

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

История развития теории управления

Введение

Знание истории науки об управлении важно как для более глубокого понимания основных принципов управления, так и для обоснованной экстраполяции ее дальнейшего развития. Эта история позволяет также понять значение взаимосвязей науки об управлении с другими науками. Особое значение имеет прикладная механика, в недрах которой и возникла теория управления. В настоящее время в ходе общего процесса интеграции наук происходит, в частности, обратное воссоединение этих наук.

Такая интеграция вначале произошла в электромеханике и продолжилась в мехатронике. В основе этой интеграции лежит системный подход. Он стал возможен на определенном уровне развития наук и в его основе лежит объективное единство мира и его объектов. Наиболее обобщенное философское понятие этого — единство материального и идеального (духовного) имеет в своей основе физические понятия материи-энергии и информации. Однако в отличие от философии здесь нет попыток противопоставления этих понятий и проблемы, что из них первично, а что вторично. Оба эти понятия органично взаимосвязаны и служат для описания разных аспектов и объектов единого мира.

Теория управления относится к информационным наукам, однако ее нельзя отрывать от материальной, физической стороны управляемых объектов. Понимание этого дает именно знание истории науки об управлении, включая имевшие место попытки сведения науки об управлении к абстрактной теории управления как раздела математики, оторванного от потребностей практики.

Как и история других наук, история теории управления полна драматизма и даже трагических событий, борьбы идей и личностей. Знание этого не только само по себе интересно, но, конечно, и поучительно.

История науки об управлении имеет свою предысторию, которая вначале привела к возникновению автоматики и телемеханики. Следующими этапами

ее развития стали линейная теория автоматического регулирования (ТАР), затем тоже линейная теория автоматического управления (ТАУ), нелинейная ТАУ, теория адаптивного и оптимального управления. Одновременно, отвечая на запросы практики, возникли теория автоматизированных человеко-машинных систем (АСУ), в том числе больших систем, вплоть до государственных и глобальных (энергетических, транспортных, связи), теория систем комплексной гибкой автоматизации, робототехника. Последняя в свою очередь способствовала развитию искусственного интеллекта и интеллектуальных систем управления. В настоящее время в стадии становления находится соответствующий раздел теории управления.

Таков общий ход развития науки об управлении, которая охватывает уже практически все аспекты человеческой деятельности, включая экономику, социальную сферу, государственные и международные структуры. Значение этой науки непрерывно растет по мере усложнения и интенсификации нашей технической цивилизации.

В развитие всех наук первостепенное значение имеет взаимодействие теории и практики. Известны науки, которые предвосхищали практические реализации их результатов и потребности практики. Однако в области управления с самого начала и вплоть до настоящего времени развитие техники предшествует теории, ставя перед наукой конкретные задачи и определяя само направление ее развития. Это обстоятельство определяет последовательность изложения дальнейшего материала.

§ П1.1. История развития техники управления

П1.1.1. История автоматики

Первыми изобретениями человека были наклонная плоскость, клин, рычаг (IV тысячелетие до н. э.). Первые простейшие механизмы — праща, лук со стрелами, блок.

Греческое слово "автомат" означает самодвижущийся механизм. Такие устройства люди начали создавать еще в глубокой древности. Первые письменные сообщения об использовании человеком примитивных автоматических устройств были обнаружены в Вавилонии, где около 2100 лет до н. э. это государство, имея наиболее развитую культуру, располагало разнообразными оригинальными приспособлениями. Вавилоняне создали системы регулирования в ирригации земель для поддержания нужной влажности земли. В своих автоматических системах они впервые применили принцип обратной связи, который затем стал доминирующим при создании автоматических устройств вплоть до нашего времени.

Среди наиболее отметить водяные надежным устр

Сохранились Древнем Египте служб, чтобы гов — покрови жигания "свяш вознесения слу финикийских и

До нас дош на Александри "Пневматика", данные авторо дошел до наше автоматов для

Упадок Еги Римской импер нию достиген Лишь начинае мяться с трудам ранее арабским

В Европе, с своя наука по ветряные мель развитие маш обслуживаемь

Ученые сре по принципу л автоматы, копи

В средние Первые механ мат, предназн мимо собствен ские устройст

В XVIII в. известность п отца и сына 2 возродились н ным направле влечения, а у

Среди наиболее интересных устройств регулирования древности можно отметить водяные часы "Клепсидра", которые были сравнительно точным и надежным устройством того времени и просуществовали вплоть до XVII в.

Сохранились сведения о различных автоматах, которые были до н. э. в Древнем Египте. Эти автоматы использовались жрецами в храмах во время служб, чтобы поражать людей чудесами, подтверждающими могущество богов — покровителей фараонов и самих жрецов. Это были устройства для зажигания "священного" огня, открывания дверей храмов по возгласу жреца, вознесения служителей культа, магов и чародеев, в частности вавилонских, финикийских и хеттских [15].

До нас дошло несколько книг гениального инженера и изобретателя Герона Александрийского (I в. до н. э.) "Механика и грузоподъемные машины", "Пневматика", "Театр автоматов". В них описаны различные в основном созданные автором автоматы. Один такой автомат для продажи "святой воды" дошел до нашего времени как прототип широко используемых аналогичных автоматов для отпуска различных штучных товаров.

Упадок Египта, затем завоевание его Римом и последующий развал самой Римской империи надолго прервали технический прогресс и привели к забвению достижений древности. Только арабы сохранили свою науку и технику. Лишь начиная с конца первого тысячелетия н. э., в Западной Европе знакомятся с трудами давно забытых ученых древности по переводам, сделанными ранее арабскими учеными.

В Европе, в том числе и на основании этих книг, начинает развиваться своя наука по механике, гидравлике, пневматике. Появляются водяные, затем ветряные мельницы, гидравлические молоты, лесопильные рамы. Начинается развитие машиностроения. В эксплуатацию вводятся десятки тысяч машин, обслуживаемых людьми.

Ученые средневековья разрабатывают автоматические устройства, похожие по принципу действия на подобные устройства Древнего Египта. Создаются автоматы, копирующие движения человека, так называемые андронды.

В средние века технический прогресс возглавили мастера-часовщики. Первые механические часы появились еще в IX в. Часы — это первый автомат, предназначенный для действительно важных практических целей. Помимо собственно часов на базе их механизмов стали создаваться автоматические устройства различного назначения, в том числе и автоматы-игрушки.

В XVIII в. достигли расцвета и работы по созданию андрондов. Большую известность получили андронды французского ученого Жака де Вокансона, отца и сына Жак-Дро. И хотя в дальнейшем с появлением электротехники возродились на новом уровне разработки человекоподобных устройств, главным направлением развития автоматике, наконец-то, стали не игрушки и развлечения, а удовлетворение реальных производственных потребностей чело-

века. Этот новый этап в автоматике связан с произошедшей в Европе на рубеже XVIII—XIX вв. промышленной революцией.

П1.1.2. Появление промышленной автоматики

В XVIII в. на смену феодализму пришел промышленный капитализм. Первоосновой и символом этих перемен стал паровой двигатель и многочисленные основанные на нем машины различного назначения. Они потребовали соответствующей автоматики — регуляторов и других подобных устройств. Начали создаваться первые машины, которые вообще не могли без них работать, т. е. уже были рассчитаны на автоматику.

В 1763 г. И. И. Ползунов (1728—1766) изобрел поплавковый регулятор уровня воды в котле созданной им паровой машины.

В 1784 г. Джеймс Уатт (1736—1819) создал тоже для своей паровой машины регулятор скорости на основе датчика скорости в виде центробежного маятника (рис. П1.1). Шпindel 1 маятника связан с валом машины и враща-

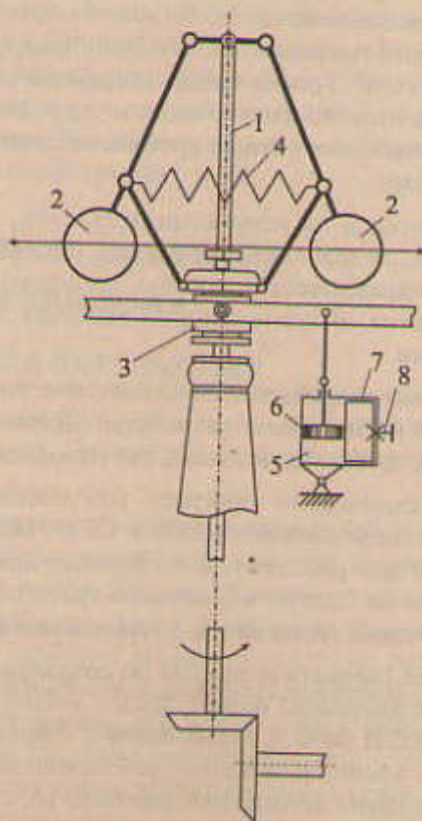


Рис. П1.1. Регулятор скорости паровой машины Д. Уатта

ется со с
вращаюто
силы они
В результ
пропорци

Для га
присоедин
поршня б
ния относ
лом поло
через уста
го трения
мещения

Как и р
рование, т
но муфтой
их мощно
кой засло
заслонкой
цилиндра
лирование

й в Европе на ру-

матики

капитализм. Пер-
ь и многочислен-
Они потребовали
обных устройств,
гли без них рабо-

сковый регулятор

воей паровой ма-
де центробежного
машины и враща-

ется со скоростью, пропорциональной ее скорости. Вместе со шпинделем вращаются подвешенные на шарнирах грузы 2. Под действием центробежной силы они расходятся, поднимая муфту 3. Этому препятствует пружина 4. В результате взаимодействия этих сил величина подъема муфты оказывается пропорциональной скорости вращения.

Для гашения колебаний маятника при изменении скорости к его муфте присоединен катаракт (демпфер) 5. Сила сопротивления перемещению его поршня 6 (сила вязкого трения) пропорциональна скорости этого перемещения относительно цилиндра. Это обеспечивается тем, что заполненные маслом полости цилиндра с двух сторон поршня соединены трубкой 7 (байпас) через установочный винт 8, положение которого определяет величину вязкого трения, возникающего при перетекании масла и препятствующего перемещению поршня.

Как и регулятор Ползунова, регулятор Уатта осуществлял прямое регулирование, т. е. заслонка на входе пара в машину перемещалась непосредственно муфтой центробежного маятника. С развитием паровых машин и ростом их мощности возросло и усилие, которое требовалось для передвижения такой заслонки. Это потребовало введения между центробежным маятником и заслонкой гидравлического усилителя в виде золотника и управляемого им цилиндра с поршнем (рис. П1.2). В результате было создано не прямое регулирование.

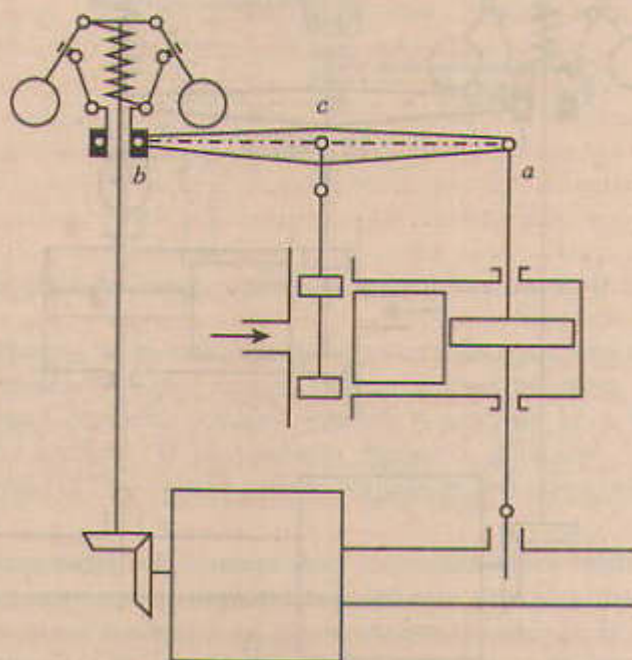


Рис. П1.2. Непрямой регулятор скорости

Дальнейшим развитием системы автоматического регулирования скорости паровых машин стало изобретение изодромного регулятора, обеспечивающего астатическое регулирование скорости. Его схема приведена на рис. П1.3. Вместо жесткой обратной связи между положением поршня гидравлического двигателя и управляющим им золотником как у непрямого статического регулятора на рис. П1.2 здесь введен масляный катаракт 2, названный изодромом (греч. "равнобежный"), т. к. с его помощью обеспечивается астатическое регулирование. При изменении скорости машины происходит смещение муфты маятника b и наклонение рычага относительно точки a , приводящее к смещению золотника и перемещению заслонки впуска пара под действием гидравлического двигателя. Этот процесс совпадает с действием непрямого статического регулятора. Новое положение равновесия наступит под действием пружины 1, когда муфта маятника вернется в исходное положение, соответствующее заданному значению скорости, но при новом положении заслонки и штока гидравлического двигателя. Последнее будет обеспечено за счет медленного смещения поршня катаракта 2 под действием пружины 1. Таким образом, изодром реализует инерционную обратную связь по скорости вместо жесткой в статических непрямах регуляторах.

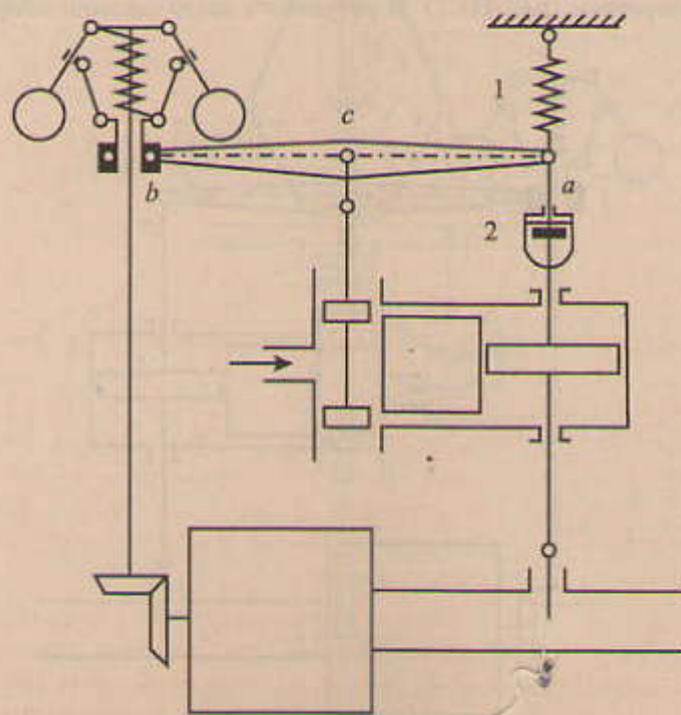


Рис. П1.3. Изодромный регулятор скорости

Описанный регулятор скорости паровых машин, как мы видели, происходило гидро- и пневматическое регулирование скорости. В 1829 г. другой принцип (по возмущению) паровой машины как пружина регулятору, т. е. не жесткая обратная связь по скорости, а инерционная обратная связь по скорости. Для паровых машин они не обладали идеями Понселя.

Рис.

Таким образом, основные принципы регулирования скорости паровых машин начали свое развитие в начале XIX в. (1831—1895 г. А. М. Ляпунов "История паровой машины" (1892).

Дальнейшим развитием паровых машин, паровых двигателей летательных аппаратов и Англии самолета с...

ирования скорости
и, обеспечивающе
дена на рис. П1.3.
и гидравлического
о статического ре
азванный изодром
и астатическое ре
смещение муфты
водящее к смеше
действием гидрав
непрямого стати
т под действием
положение, соответ
положении заслонки
обеспечено за счет
пружины 1. Таким
по скорости вме-

Описанные регуляторы — это основа уже вполне современных систем регулирования с обратной связью, хотя сама их идея появилась и была реализована, как мы знаем, намного раньше. Одновременно с этими разработками происходило развитие гидроприводов и пневмоприводов, а на их основе и гидро- и пневмоавтоматики, которая, начиная еще с Древнего Египта, получила применение во многих областях техники.

В 1829 г. французский механик Ж. В. Понселе (1788—1867) предложил другой принцип регулирования паровых машин — регулирование по нагрузке (по возмущению). На рис. П1.4 показана схема такого регулятора. Вал 1 паровой машины и вал 2 нагрузки соединены через упругую муфту 3, которая как пружина закручивается на угол, пропорциональный передаваемому моменту, т. е. нагрузке. В результате пропорционально этой величине смещается муфта 4 регулятора, а от нее перемещается заслонка подачи пара в машину. Для паровых машин того времени такой регулятор был непригоден, т. к. они не обладали достаточным самовыравниванием. Время использования идеи Понселе придет позже.

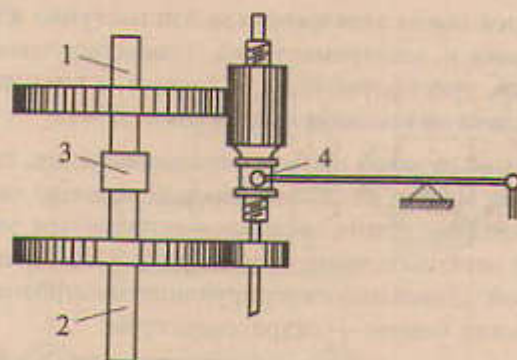


Рис. П1.4. Регулятор по нагрузке паровой машины Ж. В. Понселе

Таким образом, инженеры-практики уже тогда предложили и опробовали основные принципы современной теории автоматического регулирования, начало которой положил русский ученый и инженер И. А. Вышнеградский (1831—1895) статьей "О регуляторах прямого действия" (1876) и развил А. М. Ляпунов (1857—1918) в работе "Общая задача об устойчивости движения" (1892).

Дальнейшее развитие техники шло ускоряющимися темпами. Появились парополеты, паровозы, первые паровые автомобили. Делались даже попытки создания летательных аппаратов на основе паровой машины. В 1864 г. во Франции и Англии был выдан патент Н. А. Телешеву на проект пассажирского самолета с паровым двигателем и воздушным винтом. А в 1890 г. впервые

поднялся в воздух самолет "Эол" К. Адера с паровой машиной. Однако реальные самолеты появились позднее на базе более легких двигателей внутреннего сгорания, которые до этого привели к созданию автомобильной промышленности. Но это относится уже к новому рубежу развития техники, когда пар сменило электричество.

Двигатели внутреннего сгорания, по существу, были созданы на базе механической конструкции паровых машин: цилиндр с поршнем и кривошипно-шатунный механизм, преобразующий возвратно-поступательное движение во вращательное. Такая конструкция этих двигателей сохранилась до сих пор, хотя паровые машины давно сменились на более экономичные современные паровые турбины. Постепенно двигатели внутреннего сгорания вытеснили паровые машины с водного транспорта, где на их основе были созданы и получили применение в военном флоте подводные лодки, и, как уже сказано, явились основой создания авиации.

П1.1.3. Электротехническая автоматика

Век пара сменился веком электричества. Он наступил в конце XIX в. Возникли электротехника и электромеханика. Появились электрические машины, трехфазный ток, трансформаторы, а с ними и воздушные и кабельные линии электропередачи на высоком напряжении (ЛЭП).

В промышленности паровой привод металлорежущих, текстильных и других технологических машин от общей паровой машины через механические трансмиссии и приводные ремни заменился автономным электрическим приводом. Он получал электропитание от электрического генератора, вращаемого паровой машиной. Появились генерирующие электроэнергию агрегаты на основе гидравлических машин — гидрогенераторы.

Отдельные такие электроагрегаты стали объединяться с помощью линий электропередачи в энергосистемы. Последние, в свою очередь, со временем объединяются вплоть до появления уже в XX в. государственных энергосистем, которые также соединяются друг с другом. Это повышает экономичность и надежность электроэнергоснабжения.

Развивается электрический транспорт — трамваи, заводской электро-транспорт и др. Однако паровозы еще долго будут доминировать на железных дорогах и только во второй половине XX в. они окончательно вытесняются электрической тягой.

Одновременно со становлением электроэнергетики и электромашиностроения и применения электрических машин различного технологического назначения развивалась и несиловая электротехника и электромеханика. Механические устройства автоматики сменились электрическими и электро-механическими [5]. Возникла новая отрасль приборостроения — электромаг-

нитные и
электром
товые рас
ройства (1
ва, запо

Для по
менены э
("электри
мер такой
синхронн
приемник
сигнал в
электром
нительно
пока $\theta_{\text{вд}}$
таким об
ного вход

Типич
энергети
системы
аппарата

Анал
флоте и
телеграф
ся телем

Однако реле и аппаратуры внутренней промышленности, ко-

на базе механизмов и аппаратуры до сих пор, современные вытеснили и по-ке сказано,

XIX в. Воз-ные маши-кабельные

ых и дру-аническиеским при-ращаемо-егаты на

ю линийременемергосис-ономич-

электро-а желез-ытесня-

ашино-ческогока. Ме-лектро-ромаг-

нитные и электромеханические устройства и системы автоматики. Появилась электромеханическая коммутационная аппаратура — контакторы, реле, шаговые распределители, различного назначения другие электромагнитные устройства (муфты, магнитные усилители, дискретные бесконтактные устройства, запоминающие устройства) [19].

Для передачи усилий на расстояние механические трансмиссии были заменены электромеханическими передачами в виде систем синхронной связи ("электрический вал") и следящими системами. На рис. П1.5 приведен пример такой системы. Входной сигнал в виде угла поворота $\theta_{вх}$ подается на синхронную передачу, состоящую из сельсина-датчика 1 и сельсина-приемника 2. Сельсин-приемник соединен с валом нагрузки 4. Выходной сигнал $\varepsilon = \theta_{вх} - \theta_{вых}$ сельсина-приемника 2 усиливается усилителем U и электромагнитным усилителем мощности ЭМУ 5 и подается на якорь исполнительного двигателя 3. Вращение двигателя будет происходить до тех пор, пока $\theta_{вых}$ не станет равным $\theta_{вх}$, рассогласование ε не обратится в ноль и, таким образом, не произойдет отработка исполнительным двигателем заданного входного угла.

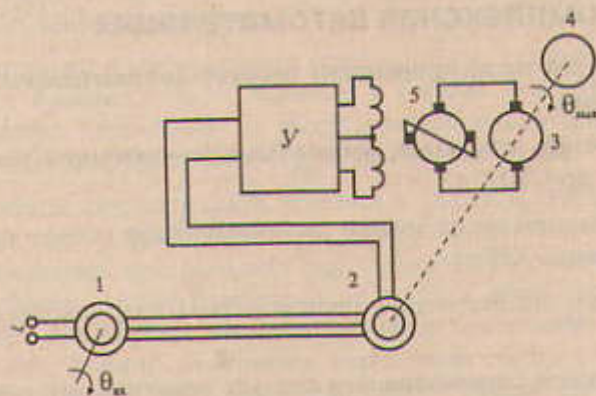


Рис. П1.5. Электромеханическая следящая система отработки угла

Типичными представителями новой техники управления стали в электроэнергетике регуляторы частоты, напряжения, перетоков мощности по ЛЭП, системы распределения нагрузки между электростанциями и генерирующими аппаратами на самих станциях, системы автоматической защиты.

Аналогично развивалась автоматика на железнодорожном транспорте, во флоте и авиации. Появились предшественники современных систем связи: телеграф, телефон и автоматические телефонные станции. Начала развиваться телемеханика как раздел автоматики, связанный с передачей сигналов на

такие значительные расстояния, когда для этого потребовались специальные средства и соответствующие преобразования сигналов. В результате появилось новое научно-техническое направление и новая специальность "Автоматика и телемеханика" [5].

После изобретения А. С. Поповым (1859—1906) радио начала бурно развиваться радиосвязь и различные радиотехнические устройства автоматики и телемеханики. В начале XX в. были изобретены первые электронные приборы — электронные лампы и с середины XX в. выделившись из электротехники начала быстро развиваться электроника прежде всего для радиосвязи. Вместе с ней получила новое качество и вычислительная техника, включая ЭВМ. Соответственно у автоматики появились новые возможности. Вместо механических, а затем электромеханических суммирующих, интегрирующих и дифференцирующих счетно-регулирующих устройств появились того же назначения электронные устройства, в том числе и цифровые на целые порядки более точные и быстродействующие. Это, естественно, позволило реализовывать значительно более сложные и эффективные алгоритмы управления.

П1.1.4. Комплексная автоматизация

В ходе развития промышленности процесс автоматизации в ней прошел следующие стадии:

- автоматизация отдельных машин (машины-автоматы технологические, транспортные и др.), XIX в.;
- создание систем таких машин (автоматические технологические участки, линии), середина XX в.;
- комплексная автоматизация производства (цехи, заводы-автоматы), конец XX в.

Для исторической справедливости следует отметить, что впервые понятие комплексной автоматизации возникло еще во второй половине XIX в. [4]. Один из первых ее результатов относится к 50-м годам XIX в. и принадлежит К. Н. Константинову (1817—1871) — русскому механику и электротехнику, крупному специалисту по ракетному делу и автоматизации того времени. Им были созданы автоматизированные производства пороховых ракет, включая набивки гильз пороховым составом с регулировкой скорости и давления, программное управление всем технологическим процессом, автоматическую защиту и блокировку с помощью реле времени и других видов реле.

Эти работы были продолжены А. П. Давыдовым (1826—1904) — изобретателем в области электроавтоматики, артиллерии и минного дела. Им были созданы автоматизированные системы управления залповым огнем артилле-

рийских орудий с качающегося судна по движущимся целям, включая автоматическое прицеливание с помощью счетно-решающего устройства.

В то же время проводились работы по комплексной автоматизации в химической промышленности, в том числе с применением первых фотоэлектрических приборов. Многие из этих разработок были позднее использованы крупными иностранными фирмами и возвращались в России уже от имени этих фирм [16].

Одна из первых современных автоматических линий была создана у нас в стране в 1939 г. на Волгоградском тракторном заводе. Ко второй половине XX в. их было уже много десятков тысяч. Логичным развитием этого процесса стало создание все более крупных автоматических систем машин вплоть до целых цехов, а затем и заводов-автоматов.

Перед Великой Отечественной войной в СССР был создан первый не имевший аналогов в мире завод-автомат по производству поршней для двигателей внутреннего сгорания.

В военные и послевоенные годы высшим достижением традиционной, как потом ее стали называть жесткой автоматизации, стали роторные и роторно-конвейерные линии Л. Кошкина. Все это были мирового уровня достижения отечественных ученых и инженеров.

Но в то же время в мире начался принципиально новый этап в развитии автоматизации производства — переход к гибкой автоматизации, которая позволила быстро переходить на выпуск новой продукции без изменения технологического оборудования и структуры производства.

История гибкой автоматизации началась в 1955 г. с появлением станков с ЧПУ. Именно такого типа автоматическое технологическое оборудование с быстросменяемыми программами работы является основой для создания гибких, т. е. быстро перестраиваемых на выпуск новой продукции, производств. Однако для реализации идеи гибкой автоматизации был необходим еще ряд условий. Этим и объясняется, что первые станки с ЧПУ распространялись очень медленно. За десять лет их доля в общем парке станков в технически передовых странах не достигла и 0,1%. Ситуация резко изменилась в 70-е годы с появлением следующего важнейшего компонента гибкой автоматизации — микропроцессорных систем управления, что обеспечило резкое снижение стоимости систем ЧПУ и повышение их надежности.

Другим компонентом гибкой автоматизации стали роботы, которые появились в промышленности несколько раньше. В результате сформировались все необходимые компоненты для развития гибких автоматизированных производств, а именно: технологическое оборудование с программным управлением, микропроцессоры как универсальное гибкое средство для обработки информации и роботы как универсальное гибкое средство для манипуляционных действий, требующихся при выполнении основных технологических

операций (сборки, сварки, окраски и т. п.) и различных вспомогательных операций по обслуживанию другого оборудования.

Таким образом, описанные выше созданные в древние времена и затем в средневековье человекоподобные автоматы-андроиды оказались предшественниками современных роботов.

Первые современные промышленные роботы никак не походили на человека, т. е. их нельзя назвать андроидами. Они были предназначены заменять людей, выполняющих вполне конкретные функции (сборщик, станочник и т. д.), и поэтому их конструкция определялась не подобием человеку, а подлежащими выполнению функциями и внешними условиями. Однако и работы по созданию андроидов продолжались в течение всего XX в. С самых древних времен и до настоящего времени сам человек был и остается для создателей техники недостижимым идеалом и образом для подражания. Видимо, поэтому, хотя и с перерывами, процесс развития техники включает повторяющиеся на все новом техническом уровне попытки создания человекоподобных автоматов, пусть в начале и игрушечных. И только в наше время развитие науки сделало эту мечту реальной, и она начинает воплощаться в современных роботах-гуманоидах. На рис. П1.6 показан один из первых таких промышленно выпускаемых роботов. И опять создание таких роботов началось с чисто демонстрационных целей, но уже рассчитанных на развитие различных практических потребностей в них (гид, сиделка, домашний работник и т. п.).



Рис. П1.6. Антропоморфный робот Asimo ("Хонда мотор", Япония)

В сво
роботов,
оборудов
такие ос
открыт
гибких
ния робо
сферы че
са, выпо.

Наряд
автомати
вающая
работ),
агрегато
строител
порт и
сферу об

Наиб
атомная
и, конеч
космиче

Опис
тике, ст
ные и га
системь

Друг
бокой д
ции был
ния изд
и более
нике с
его же
locksmi
шки. Р
(вычисл
ские ин
(в соста

Втор
гий мин
го монт

В своем развитии робототехника прошла путь от простых промышленных роботов, предназначенных для обслуживания различного технологического оборудования, затем более сложных технологических роботов, выполняющих такие основные технологические операции, как сборка, сварка, нанесение открытий и т. п., и, наконец, к комплексному применению роботов в составе гибких автоматизированных производств. Одновременно область применения роботов быстро расширялась и в настоящее время она охватила уже все сферы человеческой деятельности, включая освоение глубин океана и космоса, выполнение операций в других экстремальных условиях.

Наряду с машиностроением в XX в. развивался процесс распространения автоматизации на другие отрасли промышленности — угольная и горнодобывающая (автоматизация проходки шахт и бурения, погрузоразгрузочных работ), металлургия (автоматизация процессов загрузки и обслуживания агрегатов), химическая промышленность, лесозаготовка и деревообработка, строительная промышленность, легкая и пищевая промышленность, транспорт и непромышленные отрасли, включая сельское хозяйство, медицину, сферу обслуживания.

Наиболее динамично развивалась автоматика в таких новых областях, как атомная промышленность и энергетика, подводные и космические аппараты и, конечно, военная техника — наземная, подводная, авиационная, ракетно-космическая.

Описанный процесс интеграции, начавшийся, пожалуй, в электроэнергетике, стал общей тенденцией в технике и охватил транспорт, включая нефтяные и газовые трубопроводные системы, связь и различные информационные системы.

Другой общей тенденцией развития техники, которая возникла еще в глубокой древности, была миниатюризация. Изначально процесс миниатюризации был связан и предопределен процессом повышения точности изготовления изделий. Именно последнее является основанием для создания все более и более малоразмерных изделий. Первый этап этого процесса начался в механике с производства замков. (Слесарь — от нем. *schlosser* — замок, затвор и его же изготовитель. Кстати, и на английском языке слово "слесарь" — *locksmith* — от того же корня "замок" — *lock*.) Затем вышли в лидеры часовщики. Именно они создали первые механические изделия счетно-решающей (вычислительной) техники — арифмометры, интеграторы и т. п. Механические интеграторы в пятидесятые годы были сменены электромеханическими (в составе первых электромеханических вычислительных машин).

Второй этап миниатюризации начался на базе двухмерных (2D) технологий микроэлектроники. Символ этого этапа — многослойные платы печатного монтажа. Здесь была достигнута уже субмикронная точность.

На рубеже XXI столетия, как известно, начался третий этап миниатюризации на базе 3D-микросистемных технологий. Это уже не электроника, а трехмерная электромеханика — микроэлектронно-механические системы (МЭМС).

Каждый из перечисленных этапов не сменял предыдущий, а "надстраивал" над ним новый уровень. Так, 3D-технологии развились на базе 2D-технологий и добавили механику движений, но уже с микронным разрешением. Впереди нас ожидает уже исследуемый этап нанотехнологий с молекулярной разрешающей способностью и использование органики — симбиоз живого и техники (биокомпьютеры и т. п.). После этого, очевидно, наступит последний физически возможный этап миниатюризации на атомном уровне.

Рассмотренный процесс миниатюризации помимо возможности создания все более малоразмерных мини-, микро- и наносистем создает техническую базу для разработки компонентов нового поколения и крупномасштабных объектов вплоть до тяжелого машиностроения, наделенных принципиально новыми, в том числе интеллектуальными, функциональными возможностями и техническими характеристиками.

П1.1.5. Развитие современных систем автоматического управления

В ходе развития систем автоматического управления (САУ) развивались и сами принципы управления. Первые САУ вплоть до середины XX в. имели программное управление, изобретенное еще в 1801 г. Ж. М. Жаккардом (1752—1834) во Франции. Он создал автоматический ткацкий станок с программным управлением от перфокарт. Конечно, с тех пор техника такого управления, как было показано, конкретным образом изменилась, однако принцип остался прежним.

Современные системы программного управления — это цифровые системы, основанные на компьютерной базе. Они получили название систем числового программного управления (ЧПУ): Первые системы ЧПУ промышленного применения появились в станкостроении. Появившиеся в 50-е годы станки с ЧПУ стали, как показало будущее, решающим шагом в развитии идеи гибкой автоматизации. Потребность в последней была обусловлена быстро растущей тенденцией ускорения сроков освоения производства новой продукции с выпуском ее в том числе мелкими сериями при одновременном сохранении и даже повышении качества и производительности по сравнению с традиционным жестко автоматизированным крупносерийным и массовым производством.

Первые системы ЧПУ станков, созданные в Массачусетском технологическом институте США, программировались обучением с помощью централь-

ной ЭВМ
станки на

Следу
ванное у
ния врем
магнитн
таких си

Револ
произош
микропр
ЧПУ (УЧ
лась сто
менее. О
управлен
централи
лению.

Четве
комбини
отдельн
общей Э
водствен
хранени
шесисте

Совре
ленным
ций цент

Одно
вариант
Известн
ником
рис. П1.

У это
пировал
схема та
вально-ф
сканиру
пальца,
справа).
Это дви
жение п

ной ЭВМ с записью и последующей передачей управляющих программ на станки на перфоленте.

Следующий этап их развития — это прямое дистанционное централизованное управление несколькими станками от одной ЭВМ в режиме разделения времени. Управляющие программы при этом записывались уже на магнитных носителях (на магнитной ленте, диске и т. п.). Время развития таких систем — 60-е годы.

Революционный скачок в развитии и распространении этой новой техники произошел, как было отмечено, в 70-е годы прошлого века с появлением микропроцессоров. На их основе были созданы компьютерные устройства ЧПУ (УЧПУ) для управления отдельными станками. При этом резко снизилась стоимость этих устройств — с 50% общей стоимости станка до 20% и менее. Одновременно была коренным образом повышена надежность систем управления, в том числе благодаря переходу от дистанционного по кабелю централизованного управления к децентрализованному автономному управлению.

Четвертый этап развития УЧПУ — это переход к иерархическим системам комбинированного управления, в которых местные компьютерные УЧПУ отдельных станков объединены централизованной системой управления от общей ЭВМ. Функции последней — это групповое управление всем производственным комплексом, содержащим эти станки, включая планирование, хранение библиотек управляющих программ, контроль отказов и другие общесистемные функции.

Современная тенденция развития этих систем — это переход к распределенным модульным системам ЧПУ путем постепенного уменьшения функций центрального управления с передачей их местным УЧПУ.

Одновременно, возникнув тоже еще в начале XVIII в., развивался другой вариант программного управления — копирование по физическому образцу. Известны такие токарные копировальные станки, созданные русским механиком А. К. Нартовым (1693—1756) — "личным токарем" Петра I. На рис. П1.7 показан один из сохранившихся его станков.

У этого способа своя история. В середине XX в. были созданы электрокопировальные фрезерные станки. На рис. П1.8 приведена принципиальная схема такого типа отечественной системы программного управления копировально-фрезерного станка [14]. По модели 1 перемещается, горизонтально сканируя ее, копировальный палец 2. Одновременно повторяя движения пальца, перемещается фреза по обрабатываемой заготовке (на рис. П1.8 внизу справа). Вертикальное положение фрезы отслеживает положение пальца 2. Это движение фрезы осуществляется с помощью следящей системы. Положение пальца 2 выявляется дифференциальным трансформаторным датчиком

4, якорь 3 которого соединен с пальцем. В среднем положении якоря напряжения на двух вторичных обмотках трансформатора равны и уравновешивают друг друга. Поэтому на трансформаторе 5 напряжение отсутствует. Оно возникает при смещении якоря 3 и пропорционально величине этого смещения. Этот сигнал усиливается двухканальным электронным усилителем на лампах Л1—Л4 и подается на обмотки управления 6 и 7 электромашинного усилителя мощности (ЭМУ) 8, который питает исполнительный двигатель 9, перемещающий фрезу. Одновременно он осуществляет перемещение корпуса дифференциального трансформатора 4, возвращая его якорь в нейтральное положение.

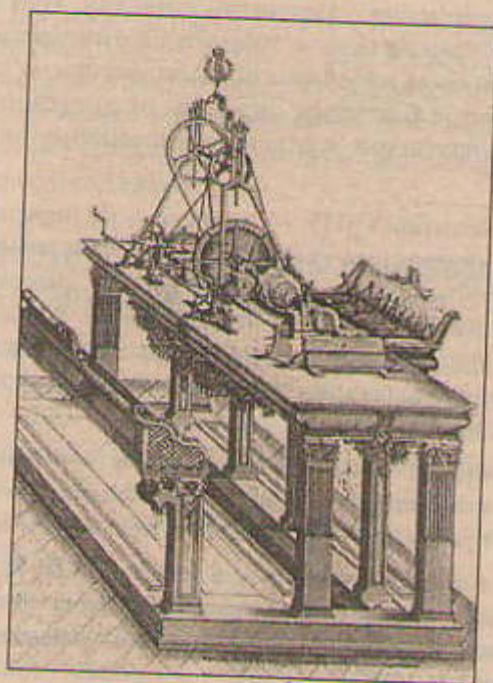


Рис. П1.7. Копировально-токарный станок А. К. Нартова (1717)

Для повышения быстродействия и точности обработки фрезой положения копирующего пальца 2 в сигнал управления ЭМУ к сигналу по смещению пальца 3 добавляется сигнал, пропорциональный производной от первого сигнала, т. е. реализуется ПД-алгоритм управления. Сигнал по производной формируется с помощью дифференциальных трансформаторов 10 и 11.

С точки зрения алгоритмов управления такие системы принципиально отличаются от систем программного управления, т. к. их основу составляют следящие системы, которые должны обрабатывать заранее неизвестный сиг-

жении якоря напря-
ны и уравновешива-
не отсутствует. Оно
вследствие этого смеще-
нием усилителем на
электромашинного
двигатель 9,
перемещение корпуса
корь в нейтральное

нал. Помимо подобных силовых следящих систем большое распространение получили приборные (измерительные) следящие системы.

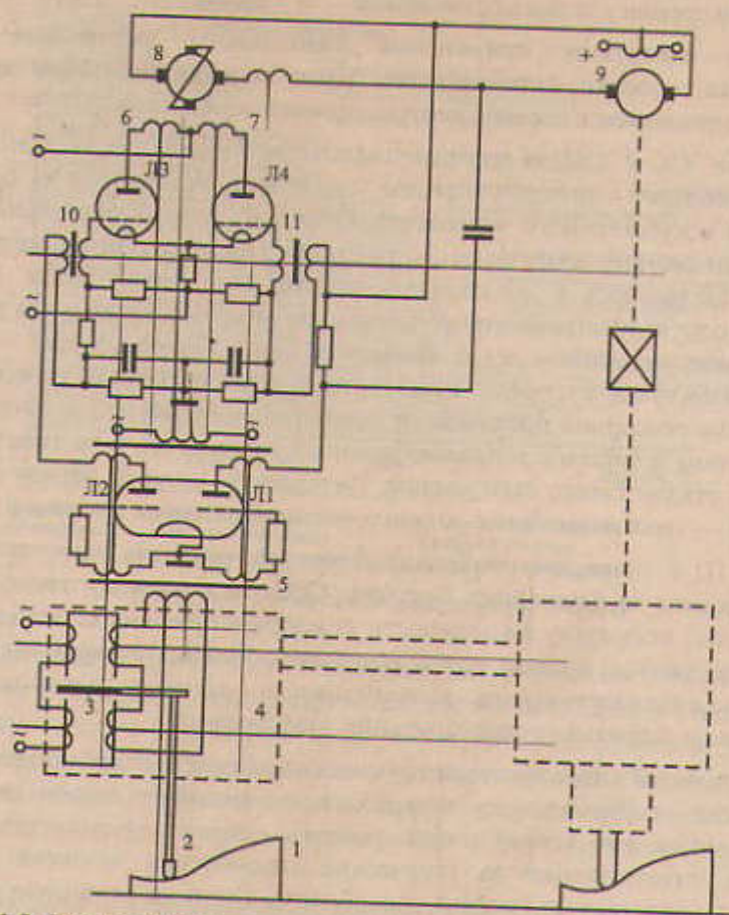


Рис. П.8. Схема системы управления копировально-фрезерного станка 6441А

(1717)

езой положения
по смещению
от первого
производной
10 и 11.

нципально от-
ву составляют
известный сиг-

Что касается собственно копировальных станков, то следующим их усовершенствованием стало создание фотокопировального станка, в котором физическая модель была заменена набором чертежей сечений подлежащего изготовлению изделия, а копировальный палец — фотодатчиком, отслеживающим эти сечения.

Следующим после программного управления был создан и нашел применение со второй половины XX в. способ адаптивного управления. Одним из первых практических его применений в машиностроении была адаптивная система подачи резца в токарных станках с ЧПУ, компенсирующая его износ.

Адаптивное управление требует создания сенсорных устройств, наиболее важным из которых стали системы технического зрения (СТЗ), аналогично такой же роли зрения у живых организмов.

Важными областями применения адаптивного управления стали робототехника, головки самонаведения ракет и тому подобные системы управления движением в заранее неопределенной обстановке.

На рубеже XX и XXI вв. сформировался следующий после адаптивного способ управления — интеллектуальное управление, основанное на применении методов искусственного интеллекта. Одним из первых применений этих методов стали системы адаптивного управления. После чего интеллектуальное управление выделилось в самостоятельный тип управления. Затем, по мере того как методы искусственного интеллекта стали применяться и для решения других помимо управления задач, появилось более общее понятие — интеллектуальные системы, в которых помимо управления эти методы используются при обработке сенсорной информации, принятия решений и т. д. Интеллектуальные системы и системы интеллектуального управления, в частности, находятся еще в стадии своего становления. Интеллектуализация, наряду с миниатюризацией — одна из наиболее общих тенденций развития техники в XX в.

На рис. П1.9 приведен обобщенный график развития этих тенденций, включая прогноз на ближайшее будущее. Обе эти тенденции тесно связаны друг с другом, поскольку возможности совершенствования способов управления определяются, прежде всего, возможностями их аппаратной реализации. Первые интеллектуальные системы смогли появиться только на определенном уровне развития миниатюризации электроники.

Искусственный интеллект имитирует одну из двух составляющих мышления человека — формализуемое вербальное мышление левого полушария головного мозга. Его вторая составляющая — образное мышление правого полушария, ответственное за творческие способности человека (креативность). Она представляет особую способность человека отличную от интеллекта, хотя и требующего определенного уровня его развития. Именно совокупность интеллекта и креативности определяет личность человека и, в частности, его профессиональные способности. Поэтому следующим этапом развития систем управления станет создание систем, воспроизводящих эти оба способа мышления, присущие *homo sapiens*, т. е. человеку разумному. Поэтому такое управление условно можно будет назвать разумным и оно — следующий этап развития способов управления после интеллектуального.

В XX в. начало развиваться еще одно направление теории автоматического управления, которое до этого уже получило многочисленные технические реализации в различных отраслях хозяйства и прежде всего в энергетике, транспорте и связи — это групповое управление, в том числе территориально разнесенными объектами.



Рис. П1.9. Развитие автоматических систем

Типовая задача группового управления техническими объектами — это управление гибкими производственными системами. Общая тенденция развития таких систем управления заключается, как уже отмечено, в прогрессивном ослаблении централизованного начала и переходе к распределенным гибким системам, состоящим из объединенных локальной сетью технологических модулей и функциональных модулей, выполняющих общесистемные функции.

Непрерывное усложнение технических систем и стоящих перед ними задач и ограничение возможности их полной автоматизации, особенно когда это касается систем, в которых наряду с техникой участвуют и люди, привели к созданию различных автоматизированных систем управления (АСУ). Основное применение такие системы получили в больших человеко-машинных системах различного назначения — энергетических, транспортных, связи, военных. В частности, у нас в стране были созданы уникальные АСУ ракетными войсками стратегического назначения (1968) и ПВО.

Если исходная цель автоматизации заключается в освобождении человека от функций управления техникой, то задача взаимодействия человека и техники совершенно другая. И одним из актуальных ее аспектов является проблема "человеческого фактора". Суть ее в возникновении на рубеже XXI в. ситуа-

ции "ножниц" между все усложняющейся техникой и остающимся, по существу, неизменными возможностями человека, участвующего в ее функционировании, его "техническими характеристиками". Подтверждением этому служит прогрессирующее нарастание аварий, в том числе глобального характера по вине персонала, причем, прежде всего, с наиболее современными объектами.

Эта проблема симбиоза человека и техники многогранна, включая и фундаментальные естественно-научные аспекты изучения человека, и требует, прежде всего, кардинального пересмотра самих сложившихся принципов ее решения.

П1.1.6. Отечественные ученые и инженеры в развитии науки и техники управления

В заключение представим сводный перечень наиболее существенного вклада отечественных ученых и инженеров в рассматриваемый исторический процесс [4, 9].

Как было отмечено, начало развития современных систем регулирования в "век пара" открыл И. И. Ползунов (1728—1766) — русский механик и теплотехник, изобретатель паровой машины и автоматического регулятора уровня воды в ее котле. Это был прообраз современных систем автоматического регулирования с обратной связью, созданный за 19 лет до получения Уаттом его знаменитого патента на центробежный регулятор скорости. А еще до этого были созданы уже упомянутые автоматические копировальные станки А. К. Нартова, часы-автомат И. П. Кулибина (1735—1818), различные самозаписывающие приборы М. Л. Ломоносова.

Основателями современной ТАУ стали выдающиеся русские ученые И. А. Вишнеградский (рис. П1.10) и А. М. Ляпунов (рис. П1.11). Мировую известность получили работы по теории автоматического управления выдающегося математика и механика П. Л. Чебышева (рис. П1.12), учеником которого был А. М. Ляпунов, и который, в частности, впервые поставил задачу оптимального параметрического синтеза автоматических регуляторов на основе его теории наилучшего приближения функций, и основателя теории современной авиации Н. Е. Жуковского (рис. П1.13), обобщившего результаты классической теории регуляторов прямого действия и введшего в нее результаты оригинальных исследований влияния кулоновского трения и методу интегрирования, используемых при этом разностных уравнений.

С началом "века электричества" русская наука и техника сделали новый скачок, связанный с опережающим развитием отечественной электротехники, начало которой положил еще М. В. Ломоносов.

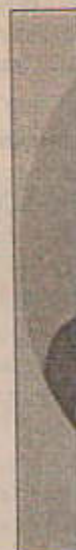


Рис. П



Рис

нощимися, по су-
щего в ее функ-
тверждением это-
е глобального ха-
ее современными

, включая и фун-
века, и требует,
ся принципов ее

ры

существенного
ий исторический

регулирования в
еханик и тепло-
улятора уровня
матического ре-
учения Уаттом
и. А еще до это-
зальные станки
азличные само-

русские ученые
.11). Мировую
правления вы-
.12), учеником
поставил зада-
регуляторов на
ователя теории
шего результа-
шего в нее ре-
рения и мето-
нений.

делали новый
екротехники,



Рис. П1.10. И. А. Вишнеградский
(1831—1895)



Рис. П1.11. А. М. Ляпунов
(1857—1918)



Рис. П1.12. П. Л. Чебышев
(1821—1894)



Рис. П1.13. Н. Е. Жуковский
(1847—1921)

Зачинателем современной электротехники в России был В. В. Петров (1761—1834), открывший электрическую дугу, которая сразу же получила широкое применение в электрическом освещении, электрометаллургии, электрохимии и многих других отраслях промышленности.

П. Л. Шиллинг изобрел электрический телеграф и магнитоэлектрическое реле. Б. С. Якоби изобрел коллекторный электродвигатель постоянного тока, прообраз трансформатора, буквопечатающий автомат, систему синхронной связи; К. И. Константинов (1817—1871) — шаговый распределитель, электромагнитный регулятор скорости, различные электроизмерительные приборы; П. И. Яблочков — дуговую электрическую лампочку ("Свеча Яблочкова", "Русский свет"), трансформатор; А. Н. Лодыгин (1847—1923) — лампу накаливания; Н. Г. Славянов (1862—1919) — систему трехфазного тока и асинхронный двигатель; В. Н. Чиколев (1845—1898) — электромашинный усилитель; С. М. Апостолов — автоматическую телефонную станцию (АТС) и комплекс необходимых для нее электромеханических приборов (искатели, коммутаторы, дешифраторы и т. п.); М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919) — трехфазный электродвигатель, линии электропередачи (ЛЭП) переменного тока.

На следующем этапе развития техники, связанном с появлением радиотехники, телевидения, современных глобальных телекоммуникаций, отечественные ученые также оказались на передовых позициях в мире. Достаточно назвать А. С. Попова — изобретателя радиотелеграфа, основателя современной радиотехники; основателей телевидения А. П. Константинова (1895—1937), Б. Л. Розинга (1869—1933), В. К. Зворыкина (1889—1992), Л. С. Термена (1895—1993). Последний был еще и зачинателем электромозыки.

Далее в ходе изложения истории развития науки об управлении будет сказано о приоритетных научных заслугах отечественных ученых в этой и смежных науках. Здесь назовем из них основателей теории нелинейных колебаний А. А. Андропова (1901—1952), Н. Н. Боголюбова (1909—1992); В. А. Котельникова (1908) — крупнейшего теоретика в области теории вероятностей, информации и кибернетики, А. А. Маркова (1856—1922) — автора теории марковских процессов, создателя теории оптимального управления А. Л. Понтрягина (1908—1987).

§ П1.2. Теория автоматического регулирования

П1.2.1. Становление классической ТАУ

Начало теории управления в конце XIX в. было положено работами знаменитого английского физика профессора Кембриджского университета

был В. В. Петров
разу же получила
металлургии, элек-

итозлектрическое
постоянного тока,
тему синхронной
ределитель, элек-
ительные прибо-
веча Яблочкова",
— лампу нака-
ого тока и асин-
ашинный усили-
анцию (АТС) и
боров (искатели,
ольский (1862—
ни (ЛЭП) пере-

влением радио-
каций, отечест-
ире. Достаточно
ателя современ-
тинова (1895—
(1889—1992),
лем электрому-

ении будет ска-
еных в этой и
ни нелинейных
(1909—1992);
ти теории веро-
1922) — автора
ого управления

работами зна-
университета

Джемса Клерка Максвелла (рис. П.14), русского профессора Санкт-Петербургского технологического института Ивана Алексеевича Вышнеградского (см. рис. П.10) и словацкого профессора Цюрихского политехникума Ауреля Стодолы (рис. П.15), которые создали линейную теорию автоматического регулирования (ТАР) [10].



Рис. П.14. Д. К. Максвелл
(1831—1879)



Рис. П.15. А. Стодола
(1859—1942)

Первой была работа Д. К. Максвелла "О регуляторах" (1868), где было проведено исследование с помощью линеаризованных уравнений устойчивости системы прямого статического регулирования скорости паровой машины с центробежным регулятором скорости. Были выведены условия устойчивости в виде отрицательности действительных корней характеристического уравнения системы. В связи с этим Максвелл на заседании Лондонского математического общества поставил перед математиками задачу найти необходимые и достаточные условия отрицательности действительных частей корней алгебраического уравнения n -й степени.

Через несколько лет решение этой задачи предложил Э. Раус вначале в 1873 г. для уравнений до 5-й степени, а затем в 1877 г. для любой степени. Теперь это широко известный критерий устойчивости Рауса. Это, пожалуй,

оказалось наиболее существенным вкладом Максвелла в становление теории автоматического регулирования. Дело в том, что сами выведенные им уравнения динамики рассмотренной системы астатического регулирования скорости паровой турбины и сделанные выводы не представляли в то время интереса для инженеров-практиков, поскольку не соответствовали реальным системам регулирования скорости турбин. Это были турбины с малым самовыравниванием и прямым (без усилителя) статическим (пропорциональным) центробежным результатом Уатта. При этом проблема повышения точности поддержания скорости путем уменьшения статизма и тем более доведения его до нуля заменой многих десятков тысяч действующих статических регуляторов астатическими (интегрирующими) не являлась тогда практически значимой. Максвелл исследовал систему регулирования скорости паровой турбины с существенным самовыравниванием, для которой показал принципиальную возможность устойчивого астатического регулирования скорости, т. е. с нулевым статизмом. (Уже в начале XX в. появились и стали распространяться изодромные регуляторы скорости турбин, обеспечивающие такое регулирование. Однако их конструкция принципиально отличалась от рассмотренной Максвеллом.)

Теория автоматического регулирования, действительно отвечающая запросам промышленной практики, начинается с работы И. А. Вышнеградского "О регуляторах прямого действия" (1876). Вышнеградский был одновременно математиком и практическим инженером-механиком. Поэтому его подход к проблеме регулирования машин существенно отличался от Максвелла. Максвелл рассматривал ее как проблему теоретической механики, а Вышнеградский — как объект прикладной механики и конструирования паровых машин. Вышнеградский рассмотрел динамику регулирования скорости паровых турбин с помощью применяемого на практике статического регулятора Уатта. При этом он использовал те же исходные уравнения, что и Максвелл, но, учитывая значения параметров реальных систем, пришел к совершенно другим и важным для практики выводам. Он, в частности, показал, что астатический регулятор не пригоден для регулирования скорости реальных паровых турбин.

Условия устойчивости рассматриваемой системы регулирования Вышнеградский привел к требованию, чтобы были отрицательными действительные части корней характеристического уравнения системы

$$\theta^3 + M\theta^2 + N\theta + \frac{KL}{I\omega_0} = 0,$$

где M — коэффициент, характеризующий вязкое трение в регуляторе, I — момент инерции турбины, KL — мера подвижности регулятора (его коэффициент передачи), N — коэффициент, характеризующий неравномерность

(статизм) регулирования, ω_0 — установившаяся угловая скорость турбины. Условие устойчивости в результате было сведено к неравенству

$$\frac{MN}{KL} I\omega_0 > 1.$$

Вышнеградский дал замечательную геометрическую интерпретацию полученных условий устойчивости, которая получила широкую известность далеко за рамками рассмотренной им задачи как "диаграмма Вышнеградского" (рис. П1.16). В приведенном выше характеристическом уравнении он перешел к новым переменным, полагая

$$\theta = \varphi \sqrt[3]{\frac{KL}{I\omega_0}}, \quad M = X \sqrt[3]{\frac{KL}{I\omega_0}}, \quad N = Y \sqrt[3]{\left(\frac{KL}{I\omega_0}\right)^2},$$

и получил в результате уравнение

$$\varphi^3 + X\varphi^2 + Y\varphi + 1 = 0.$$

В нем уже всего два параметра — X и Y . В функции от них он построил свою диаграмму, которая определяет не только условия устойчивости, но и качество переходных процессов в виде колебательности переходной характеристики. Условия устойчивости при этом принимают вид

$$XY > 1.$$

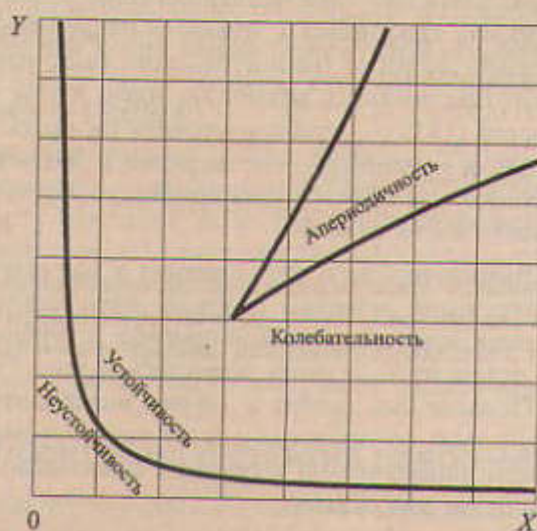


Рис. П1.16. Диаграмма Вышнеградского

Гипербола $XU = 1$ ("гипербола Вышнеградского") определяет границу устойчивости. Из диаграммы видно, что уменьшение статизма (уменьшение Y) сужает область устойчивости, т. е. диапазон значений параметров системы, при которых она устойчива, и вызывает сперва появление и рост колебательности процесса регулирования, а затем и неустойчивость. При астатическом регуляторе ($Y = 0$) неустойчивость неизбежна при любых значениях параметров системы (структурная неустойчивость).

Вышнеградский продемонстрировал важное значение вязкого трения для обеспечения устойчивости (коэффициент M). (Для его создания в конструкциях регуляторов чисто опытным путем вводили катаракт, т. е. демпфер.) Он впервые показал, что монотонный переходный процесс может быть и при наличии комплексных корней у характеристического уравнения и, наоборот, конечное число колебаний возможно при действительных корнях. Все эти замечательные выводы прекратили шатания инженерной мысли в области построения регуляторов прямого действия, введя полную ясность.

В свое время центробежные регуляторы, построенные по принципу регулятора Уатта, обеспечили быстрое развитие паровых турбин. Однако к середине XIX в. стали нарастать трудности с наладкой регуляторов, участились случаи их неустойчивой работы. Связано это было с прогрессом турбиностроения. Уатт имел дело с маломощными тихоходными машинами, снабженными большими маховиками. Их регуляторы имели значительный статизм, и это тогда устраивало практику. Однако в дальнейшем стали создаваться все более мощные и быстроходные турбины с существенно меньшей инерцией. Для управления ими требовались большие усилия от регуляторов. Одновременно возросли требования к точности поддержания скорости, т. е. уменьшению статизма. До работ Вышнеградского было неясно, как преодолеть эти трудности. Предлагались различные идеи, в том числе вспомнили предложение Понселе (1830) — стабилизировать скорость, управляя турбиной по первопричине ее изменения — по нагрузке, и братьев Сименс — регулировать по ускорению, как мгновенному признаку нарушения баланса мощности турбины и нагрузки на ее валу.

После работы Вышнеградского все сомнения в эффективности принципа регулирования Уатта были развеяны и другие идеи надолго были забыты. Однако пришло время, когда дальнейший прогресс в турбиностроении заставил опять искать новые пути, и вновь вернулись к этим "хорошо забытым" идеям. Принцип Понселе был развит в теории инвариантности, а идея использования воздействий по производным от регулируемой величины — в современные методы динамической коррекции с помощью гибких обратных связей. Но об этом будет еще сказано.

Работа Вышнеградского намного опередила свое время, показала эффективность теоретического подхода к практическим инженерным проблемам и

положила этому Вышнеградскому математическим, который становился

Непосредственно его частью жизни в Цюрихе

Стодола регулирования водится негов как прсервомоторном, ме рис. П1.2.

В 1893 ценную годы при чем регулятор трубопровода шестого знаком с кума А. устойчивой n -й степени Гурвица критерий

Следует Сименсом блем по скорости регулирования в регуляторе в виде

П1.2

В XX области скорости

еляет границу ус-
(уменьшение Y)
аметров системы,
рост колебатель-
При астатическом
значениях пара-

зкого трения для
дания в конструк-
(е. демпфер.) Он
ет быть и при на-
ния и, наоборот,
корнях. Все эти
мысли в области
ность.

о принципу регу-
Однако к сере-
ров, участились
рессом турбино-
машинами, снаб-
ачительный ста-
дем стали созда-
твенно меньшей
от регуляторов.
я скорости, т. е.
сно, как преодо-
исле вспомнили
управляя турби-
Сименс — регу-
я баланса мощ-

ности принципа
о были забыты.
строении заста-
рошо забытым"
сти, а идея ис-
величины — в
обких обратных

оказала эффек-
м проблемам и

положила начало современной теории автоматического регулирования. Поэтому Вышнеградский по праву считается основоположником науки об автоматическом управлении в целом. Он первый из плеяды отечественных ученых, которые, как будет видно из последующего, внесли решающий вклад в становление и развитие этой науки.

Непосредственным последователем И. А. Вышнеградского и продолжателем его работы стал Аурель Стодола — словак по национальности, большую часть жизни проведший в Швейцарии, где заведовал кафедрой машиностроения в Цюрихском политехникуме.

Стодола распространил линейный анализ Вышнеградского на не прямое регулирование, где управление поступлением рабочего тела в турбину производится не непосредственно центробежным маятником через систему рычагов как при прямом регулировании, а через сервомотор. (Обычно в качестве сервомотора использовался гидравлический двигатель, управляемый золотником, механически связанным с центробежным маятником, как показано на рис. П1.2.)

В 1893 г. Стодола опубликовал работу "О регулировании турбин", посвященную регулированию гидравлических турбин — проблеме, которая в те годы приобрела более важное значение как для практики, так и для теории, чем регулирование паровых турбин. Стодола учел в системе регулирования трубопровод и получил описывающее эту систему регулирования уравнение шестого порядка (против третьего порядка у Вышнеградского). Не будучи знаком с работой Рауса, он обратился к математику Цюрихского политехникума А. Гурвицу с просьбой найти необходимые и достаточные условия устойчивости, которым должны удовлетворять коэффициенты многочлена n -й степени, чтобы его корни имели отрицательные действительные части. Гурвиц в 1893 г. нашел такие условия, которые получили известность как критерий устойчивости Гурвица.

Следующая фундаментальная работа Стодолы "Принцип регулирования Сименсов и американские инерционные регуляторы" (1899) относится к проблемам прямого регулирования, но в виде комбинированного регулирования по скорости и ускорению (ПД-регулирование). Стодола показал, что добавление сигнала по ускорению позволяет реализовать устойчивое астатическое регулирование, и сформулировал в качестве условия устойчивости наличие в регуляторе кулоновского трения. Все свои результаты Стодола представил в виде диаграмм, которые обобщают диаграммы Вышнеградского.

П1.2.2. Направления развития современной ТАУ

В XX в. линейная теория автоматического регулирования получила новые области технического применения в электротехнике. Помимо регулирования скорости электрических двигателей решались задачи регулирования частоты

и напряжения электрических генераторов, в том числе в электрических энергосистемах, регулирования различных переменных в других областях техники — температуры, расхода, давления, стабилизация движения по траектории различных объектов, групповое движение строим.

Во всех этих областях в основе теоретических исследований и инженерных расчетов использовалась линейная ТАУ, в основе которой лежат идеи Вышнеградского и предложенная им форма записи уравнений динамики с безразмерными коэффициентами и временем, позволяющая минимизировать число варьируемых параметров.

Примерно до 40-х гг. прошлого века центральное место в теории регулирования занимало исследование устойчивости. Затем основным предметом исследований постепенно стало качество переходных процессов, т. е. определение таких показателей качества, как колебательность, перерегулирование, быстродействие. И здесь начало было положено методами, основанными на исследовании расположения корней характеристического уравнения системы в комплексной плоскости, т. е. на развитии подхода Вышнеградского, представленного его диаграммой. Отсюда развились корневые критерии качества и модальные методы синтеза. Затем появились частотные и статистические методы и, наконец, методы исследования нелинейных систем. Однако все эти методы получили свое развитие уже в рамках теории автоматического управления (ТАУ), частью которой стала теория регулирования. Последняя, однако, не потеряла своего самостоятельного значения и своей области применения, а следовательно, и специфики. Но история ее самостоятельного развития на этом закончилась, дав жизнь более общей ТАУ.

§ П1.3. Теория автоматического управления

П1.3.1. Линейная теория автоматического управления

Теория автоматического управления (ТАУ) создавалась как развитие и обобщение теории автоматического регулирования. Поэтому первым ее этапом стало распространение линейной теории автоматического регулирования на более общую задачу управления объектами и процессами.

Постепенно были определены следующие наиболее общие понятия ТАУ в целом:

- разомкнутые и замкнутые (с отрицательной обратной связью) системы;
- системы управления по задающему воздействию и по возмущающему воздействию (системы компенсации);