

УДК: 681.5.01/511

DOI: 10.53816/20753608_2021_3_145

**РАЗВИТИЕ ПРИКЛАДНОЙ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
В РАЗРАБОТКАХ АО «КОНЦЕРН «ГРАНИТ-ЭЛЕКТРОН»****THE DEVELOPMENT OF APPLIED THEORY OF AUTOMATIC CONTROL
IN THE JSC «CONCERN «GRANIT-ELECTRON»***Чл.-корр. РАРАН С.Н. Шаров**АО «Концерн «Гранит-Электрон»**S.N. Sharov*

Показана эволюция применения методов теории автоматического управления в инженерных разработках автоматизированных и автоматических систем предприятия (ОсТехБюро — НИИ 49 — ЦНИИПА — ЦНИИ «Гранит» — АО «Концерн «Гранит-Электрон») для бортовых систем управления и наведения летательных аппаратов, а также корабельных систем управления ракетным оружием 1921–2021 гг.

Ключевые слова: анализ и синтез автоматических систем, линейные и нелинейные математические модели, чувствительность систем управления, нелинейные динамические корректирующие устройства, системы с искусственным интеллектом.

The article shows the evolution of the application of methods of the theory of automatic control in the engineering developments of automated and automatic systems of the enterprise (Ostehbyuro — Research Institute 49 — TSNIIPA — TSNII «Granit» — JSC «Concern «Granit-Electron») for onboard control and guidance systems of aircraft, as well as shipboard missile weapons control systems 1921–2021.

Keywords: analysis and synthesis of automatic systems, linear and nonlinear mathematical models, sensitivity of control systems, nonlinear dynamic correction devices, systems with artificial intelligence.

Первой вехой в истории прикладной теории автоматического управления в разработках АО «Концерн «Гранит-Электрон», в определении её технической направленности на вооружение Военно-Морской Флота послужили изобретения В.И. Бекаури (рис. 1). Учитывая важность и необходимость реализации этих изобретений в части программного и дистанционного управления торпедами и противокорабельными минами, постановлением Совета Труда и Оборона по Мандату, выданному В.И. Лениным в августе 1921 года, ГОНТИ НТО ВСНХ преобразовано в Особое Техническое Бюро по военным изобретениям специального назначения. Так определилась основная сфера всей последующей деятель-



*Рис. 1. Владимир Иванович Бекаури
(1886–1938 гг.)*

ности предприятия, как создание автоматизированных и автоматических систем управления оружием для Военно-Морского Флота России.

Непосредственное участие в разработках ОсТехБюро принимал Аксель Иванович Берг¹ (рис. 2). При его непосредственном участии в ОсТехБюро для управления группой кораблей разработана аппаратура внутри-эскадренной радиосвязи на ультракоротких волнах, а также специальная аппаратура морского образца, которая была принята на вооружение Государственной комиссией под его председательством. С точки зрения современной теории управления — это простейшие устройства с релейным (командным) управлением с визуальным наблюдением (без автоматической обратной связи). Однако в то время это признано большим успехом в развитии советской науки и техники [1–3]. За достигнутые успехи в области развития отечественной автоматики и телемеханики в 1933 г. А.И. Берг был награжден правительством орденом Ленина.

Начиная с 1947 г. в институте уделялось особое внимание теории управления и регулирования. С этой целью в качестве членов Ученого совета, руководителей аспирантов и научных консультантов были приглашены крупные ученые в этой области науки: доктор технических наук член-корреспондент АН СССР Е.П. Попов [4], профессора Д.В. Васильева и А.И. Лурье.

Морская автоматика и телемеханика многие годы в институте являлись приоритетным тематическим направлением. Работы в области морской автоматики в институте велись по следующим направлениям: стабилизация и управление движением подводных лодок на глубине на ходу и без хода; системы управления успокоителями качки кораблей; автоматическое управление курсом кораблей; автоматические регуляторы тока в курсовых обмотках размагничивающих систем.



*Рис. 2. Аксель Иванович Берг
(1893–1979 гг.)*

Системы стабилизации и управления движением подводных лодок до 1945 года разрабатывались отдельно: по курсу, глубине на ходу и глубине без хода. Разработки осуществлялись без достаточно глубокого научного теоретического обоснования [4]. Подводная лодка не рассматривалась как единый объект автоматического управления, а ее система управления как замкнутая следящая система, описываемая соответствующим математическим уравнением. Такое положение имело место и при рассмотрении других проблем в области морской автоматики.

Первыми кандидатами технических наук в области систем стабилизации и управления движением подводных лодок стали: В.Ф. Печурин, А.А. Данилин, В.К. Чесноков и В.А. Иванова.

В научной работе В.Ф. Печурина дано теоретическое обоснование ряда схем стабилизации подводных лодок по глубине без хода. Проведен анализ и решение математических уравнений, описывающих эти системы. В.Ф. Печурин лауреат Сталинских премий (1942 г. и 1951 г.) и лауреат Ленинской премии (1959 г.).

Данилин А.А. теоретически рассмотрел структурные схемы системы управления движением

¹ Будучи в командировке по служебным делам автор статьи в 1977 году по поручению председателя секции по теории чувствительности систем автоматического управления научного комитета технической кибернетики АН СССР Р.М. Юсупова представлял статьи авторов из Ленинграда для тематических выпусков по теории чувствительности и лично встретился с председателем научного совета «Кибернетика» АН СССР А.И. Бергом, который поинтересовался научной жизнью нашего предприятия и одобрил важность исследования чувствительности нелинейных автоматических систем. В сборнике «Вопросы кибернетики» — Тематический выпуск «Теория чувствительности и её применение», публиковали научные статьи сотрудники нашего предприятия: Душин С.Е., Зельченко В.Я., Зонис Е.М., Кривцов И.Ю., Лапин В.А., Подвальных А.С., Пчелко В.Л., Синяков А.Н., Филатов И.В., Хлыпало Е.И., Шаров С.Н. и др. [13–23].

подводной лодки «Спрут» [1]. Составил уточнённое математическое описание этой системы и определил степень устойчивости решения уравнений управляемого движения.

Чесноков В.К., руководитель теоретической группы обеспечения устойчивости, применив метод Вышнеградского-Неймарка, исследовал в линеаризованной системе третьего порядка пределы изменения параметров всех регуляторов и объекта управления для обеспечения устойчивости системы — «Подводная лодка — Стабилизатор».

Иванова В.А. провела исследование устойчивости системы стабилизации и управления подводной лодкой по глубине на ходу методом Ляпунова А.М. [1].

В научных работах института подводную лодку рассматривали, по аналогии с автопилотированием, как управляемый объект, а систему стабилизации и управление ею, как замкнутую систему автоматического управления, описываемую нелинейным математическим уравнением высокого порядка. В состав такой следящей системы входит подводная лодка и технические средства, на выходе которых находятся силовые исполнительные органы.

На базе этих теоретических исследований были созданы новые технические требования, по которым разработаны системы стабилизации и управления движением подводных лодок первого и второго поколений.

Наряду с проектными и экспериментальными работами по созданию систем управления успокоителями качки кораблей в институте проводились теоретические исследования, направленные на улучшение эффективности «успокоителей» качки.

Основную роль в деле повышения научно-теоретического уровня систем управления успокоителями качки сыграла работа Ильиной С.Г. [1], выполненная под научным руководством доктора технических наук, профессора Лурье А.И., в которой тщательно исследован сам процесс успокоения качки кораблей. Составлено подробное математическое описание с учетом влияния нелинейных характеристик звеньев в системе.

Разработку теории и практического метода проектирования системы стабилизации курса корабля, под научным руководством члена-кор-

респондента АН СССР Е.П. Попова, провела Городецкая М.А. Наибольший интерес и практическую значимость в ее работе представляли оценки влияния нелинейности в системе рулевого привода на устойчивость системы стабилизации курса корабля.

В 50-е годы предприятию было поручено создание систем размагничивания кораблей, что потребовало разработку соответствующей теории и методов проектирования, оценки качества и испытаний.

Под руководством члена-корреспондента АН СССР (позже действительного члена РАН РФ) Е.П. Попова аспирантка И.А. Бородина провела математический анализ систем автоматического регулирования тока в размагничиваемых системах и показала, что они представляют класс нелинейных следящих систем, и с достаточной точностью могут быть исследованы методами теории автоматического управления и регулирования в линейном приближении, с последующим уточнением численным интегрированием и учётом нелинейных особенностей звеньев с насыщением.

Теоретической базой многих научных работ в институте был предложенный Е.П. Поповым (рис. 3) подход к созданию прикладной теории анализа и синтеза систем управления на базе методов эквивалентной линеаризации и целенаправленного использования нелинейностей.

Начало пятидесятых годов в нашей стране характеризуется бурным ростом потребности страны в автоматических системах. Особенно в



Рис. 3. Евгений Павлович Попов (1914–1999 гг.)

оборонных отраслях промышленности. Стало ясно, что сложными машинами и механизмами не может управлять человек без помощи автоматики, и не только из экономических соображений. Создание автоматических систем зачастую было единственным средством достижения необходимых технических показателей создаваемых машин и механизмов.

К этому времени стало очевидным, что в ряде случаев нелинейности, содержащиеся в реальных звеньях автоматических систем, делают эти системы совершенно непригодными для использования [5]. При использовании линейных методов расчета спроектированная, казалось бы, высококачественная система из-за реальных неучтенных нелинейностей иногда даже теряет устойчивость.

Замкнутые нелинейные системы управления при наличии элементов, обладающих инерцией и запаздыванием, особенно склонны к незатухающим или медленно затухающим колебаниям. Изучение динамических свойств нелинейных автоматических систем не может быть, в принципе, произведено при помощи линейных методов. Поэтому особое значение приобретает развитие методов исследования и проектирования нелинейных автоматических систем.

Производственная необходимость заставляла проектировщиков внимательно исследовать влияние нелинейных характеристик практически всех звеньев на поведение автоматических систем. Этот вопрос вынуждены были затрагивать исследователи практически всех систем.

В создании гироскопических следящих систем Е.П. Попов отмечает [1] В.П. Морозова, автора многих оригинальных технических решений, умевшего скрупулезно учитывать нелинейные особенности гиросинтезаторов, подбирать к ним компенсирующие цепочки, сводить дрейф нуля к минимально возможной величине. В его работах нашли отражение и практическое применение расчеты нелинейных систем с медленно меняющейся постоянной составляющей.

Из своих учеников пятидесятых годов Е.П. Попов особенно выделял Е.И. Хлыпало, защитившего кандидатскую диссертацию по

теоретическим вопросам оценки качества переходных процессов нелинейных систем в 1958 г. Его стремление и умение создавать высококачественные автоматические системы при помощи простых устройств привели его в шестидесятые годы к разработке нового класса систем с нелинейными динамическими корректирующими устройствами.

Физическая сущность предложенных им сигналов заключается в следующем: в отличие от «обычных», нелинейные переключающие корректирующие сигналы меняют параметры самих звеньев автоматической системы. При этом изменяются только динамические параметры звеньев, а их статические характеристики остаются неизменными. Изменение динамических параметров производится путем замены во времени реального управляющего сигнала на специально сформированный [6].

Точный расчет устройств с нелинейными корректирующими устройствами очень сложен и редко применяется в инженерной практике. Трудности еще более возрастают, если приходится учитывать нелинейности, присущие реальным устройствам, например, сухое трение, зазоры в кинематических передачах и т.д. Здесь для синтеза нелинейных корректирующих устройств широкое применение нашли приближенные методы исследования, в частности метод гармонической линеаризации.

Скромный молодой человек Н.М. Мозжухин (из воспоминаний Е.П. Попова² [1]) взялся за сложную, по тому времени научную задачу моделирования на аналоговых вычислительных машинах систем со случайными параметрическими возмущениями. Решение этой задачи было необходимо для определения допусков на проектируемые системы, содержащие по несколько десятков звеньев различной физической природы. Успешное завершение этих исследований позволило Н.М. Мозжухину защитить кандидатскую диссертацию. В дальнейшем он возглавил разработку сложнейшей современной автоматической системы, за которую он был удостоен в 1984 году Ленинской премии.

² По поручению генерального директора В.В. Павлова и просьбе Е.И. Хлыпало при подготовке к юбилейной научно-технической конференции НПО «Гранит» автор статьи лично встречался и брал интервью у Е.П. Попова (с записью на магнитофон) после научного семинара в МВТУ им Н.Э. Баумана в 1976 году. Воспоминания Е.П. Попова в редакции автора изложены в статье [1].

В начале шестидесятых годов стало очевидно, что создавать сложные системы управления, базируясь только на аналитических расчетах и математическом моделировании, невозможно и требуется большой объем дорогостоящих экспериментальных исследований.

Выход был найден и институт, один из первых в стране, развернул моделирование автоматических систем с реальной аппаратурой. Эту работу возглавил В.Л. Черников, под руководством которого разработаны необходимые методики и оборудование для корректного моделирования сложных нелинейных систем управления по тематике института. Практическое внедрение его технических предложений принесло значительный эффект и позволило сократить сроки разработки по ряду важнейших заказов института. В.Л. Черников возглавлял в институте цифроаналоговый комплекс стендовой отработки современных автоматических систем.

Научное руководство теоретическими исследованиями и отработкой алгоритмов управления противокорабельных крылатых ракет (ПКР) на предприятии возглавлял Александр Трифонович Барабанов (рис. 4). Уроженец г. Севастополь, окончил Ленинградский военно-механический институт (ныне БГТУ «ВОЕНМЕХ») и одновременно математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. К.т.н. (1955 г.), д.т.н. (1963 г.). С 1955 г. по 1980 г. работал в ЦНИИ «Гранит»: старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательской лаборатории, начальник отдела и отделения, заместитель главного конструктора по теоретическим исследованиям и моделированию. Основоположник аналитической теории самонаведения летательных аппаратов. Как научный руководитель заложил основы построения цифровых систем автопилотирования и самонаведения противокорабельных крылатых ракет П-6, П-500, «Гранит» и крылатой ракеты (КР) «Вулкан». Основным направлением его научной деятельности являлась разработка и развитие методов анализа динамики процессов управления полётом беспилотных летательных аппаратов. С 1980 года до последнего времени заведующий кафедрой технической кибернетики в Севастопольском государственном техническом университете. Воспитал значительное число специалистов высшей научной квалификации.



Рис. 4. Александр Трифонович Барабанов (1928–2018 гг.)

Достойным продолжателем научной деятельности А.Т. Барабанова на предприятии стал В.Р. Андриевский (рис. 5), выпускник кафедры ракетостроения Военмеха, одновременно дополнительно закончивший с отличием математический факультет Ленинградского государственного университета.

Свою кандидатскую диссертацию он защитил на новых нелинейных законах управления, проводя синтез систем управления строгими математическими методами с учётом сопутствующих нелинейных особенностей объекта управления и добиваясь наилучшего качества достижимых технических параметров (точности и запасов устойчивости).

Другим самостоятельным направлением развития теории и практики автоматического



Рис. 5. Валентин Ростиславович Андриевский (1935–2004 гг.)

регулирования в конце пятидесятих годов выделось создание оптимальных систем. Передовые идеи ученых с мировым именем, например, члена-корреспондента АН СССР А.М. Лётова и профессора В.И. Зубова (который также прошёл практическую инженерную школу нашего предприятия [1, 2]), находили практическое применение и благодатную почву для развития в проектных и исследовательских работах предприятия. Эти идеи подхватили тогда еще молодые специалисты Л.Е. Канарев, А.В. Молоденский и Я.А. Бедров. Попытка применить заманчивые идеи к практическим задачам заставила их проявить недюжинные математические способности. Они смогли внести весомый вклад в развитие методов синтеза оптимальных систем и их использование в практических разработках.

Многообразие технических задач, решаемых предприятием, привело к тому, что инженеры и научные работники вынуждены были развивать практически все направления теории и практики автоматического регулирования.

Так, например, теоретические трудности расчета нелинейных стохастических систем привели В.И. Смирнова [1] к необходимости разработки оригинальной методики проектирования. Он широко использовал возможности цифровых вычислительных машин шестидесятих годов.

Сама производственная деятельность в ЦНИИ «Гранит» заставляла инженеров искать новые технические решения и внедрять в свои практические задачи новейшие теоретические изыскания. Благодаря этому, продукция, выпускаемая институтом, не только не уступает зарубежным аналогам, но и в ряде случаев превосходит ее по качественным показателям автоматических систем.

Школа Евгения Ивановича Хлыпало [1] (рис. 6). В 1952 году после окончания Ленинградского политехнического института Евгений Иванович Хлыпало пришел в ЦНИИ «Гранит» и сразу активно включился в производственную работу. Тяжелые жилищные условия (он, жена и маленькая дочь ютились в одной маленькой комнате коммунальной квартиры) не только не останавливали его желания заниматься наукой, а, по его собственному утверждению, «стимулировали» научную деятельность. В более поздние годы он часто вспоминал об этом в укор молодым, которые, ссылаясь на семейные и бытовые



*Рис. 6. Евгений Иванович Хлыпало
(1929–1980 гг.)*

трудности, прикрывали свое пассивное отношение к научной работе.

Через два года после окончания института Е.И. Хлыпало поступает в очную аспирантуру ЦНИИ «Гранит», где под руководством члена-корреспондента АН СССР Е.П. Попова защищает кандидатскую диссертацию в 1958 году.

Во время учебы в аспирантуре Евгений Иванович никогда не пользовался учебным отпуском и практически все рабочие, а по необходимости, и выходные дни проводил непосредственно на рабочем месте. Многие из его товарищей по работе даже не догадывались, что он учится в аспирантуре.

После защиты кандидатской диссертации Е.И. Хлыпало не ослабил свою научную работу и в 1964 году защитил докторскую диссертацию в области проектирования нелинейных динамических корректирующих устройств для систем автоматического управления. За разработку инженерных методов расчета и создание автоматических систем и устройств Е.И. Хлыпало удостоен ученого звания заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

Е.И. Хлыпало был активным пропагандистом новейших идей в области нелинейных автоматических систем и подготовил ряд учеников (шесть кандидатов и одного доктора технических наук — С.Н. Шарова), продолжающих его дело в новых разработках предприятия.

Е.И. Хлыпало умел зажигать новыми идеями как своих подчиненных, так и руководство подразделений института, где он работал. Очень

часто, на первых порах, его предложения воспринимались как абсурдные. Так было с идеей создания автономных систем управления объектами без линий телеуправления, с предложениями по конструктивному объединению информационных каналов и т.д. В дальнейшем жизнь показала прочность и эффективность этих технических решений, которые были реализованы в ряде разработок ЦНИИ «Гранит».

Во всей своей производственной и научной деятельности Е.И. Хлыпало смело опирался на молодежь. В 1964 году он взялся за руководство первыми своими аспирантами: А.С. Подвальных, И.В. Филатовым и С.Н. Шаровым в ЦНИИ «Гранит», А.А. Чернышевым в ЦНИИ «Аврора». Перед тем, как рекомендовать их в аспирантуру, он поставил перед ними условия:

- производственную нагрузку увеличить в два раза по сравнению с остальными инженерами;
- не проводить в рабочее время никакой научной работы, включая написание статей, заявок на изобретение, проведение аналитических или численных расчетов (все это аспиранты должны были делать в нерабочее время; исключением было совместное обсуждение полученных результатов, а также свободное время в предпраздничные дни, когда отключалось электропитание приборов);
- не помышлять о повышении заработной платы до защиты диссертации.

Далеко не все были согласны работать в таких условиях. Некоторые увольнялись и поступали в аспирантуру учебных вузов. Оставались только люди, одержимо преданные делу, которым увлек их Е.И. Хлыпало.

Следует заметить, что работа в основе своей была очень интересная, поскольку в лаборатории Е.И. Хлыпало проводились значительные научно-исследовательские работы, требующие как теоретических, так и экспериментальных исследований. Здесь можно было найти интересную работу на любой вкус. Однако при этом приходилось проделывать огромный объем сопутствующей текущей работы, которую обычно называют «такелажной», «бюрократической», «организационно-административной» и т.д. Инженеры выступали в роли «толкача», «снабженца», «диспетчера» и т.п. Таким образом, аспиранты невольно проходили хорошую школу организаторской работы в коллективе, общения с

другими подразделениями и производством, сотрудничества с представителями контрагентских организаций и заказчиком.

Е.И. Хлыпало был убежден, что научный сотрудник должен пройти и выдержать этот путь — только тогда он может быть допущен к представлению своих научных результатов, оформленных как диссертация.

Видимо по этой причине, упомянутые аспиранты, а также другие его сотрудники — воспитанники 60-х годов, стали главными конструкторами и руководителями подразделений (А.С. Подвальных в ЦНИИ «Гранит», И.В. Филатов в Ленинградском институте авиационного приборостроения, А.А. Чернышев в ЛГУ, К.В. Тюфяев в Севастопольском филиале ЦНИИ им. А.Н. Крылова).

Е.И. Хлыпало совмещал производственную деятельность в ЦНИИ «Гранит» с преподавательской работой. Специфика работы в высшей школе существенно повлияла на его взгляды как воспитателя научных кадров. С этого времени он требует более строгой методической отточенности научных работ. Это почувствовали на себе его ученики 70-х годов (Ю.Н. Афанасьев, В.Я. Зельченко, В.А. Лапин и Б.С. Губанов). Научные работы этих сотрудников отличаются более глубокими теоретическими исследованиями, широкое использование современной вычислительной техники для анализа различных систем и приборов, а также при обработке экспериментальных результатов.

Основой теоретических исследований учеников Е.И. Хлыпало был метод гармонической линеаризации.

Все, кому по роду работы приходилось общаться с Е.И. Хлыпало, отмечали, что наряду с научной эрудицией он обладал великолепной интуицией инженера-практика. Его способность доводить любую, сколь угодно сложную теорию до состояния, когда она может быть доходчиво объяснена «на пальцах», умение выявить физическую суть рассматриваемого явления служили хорошим примером его ученикам. Иллюстрацией этого являются разработанные им способы оценки качества нелинейных систем, используемые для расчета следящих приводов антенн и гироскопов, тренажеров и манипуляторов.

Е.И. Хлыпало не создавал абстрактных теорий, а к любой проблеме подходил с позиций

инженера — всегда учитывать необходимость практической реализации разрабатываемых идей. Это важное качество для прикладной науки сумел он воспитать в своих учениках. Во многом благодаря этому, Ю.Н. Афанасьев, возглавляющий проектный отдел НПО «Ленэлектронмаш», показал близость систем с нелинейными корректирующими устройствами переключающего типа к оптимальным по быстрдействию системам с релейным управлением.

Большое значение в воспитании молодых ученых Е.И. Хлыпало придавал развитию здоровой конкуренции, что достигалось обсуждением на семинарах задач, решение которых поручалось практически всем сотрудникам сектора без учета должностей и званий. Такой прием значительно ускорил развитие научного мышления молодых инженеров и создавал свободную, демократическую обстановку в коллективе.

Жаркие споры были при обсуждении влияния помех на нелинейные системы с динамическими переключающими устройствами. Одним из основных зачинщиков споров в этой области пришлось выступать Р.Д. Васькину, которому, как человеку с богатым производственным опытом, было не просто выдержать мощную «осаду» молодых и математически более подготовленных сотрудников. Такие дискуссии принесли несомненно обоюдную пользу и ставшему кандидатом технических наук Р.Д. Васькину и всем другим участникам обсуждений. Например, В.А. Лапин во многом отошел от двухчастотного подхода Р.Д. Васькина и в своей кандидатской диссертации получил новые интересные результаты.

Учениками Е.И. Хлыпало были не только аспиранты и соискатели, научным руководителем которых он числился официально. Большое влияние он оказывал на многих соратников по работе. Его деликатный подход к сохранению индивидуального почерка и образа мысли каждого соискателя ученой степени или автора статьи, умение четко выделить и сформулировать главное, способность к жесткой, но не обидной критике, помогающей правильно понять и преодолеть слабые стороны любой научной работы, снискали ему глубокое уважение учеников, коллег и руководства ЦНИИ «Гранит». Так, при непосредственной помощи Е.И. Хлыпало, подготовили доклады по совокупности работ, за которые

им присуждена ученая степень кандидата технических наук, генеральный директор предприятия Герой Социалистического труда В.В. Павлов, лауреат Ленинской премии С.Т. Зайцев, заместитель главного инженера В.П. Лапин, главный конструктор контрольно-проверочной аппаратуры бортовой системы управления крылатых ракет Б.М. Гольдин.

Будучи профессором, заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, читая в разные годы курсы лекций по автоматическому управлению в Северо-западном заочном политехническом институте, Ленинградском государственном университете, Ленинградском институте авиационного приборостроения, Е.И. Хлыпало стремился ко взаимному обмену знаниями и опытом с молодыми коллегами по работе. Он организовал в лаборатории занятия по основам теории оптимальных систем. Лекции читал его ученик, инженер В.Я. Зельченко. По вычислительной технике и программированию занятия проводили кандидаты технических наук В.Р. Андриевский и инженер В.А. Герасимов. На этих занятиях он всегда был активным слушателем, своим личным примером показывая значимость происходящего.

Справедливости ради следует признать, что не всегда усилия Евгения Ивановича, направленные на активизацию научной работы ведущих сотрудников ЦНИИ «Гранит», заканчивались успешно. Так и не удалось ему «раскачать» ряд сотрудников, заставить поверить в свои силы и закончить научные изыскания, оформить диссертационные работы. Однако и они с благодарностью вспоминают общение с Е.И. Хлыпало как время своей наибольшей творческой активности.

После тяжелой болезни Е.И. Хлыпало скончался в 1980 году, когда ему исполнилось 50 лет, полный творческих замыслов и надежд на расцвет научных поисков, на появление новых оригинальных технических решений. Его ученики, друзья и соратники прикладывают все усилия, чтобы воплотить идеи и начатые им дела в жизнь.

Живой коллектив учеников-единомышленников, воспитанный Евгением Ивановичем, пожалуй, одна из больших ценностей, которые он оставил в наследство ЦНИИ «Гранит». Сейчас на предприятии много молодых сотрудников, которые не знали Е.И. Хлыпало, но высокий дух

бескомпромиссного служения науке, глубокая вера в конечное торжество избранного направления работ, убежденность в необходимости его развития в интересах Родины продолжают жить и давать новые плоды творчества.

Школа Рафаила Митхатовича Юсупова (рис. 7). В семидесятые годы прошлого века, во многом благодаря появлению монографии Р.М. Юсупова и Е.Н. Розенвассера [12], разработчики бортовых и корабельных систем автоматического и автоматизированного управления стали уделять больше внимания исследованию чувствительности технических и тактических характеристик не только к параметрам всех составляющих элементов [8–24], но и к структуре самих систем, включая организационно-технические системы [25].

Чувствительность количественно характеризует влияние малых изменений параметров объекта управления, элементов системы или внешней среды на свойства и выходные параметры системы управления, поэтому являлась необходимым инструментом обоснования допустимых отклонения параметров элементов, составляющих автоматическую систему. Параметры автоматической системы X , характеризующие её потребительские свойства (точность, длительность переходного процесса и др.) являются функцией параметров её элементов x_i (инерционность, коэффициент усиления). Если известна аналитическая форма этой функции $Y(x_i)$, то чувствительность определяется как частная производная $\partial Y/\partial x_i$. Эта формула оценки чувствительности справедлива для линейных моделей звеньев и систем.

Реальные системы являются нелинейными, поэтому для оценки чувствительности используются линеаризованные модели звеньев, например, путём замены реальной зависимости на приближённую линейную

$$Y(x_i) = Y(x_0) + (x_i - x_0) \partial Y / \partial x_i,$$

где x_0 — номинальное (расчётное) значение x_i . Здесь основой является разложение $Y(x_i)$ в ряд Тейлора.

Для статистического анализа и синтеза автоматических систем используются способы статистической линеаризации характеристик звеньев $Y(x_i) = \Phi(\sigma_x, x_i - x_0)$, принимая нормаль-



Рис. 7. В 1989 году Р.М. Юсупов назначен, с оставлением в кадрах Вооруженных Сил, заместителем директора по научной работе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), а с 1991 года по настоящее время директор этого института

ным закон возможного изменения параметра $(x_i - x_0)$ с заданным среднеквадратическим отклонением σ_x .

В работах Е.П. Попова, Е.И. Хлыпало и их учеников для линеаризации передаточных функций звеньев автоматических систем с колебательными процессами чаще используется метод гармонической линеаризации, где передаточная функция нелинейного звена заменяется линеаризованной, коэффициенты передачи которой соответствуют первой гармонике ряда Фурье выходных колебаний нелинейного звена [3–5].

$$Y(x_i = a \sin \omega t) \approx q(a, \omega) \sin \omega t + q'(a, \omega) \cos \omega t,$$

где a, ω — амплитуда и частота первой гармоники.

Линеаризовать звенья с нелинейной статической характеристикой достаточно просто, например, для однозначных $q(a)$ и $q' = 0$. Сложнее линеаризовать нелинейные динамические (инерционные) звенья [4, 5]. Здесь приходится искать аналитическое выражение для описания выходных колебаний и далее искать аппроксимацию коэффициентами гармоник ряда Фурье.

Для проектирования следящих систем на нашем предприятии чаще использовались частотные методы для оценки устойчивости и качества переходных процессов, поэтому определялись логарифмические амплитудные $L(a, \omega) = 20 \lg((q(a, \omega)^2 + q'(a, \omega)^2)^{0.5})$ и фазовые $\varphi(a, \omega) = \arctg(q'(a, \omega)/q(a, \omega))$ характеристики нелинейных звеньев [7–9].

В ряде случаев аналитические расчёты коэффициентов чувствительности громоздки и трудоёмки, поэтому пользуются конечными разностями или в дискретном виде $\Delta Y/\Delta x_i$. Это допустимо для анализа сложной системы, однако при синтезе системы может привести к дополнительным сложностям выбора шага Δx_i [8].

Ближайшим соратником Р.М. Юсупова на нашем предприятии был начальник отдела навигационных систем доктор технических наук, профессор Ю.М. Козлов (1978–1991 гг. зав. кафедрой систем управления летательных аппаратов в БГТУ «ВОЕНМЕХ»), который не ограничивался анализом чувствительности систем к параметрам: внешней среды, объекта и аппаратуры управления. Он один из первых в стране разработал теорию проектирования самонастраивающихся систем, за которыми позже закрепилось название «адаптивные системы».

Наряду с московской школой ученых академика РАН Петрова Б.Н. и киевским коллективом ученых во главе с академиком Ивахненко А.Г. в Ленинграде видное место в этой области занял тогда еще молодой инженер нашего предприятия Козлов Ю.М., который разработал ряд инженерных методов расчета самонастраивающихся систем и предложил оригинальные системы с, так называемыми «пробными» возмущающими сигналами. Работы Ю.М. Козлова были достойно оценены в нашей стране. Его монографии по самонастраивающимся системам используются как учебные пособия в вузах по специальности автоматическое управление [10, 11].

В 70–80 годы в коллективе разработчиков под руководством Е.И. Хлыпало развивалось новое направление обеспечения качества управления летательных аппаратов и следящих приводов при помощи нелинейных динамических корректирующих устройств [6–8].

Простые по технической реализации нелинейные корректирующие устройства позволяли подойти достаточно близко к физически реали-

зуемым оптимальным процессам управления. Синтез структуры и выбор параметров таких устройств осуществлялся на основе метода гармонической линеаризации, который в ряде случаев не позволял оценить качество управления во всех требуемых режимах функционирования системы.

Однако, как показано в [13], для синтеза квазиинвариантных автоматических систем возможно применение некоторых типов нелинейных динамических корректирующих устройств. Для этого пришлось подробно исследовать чувствительность корректирующих устройств, чтобы определить влияние отклонения параметров их элементов от номинальных значений на эффективность корректирующих устройств [14–24].

С развитием вычислительной техники большому числу инженеров стали доступными численные методы моделирования и параметрической оптимизации корректирующих устройств и систем управления в целом. Первые попытки использования градиентных методов оптимизации параметров систем с динамическими нелинейными звеньями типа «сухое трение», люфт и тем более с нелинейными динамическими корректирующими устройствами привели к неудовлетворительным результатам. Стремление улучшить точность определения значения параметров путём уменьшения шага перебора, приводило к заикливанию процесса вычисления. Причиной оказались скачки функции чувствительности при малом изменении управляющего или возмущающего воздействия [17–18]. Поняв это явление, стало возможным внесение изменений в программу поиска оптимальных параметров, например, искусственно линеаризуя область параметров, где наблюдаются скачки градиента.

В 70-е годы работы по теоретическим вопросам анализа и синтеза системы управления сверхзвуковой ракеты «Базальт» (генеральный конструктор В.Н. Челомей, главные конструктора системы управления В.Н. Яковлев и А.В. Чижов) возглавил заслуженный конструктор РФ В.Р. Андриевский, в должности начальника отдела и заместителя главного конструктора [2]. Специфика этой системы характеризуется нестационарностью (в процессе разгона существенно изменяются динамические коэффициенты уравнений движения), высокой степенью статической неустойчивости летательного аппа-

рата (обусловленной смещением центра тяжести из-за размещения в районе хвостового оперения тяжелого стартового ускорителя), упругостью конструкции, а также высоким уровнем вибраций, порождаемых работой стартового ускорителя. Обеспечить требуемое качество управления удалось при помощи синтеза нелинейных динамических корректирующих устройств с использованием методического и математического аппарата теории чувствительности, обеспечивших необходимую грубость системы к возмущающим воздействиям [22]. Эти работы были вкладом в научные и производственные достижения, за которые 1985 году предприятие награждено орденом Ленина.

Методический подход теории чувствительности используется при создании сложных комплексов радиоэлектронного вооружения и систем управления ракетного оружия кораблей [19]. При этом учитываются не только технические параметры, но и эксплуатационные и экономические условия, необходимые для прогноза развития предприятия и принятия стратегических производственных решений [23].

Предприятием созданы многие десятки принципиально новых автоматических и автоматизированных систем и комплексов для ВМФ нашей страны. Эти разработки, в большинстве своём, явились достижениями на уровне лучших образцов отечественной и зарубежной техники.

Научные достижения работников предприятия позволили впервые в отечественной и мировой практике создать систему управления ракет с подводным стартом (система управления ПКР «Аметист» к.т.н. В.С. Богданов, В.И. Смирнов), создать систему управления статически неустойчивым объектом (ПКР «Гранит», заместитель главного конструктора к.т.н. В.Р. Андриевский), создать систему управления залпом ракет, автономно, без участия оператора, решающую задачу избирательного поражения целей, в комплексах ПКР «Гранит», «Вулкан», «Оникс». Достойный вклад в создание уникальных систем управления ПКР внесли доктора технических наук Е.В. Ельяшкевич, Ю.Ф. Подоплёкин, О.С. Селивохин, О.Г. Мальцев; кандидаты технических наук А.С. Подвальных, М.А. Ермолина, ведущий инженер Ю.М. Гуляев и др.

Отработанная система проектирования и изготовления специальных вычислительных

средств и сложных алгоритмов управления в реальном масштабе времени (разработчики бортовых приборов и стендового оборудования В.Г. Меркин, П.В. Чистяков, А.А. Вершинин, к.т.н. А.М. Конобасов и др.), больших комплексов корабельной аппаратуры системы управления ПКР (разработчики: директор научно-производственного комплекса Д.С. Смирнов и С.Н. Воронцов) обеспечили реализацию самых эффективных и надёжных способов реализации программно-математического обеспечения систем управления ПКР (директор НПК — главный конструктор А.М. Чуманов) [1, 2].

С начала XXI века преобладающим направлением развития методов улучшения качества систем автоматического управления века становится использование методов искусственного интеллекта [28, 29]. На нашем предприятии возглавляет научное направление применения методов искусственного интеллекта для решения задач селекции (распознавания) цели по совокупности её признаков на фоне естественных и искусственных помех С.Г. Толмачев — начальник НИЛ обеспечения инновационных разработок АО «Концерн «Гранит-Электрон» (рис. 8). Он проводит научно-технические семинары в рамках 5-го научного отделения РАН, секции «Приборное оснащение кораблей и судов НТО судостроителей», поставил и читает курсы лекций: «Основы искусственного интеллекта» и «Представление знаний в информационных системах» для студентов и магистрантов, ведёт практические занятия со студентами и магистрантами, руководит их выпускными работами



Рис. 8. Сергей Геннадьевич Толмачев, к.т.н., начальник НИЛ АО «Концерн «Гранит-Электрон»

в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, ГУАП и СПбПУ Петра Великого.

Концерн «Гранит-Электрон» имеет статус Федерального научно-производственного центра. В Концерн «Гранит-Электрон» собран большой научно-технический коллектив, в котором в разное время работали более 20 докторов технических наук и сотни кандидатов технических наук.

Научные школы выдающихся учёных, работавших на нашем предприятии: академика РАН Е.П. Попова — многогранного учёного в области систем управления движущимися объектами, д.т.н., профессора БГТУ А.Т. Барабанова — создателя аналитической теории самонаведения; д.т.н., профессора Ю.М. Козлова — одного из основоположников теории самонастраивающихся систем навигации летательных аппаратов, д.т.н. профессора Е.И. Хлыпало и их учеников, предложивших нелинейные динамические корректирующие устройства и разработавших теорию расчёта систем автоматического управления с такими устройствами, принесли заслуженное признание высокому научному уровню коллектива.

Ведущие учёные предприятия всегда оказывали помощь высшим учебным заведениям Санкт-Петербурга, обеспечивая обучение студентов новым, актуальным для их практической деятельности дисциплинам теории управления и технической кибернетики (д.т.н., профессора А.Т. Барабанов, Ю.М. Козлов, С.Н. Шаров, Ю.С. Александров и С.Ф. Фёдоров, к.т.н., доценты С.Г. Толмачев, А.А. Александров, А.Г. Юрескул в БГТУ «ВОЕНМЕХ»; д.т.н., профессора А.Г. Варжапетян, Г.А. Коржавин, Ю.Ф. Подоплёкин, А.Н. Синяков, Р.И. Сольнищев, Е.И. Хлыпало; к.т.н., доценты Ю.П. Иванов, И.В. Филатов, А.А. Мамаев в ГУАП; д.т.н., профессора С.Е. Душин, В.П. Калявин, А.З. Киселёв в СПбЭТУ(ЛЭТИ).

Сотрудничество АО «Концерн «Гранит-Электрон» с ведущими техническими университетами Санкт-Петербурга, Российской академией ракетных и артиллерийских наук, Российским научно-техническим обществом судостроителей позволяет успешно подхватывать современные тенденции развития теории автоматического управления и технической кибернетики, что помогает АО «Концерн «Гранит-Электрон» удерживать передовые позиции и на экспортном

рынке в области создания сложных информационно-управляющих систем, входящих в комплексы приборов управления радио-электронных средств и ракетного вооружения морского и наземного базирования, обеспечивая надёжную оборону морских границ и защиту национальных интересов России на всём мировом океане [1, 2].

Литература

1. ЦНИИ «Гранит». Исторический очерк. Часть VI / под научной редакцией В.В. Павлова. — Л.: ЦНИИ «Гранит». 1988. 99 с.
2. АО «Концерн «Гранит-Электрон»: страницы истории. Редакционный совет АО «Концерн «Гранит-Электрон». — СПб: ООО «Аграф». 2011. 272 с.
3. Подоплёкин Ю.Ф., Шаров С.Н. Истоки развития теории автоматического управления и технической кибернетики в ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» История развития информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде) / под ред. чл.-корр. РАН Р.М. Юсупова. — СПб: Наука. 2010. С. 70–93.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука. 1975. 767 с.
5. Хлыпало Е.И. Нелинейные системы автоматического регулирования. — Л.: Энергия. 1967. 451 с.
6. Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах. — Л.: Энергия. 1967. 344 с.
7. Зельченко В.Я., Шаров С.Н. Нелинейная коррекция автоматических систем. — Л.: Судостроение. 1981. 168 с.
8. Зельченко В.Я., Шаров С.Н. Расчёт и проектирование автоматических систем с нелинейными динамическими звеньями. — Л.: Машиностроение. 1986. 174 с.
9. Вавилов А.А. Частотные методы расчёта нелинейных систем. — Л.: Энергия, 1970. 323 с.
10. Козлов Ю.М., Юсупов Р.М. Беспорядочные самонастраивающиеся системы. — М.: Наука. 1969. 456 с.
11. Козлов Ю.М. Адаптация и обучение в робототехнике. — М.: Наука. 1990. 455 с.
12. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем автоматического управления. — Л.: Энергия. 1969. 526 с.

13. Хлыпало Е.И., Подвальных А.С., Шаров С.Н. Применение некоторых типов нелинейных динамических корректирующих устройств для синтеза квазиинвариантных автоматических систем. АН СССР, Труды 4 все-союзного совещания по теории инвариантности и теории чувствительности. — Киев. 1971. С. 148–157.
14. Подвальных А.С., Шаров С.Н. Исследование вынужденных колебаний электромеханического привода с люфтом и инерционной нагрузкой. — М: Электричество. 1975. № 12. С. 34–37.
15. Шаров С.Н., Зонис Е.М., Зонис Ю.М. Исследование динамики электропривода с учётом люфта и сухого трения. — М.: Электричество. 1983. № 7. С. 68–74.
16. Шаров А.Н., Шаров С.Н. Автоматизация проектирования оптимальных нелинейных аналоговых устройств систем управления с учётом чувствительности к параметрам элементов системы. АН СССР, сборник «Вопросы кибернетики», Теория чувствительности и её применение. — М. 1977. Вып. 31. С. 124–130.
17. Шаров А.Н., Шаров С.Н. О возможности разрывов и скачков функций чувствительности гармонически линеаризованных нелинейных корректирующих устройств. АН СССР, сборник «Вопросы кибернетики». Теория чувствительности и её применение. — М: 1977. Вып. 31. С. 117–124.
18. Лапин В.А., Синяков А.Н., Филатов И.В., Хлыпало Е.И. Чувствительность нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах со случайными воздействиями. АН СССР, сборник «Вопросы кибернетики». Адаптивные системы управления. — М. 1979. Вып. 63. С. 179–189.
19. Зельченко В.Я., Пчелко В.Л., Шаров С.Н. Чувствительность гармонически линеаризованных систем. АН СССР, сборник «Вопросы кибернетики». Адаптивные системы управления. — М. 1979. Вып. 63. С. 197–206.
20. Филатов И.В., Шаров С.Н. Исследование параметрической чувствительности нелинейных динамических корректирующих устройств. Изв. АН СССР. «Техническая кибернетика». 1977. № 2. С. 192–195.
21. Вавилов А.А., Рубахин Р.А., Шаров С.Н. Некоторые особенности анализа параметрической чувствительности частотных характеристик исполнительных механизмов АН СССР, ДВНЦ Труды Всесоюзной школы-семинара по теории чувствительности систем управления. 1979. Т. 1.
22. Андриевский В.Р., Шаров С.Н. Нелинейная коррекция в системах управления летательных аппаратов // Известия РАН. 2004. Вып. 4. С. 66–75.
23. Шаров С.Н. Модели факторов для обоснования развития систем управления беспилотных летательных аппаратов. Сб. статей «Проблемы создания радиоэлектронного вооружения и систем управления кораблей». Книга 3. Перспективные информационные технологии / под ред. С.П. Мастина и С.Н. Шарова. СПб: ОАО «Концерн «Гранит-Электрон». 2007. С. 20–27.
24. Бажин С.А., Герасимова Т.С., Козятинский В.Н., Лентовский В.В., Шаров С.Н. Отражательные характеристики объектов и покрытий на длине волны 1,06 мкм. — СПб: ЦНИИ «Гранит». 1993. 88 с.
25. Шаров С.Н. Основы проектирования информационно-измерительных приборов систем управления движущимися объектами. Учебное пособие. — СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 1998. 98 с.
26. Посадка беспилотных летательных аппаратов на суда: проблемы и решения. Авторы: Александров А.А., Дворяшин М.С., Морозов В.В., Петухова Е.С., Подоплёкин Ю.Ф., Соловьев А.В., Соловьева В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н., Яцковская И.М. / под общей редакцией Шарова С.Н. — СПб: Судостроение. 2014. 192 с.
27. Шаров С.Н. Информационные каналы систем управления беспилотных летательных аппаратов. — СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ», АО «Концерн «Гранит-Электрон», РАН. 2018. 144 с.
28. Шаров С.Н. Информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. — СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 2007. 256 с.
29. Шаров С.Н. Локационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. — СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 2009. 312 с.