоноэр, еще в 1983 году им была высказана идея о возможности компенсации дестабилизирующего влияния чистых запаздываний стабилизирующим влиянием звеньев с малой инерционностью; намеренное введение в систему таких звеньев может обеспечить ее устойчивость, хотя они и «уводят» систему от идеального поведения, определяемого макроописанием.

10. Сообщения о практическом использовании предлагаемого Г. В. Щипановым способа формирования регулятора пока фрагментарны.

1) Прежде всего, это сообщения самого Щипанова в [1] (с. 118-119) о регуляторе типа "Double-Response" фирмы Taylor, о регуляторе "Air-O-Line" фирмы Brown и о «трех автоматиче-

ских стабилизаторах, составляющих новый автопилот фирмы Siemens»; все они принадлежат, согласно утверждению [1], типу «идеального и универсального регулятора». Здесь же приводятся физические схемы этих регуляторов, судя по которым они построены из гидравлических и механических устройств. (Об этих регуляторах упоминается и в [8] (с. 268-269), где говорится, по словам очевидцев их работы, что они «дают дрожание со звуковой частотой».)

2) Уже упоминавшиеся сообщения в [15], [17] об экспериментах на аналоговых моделях; в этих экспериментах регулятор был построен без связи по возмущению и была получена не только нулевая, но и отрицательная ошибка (отклонение регулируемой величины в направлении, противоположном направлению возмущения). В частности, в [15], [17] сообщается об аналоговом моделировании системы управления скоростью вращения электродвигателя; в [16] – о моделировании следящей системы. В [21] приводятся иллюстрации реакции «щипановской» системы управления такими объектами, как генератор постоянного тока, следящая система, электропривод и др., на скачкообразное входное воздействие.

3) Защищенные авторскими свидетельствами [22], [23] изобретения Б.Д. Гладкова (электронный стабилизатор напряжения). Попытки самого Г.В. Щипанова реализовать регулятор в виде вырожденной системы на базе механических устройств, по-видимому, успеха не имели.

11. Если говорить о современных перспективах практического использования идей Г.В. Щипанова для построения приближенно инвариантных систем управления, то, по-видимому, более естественно их использование в электронике и радиотехнике (в частности, в радиотехнике уже давно используется внутренняя

положительная обратная связь для получения большого коэффициента усиления и, с его помощью, – для создания глубокой отрицательной обратной связи).

Но в настоящее время существует техническая возможность непосредственного получения большого коэффициента усиления без использования положительной обратной связи. Поэтому в [19] был предпринят сравнительный анализ результатов синтеза приближенно инвариантной системы управления конкретным объектом – синхронным электрогенератором – с помощью вырожденного регулятора и с помощью регулятора с большим коэффициентом усиления. Для обоих этих методов получение устойчивости системы и ее приближенной инвариантности потребовало использования дифференцирующих звеньев, неизбежно обладающих инерционностью. Оба метода обеспечивают принципиальную возможность получения сколь угодно малых отклонений от абсолютной инвариантности, упирающуюся лишь в современные технические возможности точности настройки, уменьшения инерционности дифференциаторов и получения больших коэффициентов усиления. Проведенный расчет максимально возможных ошибок для модельного примера показывает примерную эквивалентность этих двух методов с точки зрения достижимой точности осуществления инвариантности. Поэтому вопрос о конкурентоспособности «щипановских» систем в сравнении с системами, использующими большой коэффициент усиления, должен решаться практикой отдельно в каждом конкретном случае.

Список литературы

- [1] Щипанов Г.В. Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов // В кн.: «Г. В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)». М.: Физматлит, 2004. С. 20-140.
- [2] Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 4-37.
- [3] Солнечный Э.М. Вырожденные системы и их использование в задачах синтеза заданного поведения. М.: Наука, 1989.
- [4] Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971.
- [5] Востриков А.С. Синтез систем управления на основе принципа локализации. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 1981.
- [6] Гайдук А.Р. Аналитический синтез инвариантных автоматических систем при одномерном объекте управления // Автоматика и телемеханика. 1981. № 5. С. 5-14.
- [7] Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами. Алгебраический подход. М.: Наука, 2007.
- [8] Айзерман М.А. Письмо вице-президенту АН СССР академику Шмидту О.Ю. // В кн.: «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)». М.: Физматлит, 2004. С. 261-269.

- [9] Андронов А.А., Понтрягин Л.С. Грубые системы // В кн.: Андронов А.А. «Собрание трудов». Изд. АН СССР, 1956.
- [10] Браверман М.Э., Розоноэр Л.И. О грубости линейных динамических систем. I, II // Автоматика и телемеханика. 1991. № 11. С. 17-23; 1992. № 1. С. 41-52.
- [11] Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. М.: Наука, 1966.
- [12] Солнечный Э.М. Некоторые высказывания о статье Г.В. Щипанова 1939 г. в советской прессе 1939-1986 годов и реплики на эти высказывания // В кн.: «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)». М.: Физматлит, 2004. С. 288-307.
- [13] Кухтенко А.И., Петров Б.Н. Структура абсолютно инвариантных систем и условия их физической осуществимости // В кн.: Б.Н. Петров «Избранные труды. Том I. Теория автоматического управления». М.: Наука, 1983. С. 197-223.
- [14] Розоноэр Л.И. М.А. Айзерман и работы Г. В. Щипанова // В кн.: «Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы)». М.: Физматлит, 2004. С. 414-421.
- [15] Ивахненко О.Г., Комаров Б.О. Недокомпенсация, абсолютная инвариантность и перекомпенсация в системах автоматического регулирования // Автоматика. 1964. № 2. С. 126-131.
- [16] Ивахненко А.Г., Зайцев Г.Ф. Эквивалентность следящих систем с комбинированным принципом регулирования и с принципом регулирования по отклонению и дифференциальными связями // В кн.: «Труды Третьего Всесоюзного

- совещания по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического управления. Том I. Теория инвариантности автоматических систем». М.: Наука, 1970. С. 225-237.
- [17] Ивахненко А.Г., Комаров Б.А. О возможности получения нулевой и отрицательной ошибки в системах стабилизации без связи по возмущению // В кн.: «Труды Третьего Всесоюзного совещания по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического управления. Том I. Теория инвариантности автоматических систем». М.: Наука, 1970. С. 237-245.
- [18] Гайдук А.Р. Оценивание воздействий и инвариантность // Автоматика и телемеханика. 1984. № 3. С. 20-29.
- [19] Солнечный Э.М. Исследование задачи синтеза инвариантной системы управления синхронным электрогенератором // Автоматика и телемеханика. № 12. 1991. С. 62-75.
- [20] Солнечный Э.М. Исследование линейной системы с одноканальной обратной связью на грубость по отношению к малым параметрам // Автоматика и телемеханика. № 12. 1998. С. 68-81.
- [21] Ивахненко А.Г. Об условиях абсолютной инвариантности автоматических систем // Автоматика. № 3. 1987. С. 90-91.
- [22] Гладков Б.Д. Авторское свидетельство 283323 СССР. Стабилизатор напряжения и тока / Опубликовано 20.06.69. 1970. Бюллетень № 31.

- [23] Гладков Б.Д. Авторское свидетельство 505013 СССР. Стабилизатор постоянного напряжения / Опубликовано 28.10.71. 1976. Бюллетень № 8.

**Г.В. Щипанов
и кафедра «Авиационные приборы»
МВТУ им. Н.Э. Баумана**

С.Ф. Коновалов

Достижения в области отечественной авиации, ракетно-космической техники, морского флота, наземной техники в значительной степени определяются применением автономных систем управления, основой которых являются гироскопические системы. Становление научной школы «Гироскопические системы» в МГТУ им. Н.Э. Баумана относится к началу 1930-х годов и большая заслуга принадлежит первому заведующему кафедрой «Авиационные приборы» профессору Георгию Владимировичу Щипанову (1903-1953).

В первые месяцы советской власти, в 1918 году был принят специальный декрет о создании в стране первой приборостроительной организации ГОИ. До 1929 года все приборостроение было объединено в трестах «Точной механики» и «Всесоюзном объединении оптико-механической промышленности», однако специальной подготовки специалистов-приборостроителей не велось.

Подготовка инженеров-приборостроителей впервые была организована в 1929 году, для чего в МВТУ был открыт факультет «Точной механики». Этот факультет, позже переименованный в факультет «Приборостроение», состоял только из одной

кафедры «Точной механики», которую возглавлял профессор Ф.Д. Дроздов (он был одновременно и деканом факультета).

В 1933 году в связи с развитием авиаприборостроения конструкции отечественных самолетов стали настолько совершенными, что стали возможны полеты на дальние расстояния, на больших высотах, в облаках и тумане. Для таких полетов требовались приборы автоматической ориентации и автоматические системы управления. В связи с этими задачами на кафедре «Точной механики», в числе других специальностей, была открыта специальность «Авиационные приборы», а несколько позже (в 1938 году), организована одноименная кафедра. В связи с постоянно изменяющимся содержанием подготовки специалистов несколько раз менялось и название кафедры. В настоящее время она называется «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации».

Первым лектором курса «Авиационные приборы» был избран по конкурсу на должность доцента Г.В. Щипанов. Выпускник Ленинградского политехнического института, он многие годы работал в промышленности и пришел на кафедру с должности технического директора одного из заводов авиационного приборостроения. Одновременно с Г.В. Щипановым для ведения учебного процесса по авиационным приборам и системам были приглашены опытные специалисты: Я.И. Соловьев, Е.Б. Левенталь – из промышленности, и научные работники – С.С. Тихменев, Г.О. Фридендер, Н.Н. Чернов. На кафедре были разработаны и начали читаться лекции по новым в те годы курсам «Авиационные приборы», «Прикладная теория гироскопов», «Автопилоты».

Основной специальный курс – «Авиационные приборы» – в соответствии с уровнем техники того времени охватывал теорию

мембранных приборов, таких как указатель скорости, высотомер, вариометр, магнитные компасы и др. Курс гироскопических приборов строился применительно к пневматическим приборам, таким как авиагоризонт, гирополукомпас и указатель поворотов, и конечно включал в себя теорию гироскопа.

По всем специальным дисциплинам почти не было ни учебников, ни учебных пособий, а по авиационным приборам литературы было особенно мало. Единственной отечественной монографией по теории гироскопов была книга А.Н. Крылова и Ю.А. Круткова «Общая теория гироскопов и некоторых их технических применений», изданная в 1932 году. В связи с этим особенно ценным было издание в 1938 году книги Г.В. Щипанова «Гироскопические приборы слепого полета. Теория, расчет и методы конструирования».

Понимая необходимость развития научных исследований в области авиационных приборов и систем, Г.В. Щипанов много внимания уделял проведению на кафедре научных исследований. Его первыми аспирантами были Е.Ф. Антипов, Н.А. Пилогин, А.С. Майоров, В.П. Чумаков. В 1939 году вышел сборник статей под редакцией Г.В. Щипанова «Основы автоматического пилотирования и автопилоты».

Высокая квалификация преподавателей и фундаментально поставленная подготовка специалистов по авиационным приборам и системам позволили заложить основы научной школы, которую в дальнейшем успешно развивали первые выпускники кафедры, в числе которых были будущие видные ученые и руководители научно-производственных коллективов: Н.А. Пилогин, Е.Ф. Антипов, Е.В. Ольман, И.А. Михалев, Д.С. Пельпор, Н.П. Никитин и другие. За достигнутые успехи многие выпускники кафедры были удостоены Ленинской премии. Высшие научные

звания присвоены Н.А. Пилюгину – академик АН СССР, В.И. Феодосьеву – член-корреспондент АН СССР, В.Ф. Журавлеву – академик РАН. За период существования научной школы кафедры подготовлено 22 доктора наук и около 215 кандидатов наук.

Развитие ракетно-космической техники выдвинуло новые специфические задачи ориентации, навигации и управления, что потребовало не только выпуска специалистов более широкого профиля, но и разработки новых научных и методических основ их подготовки. На кафедре были разработаны новые фундаментальные курсы: «Теория гироскопов и гиросtabilизаторов», «Элементы гироскопических устройств», «Инерциальные системы навигации», «Автоматическое управление летательными аппаратами», «Электронные устройства гироскопов», «Вычислительная техника в гироскопических системах», а также ряд курсов по проектированию и испытанию гироскопических приборов и систем. Во многих вышеупомянутых курсах нашли свое отражение идеи Г.В. Щипанова.

Опыт преподавания и результаты научных исследований сотрудников кафедры были обобщены в более чем 100 монографиях, учебниках и учебных пособиях, среди которых особое место занимает учебник «Гироскопические системы» в трех томах, выпущенный под редакцией Д.С. Пельпора двумя изданиями (1972, 1988).

В развитии научной школы «Гироскопические системы» можно выделить четыре основных направления: 1) системы инерциальной навигации; 2) системы автоматического управления летательными аппаратами; 3) приборы ориентации и гиросtabilизаторы; 4) элементы гироскопических приборов.

Возникновение научного направления «Системы инерциаль-

ной навигации» связано с заявкой на авторское свидетельство под названием «Навигационный прибор для регистрации пройденного пути и скорости», поданной Л.М. Кофманом и сотрудником МВТУ Е.Б. Левенталем в 1932 г. Суть изобретения состояла в обеспечении высокой точностью горизонтальных осей чувствительности акселерометров, установленных на платформе гировертикали с интегральной коррекцией. Эта схема дала начало так называемым платформенным инерциальным системам. Аналогичное изобретение в Германии было сделано годом позже, а в США инерциальная навигация начала развиваться конце 1940-х годов.

Начало разработки другого класса инерциальных систем – бескарданных (бесплатформенных) – связано с именем выдающегося выпускника кафедры (ученика Г.В. Щипанова) Николая Алексеевича Пилюгина (1908-1982), под руководством которого в середине 1930-х годов были разработаны и испытаны чувствительные элементы этих систем – самописец угловых скоростей (жирограф) (его дипломная работа), а также самописец линейных ускорений (акселерограф). С помощью этих приборов исследовалась серьезнейшая проблема авиации того времени – штопор самолетов.

Второе направление – «Системы автоматического управления летательными аппаратами» – возникло в связи с необходимостью автоматической стабилизации углов курса, крена и тангажа при создании тяжелых самолетов. Преподаватели и аспиранты кафедры занялись разработкой первых отечественных автопилотов АВП-2 (1933 г.) и АВП-12 (1938 г.). В этих работах принимал участие и Г.В. Щипанов. Опыт создания первых отечественных и зарубежных автопилотов нашел свое отражение в монографии Е.В. Ольмана, Я.И. Соловьева, В.П. Токарева

«Автопилоты» (1946 г.).

Научные разработки кафедры в области систем автоматического управления не ограничивались только пилотируемыми летательными аппаратами. Еще в 1933 году С.С. Тихменев участвовал в разработке одного из первых отечественных автопилотов АВП-2 для управляемого по радио самолета-бомбы на базе самолета ТБ-1. В 1950-е годы разработку систем управления для беспилотных летательных аппаратов продолжили и развили выпускники кафедры и ученики С.С. Тихменева – П.М. Кириллов и Н.П. Никитин. Значительный вклад в развитие теории систем управления для беспилотных летательных аппаратов внес д.т.н., профессор Е.Р. Рахтеенко, под его руководством создан ряд систем управления для беспилотных летательных аппаратов.

Третьему направлению «Приборы ориентации и гиросtabilизаторы», связанному с проблемами измерения углов курса, крена и тангажа летательного аппарата, положила начало работа Б.В. Булгакова и С.С. Тихменева «Теория авиагоризонта Сперри с маятниковой воздуходувной коррекцией» (1937 г.), которая предлагала методику исследования инструментальных и методических погрешностей авиагоризонта путем построения траектории движения вершины гироскопа на горизонтальной плоскости.

Развитие систем автоматического управления дало импульс к созданию гироскопических датчиков углов ориентации, что, в свою очередь, потребовало разработки новых принципов построения гироскопических приборов и их теории. С конца 40-х до начала 60-х годов XX в. были разработаны и начали серийно выпускаться курсовертикали АП-15, КВ-2Н, КВ-3Н, авиагоризонт типа АГД для самолетов, выполняющих фигуры высшего пило-

тажа, различные модификации центральной гироскопической ЦГВ. В создании этих приборов принимали участие И.А. Михалев, В.С. Магнусов, В.А. Бауман. Основные научные результаты, полученные при разработке приборов ориентации, отражены во втором томе уже упоминавшегося учебника «Гироскопические системы».

Гиросtabilизаторы, защищая стабилизируемые объекты от качки, вращения, наклонов, вибрации основания, сами подвержены действию этих возмущений. Большой вклад в развитие теории и создание гиросtabilизаторов, работающих при интенсивных механических воздействиях, внес Д.С. Пельпор. Результаты его исследований изложены в ряде монографий и учебных пособий, за которые проф. Д.С. Пельпор в 1976 году был удостоен Государственной премии СССР.

Работая над актуальными вопросами развития приборостроения в содружестве с промышленными предприятиями, преподаватели и научные сотрудники кафедры участвовали в создании перспективных образцов гироскопов и гиросtabilизаторов, обеспечивая конструкторско-теоретическую часть разработок: динамически настраиваемые гироскопы (Д.С. Пельпор, В.А. Матвеев, В.Д. Арсеньев), гиросtabilизаторов кино-, фото- и телеаппаратуры (В.В. Фатеев).

Под руководством С.Ф. Коновалова разработан ряд навигационных акселерометров, а также аппаратура и методики для их статических и динамических испытаний; создана теория цифровых акселерометров с широтно-импульсной и релейно-импульсной модуляцией выходного сигнала; теория виброустойчивости акселерометров. Итогом исследований в этом направлении стала монография С.Ф. Коновалова «Теория виброустойчивости акселерометров» (1991 г.).

Развитие четвертого направления – «Элементы гироскопических приборов» – связано с монографией С.С. Тихменева «Элементы точных приборов» (1956 г.), в которой впервые была проанализирована работа элементов авиационных приборов в условиях вибрации и изменяющихся температур. В связи с требованиями промышленности на кафедре был введен вначале небольшой, а затем фундаментальный курс «Элементы гироскопических приборов», в подготовке которого принимали участие Д.С. Пельпор, Е.А. Никитин, С.Ф. Коновалов, С.А. Шестов.

На пяти ведущих предприятиях отрасли организованы филиалы кафедры: в НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (заведующий филиалом кафедры д.т.н., проф. И.Н. Сапожников), в Раменском приборостроительном КБ (заведующий филиалом кафедры лауреат Государственной премии СССР, лауреат Государственной премии РФ, заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., проф. Г.И. Джанджгава), в НИИ «Автоматики и приборостроения» им. академика Н.А. Пилюгина (заведующий филиалом кафедры лауреат Государственной премии РФ Е.Л. Межирицкий), в Московском научно-производственном комплексе «Авионика» (заведующий филиалом кафедры А.В. Воробьев). Эти филиалы являются базой не только для учебной (студенческая практика, лабораторные работы, курсовые и дипломные проекты), но и для научной деятельности кафедры, особенно при выполнении опытно-конструкторских работ. Научная школа кафедры продолжает развиваться и укреплять связь с промышленностью.

В научной и педагогической деятельности кафедры всегда присутствовала преемственность поколений, которая на протяжении уже 70 лет обеспечивает осуществление первоклассных разработок и подготовку кадров высочайшей квалификации.

И в начале этого славного пути кафедры стоит имя Георгия Владимировича Щипанова, талантливого инженера и первого заведующего кафедрой.

Список литературы

- [1] Научные школы Московского Государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. История развития / Под редакцией И.Б. Федорова и К.С. Колесникова. М: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 463 с.

От теории инвариантности к практике современных технических систем

М.Ш. Мисриханов

1 Введение

Характерной особенностью производственно-технологических процессов является глубокая автоматизация управления. При этом на принципиально новый уровень поднимаются требования к точности и качеству собственно процесса управления. Большое число разнообразных факторов, влияющих на производственный процесс, глубокие внутренние перекрестные связи, стремление к учету тонкоструктурных эффектов приводит к усложнению моделей, описывающих технологические процессы, и возрастанию требований к процедурам синтеза управления (законов управления). Для удовлетворения этих требований практически повсеместно переходят к использованию законов управления с высокоразвитой внутренней структурой.

Одним из наиболее продуктивных современных направлений в решении задач анализа и синтеза систем являются алгебраические методы, лежащие в основе современной теории динамических систем и позволяющие эффективно решать практические задачи управления сложными технологическими процессами.

Использование алгебраических методов позволяет исследователю находить решения в аналитической форме, вскрывать внутренние закономерности преобразования сигналов, обусловленные структурными свойствами сложных многомерных и многосвязных систем.

Качественно новый уровень развития современной теории управления связан с изучением различного рода особенностей динамических систем, в том числе структурного характера. Именно эти особенности придают, например, многосвязным системам качественно новые свойства и открывают принципиально иные возможности, недостижимые для односвязных систем. Другими словами, развитая структура внутренних связей технологического процесса, рассматриваемого как динамическая система, порождает неисчерпаемость способов и методов решения задач управления. При этом исследователь сталкивается с проблемой выбора подходящего в том или ином смысле решения из обширного множества эквивалентных, т.е. неразличимых по исходной постановке задачи, решений.

Сегодня многими авторами для решения задач управления используются методы инвариантного управления. Инвариантное управление можно отнести к одному из самых старых направлений теории автоматического управления. Это направление объединяет методы и средства достижения инвариантности (независимости) одной или нескольких координат системы с помощью выбора параметров (или путем изменения структуры).

2 Зарождение инвариантности

В ранней истории развития человечества известны несколько случаев инвариантного управления системами. Первый случай связан с водяными мельницами. Перед водоподводящим трактом устраивали небольшое водохранилище примерно с часовым регулированием и помощник мельника четко следил за заданной отметкой этого водохранилища. При изменении приточности, из-за изменения открытия величины холостого сброса, обеспечивалось поддержание заданной отметки водохранилища, и, соответственно, расход и напор на водяной турбине (приводе) мельницы. Таким образом, сохранялось постоянство момента независимо от величины приточности.

Другими объектами применения человеком принципа инвариантности для целей управления являются ветряные мельницы. На ветряных мельницах, для сохранения постоянства момента на валу независимо от скорости ветра, мельник изменял угол установки лопастей.

Исторически первыми задачи инвариантности решались с научным фундаментальным обоснованием начиная с конца XVII века при создании часов. Существовавшие в то время часы были неточны главным образом вследствие того, что техника часового дела того времени не знала способа борьбы с температурными возмущениями. В 1758 г. Гаррисон впервые сконструировал точный хронометр с температурной компенсацией маятника. Для этой цели была использована разность коэффициентов температурного расширения двух металлов – стали и цинка. Стальные стержни с повышением температуры удлиняются, вследствие чего центр тяжести линзы маятника опускается и приведенная длина маятника увеличивается, цинковые же стержни при этом

действуют в обратном направлении. Гаррисон подобрал длины стержней так, чтобы центр качания маятника и его приведенная длина оставались инвариантными к изменениям температуры. Испытание часов Гаррисона показало, что суммарная ошибка хронометра за 4-месячное морское путешествие была менее 2 мин, что в то время считалось непревзойденным рекордом точности.

Еще большей точности достиг Грэхэм, предложивший метод компенсации температурных возмущений с помощью сосуда с ртутью, подвешиваемого на металлических стержнях. Поднятие уровня ртути вследствие ее теплового расширения компенсирует удлинение стержней.

Начиная с 60-х годов XIX в. стали применять также и барометрическую компенсацию маятника, так как изменение плотности воздуха вызывает изменения суточного хода часов. В 1864 г. Крюгер предложил прикреплять к маятнику ниже середины стержня барометрическую U-образную трубку. С повышением давления ртуть в закрытом колене поднимается, соответственно поднимается центр тяжести маятника, уменьшается его приведенная длина, колебания маятника ускоряются, компенсируя замедление колебаний, обусловленное увеличением давления окружающего воздуха. По ряду причин метод Крюгера в практику не внедрился. Вместо него Рифлер предложил компенсировать барометрические возмущения с помощью анероида.

Интересны работы французского механика Понселе, который в 1829 г. предложил систему параметрической компенсации момента нагрузки паровой машины. Измеряемый момент нагрузки подавался на вход управляемого объекта, что позволяло обеспечивать постоянную скорость паровой машины.

Еще один метод компенсации возмущений связан с усло-

коением качки судна с помощью успокоительных цистерн, названных по имени их изобретателя цистернами Фрама. Эти цистерны представляют собой систему сообщающихся сосудов – сравнительно узких бортовых цистерн, расположенных по обоим бортам судна и наполненных до половины водой. Внизу цистерны соединены водяным перепускным каналом, а сверху – воздушным трубопроводом для прохода воздуха. Подбором параметров (в частности, размеров сечения) водяного канала добиваются, чтобы сила веса переливающейся во время качки воды в цистернах компенсировала возмущающие силы от качки.

В 1875 г. знаменитый металлург Генри Бессемер сделал попытку использовать гироскоп для стабилизации каюты на пароходе, носящем его имя. Эта попытка не удалась вследствие неправильной установки гироскопа. Ось гироскопа была перпендикулярна полу каюты и неизменно с ней связана. В этом случае гироскоп не мог совершать прецессию относительно каюты, и поэтому стабилизация не удалась. Через 30 лет после этой неудачной попытки немецкий инженер Отто Шлик разработал практически пригодную конструкцию гироскопического успокоителя. Система неоднократно испытывалась и была установлена на ряде судов. Качка, достигавшая при испытании 40° , была после пуска гироскопа уменьшена до 1° .

Инженеры, работавшие с гироскопическими компасами и гировертикалями, обнаружили, что их показания имеют существенные ошибки. В начале 1920-х годов Макс Шулер исследовал этот вопрос и установил, что гироскопический маятник с периодом 84,4' полностью инвариантен к любым возмущениям. В 1928 г. Аншютц разработал на основе маятника Шулера странственный гироскопический компас, который, как указал Б.В. Булгаков в 1939 г., может считаться свободным от баллистических девиаций.

В области электротехники тоже можно найти аналоги инвариантных систем. Первая такая система – неуравновешенная мостовая схема – была предложена в 1832 г. английским математиком и физиком Кристи. Схема состояла из четырех проволок одинаковой длины, соединенных концами, к одной паре противоположных вершин четырехугольника был присоединен источник питания (индукционная катушка), к другой паре – гальванометр. Кристи разработал эту схему для точных измерений электропроводности различных металлов, требовавшихся ему в процессе изучения влияния нагрева на электропроводность. Схема вошла в историю под названием мостика Уитстона, разделив судьбу многих приборов, изготовлявшихся в мастерской Уитстона по заказам, схемам и чертежам подлинных изобретателей. Кристи опубликовал описание своей схемы в 1833 г. В том же году Уитстон опубликовал заметку, в которой, ссылаясь на Кристи, описал изготовленный им мостик, назвав его дифференциальным измерителем сопротивления. Это измерительное устройство представляло собой симметричную схему из четырех проволок. В разрывы двух из них были включены два сравниваемых сопротивления. Уравнивание достигалось с помощью ползунка, которым закорачивалось одно плечо. В 1848 г. Вернер Сименс разработал новую модификацию мостовой схемы с неравными плечами.

Изобретателем автоматически уравнивающейся схемы был английский ученый Каллендар, который получил в 1897 г. британский патент.

Начиная с 1920-х годов, широко распространяется новый вид средств компенсации возмущений – стабилизаторы тока и напряжения. Типичный представитель таких систем – бареттер. Он состоит из железной проволоки, помещенной в баллон с водоро-

дом под небольшим давлением. Как известно, железо отличается сильной зависимостью проводимости от температуры. Бареттер изменяет свое сопротивление при изменении температуры таким образом, что отношение остается постоянным.

Подводя итог краткому историческому обзору, необходимо отметить, что вопросы компенсации возмущений рассматривались разрозненно в отдельных областях техники. Развитие этого направления в начале XX в. сдерживалось отсутствием теоретических положений инвариантных систем.

3 Становление и развитие теории инвариантности

Возникновение идей инвариантности в теории автоматического управления и первые математические изыскания в этой области связывают с именем профессора Георгия Владимировича Щипанова.

Георгий Владимирович, со слов академика А.А. Красовского (они познакомились в апреле 1946 г. на ежемесячном научном семинаре по инвариантности академика В.С. Кулебакина в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского), регулярно посещал семинар. Его участниками также были такие известные в будущем ученые как Г.С. Поспелов, Б.Н. Петров, В.В. Солодовников. Георгий Владимирович был чрезвычайно талантливым инженером в области авиационного приборостроения и имел солидную математическую подготовку, полученную на физико-механическом факультете Ленинградского политехнического института (ЛПИ) им. М.И. Калинина. А.А. Красовскому, по его рассказам, часто приходилось встречаться с Г.В. Щи-

пановым и по работе. Дело в том, что они оба участвовали в НИР одного режимного института, где исследовали (или «разбирали по косточкам», как любил выражаться А.А. Красовский) все виды зарубежных летательных аппаратов, попавшие к нам в период Второй мировой войны. Самые сложные авиационные приборы поручали Г.В. Щипанову, как прибористу самого высокого класса. Он мог часами, а иногда сутками, сидеть за очередным «заморским» прибором, пока «не докапывался до самой сути каждого прибора».

«Докопаться до самой сути каждого прибора» – это была излюбленная фраза Г.В. Щипанова. Когда приносили новый прибор, он внимательно его осматривал, гладил, приговаривая, что «у каждого прибора есть душа», и говорил: «Я такого прибора еще не видел, но догадываюсь для чего он создан и на каком принципе он работает». Как показала жизнь, он оказывался почти всегда прав. Г.В. Щипанов очень быстро составлял детальные чертежи прибора и в высшей степени подробно рассказывал комиссии института о данном приборе. Все говорили, что он приборист от бога. «Очень было приятно его слушать, так как он был всем открыт и со всеми своими знаниями охотно делился», – вспоминал А.А. Красовский.

Действительно, Г.В. Щипанов учился в ЛПИ. С ним вместе на физико-механическом факультете, но в разных группах, учились в будущем знаменитые ученые А.И. Лурье, академик АН СССР, Герой Социалистического Труда В.В. Новожилов и другие. Учился вместе с Г.В. Щипановым и дружил с ним Дмитрий Сергеевич Щавелев, который в последствии возглавил кафедру «Использование водной энергии» ЛПИ, в 1951 г., уже будучи к тому времени доктором технических наук, профессором (я с проф. Д.С. Щавелевым познакомился в 1983 г. на его

родной кафедре, будучи аспирантом у его ученика, академика РАН Ю.С. Васильева). По словам Д.С. Щавелева, они учились по специальности аэрогидродинамика. Их факультет был очень престижным. Среди преподавателей было много было знаменитых ученых (академики А.Ф. Иоффе, А.Н. Крылов и др.). Руководил их научной работой с 3-го курса проф. А.А. Фридман – молодой, но уже известный ученый в области космогонической теории расширяющейся Вселенной и общей теории относительности, математики, геофизики, механики жидкости и газов.

Здесь следует особо отметить профессора А.А. Фридмана, очень одаренного человека, который прожив всего 37 лет (1888 - 1925) оставил свой «золотой след» в современной науке. В частности, А.А. Фридман был известен как крупный специалист в области аэрогидродинамики и экспериментальной физики.

Физико-механический факультет ЛПИ, основанный в 1919 г. по инициативе академика А.Ф. Иоффе, был первым в нашей стране факультетом по подготовке инженеров-физиков с исследовательским уклоном для нужд развивающейся промышленности, науки и техники.

С момента открытия физико-механического факультета в ЛПИ под руководством А.А. Фридмана была создана лаборатория по исследованиям в области механики жидкости и газа. Первый руководитель механических специальностей на этом факультете А. А. Фридман заложил основы новой научной области – динамической метеорологии, став одним из основателей современной статистической теории турбулентности.

В ЛПИ, МГУ и МВТУ, как учебник, была востребована монография А.А. Фридмана «Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости» (1922 г.), которая была посвящена общим вопросам гидродинамики сжимаемой жидкости. Заметим, что эта книга

была издана на всех основных европейских языках.

Профессор А.А. Фридман считал себя учеником сразу четырех гениев:

Н.Е. Жуковского, который поставил ему задачу «дать подробный кинематический анализ движения сжимаемой жидкости и методику отбора из числа кинематически возможных движений тех, которые удовлетворяют уравнениям гидродинамики»;

С.А. Чаплыгина, семинары которого один раз в месяц он посещал и докладывал свои результаты (ездил в Москву на этот семинар вместе с академиком А.Н. Крыловым);

А.Н. Крылова, который руководил его научной работой за весь период его научной жизни;

Л. Прандтля, у которого по направлению А.Н. Крылова два года стажировался в Германии.

Дело учителя блестяще продолжил профессор Л.Г. Лойцянский, ученый мировой величины, создавший известную российскую школу теоретической аэрогидродинамики.

В последствии идеи А.А. Фридмана также были развиты в работах известных отечественных ученых (Б.И. Извеков, И.А. Кибель, Н.Е. Кочин и др.) и легли в основу современной аэрогидромеханики.

По рекомендации проф. А.А. Фридмана (научного руководителя их дипломных работ), как лучших выпускников, Д.С. Щавелева и Г.В. Щипанова оставляют в ЛПИ для дальнейшей научно-педагогической деятельности. Инженер Г.В. Щипанов остается в лаборатории у А.А. Фридмана и занимается гидродинамикой жидкости (в основном ртути) в различных приборах (гироскопах, гиригоризонтах и т.д.). Инженер Д.С. Щавелев переходит на кафедру профессора А.А. Морозова по использо-

ванию водной энергии и занимается вопросами гидроэнергетики.

С другой стороны, во время учебы в ЛПИИ Георгий Владимирович познакомился с еще одним великим ученым мирового значения – академиком А.Н. Крыловым. Именно академик А.Н. Крылов предложил 1923 г. талантливому студенту Г.В. Щипанову заняться разработкой гироприборов и, в частности, расчетами маятниковых уклономеров. Такие приборы нужны были как для авиации, так и для морского флота. Тогда же А.Н. Крылов познакомил молодого Г.В. Щипанова со своей личной библиотекой, где хранились работы почти всех западных ученых механиков и прибористов: Гаррисона, Рифлера, Бессемера, Шлика, Аншютца, Шулера, Уитстона, Кристи, Вернера Сименса, Сперри и др. Г.В. Щипанов часто пользовался этой библиотекой. После смерти А.Н. Крылова она была передана в библиотеку ЛПИИ.

В 1925 г. скоростно умирает профессор А.А. Фридман. Г.В. Щипанов остается без научного руководителя и судьба вновь приводит его к академику А.Н. Крылову. А.Н. Крылов «шлифует» первую статью Г.В. Щипанова и с рецензией отправляет для публикации в журнал «Прикладная физика», а самому Г.В. Щипанову рекомендует (дает рекомендательное письмо) поехать в Москву и устроиться работать на заводе «Авиаприбор». В тот момент А.Н. Крылов курировал разработки и сопровождал изготовление серии новых приборов на этом заводе. Он первым понял, что Г.В. Щипанов с его тягой к науке, творческим поиском и талантом лидера, может сделать хорошую карьера на этом режимном заводе. Со слов Д.С. Щавелева, А.Н. Крылов очень хотел оставить Г.В. Щипанова у себя в лаборатории, но врачи настоятельно рекомендовали Георгию Владимировичу уехать из Ленинграда по состоянию здоровья.

В том же году выходит вышеупомянутая статья Г.В. Щипа-

нов, где он впервые пишет о компенсации «помех, нежелательных внешних воздействий и возмущений».

Перед отъездом в Москву А.Н. Крылов согласовал с Г.В. Щипановым план его будущей кандидатской диссертации и посоветовал посещать научные семинары в МГУ, МВТУ им. Н.Э. Баумана и ЦАГИ.

Действительно, несмотря на занятость, сложную жизнь в коммунальной квартире и слабое здоровье, Г.В. Щипанов не пропускает ни один математический семинар в МГУ и инженерно-технические семинары в МВТУ им. Н.Э. Баумана и ЦАГИ. На этих семинарах на талант и большое трудолюбие Г.В. Щипанова обратили внимание многие известные в то время ученые: Н.Н. Лузин, Н.О. Вознесенский, С.А. Чаплигин, В.С. Кулебакин.

Академик А.Н. Крылов оказался пророком – Г.В. Щипанов, несмотря на свою болезнь, сделал блестящую карьеру на производстве. За четыре года, начав с должности старшего инженера-конструктора (1925 г.), дошел в 1929 г. до начальника отдела опытных разработок. Одновременно с этим он занимал должность главного конструктора завода «Авиаприбор».

Работая одновременно в Научно-испытательном Институте Военно-Воздушных Сил СССР на должности начальника научно-конструкторского бюро и будучи также членом Научного Комитета Управления Военно-Воздушных сил Наркомата Обороны СССР, Г.В. Щипанов смог внедрить в производство ряд новых приборов и устройств, не имеющих в то время аналогов в мире.

С 1930 г. по 1938 г. наступает период пика славы Г.В. Щипанова. В этот период он везде востребован. Его приглашают на различные совещания подразделений Управления Военно-Воздушных сил Наркомата Обороны СССР. Он участвует в

составе государственной комиссии при испытаниях различных летательных аппаратов. Его мнение по авиационным приборам различного назначения является чрезвычайно авторитетным. Г.В. Щипанова приглашают читать лекции в разные институты.

В 1932 г. Г.В. Щипанов был назначен заместителем технического директора завода «Авиаприбор», а в 1933 г. по предложению Наркомата Обороны его назначают начальником Особого конструкторского отдела вновь введенного оборонного завода «Метрон». В эти годы он много занимается комплексными вопросами приборостроения: качеством изготовления авиационных приборов на заводах-изготовителях; качеством их монтажа на летательных аппаратах (самолетах, дирижаблях и стратостатах – модных веяниях 1930-х годов) в сборочных цехах авиазаводов; отказами этих приборов в период эксплуатации.

На основе своего опыта работы в эти годы он публикует очередные две статьи.

В 1932 г. Г.В. Щипанова приглашают прочесть курс лекций по «авиационным пилотажным, высотным и навигационным приборам» в Ленинградский Институт Гражданского Воздушного Флота (ЛИГФ). Георгий Владимирович не мог отказать ленинградцам ни в чем, поскольку со студенчества относился к Ленинграду и его жителям с особой любовью. Только поэтому, хотя врачи категорически запрещали по состоянию здоровья переезд в Ленинград, он согласился читать лекции в ЛИГФ. При этом он перешел на работу на заводе «Метрон» на полставки.

Зимой 1932-1933 гг. в Ленинграде у Георгия Владимировича обостряется болезнь легких и он возвращается в Москву. Весной 1933 г. он подает документы и избирается по конкурсу на должность доцента Факультета точного приборостроения МВТУ им. Н.Э. Баумана. После этого Г.В. Щипанов увольняется

с завода. С этого периода времени в сложной жизни Г.В. Щипанова большую (в самом положительном смысле этого слова) роль сыграл академик В.С. Кулебакин. Это в беседах с А.А. Красовским Георгий Владимирович всегда подчеркивал и говорил о В.С. Кулебакине с непременным восхищением.

В.С. Кулебакин близко познакомился с Г.В. Щипановым на техническом совете Научного Комитета Управления Военно-Воздушных сил Наркомата Обороны СССР в 1928 г. С этого момента они часто встречались по различным вопросам и поддерживали друг друга. Когда Г.В. Щипанов в 1933 г. вернулся больным из Ленинграда, В.С. Кулебакин оказался рядом, уговорил его лечь в Военный госпиталь им. Бурденко для лечения и попросил подать документы в МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Г.В. Щипанов, находясь в военном госпитале им. Бурденко и едва улучшив свое самочувствие, под влиянием В.С. Кулебакина и А.Н. Крылова начинает работать над кандидатской диссертацией. В 1935 г., уже работая в МВТУ им. Н.Э. Баумана, завершает ее. Диссертация была издана в виде книги «Теория и расчет авиационных приборов» и позже была утверждена в качестве учебника Учебно-методическими советами ЛПИ и МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Защищать диссертацию Г.В. Щипанов решил в своем родном Ленинградском Политехническом институте, ученый совет которого после блестящей защиты присудил Г.В. Щипанову ученую степень кандидата технических наук. Сразу после этого в МВТУ им. Н.Э. Баумана Г.В. Щипанов (при поддержке профессоров В.С. Кулебакина, К.А. Круга, Ф.Д. Дроздова и др.) становится заведующим кафедрой «Авиационные приборы», открывает новую специальность по авиационным приборам, приглашает на кафедру новых ученых и специалистов-производственников, на-

бирает аспирантов (со слов А.А. Красовского он очень гордился своими учениками, особенно Н.А. Пилюгиным), разрабатывает и читает новые курсы по авиационным приборам и одновременно работает над докторской диссертацией под названием «Гирроскопические приборы слепого полета». Эта диссертация также была издана в виде монографии «Гирроскопические приборы слепого полета. Теория, расчет и методы конструирования» в 1938 г. Монография получила хорошие отзывы от специалистов по авиационным приборам и поэтому было решено выйти на защиту с диссертацией по такой же тематике.

Как было сказано выше, Г.В. Щипанов планировал защитить диссертацию на докторском совете в ЛПИ, но правила ВАКа того времени требовали защиты диссертации в том ВУЗе, где была сделана работа, при условии если в этом институте имеется докторский совет по техническим наукам. Поэтому докторская диссертация в виде монографии «Гирроскопические приборы слепого полета» была представлена к защите в ученый (докторский) совете МВТУ им. Н.Э. Баумана. На этой защите присутствовал проф. В.С. Квятковский, который так же как профессор К.А. Круг, в начале преподавал в МВТУ им. Н.Э. Баумана, а потом перешел работать в МЭИ и основал 1946 году кафедру гидравлических машин и возглавил ее до 1974 года. До 1940 года многие ученые, в том числе В.С. Кулебакин, К.А. Круг, В.С. Квятковский, оставались в ученых советах МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Профессор В.С. Квятковский рассказывал, «что в начале защита шла нормально, выступили оппоненты, начались вопросы. Потом по непонятным причинам на некоторые вопросы диссертант начал отвечать излишне нервозно и эмоционально, получился неоднозначный диалог, многие члены совета чувствовали себя обиженными после ответа диссертанта, а после тайного

голосования итог: «за» присвоение ученой степени доктора технических наук проголосовали всего 4 члена из 28, полный провал, я такого не помню ни до, ни после Щипанова. После голосования выступил профессор Ф.Д. Дроздов, который попросил диссертанта самому снять диссертацию с защиты и через некоторое время, после доработки с учетом замечаний, вновь представить к защите».

Со слов В.С. Квятковского, «потом был второй вопрос о присвоении за научно-педагогическую деятельность звание профессора к.т.н. Г.В. Щипанову. По этому вопросу выступил декан факультета профессор Ф.Д. Дроздов, он же был одновременно и зав. кафедрой «Точной механики». Профессор Ф.Д. Дроздов был лектором от бога, он мог очень лаконично и доходчиво преподнести аудитории любой вопрос. После его выступления больше не было желающих выступить, поэтому сразу поставили вопрос на открытое голосование. Все 28 членов проголосовали единогласно за присвоение к.т.н. Г.В. Щипанову звания профессора. Конечно мы все, его друзья, понимали, что тот день нанес отрицательный эмоциональный удар по Г.В. Щипанову. Так и получилось, он после этого болел и месяц его не было на работе. Потом я от профессора К.А. Круга узнал, что Г.В. Щипанов ушел из МВТУ им. Н.Э. Баумана в какой-то вновь созданный Комитет. Мне было жалко, что он ушел из института, так как он был прекрасным лектором. Насколько я помню все студенты о нем отзывались очень хорошо. Я много слышал отзывов о нем как о хорошем специалисте по авиационным приборам, но я точно знал, что он был одним из лучших гидромехаников в МВТУ им. Н.Э. Баумана и прекрасно разбирался в гидротурбинах. После той защиты Г.В. Щипанова я всех своих аспирантов и докторантов учил элементам ораторского искусства и говорил (и сейчас говорю) всем

своим ученикам, что мало получить хорошие научные результаты, надо их также хорошо преподнести научному миру». В том же году Высшая аттестационная комиссия утвердила решение ученого совета МВТУ им. Н.Э. Баумана и Г.В. Щипанову было присуждено ученое звание профессора.

С этого момента научная и педагогическая деятельность Г.В. Щипанова связана с двумя выдающимися учеными – К.А. Кругом и В.С. Кулебакиным.

В 1938 г. В.С. Кулебакина, к тому времени уже известного специалиста по автоматике и телемеханике, по рекомендации академиков Г.М. Кржижановского и В.Ф. Миткевича, назначают руководителем Комитета автоматизации и телемеханики АН СССР (на правах НИИ). Сразу после создания Комитета автоматизации и телемеханики, В.С. Кулебакин приглашает для работы в этот Комитет Г.В. Щипанова, потому что очень интеллигентный и человеколюбивый В.С. Кулебакин понимал, что после провала защиты докторской диссертации Г.В. Щипанова нельзя оставлять в МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Г.В. Щипанов с благодарностью принял приглашение и с огромным энтузиазмом включился в работу Комитета. Работу в этом Комитете Г.В. Щипанов считал самыми лучшими годами своей жизни.

В 1939 г. этот комитет преобразовывают в Институт автоматизации и телемеханики (ИАТ) АН СССР, а самого В.С. Кулебакина избирают действительным членом АН СССР. В этот период он выполнял также работу заместителя академика-секретаря Отделения технических наук АН СССР.

Сейчас, через более чем полвека, оценивая ситуацию того времени понимаешь, что академик В.С. Кулебакин был талантливым, мужественным и целеустремленным человеком. Он

достигал всегда поставленных целей. Эти его качества проявились и во время Первой мировой войны, где он принимал участие, и при разработке и реализации плана ГОЭЛРО, и во время его работы Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского, МВТУ им. Н.Э. Баумана и в МЭИ. Во всех этих ВУЗах он создавал факультеты и кафедры, которые до сих пор выпускают высококлассных инженеров, многие из которых в последствии стали всемирно известными учеными. Плохо, что об этом мы мало рассказываем нашей молодежи, а российские СМИ практически забыли об отечественных гигантах науки.

Когда В.С. Кулебакина назначили директором ИАТ, он понимал, что для решения всех проблем, стоящих перед институтом (для становления в СССР теории автоматического управления, как науки) необходимо пригласить неординарных людей. Поэтому в том же году, сразу после создания ИАТ, академик В.С. Кулебакин приглашает многих известных ученых, в том числе, известного в мире математика академика Н.Н. Лузина, на работу во вновь созданный институт.

Академик В.С. Кулебакин создает из двух ученых (академика Н.Н. Лузина и профессора Г.В. Щипанова) мощный тандем. В 1939 г. Г.В. Щипанов был назначен в институте на должность руководителя лаборатории автоматического регулирования, где он развернул работы по теории автоматического регулирования систем на основе принципов инвариантности. Академик Н.Н. Лузин оказывал ему «математическую поддержку».

Здесь необходимо вернуться вновь к академику А.Н. Крылову. У нас в стране не особо отмечают роль этого выдающегося человека в развитии теории автоматического управления. Ради справедливости следует отметить, что именно А.Н. Крылов, продолжая российские традиции, начатые Н.Е. Жуковским и

А.М. Ляпуновым, внес в теорию автоматического регулирования описание методом пространства состояний динамических систем «не только для проверки устойчивости системы, но и для определения и других свойств системы для целей регулирования». Именно А.Н. Крылов и В.С. Кулебакин впервые начали говорить о том, что теория автоматического регулирования не заканчивается на определении устойчивости системы, а вбирает в себе основы создания автоматических систем и регуляторов.

Именно с таких позиций Г.В. Щипанов начал изучать проблемы автоматического регулирования. Он стремился установить количественную связь между параметрами системы и реакцией этой системы на внешние воздействия. Такая постановка непосредственно вытекала из работ академика А.Н. Крылова, на которые Г.В. Щипанов многократно ссылался. Преемственность распространялась на основные понятия, обозначения, применяемый математический аппарат (он также как и А.М. Ляпунов и А.Н. Крылов для описания динамики системы пользовался аппаратом дифференциальных уравнений в форме Коши, а для описания внутренних и внешних взаимосвязь – аппаратом структурных схем) и, главное, – на постановку задач об уменьшении вынужденных отклонений, бывших даже в те времена обычными для теории и практики гироскопии. Именно, исходя из требований уменьшения девиации гироскопов, уже имея пример теоремы Шулера о невозмущаемости маятника, Г.В. Щипанов формулирует общую постановку проблемы компенсации возмущений для гироскопических систем.

С другой стороны, академику Н.Н. Лузину, «как чистому математику, ничего не понимающего в технике», «математическая постановка задачи о компенсации влияния возмущений на регулируемую координату системы управления и математическая

модель системы в форме Г. В. Щипанова были предельно ясны и понятны», что было очень важно для совместной работы.

Там, в лаборатории Института автоматики и телемеханики, за один год работы Г.В. Щипанов успел сделать удивительно много в разработке теории компенсации, написал в 1939 г. монографию «Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов», где были приведены математические методы анализа систем регулирования в пространстве состояний и, самое главное, его метод по синтезу систем регулирования на основе его знаменитого принципа компенсации (со слов автора, имелись пять экземпляров машинописного текста этой книги).

Однако, книга не получила положительных отзывов и была отклонена. Это был очень сильный удар по престижу Г.В. Щипанова. Книга и последующая защита докторской диссертации должны были стать трамплином Г.В. Щипанову для участия в выборах на получение звания члена-корреспондента АН СССР (такую идею поддерживали академики Н.Н. Лузин, А.Н. Крылов, В.С. Кулебакин, Б.Е. Веденеев, Г.М. Кржижановский и другие). Но к великому сожалению, так уж повелось в жизни и, перефразируя Святое Писание, параллельно с добрыми людьми «живут карьеристы, интриганы, завистники и, наконец, конкуренты». Такие люди были и вокруг Г.В. Щипанова и они начали свое грязное дело травли, лицемерия и полуправды. Они вовлекли «в эту травлю под эгидой научных дискуссий» многих крупных ученых страны.

В том же 1939 г. директору ИАТ В.С. Кулебакину удалось получить разрешение на издание журнала «Автоматика и телемеханика». И в первом номере этого издания весной 1939 г. была опубликована статья Г.В. Щипанова «Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов» [183]. Статья, по

сути, являлась расширенным рефератом запрещенной к изданию книги, носила то же название и была посвящена вопросам регулирования однокоординатных процессов, у которых возмущение действует на регулируемую координату (параметр). Но Г.В. Щипанов рассматривал и многокоординатные процессы, о чем он говорит в заключении к статье. Эта работа Г.В. Щипанова содержала новые и плодотворные идеи, тем не менее рассмотренные в ней системы регулирования могли быть инвариантны только при бесконечно большом коэффициенте усиления. Этот факт надо оценивать как демонстрацию абсолютно правильного метода на неудачно выбранном частном примере, для которого достижение абсолютной инвариантности реально невозможно.

Появление в печати работы Щипанова привлекло внимание к автору и полученным им результатам, а также вызвала бурную научную дискуссию. В этой дискуссии приняли участие такие видные математики, как Л.Н. Михайлов, С.Л. Соболев, Ф.Р. Гантмахер, С.А. Христианович, Н.О. Вознесенский, Л.О. Николаи и др. Первое время дискуссия, несмотря на остроту, носила чисто научный характер. Однако, 16 мая 1941 г. в своей передовой статье «Наука и промышленность» газета «Правда» неожиданно обрушилась с острой критикой на научно-исследовательские учреждения. В частности, там говорилось, что эти учреждения «сплошь и рядом оторваны от нужд народного хозяйства, в некоторых из них господствует рутинная, застойная, гнездится лженаука. Вот, например, Институт автоматки и телемеханики Академии Наук СССР. Здесь долгое время гуляла лженаучная, абсурдная теория в области автоматки регулирования». И далее – «надо полагать, что актив Академии наук, который соберется в ближайшие дни, будет способствовать развертыванию самокритики и поможет приблизить институты

Академии Наук к запросам социалистической экономики».

Щипанова обвинили в том, что он пытается «путем математических спекуляций создать фантастический «универсальный и идеальный» регулятор – нечто вроде вечного двигателя». Видимо, эта статья привлекла внимание, и в ИАТ была направлена специальная Комиссия Президиума Академии наук СССР по обсуждению и оценке работы Г.В. Щипанова. Руководителем этой комиссии был назначен вице-президент АН СССР академик О.Ю. Шмидт.

В 1941 г. в № 2 журнал «Автоматика и телемеханика» опубликовал выводы этой Комиссии и предложения директора ИАТ АН СССР академика В.С. Кулебакина по изменению формулировки, а также особое мнение академика Н.Н. Лузина, считавших «необходимым дальнейшие изыскания» («Автоматика и телемеханика», 1941, № 2, с. 131-132).

К сожалению, точку на этом поставить не удалось. В журнале «Большевик» (1941, № 9, с. 90-96) появилась статья под названием «Лженаучные работы Института автоматки и телемеханики Академии наук СССР». Один из выводов этой статьи гласит: «Лженаучная деятельность Института автоматки и телемеханики в области теории регулирования приносит огромный вред нашей стране. Эта деятельность дезориентирует инженеров-практиков, мешает развитию теории регулирования и дискредитирует советскую науку и высшее научное учреждение страны – Академию наук СССР. Не пора ли положить предел этой деятельности Института автоматки и телемеханики».

В результате все этой «деятельности» лаборатория Г.В. Щипанова была ликвидирована, документы и материалы изъяты, а сам Г.В. Щипанов тяжело заболел и оставил работу в ИАТ.

В июне 1941 г. началась Великая Отечественная война.

Стране нужны были специалисты всех специальностей и особенно оборонных. Академики Н.Н. Лузин, В.С. Кулебакин, Г.М. Кржижановский и другие ученые часто посещали больного Г.В. Щипанова, помогая ему не только морально, но и материально. В октябре 1941 г., когда враг был недалеко от Москвы, В.С. Кулебакин посетил больного Г.В. Щипанова и предложил ему работу в Московском авиационном институте (МАИ). Г.В. Щипанов, хотя сильно болел, был большим патриотом и в трудные для своей страны дни не мог находиться дома, поэтому согласился и подал документы.

В декабре 1941 г. он уже участвовал в организации приборостроительного факультета МАИ и стал первым деканом этого факультета. Тогда же им создается новая кафедра «Авиационного приборостроения и автоматики». Он начинает вновь активно заниматься наукой, посещает семинары В.С. Кулебакина в ВВИА им. Жуковского. Как я уже писал выше, его начали привлекать различные режимные авиационные институты для консультаций. Он консультирует также различные гражданские учреждения и проектно-конструкторские организации (институт ОРГРЭС, институт Гидроэнергопроект, ВЭИ, ЦНИИЭЛ и другие). В этих институтах Г.В. Щипанов, кроме чтения новых курсов в Московском авиационном институте, проводит ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с реализацией принципов инвариантности. В частности, о его работах в области электроэнергетики будет сказано далее.

За большую работу в дни Великой Отечественной войны Г.В. Щипанов был награжден Орденом Красной Звезды.

Г.В. Щипанов, как бы ему не было трудно и тяжело, всегда работал на пределе своих возможностей. В конце 1949 г. Г.В.

Щипанов тяжело заболевает и вынужденно оставляет работу в МАИ. Несмотря на болезнь, по словам многих очевидцев (Б.А. Рябова, А.А. Красовского и др.), «не было и дня, чтобы к нему не приходили его ученики и коллеги, и у постели больного не обсуждались бы самые острые проблемы автоматического управления и приборостроения».

Георгий Владимирович Щипанов ушел из жизни весной 1953 года, не дожив несколько недель до своего пятидесятилетия, и похоронен на Новодевичьем кладбище в Москве.

Не имея возможности убедительно опровергнуть новую теорию, противники ее выдвигали обвинение в некорректности примененного математического аппарата.

Для выяснения этого вопроса была начата работа академиком Н.Н. Лузиным, в последующем оформленная им в статью о математической теории инвариантности. Работа Н.Н. Лузина вылилась в фундаментальные исследования по применению матричного исчисления. Она дала теории автоматического регулирования эталонный метод синтеза инвариантных систем. Именно Н.Н. Лузин ввел термин «инвариантность». В последующем Н.Н. Лузин совместно с профессором П.И. Кузнецовым неоднократно возвращался к рассмотрению математических сторон абсолютной и частичной инвариантности.

Роль академика В.С. Кулебакина в теории инвариантности велика и чрезвычайно многогранна. В предвоенные годы XX в. он формирует подход к теории инвариантности с позиций оценки качества переходных процессов. Первой школой инвариантности была созданная В.С. Кулебакиным группа молодых ученых в Военно-воздушной инженерной академии им. Н. Е. Жуковского.

Работы В.С. Кулебакина были направлены, в первую очередь, именно на доказательства физической реализуемости усло-

вий инвариантности. Об этом всегда он говорил на семинарах. Этим можно объяснить заглавие первой послевоенной его статьи, посвященной инвариантности: «О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах». В этой работе была показана реальная возможность применения инвариантных систем и продемонстрированы уже существующие примеры.

Вторым направлением работ В.С. Кулебакина стало рассмотрение реализации идей инвариантности при организации дополнительного управления по нагрузке, что определило построение целого класса особых, так называемых комбинированных инвариантных систем [63, 64].

Академик В.С. Кулебакин, рассмотрел характерные особенности задач инвариантности и нашел новые математические методы их решения. К этому нужно отнести цикл его работ по $K(D)$ -изображению, начиная со статьи [65], опубликованной в Трудах ВВИА им. Н.Е. Жуковского в 1952 г., основные положения которой были представлены на семинаре в Институте автоматизации и телемеханики АН СССР еще весной 1951 г., и закончившая работой [66], изданной уже в 1958 г.

В 1953 г. В.С. Кулебакиным были сформулированы так называемые условия «избирательной» инвариантности. В дальнейшем он получил ряд фундаментальных обобщений теории инвариантности [67-70]. Одним из основополагающих его результатов можно считать доказательство того факта, что инвариантность одной координаты объекта можно обеспечить от $(n - 2)$ возмущений или $(n - 2)$ координат от одного возмущения.

Непреходящее значение для теории инвариантности имеют работы академика Б.Н. Петрова. Так, его статья «О построении и преобразовании структурных схем», опубликованная в 1945 г.,

является естественным продолжением работ Н.Н. Лузина.

Дальнейшие публикации Б.Н. Петрова были посвящены вопросам реализуемости инвариантного управления в линейных и нелинейных системах регулирования. Критерий реализуемости условий инвариантности был сформулирован в работе [123]. В ней в общем виде обосновано необходимое условие реализуемости инвариантных систем и определены достаточные условия инвариантности для конкретных схем автоматического управления.

С целью определения физической реализуемости условий инвариантности Б.Н. Петров сравнивает множества решений двух систем уравнений. Первая система описывает модель исходной системы, вторая – модель разомкнутой на выходе инвариантных компонент вектора состояния. Необходимым условием реализуемости условий инвариантности является совпадение множества решений первой и второй систем. Для отыскания всех решений системы линейных дифференциальных уравнений Б.Н. Петров использует подход Н.Н. Лузина [79], в соответствии с которым исходная система уравнений приводится к канонической форме Эрмита, а затем ищут решения цепным порядком. Разомкнутая система получается из замкнутой путем обнуления всех элементов первого столбца матрицы исходной системы, кроме первого [125].

Из анализа структурных схем при выполнении критерия реализуемости Б.Н. Петров делает вывод, что в динамической системе должно быть хотя бы два канала распространения внешнего воздействия: между точкой приложения внешнего воздействия и точкой измерения величины, инвариантность которой должна быть обеспечена. Основные идеи принципа физической реализуемости были развиты в работах [124, 125, 127] для различных систем автоматического управления.

Особое место в теории инвариантности занимают работы академика А.Ю. Ишлинского, академика НАН Украины А.И. Кухтенко, член-корреспондента НАН Украины А.Г. Ивахненко.

Академик А.Ю. Ишлинский исследовал возможности использования принципа инвариантности для гироскопических и навигационных систем. Он не только критически оценил с позиций инвариантности теорему Шулера, но и дал основные положения теории сложных систем навигации [35, 36]. В общей теории инвариантности А.Ю. Ишлинский выявил зависимость изменений обобщенной выходной координаты не только от внешнего воздействия, параметров и структуры системы, но и от предыстории исследуемого состояния.

Работы А.Г. Ивахненко [25-33] посвящены комбинированному управлению. Согласно сформулированному А.Г. Ивахненко принципу комбинированного управления на вход системы с помощью компаундирующей связи подается величина, пропорциональная возмущающему воздействию. Это дает возможность в ряде важных практических случаев получить не только нулевую, но и отрицательную погрешность. А.Г. Ивахненко определил зависимость между условиями инвариантности и запасом устойчивости. В дальнейшем А.Г. Ивахненко сосредоточил внимание на создании инвариантных систем, работающих по отклонению, связал статистические задачи с инвариантностью, искал связь инвариантности с логическими системами [143].

Начало научной деятельности А.И. Кухтенко в области теории инвариантных систем [73, 74] проходило под руководством Г.В. Щипанова. Поэтому многие его работы посвящены вопросам физической реализации систем автоматического управления, построенных по принципу отклонений, инвариантных до ϵ . А.И. Кухтенко изучал вопросы создания инвариантных систем с пере-

менными коэффициентами, оценивал влияние начальных условий, впервые применил к инвариантным системам операторный метод и показал важную роль при решении задач инвариантном управлении ненулевых начальных условий объекта.

Упоминание всех многочисленных работ отечественных и зарубежных ученых в области инвариантности является достаточно трудной задачей. Тем не менее, необходимо отметить работы профессора В.А. Боднера [9], который совместно с сотрудниками факультета электроспецоборудования ВВИА им. Н.Е. Жуковского продемонстрировал образцы последовательного развития и практического применения теории инвариантности к авиационным автоматическим устройствам и системам. Важно также упомянуть труды профессора Г.М. Уланова [161-164], в которых устанавливается непосредственная связь теории инвариантности с другими областями теории автоматического регулирования. Профессор Г.М. Уланов также рассмотрел вопросы инвариантности в стохастических системах и, в частности, доказал, что условия минимизации ошибки системы в ряде случаев совпадают с условиями инвариантности [163]. Сформулированные им условия малой возмущаемости нелинейных систем и критерий их динамической точности являются большим вкладом в теорию автоматического управления.

В работах М.В. Меерова [85] разработана теория систем высокой точности, достигаемой увеличением коэффициента регулятора до сколь угодно высоких значений путем специальной организации местных обратных связей. В таких системах удовлетворяются условия инвариантности до ϵ .

Профессор О.М. Крыжановский значительно расширил понятие инвариантности до ϵ и ввел понятие «квазиинвариантных» систем.

Системам со многими параметрами посвятили свои работы профессора Ю.Г. Корнилов, П.И. Чинаев, А.И. Суд-Злочевский [143]. Ими разработаны инженерные методы расчета самонастраивающихся систем и их элементов, которые могут быть использованы для автоматического управления различными производственными процессами. Такими процессами могут быть поддержания оптимального коэффициента избытка воздуха в камерах сгорания газотурбинных установок, регулирования к. п. д. осевых компрессоров и газовых турбин, обеспечения минимальной ошибки при прокате, металла и сварке труб, оптимизации режима следящих и систем, используемых в различных отраслях машиностроительной промышленности и др.

Проблемы инвариантных адаптивных систем рассмотрены в работах академика НАНУ В.М. Кунцевича [71, 72], профессора А.Г. Шевелева [179, 180] и др.

Формирование методики расчета комбинированных систем и систем с неединичной обратной связью посвящены работы профессоров В.А. Бесекаевского и С.М. Федорова [168].

Профессор А.Г. Шевелев показал, что использование при синтезе передаточной функции системы автоматического регулирования условий инвариантности и условия минимума среднеквадратической ошибки приводит к эквивалентным результатам. Это позволило А.Г. Шевелеву сделать вывод, что инвариантные системы оптимальны в смысле минимума среднеквадратической ошибки.

В работах профессоров В.Ю. Рутковского, С.Д. Землякова развиваются понятия двукратной инвариантности в адаптивных системах координатно-параметрического управления [128-131].

Профессор Э.М. Солнечный [15, 155, 156] рассматривал проблему инвариантности с позиций вырождения порядка систем

дифференциальных уравнений.

Зарубежные ученые В.Д. Anderson [184], G. Basile и G. Marro [185-187], С.Д. Johnson [18], А.С. Morse [193], W.M. Wonham (Уонем) [165, 193] и др. внесли существенный вклад в развитие теории инвариантности в рамках классической и современной теории управления.

Эти и многие другие работы, например, академика А.А. Красовского [46], В.Т. Морозовского [116], М.В. Меерова [85], Р.А. Полуэктова [135, 136], О.С. Соболева [153] развивали как теорию инвариантности, так и ее инженерные приложения в вопросах инвариантности и автономности многомерных динамических систем.

4 Современное состояние теории и практики инвариантности

Подводя итог краткому историческому обзору, необходимо отметить, что вопросы компенсации возмущений рассматривались разрозненно в отдельных областях техники. Развитие этого направления в начале XX в. сдерживалось отсутствием теоретических положений инвариантных систем.

Выделим основные направления развития теории инвариантности и прокомментируем некоторые подходы.

Инвариантность в линейных многомерных системах. Решению задачи инвариантности для систем с несколькими переменными посвящены работы [22, 40, 46, 75, 82, 83, 86, 123, 135-138, 166, 167]. В многомерных системах проблема инвариантности усложняется тем, что, кроме внешних возмущений, которые могут быть приложены в любом месте системы, имеет место связь

между регулируемыми величинами.

В работах [22, 82, 83, 138] для синтеза управления используется метод обратных операторов, суть которого заключается во включении в управляющую модель обратной передаточной функции. Основная проблема использования подхода связана с тем, что требования физической реализуемости системы при синтезе не учитываются. Поэтому зачастую решение получается физически нереализуемым. Кроме того, сокращение полюсов и нулей передаточной функции объекта с соответствующими нулями и полюсами корректирующих устройств может привести к появлению в системе неуправляемой и ненаблюдаемой составляющих [188, 190]. В этом случае в работах [40, 135, 136] на передаточную матрицу предложено накладывать ограничения специального вида, зависящие от структуры и динамических свойств объекта регулирования.

В работах [166, 167] рассматриваются вопросы инвариантности многосвязных систем с разрывными управлениями.

Исследованию систем с переменными параметрами посвящены работы [7, 12, 74, 128, 142, 148, 157, 178]. Выделяют две постановки задачи инвариантности.

В первом случае объект управления описывается системой дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Для решения задачи используются уравнивающие операторы [74, 157]. В этом случае критерий абсолютной инвариантности является общим как для объектов с постоянными параметрами, так и для объектов с переменными параметрами. При этом при изменении параметров объекта нет необходимости изменять параметры регулятора.

Вторая постановка задачи связана с понятием параметрической инвариантности [142]. В этих случаях добиваются незави-

симости выходных переменных систем не только от внешних возмущений, но и от изменения ее параметров (двукратная инвариантность). Решение задачи двукратной инвариантности рассматривалось в [7, 12, 128, 154].

Нелинейным инвариантным системам посвящены работы [4, 5, 8, 19, 21, 44, 57, 87, 118-120, 125, 133]. В них рассматривались случаи, когда нелинейные задачи могут быть либо сведены к линейным, либо для их изучения может быть использована идея симметрирования двух каналов с нелинейными звеньями, по которым проходит одно и то же возмущение. В отличие от работ по линейным системам, вместо определителей используются понятия якобианов.

Различают сильную и слабую инвариантность нелинейных систем. При сильной инвариантности компоненты вектора состояния не зависят от возмущения на всем конечном интервале времени. Обеспечение сильной инвариантности в общем случае достаточно сложная процедура, определяемая априорной информацией и «точностью» математической модели и связываемая с увеличением мощности управляющего воздействия.

Инвариантность, чувствительность, управляемость. Идея параметрической инвариантности близка к идеям теории чувствительности. Целесообразно совместное использование методов теории чувствительности и теории инвариантности. Примеры такого исследования приведены в работах [42, 78, 132, 194].

Еще более широкое сочетание различных методов исследования можно обнаружить в работах [192, 195, 197], в которых с общей точки зрения обсуждаются понятия управляемости, инвариантности и чувствительности. В работе [195] к этому добавлена адаптивность. Основой для такого взгляда послужила общая теория возмущений. Это позволило Р. Томовичу, в от-

личие от основополагающих представлений об управляемости, принадлежащих Р.Е. Калману и базирующихся на том, что только вектор управляющих воздействий вынуждает двигаться динамическую систему к ее конечному состоянию, ввести более широкое представление об управляемости, когда не только принимается во внимание вектор управляющих воздействий, но и учитывается вектор внешних возмущающих воздействий, вектор параметрических воздействий, а также принимаются во внимание начальные условия, в которых находится изучаемая динамическая система.

Задачи инвариантности для объектов с распределенными параметрами решались в работах [1, 16, 17, 14, 145, 168]. В них объекты управления описываются уравнениями в частных производных. Такого рода задачи связаны с проблемой автоматизации технологических процессов.

Принцип инвариантности в сочетании с идеями построения адаптивных систем рассматривался в работах [20, 39, 71, 129, 130, 141, 160, 175].

Задачей самонастраивающихся систем управления является обеспечение устойчивости и необходимого качества переходных процессов в условиях изменения параметров объекта управления в широких пределах. Применение самонастраивающихся систем приводит к улучшению характера собственных переходных процессов, свободных колебаний системы и лишь частично отражается на протекании вынужденных колебаний при действии внешних возмущений. Проблема параметрической инвариантности заключается в обеспечении независимости поведения автоматической системы и ее динамических свойств от изменения параметров объекта управления или характеристик элементов управляющей системы. Эта задача может решать-

ся методами самонастройки. Другими словами, некоторые типы самонастраивающихся систем могут обеспечивать параметрическую инвариантность автоматической системы по отношению к изменению одного или нескольких ее параметров.

Самонастраивающиеся системы, в которых используется принцип инвариантности, могут быть трех основных типов.

1. Для управления объектом с переменными параметрами используется самонастраивающаяся система того или иного класса, а для обеспечения инвариантности системы относительно внешнего возмущающего воздействия создается дополнительный канал с постоянными параметрами, который и решает поставленную задачу. К этому же типу относятся комбинированные системы, в замкнутый цикл которых входит самонастраиваемая система, а блоки разомкнутого цикла имеют постоянные параметры, выбранные на основании условий инвариантности.

2. Двухканальная (в частности, комбинированная) система управления, в которой одна самонастраивающаяся система замкнутого контура выполняет обычную функцию – обеспечивает устойчивость и удовлетворительное качество переходных процессов на всех режимах работы управляемого объекта с переменными параметрами, а вторая самонастраивающаяся система разомкнутого цикла или второго канала управления обеспечивает выполнение условий инвариантности. Необходимость создания второй самонастраивающейся системы возникает в том случае, когда и при действии первой в условии инвариантности входят переменные параметры, не позволяющие обеспечить инвариантность на всех режимах при постоянной настройке второго канала управления.

3. Самонастраивающиеся системы, обеспечивающие двукратную инвариантность. В таких системах удовлетворение условий

инвариантности относительно внешнего воздействия одновременно обеспечивает и параметрическую инвариантность относительно изменения одного или нескольких параметров самой автоматической системы, в частности параметров объекта управления. Такие системы обычно относятся к классу самонастраивающихся систем.

Решению задач инвариантности для импульсных и дискретных систем посвящены работы [34, 72, 158]. В них идеи и методы теории инвариантности перенесены на теорию дискретных и импульсных систем и решены некоторые специфические для этого класса систем задачи инвариантности. Среди новых проблем, выдвинутых в этой области, большое значение приобретает задача о достижении инвариантности глобального критерия качества той или другой сложной системы управления, включающей в себя управляющую ЦВМ, относительно неконтролируемых возмущений, действующих на локальные подсистемы, из которых состоит изучаемая сложная система.

О вариационной трактовке задач теории инвариантности необходимо сказать отдельно. Эта область исследований интенсивно развивается [23, 139, 151, 171, 172]. Решение задач инвариантности сводится к исследованию приращения функционала [139], но задачи инвариантности не являются экстремальными [126]. Эти задачи отличаются как по постановке задачи, так и по методу решения и могут быть отнесены к общей теории управления. Отметим, что задачи инвариантности в технических областях возникают тогда, когда необходимо компенсировать возмущающие факторы, нарушающие условия нормальной работоспособности различных устройств. К таким задачам относятся, например, следующие.

Для ракетно-космических систем:

1. инвариантность орбит искусственных спутников Земли при выполнении высокоточных астрономических наблюдений в дальнем космосе;

2. инвариантность искусственных спутников Земли к инерционным возмущениям вибрационного характера (низкоорбитальные микрогравитационные платформы);

3. инвариантность искусственных спутников Земли к медленно меняющимся инерционным ускорениям и т.д.

Для летательных аппаратов:

1. инвариантность углов атаки и скольжения летательного аппарата при боевом маневрировании;

2. инвариантность высоты полета летательного аппарата в маловысотном полете;

3. инвариантность углового положения вертолета в режиме висения и т.д.

Для электроэнергетики:

1. поддержание постоянства частоты (50 Гц) в ЭЭС как в нормальных, так и в аварийных режимах ЭЭС;

2. поддержание заданных межсистемных перетоков в объединенной ЭЭС вне зависимости от режимов в отдельных ЭЭС;

3. поддержание постоянства напряжения в узлах нагрузки ЭЭС вне зависимости от режимов по активной мощности в ЭЭС;

4. поддержание постоянства заданной мощности групповым регулятором активной мощности (ГРАМ) агрегатов электростанций;

5. поддержание постоянства попусков воды в нижний бьеф самой нижележащей ГЭС каскада в период нереста рыб;

6. поддержание заданной отметки бьефов ГЭС по условиям и требованиям участников водохозяйственного комплекса;

7. поддержание постоянства различных режимных параметров для вспомогательных механизмов и т.д.

Заметим, что для электроэнергетики задачи 1) - 3) сегодня решаются за счет внедрения быстродействующих силовых тиристорных управляющих схем, на основе которых формируются управляемые гибкие электропередачи переменного тока или в соответствии с терминологией IEEE – Flexible AC Transmission Systems (FACTS).

5 Реализация теории инвариантности в электроэнергетике

В отличие от других областей науки и техники, благодаря В.С. Кулебакину и ученикам его школы, именно электроэнергетика и авиация оказались более продвинутыми в вопросах применения новых, самых современных и передовых систем управления [109].

Когда в 1920 году был образован Государственный экспериментальный электротехнический институт (ГЭЭИ), там была организована под руководством В.С. Кулебакина крупная лаборатория по автоматике и регулированию электрических машин и агрегатов куда вошли такие известные ученые, как В.К. Аркадьев, Н.Н. Андреев, Н.Е. Успенский, Л.И. Сиротинский, К.И. Шенфер, А.Н. Ларионов и другие.

Перед этой лабораторией были поставлены задачи по разработке отечественных регуляторов и автоматических систем для вновь строящихся по плану ГОЭЛРО энергетических объектов.

Первой проблемой, над которой начала работать эта лаборатория, была проблема создания эффективных регуляторов

возбуждения синхронных машин.

Проблема регулирования возбуждения появилась в связи с задачей поддержания требуемого уровня напряжения. Регуляторы возбуждения или, как их называли раньше, регуляторы напряжения появляются и довольно широко начинают применяться уже в начале 1920-х годов (фирмы Siemens и Brown Boveri).

Первоначально регуляторы возбуждения рассматривались только в качестве автоматических устройств, облегчающих работу дежурного персонала по поддержанию требуемого уровня напряжения. Никаких задач по улучшению устойчивости параллельной работы генераторов перед ними не ставилось. Поэтому, несмотря на то, что к концу 1920-х годов было предложено довольно много разных типов регуляторов возбуждения, применялись они очень редко и их эффективность в части улучшения устойчивости параллельной работы была ничтожна. Однако, в это же время потребность в повышении устойчивости синхронных генераторов стала очень острой. В энергетических системах страны наблюдалось много аварий, сопровождавшихся нарушением устойчивости генераторов и нагрузки («лавина напряжений»). Предлагавшиеся в то время разные способы повышения устойчивости были или малоэффективны, или требовали отключения большого числа потребителей.

Первый и весьма ценный опыт широкого применения автоматических регуляторов напряжения для повышения устойчивости энергосистем, разработанных совместно в ВЭИ, МЭИ и ИАТ, был получен еще в 1937-1941 гг. в Азэнерго. До внедрения автоматических регуляторов напряжения в системе Азэнерго из-за недостатка реактивной мощности аварии с отключением генераторов приводили к «лавине» напряжения с развалом энер-

госистемы и нарушением электроснабжения большей части потребителей (в то время Кавказ был основным поставщиком нефтепродуктов). Осуществленное в Азэнерго по инициативе и под руководством И.А. Сыромятникова (учился в аспирантуре у В.С. Кулебакина) оснащение генераторов и синхронных компенсаторов автоматическими регуляторами возбуждения обеспечило значительное повышение располагаемой реактивной мощности энергосистемы при посадках напряжения и устранило аварии с нарушением статической устойчивости энергосистемы. Полученный опыт выявил большую эффективность автоматического регулирования возбуждения, обеспечивающего полное использование кратковременной перегрузочной способности генераторов и синхронных компенсаторов для повышения устойчивости энергосистем. Большое значение проведенной работы определялось также тем, что была преодолена характерная для этого периода эксплуатации энергосистем боязнь использования перегрузочной способности оборудования. Положительный опыт использования перегрузочной способности генераторов и синхронных компенсаторов подготовил необходимые условия для развития в будущем сильного регулирования возбуждения со значительным кратковременным форсированием возбуждения. Здесь также была впервые применена релейная форсировка возбуждения, действовавшая на замыкание накоротко шунтового реостата возбуждателя при снижении контролируемого напряжения на 10-15%. Такой простейший аварийный регулятор возбуждения, несмотря на его примитивность, получив повсеместное применение, сыграл значительную роль в повышении устойчивости. Идея форсирования возбуждения для повышения устойчивости до сего времени используется при создании устройств, способствующих повышению устойчивости энергосистем.

Большие работы по разработке теории и практическому созданию электронных регуляторов возбуждения пропорционального типа в 1935-1940 гг. были проведены в ВЭИ. Работы проводились под руководством В.С. Кулебакина и С.А. Лебедева. Созданные ВЭИ регуляторы ознаменовали переход к новой стадии регулирования мощных синхронных генераторов – электронному регулированию. Регулятор этого типа по своим принципам позволял работать при весьма малом статизме. Он выполнял несколько функций – не только осуществлял непрерывную коррекцию напряжения, но и кардинальным образом изменял условия устойчивости системы, позволяя работать в зоне, где нерегулируемый генератор неустойчив (это обычно соответствует углу $>90^\circ$). Эту зону называют зоной «искусственной устойчивости». Для стабилизации регулятора в нем была применена гибкая обратная связь.

Разработка способов компаундирования, эффективность которых была близка к эффективности электронного регулирования, проводилась рядом авторов под руководством В.С. Кулебакина. Наибольший вклад в теорию и практическое осуществление компаундирования был внесен Институтом электротехники АН УССР (ИЭ АН УССР). Одним из руководителей этих работ являлся Л.В. Цукерник, удостоенный совместно с С.А. Лебедевым за проведенные исследования и практическое внедрение созданных регуляторов Государственной премии.

В дальнейшем в советских энергосистемах для автоматического регулирования возбуждения генераторов стала широко применяться эта система в виде компаундирования с коррекцией напряжения.

Широкое внедрение обычных автоматических регуляторов возбуждения (пропорционального действия) и устройств фор-

сировки возбуждения генераторов в советских энергосистемах явилось одной из наиболее эффективных мер по повышению надежности работы энергосистем. Значительно повысилась статическая и динамическая устойчивость энергосистем, были практически полностью устранены аварии типа «лавины» напряжения, появилась возможность широкого использования несинхронных включений, во многих случаях стали допустимыми кратковременные асинхронные режимы и облегчилась ресинхронизация генераторов, существенно улучшилось поддержание напряжения в нормальных и аварийных режимах энергосистем.

Особенно велика была роль регуляторов возбуждения синхронных генераторов во время Отечественной войны, когда наша промышленность была перебазирована в восточные области, энергосистемы которых работали со значительной перегрузкой. В этих тяжелых условиях внедрение устройств регулирования возбуждения наряду с другими методами повышения надежности систем, такими, как автоматическое повторное включение, автоматическая разгрузка, самозапуск двигателей и др., позволило обеспечить снижение системных аварий. Так, например, много аварий было в Уральской энергосистеме. В 1943 г. там произошло 33 аварии с нарушением устойчивости. После проведения указанных выше мероприятий количество таких аварий упало до двух в 1944 г., а в 1945 г. уже не было ни одной такой аварии.

Таким образом, уже с 1946 г. практически все генераторы энергосистем Советского Союза имели устройства регулирования возбуждения, причем устройства регулирования пропорционального действия отечественного производства очень быстро вытеснили ранее имевшиеся установки регулирования зарубежных фирм. Как неоднократно отмечалось выше, теоретические

исследования по вопросам регулирования возбуждения генераторов, влияния этого регулирования на режим системы и ее устойчивость были начаты в Советском Союзе В.С. Кулебакиным, это в последние годы стали замалчивать, что очень печально.

Ряд фундаментальных теоретических исследований был проведен под руководством В.С. Кулебакина будущим академиком АН СССР С.А. Лебедевым (он в стране считается основателем и первым создателем отечественных компьютеров), который построил теорию сложного пропорционального регулирования возбуждения без зоны нечувствительности и показал, что можно получать предел устойчивости, определяемый исходя из постоянства э.д.с., приложенной за реактивным переходным сопротивлением. В этих работах уже были заложены идеи инвариантности. С.А. Лебедев, синтезировав закон управления возбуждением синхронной машины по принципу инвариантности (угол вращения агрегата и напряжение на шинах генератора не должны изменяться при изменении внешней нагрузки), пришел к выводу, что реализация такого закона управления возможна если существует точный датчик измерения мощности нагрузки. Тогда он создает, так называемую, «фантомную схему измерения искомой мощности через ток статора генератора и напряжение на шинах генератора». Сейчас мы бы назвали такую фантомную схему наблюдателем состояния.

С.А. Лебедев выяснил роль обратной связи для обеспечения устойчивости регулирования, показал, что для увеличения предела устойчивости можно ввести в уравнение регулирования производную по отклонению напряжения. В этих же работах он выяснил роль и второй производной напряжения и этим самым подошел к обоснованию будущего нового типа регулирования –

«сильного регулирования». По предложению В.С. Кулебакина (это был 1939 год, поэтому регуляторы можно было называть как угодно, но только не инвариантными) такие регуляторы начали называть не инвариантными, а «сильными регуляторами», хотя все понимали их идентичность.

Однако на этой стадии исследований роль производных по напряжению или по другому параметру не была в достаточной степени оценена с точки зрения практических возможностей и регуляторы с воздействием по производным и одновременно с большим коэффициентом усиления еще не были реализованы, хотя теоретическая база для их создания была уже подготовлена. Такой метод вынужденных колебаний облегчил подход к созданию регуляторов, улучшающих устойчивость систем путем регулированием по углу и его первой и второй производным. В исследованиях М.М. Ботвинника был использован этот метод, на основе которого им был предложен способ регулирования возбуждения по отклонению угла и первым двум его производным.

Великий шахматист (чемпион мира по шахматам), д.т.н., профессор М.М. Ботвинник под влиянием академика В.С. Кулебакина подошел к этой проблеме совершенно оригинально. Он считал, если нам точно не известно возмущение, то надо построить прогнозирующее устройство этого внешнего возмущения и вводить полученный прогноз вместо возмущения в систему управления и таким образом управлять объектом. Прогнозирующее устройство построили на основе экстраполяции гипотетической функции нагрузки в ряд Тейлора. Полученную величину на выходе прогнозирующего устройства вводили в регулятор. Точность оценивали по количеству членов ряда в прогнозирующем устройстве и соответственно колебаниям инвариантных выходных параметров (напряжения на шинах генератора и частоты

вращения агрегата). Сейчас эта идея очень напоминает СОРЭ академика А.А. Красовского. Первые эксперименты показали, что регулятор работоспособен и можно его совершенствовать.

В работах С.А. Лебедева, в частности в его докладе, представленном на Международную конференцию по высоковольтным сетям, проводился строгий анализ, показывающий возможности регулирования по углу, напряжению, току статора генератора с вводом в закон регулирования производных этих параметров. В дальнейшем эта идея равноценности комбинации различных отклонений для обеспечения искусственной устойчивости системы получает свое практическое развитие и полное обоснование.

После перерыва, обусловленного Великой Отечественной войной, работы по сильному регулированию возбуждения были возобновлены в ВЭИ, ВНИИЭ, ИАТ АН СССР, ИЭ АН УССР, МЭИ, где были созданы макеты регуляторов сильного действия. Макет регулятора, реагирующего на отклонение угла и первые две его производные, созданный под руководством М.М. Ботвинника, успешно испытывался на небольшом турбогенераторе ТЭЦ № 9 Мосэнерго, на гидрогенераторе Карамышевской ГЭС. В 1951-1952 гг. на динамической модели МЭИ были проведены первые опыты практической проверки сильного регулирования в условиях работы мощной энергетической системы.

В процессе этих первых опытов выяснилось огромное значение экспериментальных исследований на динамических моделях, далее ставших основным средством изучения и отработки систем регулирования. Эти исследования начались в связи с необходимостью повысить предел передаваемой мощности и устойчивость электропередачи Куйбышев-Москва. Работы в этой области велись в основном по двум направлениям. В ВНИИЭ (ранее

ЦНИЭЛ) велись упомянутые выше исследования по созданию регулятора возбуждения, реагирующего на изменение угла и его производные. В ВЭИ под руководством Г.Р. Герценберга создавался регулятор Кулебакина-Лебедева с комбинированными сигналами.

Кроме этих двух основных направлений при первых попытках создания регулятора были разработаны экспериментальные макеты регуляторов, отличавшиеся своей конструкцией. Так был создан регулятор Института электротехники АН УССР, осуществлявший регулирование по току, с введением дополнительной коррекции и релейного регулирования. В МЭИ создавались регуляторы на магнитных усилителях (руководитель профессор В.А. Веников). Разработки регуляторов, использующих телеизмерения для замеров угла и предназначенных специально для Куйбышевской электропередачи, велись в ИАТ АН СССР (руководитель Б.Н. Петров). Велись также разработки регулятора в Энергетическом институте имени Г.М. Кржижановского АН СССР (руководитель профессор Г.В. Михневич). При создании первых макетов регуляторов еще не существовало достаточно надежных методов исследования как самих регуляторов, так и энергосистемы, генераторы которой снабжаются такими регуляторами.

Для внесения ясности в оценку возможностей нового вида регулирования, уточнения теории и ускорения отработки конструкции Техническим управлением Министерства электростанций была создана специальная комиссия (под председательством И.А. Сыромятникова), которая провела сравнительные испытания всех предложенных макетов регуляторов и вынесла рекомендации в отношении окончательной разработки регулятора и системы регулирования возбуждения. Согласно решению этой

комиссии на электродинамической модели МЭИ были развернуты работы по экспериментальному изучению всех указанных выше систем регулирования возбуждения генераторов и разработке методики расчета устойчивости энергосистем при этих регуляторах. Эти работы велись под руководством В.А. Веникова при участии авторов и конструкторов различных макетов регуляторов возбуждения.

В результате указанных испытаний выяснилось, что регулятор по схеме ВЭИ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими предложенными регуляторами. Поэтому было поручено ВЭИ продолжать работу по дальнейшей разработке регуляторов, их испытаниям, изготовлению и наладке на станциях. Такой регулятор был создан в ВЭИ под руководством Г.Р. Герценберга, удостоенного за эту работу Ленинской премии 1961 года, и в настоящее время успешно эксплуатируется на всех электростанциях России, стран СНГ и даже других зарубежных стран.

В работах по созданию и внедрению регуляторов возбуждения сильного действия помимо ВЭИ принимали участие коллективы ряда научно-исследовательских институтов, наладочных организаций и работников эксплуатации энергосистем, гидроэлектростанций и подстанций (ВНИИЭ, МЭИ, ИАТ, ЭНИН АН СССР, НИИПТ, ЦДУ ЕЭС, ОРГРЭС, ТЭП, Гидропроект, и др.).

Автор этих строк модернизировал эти регуляторы (в 1987-2000 гг.) совместно с рядом вышеназванных институтов, и на новой микропроцессорной базе реализовал почти на всех электростанциях Федерального уровня.

Необходимо рассказать еще о двух регуляторах, внедренных на электроэнергетических объектах и работающих на принципе инвариантности.

Во-первых, это регулятор мощности гидроэлектростанций

работающих по водотоку. Что это такое?

Для электроснабжения г. Алма-Ате в 1938 г. были построены ГЭС-1 и ГЭС-2 Алма-Атинского каскада ГЭС. Институт НИИ Гидроэнергопроект обратился в ИАТ к академику В.С. Кулебакину с просьбой максимально автоматизировать эти гидроэлектростанции. Академик В.С. Кулебакин подключил к работе профессора Г.В. Щипанова. Когда Г.В. Щипанов изучил эту проблему, он пришел к выводу, что максимальную отдачу можно получить от ГЭС, если отметку верхнего бьефа поддерживать на максимально высоком уровне и пропускать для этого через гидроагрегаты ровно столько воды сколько притекает в этот момент к водохранилищу. Таким образом, он предложил управлять ГЭС по принципу полной компенсации внешних возмущений, т.е. водотока. Этот принцип работы он назвал «автоматическим регулированием мощности ГЭС по водотоку» (АРМВ). К великому сожалению, начались гонения на Г.В. Щипанова, потом началась война, и до начала 1950-х годов к этой проблеме не возвращались.

К середине 1960-х годов идею Г.В. Щипанова реанимировали. Для реализации этой идеи на всех ГЭС страны мощностью до 60 МВт в институте ОРГРЭС была создана мощная группа для реализации этого проекта. Одной из первых, с участием автора этой статьи, была автоматизирована Сенгилевская ГЭС – гидроэлектростанция деривационного типа мощностью 16 МВт, сооруженная для энергетического использования воды Невинномысского канала.

После этого система управления ГЭС по принципу АРМВ была реализована еще на 12 ГЭС.

В настоящее время вновь заговорили об автоматизированных системах управления ГЭС, и имеет большое практическое зна-

чение реализация идеи АРМВ на современных IT-технологиях.

Следующими объектами, где был реализован автором настоящей статьи регулятор, работающий по принципу инвариантности, являются ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения на Экспериментальной базе ветроэнергетики Минэнерго СССР (с 1992 года РАО ЕЭС России) в пос. Дубки Республики Дагестан.

Под руководством автора в механических мастерских были изготовлены два ветроагрегата с вертикальной осью вращения типа МВР-2 (с 2 вертикальными лопастями) и МВР-4 (с 2 вертикальными лопастями) мощность по 4 кВт каждый.

Особенность этих установок состоит в том, что они снабжены устройством для автоматического разворота лопастей, предназначенных для компенсации мощности ветрового потока с целью поддержания постоянного момента на валу установки и сохранения частоты вращения строго постоянной. При увеличении скорости ветра, пропорционально и синхронно лопасти поворачиваются (складываются в сторону горизонтального положения). При этом наряду, с уменьшением тянущей силы, весьма быстро возрастают силы дополнительного аэродинамического сопротивления, препятствующие увеличению скорости ветроколеса.

Это устройство также срабатывает автоматически, если при высокой скорости ветра мощность генератора оказывается недостаточной для поддержания расчетной частоты вращения, а также при аварийном выходе генератора или сети из строя, т.е. при аварийном отключении потребителя. Это очень ценные качества для надежной работы ветроагрегата.

Испытания описанной ветроустановки проводились на Экспериментальной базе ветроэнергетики. Система управления и

сам механизм разворота лопастей испытывался при разной комплектации ротора ветроагрегата, в том числе, и при двух, трех и четырех лопастях. Аварийный режим работы ветроустановки был зафиксирован на полигоне в конце октября - начале ноября 1990 г. Почти сутки установка работала без превышения заданного числа оборотов при отсутствии внешней нагрузки с отключенным генератором практически при ураганной скорости ветра, порывы которого временами достигали 43-47 м/с. При этом максимальные (угонные) обороты ветроколеса отличались от номинальных (120 об/мин) не более чем на 15-20%, а максимальный угол разворота лопастей доходил до 30-35°. Такой режим работы согласуется с теоретическими работами автора по созданию инвариантных регуляторов для различных электроэнергетических установок.

Разработанные ветроагрегаты получили высокую оценку специалистов в нашей стране и зарубежом. В настоящее время по нашему патенту (РАО ЕЭС России) их изготавливают в Индии и Китае.

Для меня, как ученого, очень важно, что принципы инвариантности в технических системах работают. Это и есть памятник всем тем, кто стоял (и боролся) у истоков этой идеи.

Список литературы

- [1] Абдикеримов Т., Егоров А.И., Живогляднов В.Я. и др. Применение вариационных методов в теории инвариантных систем с распределенными параметрами // Теория инвариантности автоматических систем: Тр. Третьего Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применению в систе-

мах автоматического управления (Киев, 31 мая - 5 июня 1966 г.). М.: Наука, 1970.

- [2] Алиев Р.А. Принцип инвариантности и его применение. М.: Энергоиздат, 1985.
- [3] Бабушкин С.А. Математические условия физической осуществимости в инвариантных автоматических и гироскопических системах // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [4] Бабушкин С.А. К абсолютной инвариантности и инвариантности до ϵ в теории нелинейных дифференциальных уравнений // Теория инвариантности автоматических систем: Тр. Третьего Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического управления (Киев, 31 мая - 5 июня 1966 г.). М.: Наука, 1970.
- [5] Бабушкин С.А., Гинзбург И.П. К теории нелинейных систем комбинированного и автономного управления // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1961. № 3.
- [6] Баранчук Е.И. Взаимосвязанные и многоконтурные регулируемые системы. Л.: Энергия, 1968.
- [7] Беля К.К. Об инвариантности регулируемой величины автоматического устройства от некоторых его параметров // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1960. № 6.
- [8] Беля К.К. Нелинейные колебания в системах автоматического регулирования и управления. М.: Машгиз, 1962.

- [9] Боднер В.А., Рязанов Ю.А. Применение теории инвариантности к выбору параметров системы управления полетом // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [10] Боднер В.А., Селезнев В.П., Овчаров В.Е. К теории инерциальных демпфированных систем с произвольным периодом, инвариантных по отношению к маневрированию объекта // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1959. № 3.
- [11] Бржозовский Б.М., Мартынов В.В. Обеспечение инвариантности сложных технологических систем. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2002.
- [12] Василенко В.Л. О реализуемости принципа абсолютной инвариантности в линейных системах с переменными параметрами // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1961. № 3.
- [13] Вознесенский И.Н. О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров // Автоматика и телемеханика. 1938. № 4, 5.
- [14] Волгин Л.Н. Комбинированные системы регулирования с цифровыми вычислительными машинами // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [15] Г.В. Щипанов и теория инвариантности (Труды и документы) / Сост. З.М. Лезина, В.И. Лезин. М.: Физматлит, 2004.

- [16] Грищенко Л.З., Жалнина Д.Ф. Инвариантность замкнутых импульсных систем автоматического регулирования // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [17] Девятков Б.Н., Гимельштейн Ф.Я., Хорькова Г.С. Об использовании распределенного контроля для создания высококачественных систем управления технологическими процессами // Изв. СО АН СССР. 1963. № 2.
- [18] Джонсон С. Теория регуляторов, приспособляющихся к возмущениям // Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К.Т. Леондеса. М.: Мир, 1980.
- [19] Догановский С.А. Компенсация возмущений в нелинейных системах // Автоматика и телемеханика. 1962. № 6.
- [20] Елисеев В.Д. О построении параметрически инвариантных и самонастраивающихся систем управления на основе сигнала невязки объекта управления // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [21] Елкин В.И. Редукция нелинейных управляемых систем: Декомпозиция и инвариантность по возмущениям. М.: ФАЗИС, 2003.
- [22] Жук К.Д., Пятенко Т.Г., Скурихин В.И. Вопросы синтеза управляющих моделей в многосвязных автоматических системах // Материалы научных семинаров по теоретиче-

- ским и прикладным вопросам кибернетики. Киев: КДНТП, 1964.
- [23] Иванов Ю.П. Комплексная оптимально-инвариантная инерционная обработка сигналов с учетом отказов измерителей // Приборы и системы. 2003. № 1.
- [24] Иванченко А.И., Петлин А.А., Попов В.В. Инвариантные свойства гироскопа со смещенным центром масс гироскопа // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [25] Ивахненко А.Г. Теория компаундирующих регуляторов // Сб. тр. Ин-та электротехники АН УССР. 1951. Вып. 6; 1953. Вып. 10.
- [26] Ивахненко А.Г. О способах устранения установившейся составляющей ошибки системы автоматического регулирования // ДАН СССР. 1952. Т. 87, № 6.
- [27] Ивахненко А.Г. Автоматическое регулирование скорости асинхронных двигателей небольшой мощности. Киев: Изд-во АН УССР, 1953.
- [28] Ивахненко А.Г. Электроавтоматика. Киев: Гостехиздат УССР, 1954; 2-е изд., 1957.
- [29] Ивахненко А.Г. Определение оптимальных значений варьируемых параметров комбинированных систем регулирования обратным методом (способом расчета по частям) // Тр. II Всесоюз. совещ. по теории автоматического регулирования. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 2.

- [30] Ивахненко А.Г. Комбинированное регулирование как общий случай регулирования состояния и количества // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [31] Ивахненко А.Г. Связь условия неабсолютной инвариантности с работами по синтезу структур систем высокой точности // Автоматика. 1960. № 1.
- [32] Ивахненко А.Г. Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика. 1960. № 5.
- [33] Ивахненко А.Г. Связь теории инвариантности с теорией дифференциальных регуляторов // Автоматика. 1961. № 1.
- [34] Исаев Л.П. Условия инвариантности в дискретных системах // Вопросы авиационной автоматики и вычислительной техники. Киев: КИГВФ, 1963. Вып. 3.
- [35] Ишлинский Ю.А. Полная компенсация возмущений, вызванных маневрированием в гироскопических системах // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [36] Ишлинский А.Ю. Иден теории инвариантности и инерциальная навигация // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.

- [37] Калман Р. Об общей теории систем управления // Тр. I Междунар. конгр. ИФАК. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 2.
- [38] Карнюшин Л.В. К вопросу о применении теории инвариантности в автоматизированном электроприводе // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [39] Катковник В.Я. Автономная система регулирования с самонастройкой // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [40] Катковник В.Я., Полуэктов Р.А. О задаче синтеза оптимальных многомерных систем автоматического управления // Автоматика и телемеханика. 1965. № 1.
- [41] Кияновский Л.З. О построении инвариантных измерительных устройств на основе автоматического исключения переменных коэффициентов // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 2.
- [42] Кокотович П.В., Рутман Р.С. Теория чувствительности и алгоритмы воздействия на параметры систем управления // Многосвязные и инвариантные системы. Нелинейные и дискретные системы: Тр. III Всесоюз. совещ. по автоматическому управлению (технической кибернетики). Одесса, 20-26 сентября 1965 г. М.: Наука, 1968.

- [43] Колпакова Н.П., Татарина Г.А., Ильясов Б.Г. О двукратной инвариантности автоматических систем с дополнительной информацией о состоянии объекта // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [44] Костюк О.М. К вопросу инвариантности выходной координаты нелинейного объекта регулирования с нестабильными параметрами // Автоматика. 1961. № 6.
- [45] Корнилов Ю.Г. Автономное регулирование при параллельной работе котельных агрегатов // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [46] Красовский А.А. Двухканальные следящие системы с антисимметричными связями при наличии случайных возмущающих воздействий // Автоматика и телемеханика. 1961. № 2.
- [47] Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И. Системы автоматического управления летательных аппаратов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986.
- [48] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Основы теории и техники создания гидро- и ветроэнергетических установок нового класса. М.: Энергоатомиздат, 1995.
- [49] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Модульные ветроэнергетические установки с управляемым колебательным рабочим движением – путь к решению проблем автономной и системной ветроэнергетики // Повышение эффективно-

сти работы энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 2001. (Тр. ИГЭУ. Вып. 4).

- [50] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Модульные ветроэнергетические установки с управляемым колебательным рабочим движением промышленной частоты // Повышение эффективности работы энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 2001. (Тр. ИГЭУ. Вып. 4).
- [51] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Основы теории и техники ветроэнергетических установок с колебательным рабочим движением // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 3.
- [52] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Концептуальные основы создания мощных ветроэнергетических установок с колебательным рабочим движением // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2003. № 2.
- [53] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Анализ и синтез ветроэнергетических установок с колебательным рабочим движением как автоколебательных систем // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2003. № 3.
- [54] Красовский А.А., Мисриханов М.Ш. Универсальные алгоритмы оптимального оперативного управления гидроэнергетическими комплексами. Махачкала: Дагкнигоизд, 1977.
- [55] Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. Л.: Госэнергоиздат, 1962.
- [56] Крементуло Ю.В. Условия инвариантности для замкнутых импульсных систем // Теория инвариантности в системах

автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.

- [57] Кринецкий И.И., Фокин А.В. Некоторые общие вопросы теории инвариантности // Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Машиностроение, 1964. Вып. 6.
- [58] Крылов А.Н. О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем // Изв. АН СССР. Сер. физ.-мат. 1931. № 4.
- [59] Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.
- [60] Кукулиев Р.М. О двукратной инвариантности демпфированной навигационной системы // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [61] Кулебакин В.С. Об определении основных параметров автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1940. № 6.
- [62] Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР. 1948. Т. 60, № 2.
- [63] Кулебакин В.С. О поведении непрерывно возмущаемых автоматизированных линейных систем // ДАН СССР. 1949. Т. 68, № 5.

- [64] Кулебакин В.С. О выборе оптимальных параметров автоматических регуляторов и следящих систем // ДАН СССР. 1951. Т. 77, № 2.
- [65] Кулебакин В.С. Об изображении функций интегралами дифференциальных уравнений // Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского. 1952. Вып. 433.
- [66] Кулебакин В.С. Операторное $K(D)$ -изображение функций и его практическое применение // Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского. 1958. Вып. 695.
- [67] Кулебакин В.С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматически регулируемых систем // Тр. II Всесоюз. совещ. по теории автоматического регулирования. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 2.
- [68] Кулебакин В.С. Высококачественные инвариантные системы регулирования // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [69] Кулебакин В.С. Теория инвариантных автоматически регулируемых и управляемых систем // Тр. I Междунар. конгр. ИФАК: (Теория непрерывных систем, специальные математические проблемы). М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 1.
- [70] Кулебакин В.С., Яншин А.А. Применение принципа инвариантности в системах частотного управления асинхронным двигателем // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.

- [71] Кунцевич В.М. Инвариантность импульсных и экстремальных систем без связей по возмущениям // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [72] Кунцевич В.М., Крементуло Ю.В. Теория инвариантности импульсных и самонастраивающихся импульсных систем // Тр. II Междунар. конгр. Междунар. федерации по автоматическому управлению. М.: Наука, 1965. Т. 3.
- [73] Кухтенко А.И. Задачи инвариантности для систем регулирования // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [74] Кухтенко А.И. Критерий абсолютной инвариантности для систем регулирования с переменными параметрами // Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1965. № 2.
- [75] Кухтенко А.И. Проблема инвариантности в автоматике. Киев: Гостехиздат УССР, 1963.
- [76] Латыев С.М., Сухопаров С.А., Тимошук И.Н. Инвариантные системы с синхронными пространственными связями // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. № 5.
- [77] Лекарев Я.З., Мишнев Б.Ф. Компенсация детерминированных возмущений в дискретной системе автоматического управления вертолета // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.

- [78] Липатов А.В. Чувствительность запасов устойчивости параметрически инвариантной системы к характеру изменения переменных параметров // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 2.
- [79] Лузин Н.Н. К изучению матричной теории дифференциальных уравнений // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5.
- [80] Лузин Н.Н., Кузнецов П.И. К абсолютной инвариантности и инвариантности до ϵ в теории дифференциальных уравнений // ДАН СССР. 1946. Т. 51, № 4, 5.
- [81] Луковников В.И., Захаренко С.И., Захаренко В.С., Савельев В.А. Инвариантный электромеханический стенд испытания трансмиссий // Минск: Энергетика, 1999.
- [82] Математическое моделирование и электрические цепи. Вып. 1. Киев: АН УССР, 1963.
- [83] Математическое моделирование и электрические цепи. Вып. 2. Киев: АН УССР, 1965.
- [84] Машиностроение: Энциклопедия. Т. 1-4. Автоматическое управление. Теория. М.: Машиностроение, 2000.
- [85] Мееров М.В. Системы многосвязного регулирования. М.: Наука, 1965.
- [86] Мееров М.В. Исследование и оптимизация многосвязных систем управления. М.: Наука, 1986.

- [87] Менский Б.М., Павличук К.П. Применение принципа инвариантности при нелинейном воздействии внешнего возмущения // Автоматика и телемеханика. 1961. № 12.
- [88] Мирошник И.В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
- [89] Мисриханов М.Ш. Адаптивные прогнозирующие системы и их алгоритмическое обеспечение в задаче управления энергокомплексом // Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по пробл. управления. Ташкент, сентябрь 1989 г. М.: Институт проблем управления, 1989.
- [90] Мисриханов М.Ш. Аналитическая теория синтеза инвариантного управления многосвязных систем (на примере управления электроэнергетическими объектами) // Современные методы управления многосвязными системами / Под ред. А.А. Красовского. М.: Энергоатомиздат, 2003.
- [91] Мисриханов М.Ш. Аналитический синтез инвариантных регуляторов // Автоматика и телемеханика. № 11. 2005.
- [92] Мисриханов М.Ш. Аналитическое конструирование комплексной системы адаптивного управления мощностью и возбуждением гидроагрегата по критерию обобщенной работы. Махачкала: Даг. ЦНТИ, 1979.
- [93] Мисриханов М.Ш. Децентрализованное управление взаимосвязанными электроэнергетическими системами с экзогенными моделями возмущений // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2003. № 6.

- [94] Мисриханов М.Ш. Инвариантное модально-оптимальное управление // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 4.
- [95] Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление матричными системами: Сравнение подходов: (Обзор) // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 3.
- [96] Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами: алгебраический подход. М.: Наука, 2007.
- [97] Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многосвязными системами с заданными свойствами // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 4.
- [98] Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление на основе модифицированных РВН-тестов // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 3.
- [99] Мисриханов М.Ш. Классические и новые методы анализа многомерных динамических систем. М.: Энергоатомиздат, 2004.
- [100] Мисриханов М.Ш. Ленточные критерии управляемости и наблюдаемости линейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. № 12. 2005.
- [101] Мисриханов М.Ш., Матвеев В.А. и др. Совместная работа системы ГРАМ с устройствами противоаварийной автоматики // Электр. станции. 1993. № 1.
- [102] Мисриханов М.Ш. Математическая модель и основные параметры универсального унифицированного модуля ветро-

- и гидроэнергетической установки с колебательным рабочим движением // Современные методы управления многосвязными системами / Под ред. А.А. Красовского. М.: Энергоатомиздат, 2003. № 3.
- [103] Мисриханов М.Ш. Многоуровневое иерархическое децентрализованное управление каскадом гидроэнергетических установок. Махачкала: Дагкнигоиздат, 1976.
- [104] Мисриханов М.Ш. Многокритериальное оптимальное управление оперативными режимами сложных энерговодохозяйственных комплексов. Махачкала: Даг. ЦНТИ, 1977.
- [105] Мисриханов М.Ш. О проблеме устойчивости в инвариантном управлении // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 4.
- [106] Мисриханов М.Ш. Оптимальное адаптивное управление оперативными режимами работы каскадов гидроэлектростанций // Оптимизация режимов энергетических систем: Науч. тр.: Межвед. темат. сб. М.: МЭИ, 1985. № 65.
- [107] Мисриханов М.Ш. Оптимизация инвариантных систем по неклассическим функционалам // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 4.
- [108] Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Инвариантное управление энергетическими объектами // Изв. ТРТУ. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. № 7: Темат. вып. «Актуальные проблемы производства и потребления электроэнергии».

- [109] Мисриханов М.Ш., Применение принципов инвариантности в системах управления сложными объектами электроэнергетики // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2001. № 3.
- [110] Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Синтез многосвязного управления динамическими системами: Обзор // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2003. № 5.
- [111] Мисриханов М.Ш. Синтез инвариантных систем на основе ленточных критериев управляемости и наблюдаемости // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. 2002. № 3.
- [112] Мисриханов М.Ш. Синтез по критерию обобщенной работы автоматической системы адаптивного управления частоты и активной мощности в энергосистеме. Махачкала: Даг. ЦНТИ, 1980.
- [113] Мисриханов М.Ш. Синтез по критерию обобщенной работы группового регулятора мощности многоагрегатной ГЭС. Махачкала: ДагФАН СССР, 1981.
- [114] Мисриханов М.Ш. Системный анализ динамических свойств гидроэнергетических установок как объектов управления. Махачкала: Дагкнигоиздат, 1977.
- [115] Мисриханов М.Ш. Фундаментальные теоретические и прикладные работы академика РАН А.А. Красовского – основа для форсированного возрождения энергетики при отечественном инвестировании // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7.
- [116] Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970.

- [117] Осмоловский П.Ф. Комбинированные измерительные следящие системы // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [118] Павлов В.В. Условия абсолютной инвариантности для нелинейных систем регулирования // Вопросы авиационной автоматики и вычислительной техники. Киев: КИГВФ, 1963. Вып. 3.
- [119] Павлов В.В. Инвариантность и автономность в многомерных существенно нелинейных автоматических системах // Многосвязные и инвариантные системы. Нелинейные и дискретные системы: Тр. III Всесоюз. совещ. по автоматическому управлению (технической кибернетики). Одесса, 20-26 сентября 1965 г. М.: Наука, 1968.
- [120] Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления. Киев: Техника, 1969.
- [121] Параев Ю.И. Алгебраические методы в теории систем управления. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1980.
- [122] Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986.
- [123] Петров Б.Н. О применении условий инвариантности // Тр. II Всесоюз. совещ. по теории автоматического регулирования. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 2.
- [124] Петров Б.Н. О реализуемости условий инвариантности // Теория инвариантности и ее применение в автоматических

- устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [125] Петров Б.Н. Принцип инвариантности и условия его применения при расчете линейных и нелинейных систем // Тр. I Междунар. конгр. ИФАК: (Теория непрерывных систем, специальные математические проблемы). М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 1.
- [126] Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Современное состояние теории инвариантности // Теория инвариантности автоматических систем: Тр. Третьего Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического управления (Киев, 31 мая - 5 июня 1966 г.). М.: Наука, 1970.
- [127] Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Структура абсолютно инвариантных систем и условия их физической осуществимости // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [128] Петров Б.Н., Рутковский В.Ю. Двукратная инвариантность систем автоматического управления // ДАН СССР. 1965. № 4.
- [129] Петров Б.Н., Рутковский В.Ю. Системы автоматического управления, обладающие свойствами двукратной инвариантности // Теория инвариантности автоматических систем: Тр. Третьего Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического

- управления (Киев, 31 мая - 5 июня 1966 г.). М.: Наука, 1970.
- [130] Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д., Глумов В.М. К вопросу динамической точности движения параметрических инвариантных беспонсковых самонастраивающихся систем с эталонной моделью // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [131] Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М.: Наука, 1980.
- [132] Петров Б.Н., Соколов Н.И., Липатов А.В., Черкашин Э.М. Применение оценок чувствительности при проектировании параметрически инвариантных систем // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [133] Петров Б.Н., Уланов Г.М. Вопросы теории комбинированного управления // Научно-технические проблемы автоматизации электропривода. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
- [134] Пионтовский Л.А. Исследование системы связанного автоматического регулирования полетом самолета методами теории инвариантности // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.

- [135] Полуэктов Р.А. Ограничения, вызванные объектом, в задачах синтеза многомерных замкнутых систем // Автоматика и телемеханика. 1966. № 3.
- [136] Полуэктов Р.А. Теория синтеза многомерных линейных систем управления: Автореф. дис. д-ра техн. наук. Л., 1966.
- [137] Поспелов Г.С. Инвариантность некоторых координат при автоматическом управлении самолетом // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [138] Пухов Г.Е., Жук К.Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов. Киев: Наук. думка, 1966.
- [139] Розоноэр Л.И. Вариационный подход к проблеме инвариантности систем автоматического управления // Автоматика и телемеханика. 1963. № 6, 7.
- [140] Рутковский В.Ю., Ильясов Б.Г., Кабальнов Ю.С. и др. Адаптивные системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов. М.: МАИ, 1994.
- [141] Рутковский В.Ю., Павлов Б.В. Применение теории инвариантности для синтеза основного контура адаптивных систем // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [142] Рутман Р.С., Эпельман М.С. Параметрическая инвариантность линейных динамических систем // ДАН СССР. 1964. № 1.

- [143] Рябов Б.А. Возникновение, развитие и состояние теории инвариантности // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [144] Рябченко В.Н. Вложение систем. Нерегулярные законы управления // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7.
- [145] Самойленко Ю.И., Волкович В.Л. Разрешающая способность и свойство статистической инвариантности распределенных управляющих и приемных систем // Теория инвариантности автоматических систем: Тр. Третьего Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического управления (Киев, 31 мая - 5 июня 1966 г.). М.: Наука, 1970.
- [146] Свистунов Б.Л. Построение измерительных преобразователей параметров электрических цепей с использованием двухканальной обработки // Изв. вузов. Приборостроение. 1981. № 11.
- [147] Свистунов Б.Л. Пути реализации принципа двухканальной инвариантности в средствах измерений параметров электрических цепей // Приборостроение. 2003. № 3.
- [148] Симонов Н.И. Инвариантность решений систем линейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.

- [149] Сирезетдинов Т.К. Инвариантность, чувствительность и устойчивость в системах с распределенными параметрами // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [150] Сменковский Е.Г. Применение теории инвариантности к синтезу инерциальных навигационных систем // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [151] Смольников Л.П. Комбинированное управление автоматическими системами, оптимальными по быстродействию // Теория инвариантности автоматических систем. Тр. Третьего Всесоюз. совещ. по теории инвариантности и ее применению в системах автоматического управления (Киев, 31 мая - 5 июня 1966 г.). М.: Наука, 1970.
- [152] Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987.
- [153] Соболев О.С. Методы исследования линейных многосвязных систем. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [154] Современные методы проектирования систем автоматического управления / Под ред. Б.Н. Петрова, В.В. Солодовникова, Ю.А. Топчиева. М.: Машиностроение, 1967.
- [155] Солнечный Э.М. Инвариантные динамические системы с вырожденными подсистемами и условия их грубости // Автоматика и телемеханика. 1975. № 8.

- [156] Солнечный Э.М. О возможности приближения динамических свойств одноканальной системы к абсолютной инвариантности // Автоматика и телемеханика. 1985. № 4.
- [157] Солодов А.В. Линейные системы автоматического управления с переменными параметрами. М.: Физматгиз, 1962.
- [158] Стрейц В. Многомерные и дискретные системы управления // Тр. Междунар. конф. по многомерным и дискретным системам автоматического управления, Прага, 9-12 июля 1965 г. Секция А. Прага, 1965.
- [159] Сухопаров С.А., Тимощук И.Н. Самоустанавливающиеся оптические приборы для угловых и линейных измерений // Опт.-мех. пром-сть. 1991. № 2.
- [160] Тимофеев А.В. Инвариантность и адаптивная стабилизация программных движений // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 1.
- [161] Уланов Г.М. Системы автоматического регулирования и следящие системы, работающие по разомкнутому и замкнутому циклам, и принцип инвариантности // ДАН СССР. 1954. Т. 96, № 5.
- [162] Уланов Г.М. Инвариантность до ϵ в комбинированных системах автоматического регулирования // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [163] Уланов Г.М. Статистические и информационные вопросы управления по возмущению. М.: Энергия, 1970.

- [164] Уланов Г.М. Динамическая точность и компенсация возмущений в системах автоматического управления. М.: Машиностроение, 1971.
- [165] Уонем М. Линейные многомерные системы управления: Геометрический подход. М.: Наука, 1980.
- [166] Уткин В.А. Инвариантность в системах с большими коэффициентами и разрывными управлениями // Управление в сложных нелинейных системах. М.: Наука, 1984.
- [167] Уткин В.А. Инвариантность и автономность в системах с разделяемыми движениями // Автоматика и телемеханика. 2001. № 11.
- [168] Федоров С.М. Комбинированное управление в следящих системах с цифровыми вычислительными машинами // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [169] Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация. М.: Наука, 1977.
- [170] Храмой А.В. Предыстория инвариантных систем // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [171] Хрусталеv М.М. Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности // Автоматика и телемеханика. 1986. № 4.

- [172] Хрусталеv М.М. Методы теории инвариантности в задачах синтеза терминального управления летательными аппаратами: Учеб. пособие. М.: МАИ, 1987.
- [173] Цукерник Л.В. Комбинированное регулирование возбуждения синхронных машин // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: Тр. совещ., состоявшегося в Киеве 16-20 октября 1958 г. М., 1959.
- [174] Чехонадский Н.А. Некоторые вопросы применения теории инвариантности в измерительных системах высокой точности // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [175] Чинаев П.И. Применение инвариантных самонастраивающихся систем // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [176] Чинаев П.И. Методы анализа и синтеза многомерных автоматических систем. Киев: Техника, 1969.
- [177] Чинаев П.И. Методы анализа и синтеза сложных автоматических систем. М.: Машиностроение, 1992.
- [178] Шаталов А.С. Аналитические и структурные оценки условий инвариантности в линейных системах с переменными параметрами // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.

- [179] Шевелев А.Г. Стабилизация координат самолета при полете в возмущенной атмосфере // Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Второго Всесоюз. совещ., состоявшегося в Киеве 29 мая - 1 июня 1962 г. М.: Наука, 1964.
- [180] Шевелев А.Г., Пустовалов А.В. Применение теории инвариантности для стабилизации координат вертолета при полете в неспокойной атмосфере // Теория инвариантности и ее применение: Тр. V Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1979. Ч. 2.
- [181] Школьников А.И. Применение нелинейных элементов для синтеза инвариантных систем программного управления тиристорным асинхронным электроприводом // Там же. 1979. Ч. 1.
- [182] Щипанов Г.В. Гироскопические приборы слепого полета. М.: Оборонгиз, 1938.
- [183] Щипанов Г.В. Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1.
- [184] Anderson B.D. Output nulling invariant and controllability subspaces // Prepr. 6th Triennial World Congr. IFAC. Boston; Cambridge (Mass.), 1975. Pt 1B. N 43.6.
- [185] Basile G., Marro G. Controlled and conditioned invariant subspaces in linear system theory // Optimiz. Theory and Appl. 1969. Vol. 3, N 5.

- [186] Basile G., Marro G. Controlled and conditioned invariants in linear system theory // Prepr. Dep. of Electronics, Systems and Computer Science, Univ. of Bologna. Bologna, 1991.
- [187] Basile G., Marro G. On the observability of linear time-invariant systems with unknown inputs // Optimiz. Theory and Appl. 1969. Vol. 3, N 6.
- [188] Brockett R.W. Poles, feedback, state space approach // IEEE Trans. Automat. Control. 1965. Vol. AC-10, N 2.
- [189] Eitelberg E. Optimale Regelung mit Hilfe der Ljapunov-Schritt der Riccati-Gleichung // Regelungstechnik. 1979. Bd. 27, N 11.
- [190] Kalman R.E. Mathematical description of linear dynamical systems // SIAM J. Control. A. 1963. N 1.
- [191] Kalman R.E. Contributions to the theory of optimal control // Bull. Soc. Mat. Mex. 1960. N 5.
- [192] Kreinder E., Sazachik P.E. On the concept of controllability and observability of linear systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1964. Vol. AC-9, N 2.
- [193] Morse A.S., Wonham W.M. Decoupling and pole assignment in linear multivariable system: geometric approach // SIAM J. Control. 1970. Vol. 7, N 3.
- [194] Sensitivity method in control theory: Proc. of Intern. symp. held at Dubrovnik / Ed. L. Radanovic. Pergamon press, 1966.
- [195] Tonovic R. Controllability, invariancy, sensitivity // Proc. Allerton Conf. Michigan, 1965.

- [196] Tu J. Modern control theory. N.Y.: McGraw-Hill, 1964.
- [197] Wang P.K.C. Invariance, uncontrollability and unobservability in dynamical systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1965. Vol. AC-10, N 3.



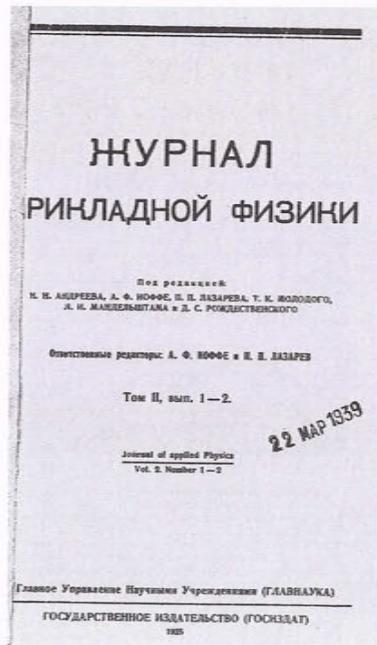
Георгий Владимирович Щипанов
(1903-1953)



Борис Николаевич Петров
(1913-1980)



Николай Николаевич Лузин
(1880-1950)



Журнал, в котором опубликована первая статья Г.В. Щипанова



Статья Г.В. Щипанова по разработке механизмов гироскопов



Авторское свидетельство Г.В. Щипанова

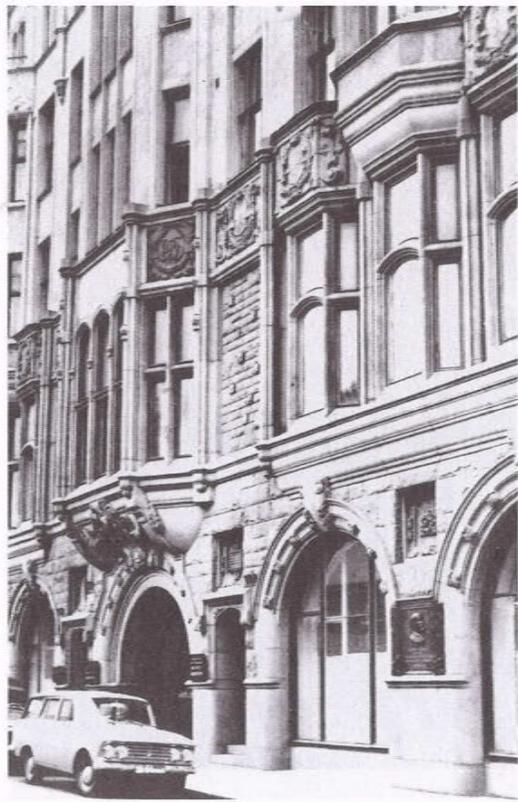
Захоронение Г.В. Щипанова на Новодевичьем кладбище
в Москве



Надгробие В.С. Кулебакина на Новодевичьем кладбище
в Москве



Надгробие Б.Н. Петрова на Новодевичьем кладбище
в Москве



Здание Института автоматики и телемеханики
в Малом Харитоновском переулке в Москве



Здание МВТУ им. Н.Э. Баумана, в котором находилась
кафедра «Авиационные приборы»



Кафедра ИУ-2 в МГТУ им. Н.Э. Баумана, организованная Г.В. Щипановым под названием «Авиационные приборы» в 1938 г.

П Р И К А З
по Институту Автоматики и Телемеханики АН СССР
№ 101
г. Москва 30 сентября 1940 г.

§ 1.

Мл. науч. сотруднику т. САЙТНОСКИУ И. Б. полагать больное с 24 по 26 сентября 1940 г. вкл. и приступившей к работе с 27|IX-40 г.
Основание: д/н-л № 017459.

§ 2.

Руководителя лаборатории телевизионных методов т. ТАГЕРА П. Г. полагать больным с 24 по 28 сентября вкл. и приступившим к работе с 30|IX-40 г.
Основание: д/н № 082747.

§ 3.

Ввиду невозможности в Институте Автоматики и Телемеханики создать нормальные условия работы, а также учитывая болезненное состояние проф. Г. В. Щипанова, разрешить последнему в октябре м-це по понедельникам, вторникам, четвергам и субботам проводить работу на дому по утвержденному мною для него плану.

§ 4.

Ст. науч. сотр. т. Д. В. Зернову, лаборантке т. В. И. Копановой руководителю лаборатории телевизионных методов т. П. Г. Тагеру установить рабочий день в 6 часов, как заявляем на работе с вредными условиями труда (парфютные установки).
Основание: Приложение к постановл. СНК СССР от 1|VII-40 г. № 1120.

§ 5.

Попустить студентов МЭИ им. Молотова т. т. ЕШИНСОН М. И. и НЕВМН Н. И. к прохождению преддипломной практики в лаборатории телевизионных методов с 19|IX по 1|XI-с.г. с рабочим временем с 9 до 13 часов.

Руководство практикой возложить на руковод. лабор. т. т. Тагера П. Г. и т. т. Тагера П. Г.
Основание: Письмо МЭИ им. Молотова от 17|IX-40 г. № 127/л с резол. Зам. Директора Института.

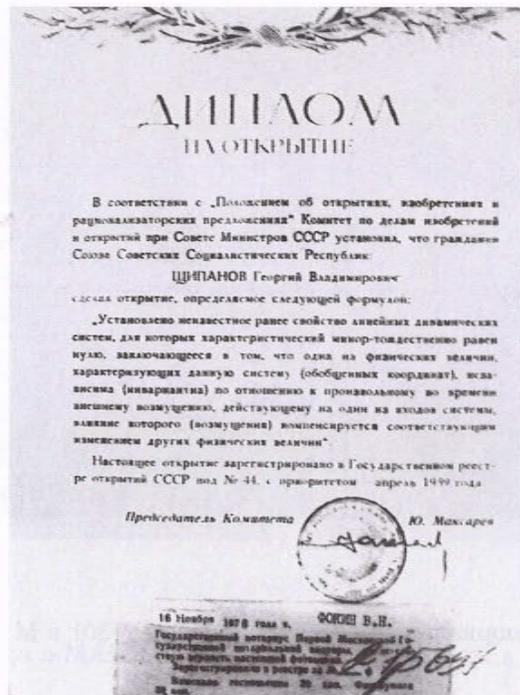
Разрешение Дирекции ИАТ Г.В. Щипанову работать неполную неделю в связи с болезнью



Кафедра в МАИ, созданная Г.В. Щипановым в 1942 г.



Мемориальный стенд на кафедре №301 в МАИ



Диплом Г.В. Щипанова на открытие



Учебная аудитория на кафедре №301 в МАИ



Портрет Г.В. Щипанова на кафедре №301 в МАИ

Сведения об авторах

Васильев Станислав Николаевич, академик РАН, директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Лезина Зоя Марковна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Рутковский Владислав Юльевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Розоноэр Лев Ильич, доктор технических наук, профессор, бывший сотрудник лаборатории Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, заведующим которой был М.А. Айзерман

Куцневич Всеволод Михайлович, академик Национальной Академии Наук Украины

Бутковский Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Проскурников Антон Викторович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН

Якубович Владимир Андреевич, член-корреспондент РАН, в течение многих лет возглавлял кафедру теоретической кибернетики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Солнечный Энгель Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Коновалов Сергей Феодосьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы систем ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Мисриханов Мисрихан Шапиевич, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ОАО «Магистральные Энергетические сети Центра России», заслуженный энергетик России