

# РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Б.Т. Поляк

Рассмотрена история развития теории автоматического управления в Институте проблем управления с момента его создания по настоящее время. Упомянуты крупнейшие ученые Института, внесшие большой вклад в становление науки об управлении. Кратко обсуждены современные направления исследований.

**Ключевые слова:** автоматическое регулирование, теория управления, линейные системы, нелинейные системы, дискретные системы, релейные системы, оптимальное управление, адаптивные системы, робастность.

## ВВЕДЕНИЕ

Институт автоматики и телемеханики (ИАТ) был основан в 1939 г. во многом для осуществления автоматизации производства, развития телемеханики и других прикладных целей. Однако он был создан как институт Академии наук, и руководству было совершенно ясно, что прогресс в решении практических задач невозможен без развития теории на достаточно высоком уровне.

В первые же годы существования Института (и даже ранее, когда он функционировал как Комиссия по телемеханике и автоматике) его сотрудники публикуют работы по теории автоматического регулирования (в основном в журнале «Автоматика и телемеханика» — первом в мире журнале по этой тематике). Достаточно отметить два таких результата. В 1938 г. появляется статья А.В. Михайлова о графическом критерии устойчивости линейных систем (знаменитый «годограф Михайлова») [1]. В 1939 г. Г.В. Щипанов публикует статью [2] об инвариантном регуляторе, позволяющем полностью подавить произвольные внешние возмущения. Работа вызывает бурю возмущения, ее критикуют в журнале «Большевик», все это грозит Институту закрытием. Однако проблема инвариантности оказывается глубокой, после войны ей посвящают несколько специальных конференций и множество публикаций. Последняя такая конференция прошла в Институте проблем управления (ИПУ) в 2008 г. (опубликованы ее труды [3]), о драматической истории автора теории инвариант-

ности и ее последующем развитии можно прочесть в сборнике [4]. Большую роль в развитии математической теории управления в ИАТе сыграло приглашение в Институт опального академика Н.Н. Лузина, изгнанного из университета (о постыдной травле основателя московской математической школы сохранились материалы, они опубликованы в книге [5]).

После войны в Институте происходили знаменитые семинары А.А. Андропова, которые во многом определили круг научных интересов участников семинара, среди которых — А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин, А.В. Михайлов, М.А. Айзерман, М.В. Мееров, А.Я. Лернер, Б.Я. Коган, В.В. Солодовников и многие другие. Эти молодые ученые с огромным энтузиазмом принялись за решение теоретических задач и на многие годы определили высочайший уровень теоретических исследований в Институте. Ниже я остановлюсь (поневоле кратко) лишь на некоторых направлениях исследований.

## 1. ТЕОРИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Одним из первых в Институте стало развиваться новое направление — теория дискретных систем. Фактически, такие системы возникли ещё на заре развития техники автоматического регулирования — достаточно вспомнить прерывистые и релейные регуляторы паровых машин, импульсную радиосвязь, радиолокацию. Однако адекватной теории подобных управляющих устройств тогда не существовало.



С 1948 г. Я.З. Цыпкин начал разрабатывать единый подход к описанию дискретных систем (первоначально они назывались прерывистыми). Этот подход был основан на идее дискретного преобразования Лапласа ( $Z$ -преобразования) и позволил синтезировать цельный математический аппарат, подобный операторному методу описания непрерывных систем. Это позволило ввести для дискретных систем стандартные понятия передаточной функции, частотной характеристики и им подобные и обобщить классические критерии устойчивости Найквиста и Михайлова на случай дискретных систем. Полученные на этом этапе результаты были подытожены в монографии Я.З. Цыпкина [6], вышедшей в 1951 г.

Дальнейшее развитие теории импульсных систем шло по пути разработки частотных методов исследования как при детерминированных, так и случайных внешних воздействиях. Кроме того, удалось установить специфическое свойство дискретных систем — существование процессов конечной длительности, в теории линейных непрерывных систем попросту невозможных. Этот факт лёг в основу фундаментального понятия управляемости, введённого Р. Калманом.

Все эти результаты нашли отражение в книгах [7, 8].

Следующим шагом стало исследование оптимальных дискретных систем. Теория таких систем (линейно-квадратичная оптимизация, условия экстремума, численные методы) была развита в работах Я.З. Цыпкина, Л.И. Розоноэра, А.И. Проппа, А.Г. Бутковского в 1960-е гг.

Впоследствии теория дискретных систем стала удобным аппаратом для исследования адаптивных и обучающихся систем управления. Значительно позже, в 1990-е гг., дискретные системы вновь привлекли внимание исследователей Института проблем управления в связи с проблемой робастности. Были построены графические критерии робастной устойчивости таких систем и методы синтеза робастных регуляторов для них (Я.З. Цыпкин, Б.Т. Поляк).

## 2. РЕЛЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ

К работам по дискретным системам тесно примыкают исследования по релейным системам. В отличие от дискретных систем, в релейных квантование производится не по времени, а по уровню управления. Такие системы неизбежно являются нелинейными, и в них могут возникать свойственные нелинейным задачам эффекты, исследовавшиеся ещё в пионерских работах А.А. Андропова [9]. Эти работы были продолжены М.А. Айзерманом, В.В. Петровым, Г.М. Улановым, В.Ю. Рутковским. Систематическая теория релейных систем

управления была создана Я.З. Цыпкиным; его книга [10] вышла в свет в 1955 г. и была переведена на немецкий, японский, испанский и английский языки. Яков Залманович разработал конструкцию «годографа Цыпкина» — графический частотный метод для изучения вынужденных колебаний в замкнутых релейных системах. В целом для релейных систем были созданы методы расчёта, которые по своей эффективности оказались близки к тем, что применялись в теории линейных систем. За работы по теории импульсных и релейных систем Я.З. Цыпкину в 1960 г. была присуждена Ленинская премия.

## 3. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Релейное управление может возникнуть и в линейных оптимальных задачах при наличии ограничений на управление. Впервые этот факт был установлен для одного частного случая А.А. Фельдбаумом в 1949 г. [11], позже им же и А.Я. Лернером были получены более общие результаты того же типа (например, знаменитая «теорема об  $n$ -интервалах» [12]). Эти работы проложили путь к созданию общей теории оптимального управления.

Первоначально исследовались линейные системы и задачи быстродействия для них. Довольно скоро стало ясно, что можно построить теорию оптимальных систем и для нелинейных задач и более общих критериев оптимальности, а также более общих ограничений на управление. Взаимодействие А.А. Фельдбаума с математиками из Математического института им. В.А. Стеклова привело последних к созданию общей теории оптимального управления в форме «принципа максимума Л.С. Понтрягина» [13]. Большую роль в разъяснении этих математических результатов для инженеров сыграл цикл статей Л.И. Розоноэра 1959 г. [14], в них он дал и более простое доказательство принципа максимума, обобщил его на ряд других задач и продемонстрировал его использование в приложениях.

Последующее развитие оптимального управления шло в рамках описания систем в терминах пространства состояний, введённого Р. Калманом. Значительным шагом явилось создание «аналитического конструирования регуляторов» А.М. Лётовым [15]; сейчас более употребителен термин «линейно-квадратичный регулятор», использовавшийся в работах американских ученых Р. Беллмана и Р. Калмана. Оказалось, что для случая линейной системы, квадратичного критерия оптимальности и отсутствия ограничений на управление оптимальное программное управление записывается в форме линейной обратной связи, общепринятой в «инженерной» теории управления. Это перекинуло мостки между двумя теориями.



Еще в 1960-е гг. были предложены важные обобщения теории оптимального управления. Так, А.Г. Бутковский развил теорию для случая распределенных систем [16]. В.С. Пугачев изучал стохастические постановки задачи оптимального управления [17]. В.Ф. Кротов предложил технику достаточных условий оптимальности («функции Кротова») для построения оптимального управления (более подробно об этой технике можно прочесть в книге [18]).

#### 4. СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

В линейных системах обычно применяется управление в форме линейной обратной связи, однако возможности такого управления (и в смысле борьбы с неопределенностью системы, и в смысле качества системы) весьма ограничены. В 1960-е гг. С.В. Емельяновым был предложен новый закон управления, когда линейная обратная связь различна в разных областях пространства состояний. Такие системы с переменной структурой обладают большими возможностями, их изучение подытожено в книге [19]. К этим исследованиям присоединился В.И. Уткин [20]. В 1972 г. С.В. Емельянов и В.И. Уткин были удостоены Ленинской премии за работы по данной тематике. В настоящее время эта техника нашла множество практических приложений и очень популярна за рубежом; в нашем институте исследования в этом направлении ведут В.А. Уткин и С.А. Краснова [21].

#### 5. НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ

Линейная теория является лишь приближением в описании реальных объектов управления, которые практически всегда нелинейны. Поэтому в теории автоматического регулирования, начиная с самых первых ее шагов, существовал интерес к нелинейным системам и способам управления ими. К этому следует добавить существование первоклассной школы по нелинейным колебаниям, возглавляемой А.А. Андроновым, и технику исследования нелинейных систем, заложенную А.М. Ляпуновым. Неудивительно, что в ИАТе уже в первые послевоенные годы были осуществлены первоклассные исследования в области нелинейных систем. Здесь в первую очередь следует выделить знаменитую задачу абсолютной устойчивости. Ее формулировка звучит весьма современно — изучается устойчивость не индивидуального объекта, а целого класса систем с данной характеристикой нелинейности (например, секторной). Иначе говоря, это проблема робастной устойчивости. Большую роль сыграла гипотеза М.А. Айзермана (1948 г.) о критериях абсолютной устойчивости и впоследствии монография [22]. Эти исследования

были успешно продолжены Е.С. Пятницким. Он применял продуктивный вариационный подход к абсолютной устойчивости, исследовал управление механическими системами. Посмертно его работы собраны в книге [23]. В настоящее время тематика абсолютной устойчивости с использованием нового аппарата (в частности, линейных матричных неравенств и обобщений  $S$ -теоремы) развивается Л.Б. Рапопортом и его коллегами по лаборатории. Им удалось применить эти методы для описания области притяжения нелинейных систем, см., например, статью [24].

Другие проблемы, относящиеся к нелинейным системам, разрабатывались М.А. Красносельским и сотрудниками его лаборатории в 1970—1980-е гг. В частности, была построена теория систем с гистерезисной нелинейностью и проведена их классификация (совместно с А.Б. Покровским) [25]. Исследовались условия возникновения периодических режимов в нелинейных системах. Ученик М.А. Красносельского Н.А. Бобылев в цикле работ совместно с С.В. Емельяновым и С.К. Коровиным развил геометрические методы в вариационных задачах [26].

Под руководством В.П. Жукова в его лаборатории сейчас ведутся работы по критериям асимптотической устойчивости нелинейных систем; Э.М. Солнечный получил результаты по управлению системами с распределенными параметрами.

Для нелинейных систем характерно возникновение хаотических режимов; способы управления хаосом предложены Б.Т. Поляком [27].

#### 6. АДАПТИВНЫЕ И ОБУЧАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

Уже более 50 лет назад теоретики управления понимали, что, как правило, точное описание системы управления недоступно, и неизбежные неопределенности параметров и характера динамики системы приводят к необходимости синтеза управлений в условиях неопределенности. В рассматриваемой ситуации наиболее естественно воспользоваться стратегией адаптивного управления, когда одновременно происходит и уточнение описания системы, и управление ею. Наиболее глубоко идея подобного подхода была воплощена в концепции дуального управления А.А. Фельдбаума. По логике Фельдбаума, управление имеет двойственную природу: с одной стороны, оно является пробным воздействием, предназначенным для изучения управляемой системы, а с другой — решает некоторую задачу оптимизации. Влияние, которое оказала теория дуального управления на современную теорию управления, трудно переоценить. Недаром цикл статей А.А. Фельдбаума, вышедший в 1960—1961 гг. [28], был признан специальной комиссией ИФАК одной из «вех» науки об управле-



нии в XX в. Однако непосредственное формирование оптимального дуального управления возможно лишь в очень редких случаях, вот почему внимание исследователей сконцентрировалось на применении более простых стратегий — стратегий адаптивного управления. Например, в работах В.Ю. Рутковского и его сотрудников применялся удобный метод эталонной модели.

Другая волна исследований по адаптивным и обучающимся системам была связана с тем, что ещё в конце 1950-х гг. появились (в рамках науки, которая тогда называлась «кибернетика») работы по распознаванию образов и обучению автоматических систем. В Институте эти работы развивались по двум направлениям. С одной стороны, М.А. Айзерман и его сотрудники Л.И. Розоноэр и Э.М. Браверман разработали модель распознавания, связанную с разделением компактных множеств точек в пространстве образов, и предложили для решения задачи метод потенциальных функций. Эти исследования были позже подытожены в их монографии [29], вышедшей в 1970 г. С другой стороны, А.Я. Лернером и В.Н. Вапником для решения той же задачи распознавания был разработан метод «обобщённого портрета». Впоследствии этот результат лёг в основу очень глубоких исследований В.Н. Вапника и А.Я. Червоненкиса, связанных с решением проблемы восстановления зависимостей по экспериментальным данным [30, 31].

Родство задач распознавания и обучения с общими проблемами теории адаптации было отмечено Я.З. Цыпкиным в середине 1960-х гг. Он первым понял, что общим математическим аппаратом для их исследования могут служить рекуррентные стохастические алгоритмы (в частности, уже известный в статистике метод стохастической аппроксимации). Оказалось, что в этих рамках могут быть рассмотрены столь разнообразные задачи, как оценивание параметров, идентификация, распознавание образов, стохастическая оптимизация и ряд других базовых задач теории управления. Первоначально эти идеи вызвали острую дискуссию; не сразу было осмыслено их соотношение с классическими статистическими методами и методом потенциальных функций. Позднее, после выхода из печати книг Я.З. Цыпкина [32, 33] метод стохастической аппроксимации стал общепризнанным инструментом описания и исследования рекуррентных адаптивных процедур. В работах Я.З. Цыпкина и Б.Т. Поляка 1970—1980-х гг. была строго исследована сходимости и скорость сходимости адаптивных алгоритмов и предложены оптимальные (по скорости сходимости) версии алгоритмов [34]. Те же авторы предложили робастные варианты алгоритмов, сохраняющие работоспособность при недостаточной информации о вероятностных свойствах помех [35].

## 7. РОБАСТНЫЕ СИСТЕМЫ

Как уже отмечалось, основная идея адаптивных методов управления заключается в одновременном решении двух задач: исследовании системы и управлении ею во имя достижения некоторой заданной цели. Однако встречаются ситуации, когда идентификация системы невозможна или нежелательна, и тогда необходимо применять методы робастного управления, т. е. управления в условиях неопределённости. По существу, уже сам классический принцип обратной связи имеет своей целью устранение неизбежных неопределённостей в функционировании и, соответственно, описании системы. Теория робастного управления по-настоящему заинтересовала учёных сравнительно поздно, в 1990-е гг., хотя некоторые фундаментальные идеи робастности присутствовали в теории управления с самого ее зарождения. Первые результаты в этой области относились к анализу систем с неопределённостями — удалось построить робастные аналоги основных критериев устойчивости линейных систем. Так, например, робастный вариант критерия Михайлова позволяет проверить устойчивость интервального семейства полиномов («годограф Цыпкина—Поляка»). Эти результаты были обобщены на многие другие проблемы анализа робастной устойчивости (критерий Найквиста, дискретные системы, нелинейно входящие параметры и др.) Серьёзные результаты были получены и в задачах робастного синтеза (т. е. проектирования регуляторов для робастных систем). В книге Б.Т. Поляка и П.С. Щербакова [36] описываются основные итоги этих исследований.

## 8. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ

В 1970-е гг. казалось, что классическая теория линейных систем полностью завершена, и ждать здесь каких-то новых прорывов не приходится. Впоследствии оказалось, что это совершенно не так.

Прежде всего, как уже отмечалось, возникла робастная теория линейных систем. Мы говорили ранее о задачах с параметрической неопределённостью; другой важный класс систем — с частотной неопределённостью. Здесь в 1980-е гг. в работах западных ученых (Зеймс, Гловер, Френсис, Дойл и др.) была создана чрезвычайно плодотворная теория  $H_\infty$ -робастности. Эта же  $H_\infty$ -теория оказалась очень полезной при постановке задач оптимального управления ( $H_\infty$ -оптимизация) и при решении стохастических задач управления. В нашем институте первыми энтузиастами новой теории стали А.С. Позняк и А.П. Курдюков. В частности, еще в 1991 г. А.С. Позняк выпустил бро-





шюру о  $H_\infty$ -теории, по-видимому, первую в нашей стране [37]. Ныне А.П. Курдюков со своими учениками развивает анизотропный подход в рамках этой теории [38].

Далее, некоторые старые идеи обрели новое дыхание. Так, восходящая еще к И.А. Вышнеградскому (1876 г.) задача выделения области устойчивости линейной системы в пространстве двух параметров была успешно решена в рамках так называемого  $D$ -разбиения (Неймарк, 1948). Впоследствии оказалось, что эта задача важна как при синтезе регуляторов низкого порядка, так и при анализе робастной устойчивости. В работах молодых исследователей из ИПУ Е.Н. Грязиной и А.А. Трембы удалось значительно развить теорию  $D$ -разбиения. Выяснена геометрия области устойчивости для непрерывных и дискретных систем, исследован матричный аналог задачи, предложено обобщение на случай большего чем два числа параметров, построены робастные варианты  $D$ -разбиения и его аналог для  $H_\infty$ -оптимизации [39].

Затем была развита новая техника линейных матричных неравенств (ЛМН) для анализа и синтеза линейных систем. Основы этого подхода были заложены еще А.М. Ляпуновым; В.А. Якубович первым записал некоторые задачи управления на языке ЛМН. Однако лишь после выхода в 1994 г. монографии американского ученого С. Бойда с соавторами техника ЛМН превратилась в удобный и общепринятый аппарат исследования разнообразных задач управления. Ситуация облегчалась тем, что в работах А. Немировского и Ю. Нестерова были предложены эффективные методы внутренней точки для решения ЛМН. Написанные на их основе программные средства сделали решение ЛМН алгоритмически удобным и доступным средством. На основе этого подхода удалось (Б.Т. Поляк, С.А. Назин, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков) решить важную задачу подавления постоянно действующих возмущений. Эта задача стояла с момента возникновения теории линейных систем, но ее удавалось решить лишь для некоторых типов возмущений (единичный скачок, гармонические возмущения, гауссовские помехи и т. д.) Для наиболее распространенного класса произвольных ограниченных возмущений проблема оставалась открытой. Здесь следует отметить пионерские исследования Б.В. Булгакова (1946 г.) по анализу таких систем и их обобщения в трудах Ф.Л. Черноушко и А.Б. Куржанского. Однако задача синтеза регуляторов при наличии подобных возмущений представляла большие трудности. Развита в лаборатории № 7 техника инвариантных эллипсоидов в сочетании с аппаратом ЛМН позволила преодолеть эти трудности [40, 41].

Наконец, весьма плодотворной для решения классических трудных задач теории управления оказалась идея рандомизации. К их числу относятся проблема синтеза регуляторов низкого порядка, проблема статической стабилизации по выходу, робастная стабилизация при матричной неопределенности и многие другие. Систематические аналитические или численные методы решения здесь отсутствуют, тем не менее, все эти задачи очень важны. Рандомизированные алгоритмы (типа методов Монте-Карло или случайного поиска) позволяют в ряде случаев находить решение. Так, построены способы генерации случайных устойчивых полиномов и матриц, методы генерации случайных стабилизирующих регуляторов, рандомизированные методы решения ЛМН и задач оптимизации. Все эти подходы используются в работах Б.Т. Поляка, П.С. Щербакова, Е.Н. Грязиной и Я.И. Петрикевич для решения разнообразных задач управления линейными системами [42].

## 9. ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Помимо упомянутых основных областей теории управления, есть ряд направлений исследований в нашем институте, выходящих за их рамки. Так, А.Г. Бутковский разрабатывает единую геометрическую теорию управления, которая позволяет взглянуть на всю тематику управления с самых общих и абстрактных позиций [43]. В его лаборатории продолжается и исследование методов подвижного управления в задачах с распределенными параметрами [44]. В.Ф. Кротов использует управленческую идеологию для описания проблем квантовой физики [45].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

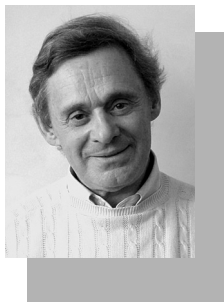
Разумеется, в этом обзоре мы были лишены возможности дать сколько-нибудь полную картину теоретических исследований в Институте проблем управления. Тем не менее, даже по вышеприведенному краткому описанию можно заключить, что хотя эпоха бурного развития теории автоматического управления в нашем институте позади (ее пик пришелся на 1950—1960-е гг.), ее традиции живы и развиваются поныне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В. Методы гармонического анализа в теории регулирования // Автоматика и телемеханика. — 1938. — № 3.
2. Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. — 1939. — № 1. — С. 4—37.



3. *70 лет теории инвариантности* / Ред. С.Н. Васильев. — М.: Ред. ЛКИ, 2008.
4. *Шипанов и теория инвариантности* / Ред. З.М. Лезина, В.И. Лезин. — М.: Физматлит, 2004.
5. *Дело академика Н.Н. Лузина* / Ред. С.С. Демидов, Б.В. Левшин. — СПб.: РХГИ, 1999.
6. *Цыпкин Я.З. Переходные и установившиеся процессы в импульсных системах.* — М.: Госэнергоиздат, 1951.
7. *Цыпкин Я.З. Теория импульсных систем.* — М.: Физматгиз, 1958.
8. *Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем.* — М.: Физматгиз, 1963.
9. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний.* — М.: Физматгиз, 1959.
10. *Цыпкин Я.З. Теория релейных систем автоматического регулирования.* — М.: Гостехиздат, 1955.
11. *Фельдбаум А.А. Простейшие релейные системы автоматического регулирования* // Автоматика и телемеханика. — 1949. — Т. 10, № 4.
12. *Фельдбаум А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования* // Автоматика и телемеханика. — 1953. — Т. 14, № 6.
13. *Математическая теория оптимальных процессов* / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. — М.: Наука, 1961.
14. *Розоноэр Л.И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в теории оптимальных систем, 1—3* // Автоматика и телемеханика. — 1959. — Т. 20, № 10—12.
15. *Лётов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов, 1 — 4* // Там же. — 1960. — Т. 21, № 4 — 6; 1961. — Т. 22, № 4.
16. *Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами.* — М.: Наука, 1965.
17. *Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления.* — М.: Физматгиз, 1960.
18. *Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления.* — М.: Физматгиз, 1973.
19. *Емельянов С.В. Системы автоматического регулирования с переменной структурой.* — М.: Наука, 1967.
20. *Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой.* — М.: Наука, 1974.
21. *Уткин В.А. Краснова С.А. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем.* — М.: Наука, 2006.
22. *Айзерман М.А., Гантмахер Ф.Р. Абсолютная устойчивость нелинейных регулируемых систем.* — М.: Изд. АН СССР, 1963.
23. *Пятницкий Е.С. Избранные труды. Теория управления.* — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1; 2005. — Т. 2.
24. *Рапопорт Л.Б., Морозов Ю.В. Оценка области притяжения инвариантного множества в задаче управления колесным роботом* // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 11. — С. 48—61.
25. *Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом.* — М.: Наука, 1983.
26. *Бобылев Н.А., Емельянов С.В., Коровин С.К. Геометрические методы в вариационных задачах.* — М.: Магистр, 1998.
27. *Поляк Б.Т. Стабилизация хаоса с помощью прогнозирующего управления* // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 11. — С. 99—112.
28. *Фельдбаум А.А. Теория дуального управления, 1 — 4* // Там же. — 1960. — Т. 21, № 9, 11; 1961. — Т. 22, № 1, 3.
29. *Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциальных функций в теории обучения машин.* — М.: Наука, 1970.
30. *Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов.* — М.: Наука, 1974.
31. *Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным.* — М.: Наука, 1979.
32. *Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах.* — М.: Наука, 1968.
33. *Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем.* — М.: Наука, 1970.
34. *Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Оптимальные псевдоградиентные алгоритмы адаптации* // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 8. — С. 74—81.
35. *Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Робастные псевдоградиентные алгоритмы адаптации* // Там же. — 1980. — № 10. — С. 91—97.
36. *Поляк Б.Т., Щербakov П.С. Робастная устойчивость и управление.* — М.: Наука, 2002.
37. *Позняк А.С. Основы робастного управления ( $H_\infty$ -теория).* — М.: МФТИ, 1991.
38. *Курдюков А.П., Максимов Е.А. Робастная устойчивость линейных дискретных систем с неопределенностью, ограниченной по анизотропийной норме* // Доклады РАН. — 2005. — Т. 400, № 2. — С. 178—180.
39. *Грязина Е.Н., Поляк Б.Т., Тремба А.А. Современное состояние метода  $D$ -разбиения* // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 12. — С. 3—40.
40. *Назин С.А., Поляк Б.Т., Топунов М.В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов* // Там же. — 2007. — № 3. — С. 106—125.
41. *Поляк Б.Т., Топунов М.В. Подавление ограниченных внешних возмущений: управление по выходу* // Там же. — 2008. — № 5. — С. 72—90.
42. *Polyak B.T., Gryazina E.N. Hit-and-Run: New Design Technique for Stabilization, Robustness and Optimization of Linear Systems / 17th World IFAC Congress, Seoul, July 2008.* — P. 376—380.
43. *Бабичев А.В., Бутковский А.Г., Похйолайнен С. К единой геометрической теории управления.* — М.: Наука, 2001.
44. *Кубышкин В.А., Финягина В.И. Подвижное управление в системах с распределенными параметрами.* — М.: СИНТЕГ, 2005.
45. *Кротов В.Ф. Оптимальное управление квантовыми системами* // Доклады РАН. — 2008. — Т. 423, № 3. — С. 316—319.



**Поляк Борис Теодорович** — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией им. Я.З. Цыпкина ИПУ, профессор МФТИ. Председатель секции «Теория автоматического управления» Ученого совета ИПУ. Автор 4-х монографий, 180-ти статей в журналах и свыше 150-ти докладов на российских и международных конференциях. Основные работы — по теории управления и оптимизации. Зам. главного редактора журнала «Автоматика и телемеханика» и член редколлегий 5-ти международных журналов. Лауреат премии им. А.А. Андропова РАН, премий им. В.С. Кулебакина, А.М. Лётова, А.А. Фельдбаума, Я.З. Цыпкина ИПУ. Почетный член ИФАК (IFAC Fellow). Работал в университетах США, Франции, Италии, Израиля, Тайваня и др. Свыше 20-ти его учеников — кандидаты и доктора наук. ☎(495) 334-88-29, ✉boris@ipu.ru.