

100 лет со дня рождения академика Е.П. Попова



Основоположник отечественной школы робототехники

С.Л. Зенкевич, Е.А. Котов, А.В. Назарова, С.А. Воротников

Аннотация. Статья посвящена основным этапам жизненного пути Евгения Павловича Попова (1914–1999), инженера и математика, выдающегося ученого в области механики, теории автоматического управления и робототехники, академика РАН, генерал-майора, лауреата государственных премий СССР 1949, 1972 и 1984 г.г.

Ключевые слова: стержневые конструкции, упругость и деформация, нелинейные системы автоматического управления, метод гармонической линеаризации, диаграмма качества колебательных процессов, робототехника.

Евгений Павлович Попов родился 14 февраля 1914 года в Москве. В 1934 году он стал студентом МВТУ им. Н.Э. Баумана. На втором курсе Училища Е. Попов начал заниматься научной работой по сопротивлению материалов. По результатам выполнения ряда курсовых проектов он опубликовал две статьи в журнале АН СССР «Прикладная математика и механика». Одна из решенных задач была связана с деформацией нецилиндрических пружин, а другая - с исследованием изгиба тонких стержней при действии нагрузки. Исследуя деформа-

цию пружин, он обнаружил, что жесткость пружины при ее сжатии увеличивается, и зависимость величины перемещения от сжимающей силы становится нелинейной, причем это характерно для пружин любой формы. Впоследствии это исследование оказалось важным для практики создания антирезонансных пружин.

Вторая задача состояла в нахождении больших перемещений изгиба тонких стержней и пластинок, когда общая деформация изгиба получается очень значительной, так что концы стержня получают перемещения, сравнимые с

длиной самого стержня. Такая задача впервые была поставлена Л.Эйлером, который предложил и соответствующий математический метод в общем виде. Позже этой задачей занимались, применительно к частным случаям, ряд выдающихся ученых, в их числе и заведующий кафедрой сопромата МВТУ в то время проф. Е.Н. Тихомиров. Е. Попов разработал универсальный метод расчета, включающий все частные случаи. Существенное развитие материала первой из этих студенческих работ Е. Попова вылилось в кандидатскую диссертацию, а второй - в докторскую.

После второго курса Е. Попов выбрал специальность «Насосы и гидротурбины», которой руководил профессор И.И. Куколевский. Дипломный проект был посвящен проектированию гидротурбины.

После окончания Училища в 1939 г. Е. Попова предполагалось оставить в аспирантуре, но в это время началась массовая мобилизация, и он был призван в армию, где проходил службу в инженерно-технических частях ВВС. Вскоре началась Финская война, а вслед за ней и Великая Отечественная. Сержанту Е.П. Попову пришлось разделить со своими сослуживцами все тяготы службы по время военных действий. Однако, даже в этих условиях, он находил возможность писать серьезные научные статьи, которые продолжали печатать академические журналы. В 1942 г. его часть была перебазирована в Йошкар-Олу. Туда же была эвакуирована и созданная в 1941 г. Ленинградская военно-воздушная инженерная академия (ЛВВИА), испытывавшая острую потребность в квалифицированных преподавательских кадрах. В звании старшего сержанта Е.П. Попов был переведен на преподавательскую работу в Академию. Первое офицерское звание молодой ученый получил в 1943 г.

В условиях военной академии способности Е.П. Попова получили чрезвычайно быстрое и мощное развитие. На базе задач, решенных еще в студенческую пору, в 1944 г. в МВТУ им была защищена кандидатская диссертация: «Теория деформации витых пружин с учетом явления посадки витков». Материалы диссертации в переработанном виде были опубликованы в 1950 г. в сборнике Академии наук СССР «Динамика и прочность пружин».

После защиты кандидатской диссертации Е. Попов, несмотря на большую педагогическую нагрузку, начал готовить докторскую диссертацию. Это была теоретическая работа, в которой решалась классическая задача, поставленная Л. Эйлером, причем требовалось найти не только её математически красивое решение, но и создать инженерные методы исследования и расчета гибких конструкций. Работа была завершена уже в Ленинграде, куда ЛВВИА вернулась к осени 1944 года. Диссертация называлась «Расчет гибких деталей приборов и машин (прикладная теория плоского изгиба прямого и кривого бруса малой жесткости)». Научные работы, имевшиеся в этой области, обычно заканчивались принципиальными математическими решениями, не дающими инженеру возможности применять их в своих расчетах. Е.П. Попову удалось найти универсальные уравнения и соотношения, позволяющие решать единым методом практически любую частную задачу в этой области. Точное решение задачи изгиба дано в эллиптических интегралах, а поскольку они не берутся в аналитической форме, то для удобства инженерных расчетов были составлены специальные числовые таблицы и номограммы. В 1946 году в возрасте 32 лет Е.П. Попов успешно защитил докторскую диссертацию, и ему было присвоено воинское звание инженер-майора.

Основные научные результаты выполненной работы в 1947 году были опубликованы в книге «Теория и расчет гибких упругих деталей», которая вышла в издательстве ЛКВВИА. За нее автор в 1949 г. был удостоен Сталинской премии. В 1948 году Е.П. Попову было присвоено ученое звание профессора по кафедре теоретической механики, а в 1949 г. - воинское звание инженера-подполковника. Таким образом, за шесть лет, не выдерживая уставных сроков, Е.П. Попов прошел через все промежуточные офицерские звания от старшего сержанта до подполковника.

По результатам докторской диссертации в 1948 году в серии «Современные проблемы механики» Е.П. Попов издал монографию «Нелинейные задачи статики тонких стержней». Титульным редактором этой серии был выдающийся ученый - механик профессор (впо-

следствии член-корреспондент АН СССР) Анатолий Исаакович Лурье.

Развитие науки часто ставит перед учеными задачи, решение которых требует освоения новых областей исследования. Такими областями в 50-е годы стали автоматика и телемеханика. В 1949 г. Е.П. Попов получил задание создать в Академии кафедру автоматики и телемеханики, первую среди военных вузов. В то время автоматика и телемеханика еще не сложились как наука, не было учебников, которые можно было бы предложить слушателям. Обработав огромное количество доступной к тому времени литературы, преимущественно журнальных статей, Е.П. Попов выстраивает, по существу, новую науку – теорию автоматического управления. Первые книги, написанные им по этому предмету, были изданы в качестве учебных пособий в Ленинградской Военно-Воздушной Академии: «Теория автоматического регулирования» ч.1 в 1952 г. и ч.2 в 1953 г., книга «Динамика систем автоматического регулирования» была издана Гостехиздатом в 1954 году. Ее существенно дополненный и переработанный вариант - «Автоматическое регулирование и управление» - выдержал пять изданий в Издательстве Физматгиз с 1956 по 1966 годы. В этот период книга была переведена на иностранные языки и издана в Германии, Англии и США. Отметим, что большое число вышедших впоследствии книг по теории автоматического управления и регулирования, в основном, следуют предложенным Е.П. Поповым разделам этой теории, принимают сделанные им определения и основные положения. Таким образом, автора по праву считают одним из основоположников этой науки в России и в мире.

Особый интерес Е.П. Попова вызывала теория нелинейных систем автоматического управления. Возможно, это объясняется его работами в области механики, где решались существенно нелинейные задачи. В 60-е годы он публикует несколько работ, заложивших основы метода гармонической линеаризации нелинейностей. Этот метод до сего дня остается одним из наиболее эффективных методов исследования и проектирования автоматических систем с существенными нелинейностями. Основываясь на разложении сигналов на выходе

нелинейного элемента в ряд Фурье и ограничиваясь первой гармоникой, можно получить достаточно простые уравнения для определения параметров автоколебаний в нелинейных автоматических системах. В 1960 г. была издана книга Е.П. Попова и И.П. Пальтова «Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем» (Физматгиз, М.), содержащая математическое обоснование метода гармонической линеаризации, анализ симметричных автоколебаний и их устойчивости, оценку качества нелинейных переходных процессов и вычисление высших гармоник автоколебаний. Эта книга была издана и за рубежом – в Германии, США и Польше.

В последующие десять лет Е.П. Попов продолжил работу над теорией нелинейных автоматических систем. Исследования в этой области в 1973 г. были обобщены в монографии «Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах» (Наука, М.). Им и его учениками были решены новые задачи для отдельного класса систем, в частности, выполнен анализ многочастотных колебаний, а также гармоническая линеаризация систем с несколькими нелинейностями. Следует особо отметить диаграммы качества колебательных процессов, обобщающие метод гармонической линеаризации и дающие возможность не только анализировать, но и проектировать нелинейные системы автоматического управления. Основная идея диаграмм заключается в рассмотрении колебательных процессов с переменной амплитудой. Сигнал, поступающий на вход нелинейного звена $F(x, \dot{x})$, в системе, показанной на Рис. 1 а, представляется в виде:

$$x(t) = A(t) \sin \Theta(t);$$

$$\frac{dA}{dt} = A\xi(A), \quad \frac{d\Theta}{dt} = \omega(A),$$

где $\xi(A)$ и $\omega(A)$ - показатель затухания и частота, определяемые как функции переменной амплитуды A из характеристического уравнения системы после ее гармонической линеаризации:

$$H(p) + R(p) [q(A) + q'(A)(p - \xi)\omega^{-1}] = 0,$$

$$p = \xi + j\omega.$$

$R(p)$, $H(p)$ - полиномы произвольной степени числителя и знаменателя приведенной линейной части, $q(A)$, $q'(A)$ - коэффициенты гармонической линеаризации.

Таким образом, диаграммы качества (или диаграммы затухания) позволяют исследовать динамику нелинейных систем во всей области амплитуд. С инженерной точки зрения они дают информацию о системе в таком виде, что возможно построение эквивалентной модели, представляющей замкнутую одноконтурную систему и состоящей из рассматриваемой нелинейности и некоторого колебательного звена с переменными параметрами. Это следует из основной идеи метода гармонической линеаризации, согласно которой динамический процесс в замкнутой нелинейной системе определяется корнями, ближайшими к мнимой оси. Эквивалентная модель может быть полезна для целенаправленного изменения параметров системы. Так, если построить семейство диаграмм для различных значений какого-либо параметра системы (Рис. 1 б), то можно выбрать такие значения этого параметра, при которых система

автоматического управления будет удовлетворять предъявленным к ней требованиям.

Особый интерес представляет использование диаграмм затухания для исследования многозвенных манипуляторов. Если в некоторых из n степеней подвижности манипулятора присутствуют однотипные существенные нелинейности, например, упругие люфты в механических передачах, то модель системы может быть представлена в виде структурной схемы (Рис. 2 а):

Здесь $F(x)$ – диагональная матрица ($n \times n$), элементами которой являются, в общем виде, существенные нелинейности; $W(p)$ – функциональная матрица ($n \times n$) приведенной линейной части; $x(t)$ – вектор ($n \times 1$), координаты которого – динамические сигналы, поступающие на вход нелинейностей (Рис. 2, б):

$$x(t) = \sum_{i=1}^l A_i(t) \sin \theta_i(t),$$

$$\frac{dA_i}{dt} = A_i \xi_i(A_1, A_2, \dots, A_l), \quad \frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i(A_1, A_2, \dots, A_l),$$

где l – количество гармоник в рассматриваемом процессе.

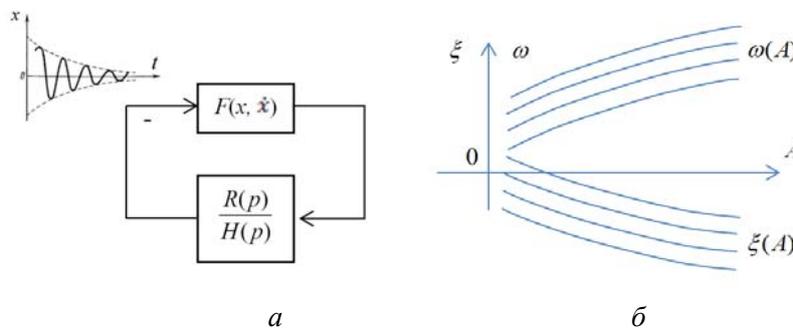


Рис. 1. Исследование нелинейных систем с помощью диаграмм качества колебательных процессов

а – структурная схема, б – семейство диаграмм качества

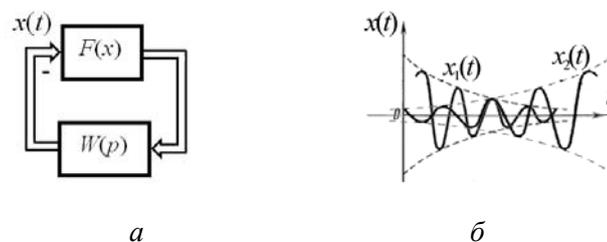


Рис. 2. а – структурная схема многозвенной нелинейной манипуляционной системы, б – многочастотные колебательные процессы

Для определенного класса с помощью диаграмм затухания систем могут быть определены параметры гармонических составляющих и их устойчивость. Для этого выполняется гармоническая линеаризация каждой из нелинейностей, например, методом минимизации среднего значения квадрата разности между действительными и приближенными значениями сигналов.

Помимо развития метода гармонической линеаризации, Е.П. Поповым были получены новые результаты в области процессов управления при вынужденных вибрациях. Так, в результате испытаний ракетной техники выяснилось, что вибрации корпуса ракеты при нелинейности привода рулей приводят к неустойчивости движения в полете. Е.П. Поповым был развит эффективный метод вибрационной линеаризации, позволяющий выбрать параметры системы, обеспечивающие устойчивость. Эти методы в дальнейшем использовались при проектировании баллистических ракет.

Результаты, полученные Е.П. Поповым в теории нелинейных систем управления, получили отражение в ряде монографий. Под редакцией и при участии Е.П. Попова издательство «Машиностроение» в 1978–80 годах выпустило серию из 10 книг по теории нелинейных систем автоматического управления. В 1972 году Е.П. Попов был удостоен второй Государственной премии за работы по теории нелинейных систем управления.

В 1960 г. Е.П. Попов был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению механики и процессов управления. В 1964 г. в звании генерал-майора он был переведен на работу в Москву в Научно-Технический комитет Генерального штаба и назначен председателем только что созданной Секции прикладных проблем при Президиуме АН СССР. На этом посту он находился с 1964 по 1971 год. Несмотря на большую организационную работу и постоянные командировки, Е.П. Попов продолжал свою научную деятельность, в 1966 г. вышла новая книга, написанная совместно с В.А. Бесекерским «Теория систем автоматического регулирования», которая трижды переиздавалась и стала основным учебником для нескольких поколений студентов. За работу в Секции при-

кладных проблем Е.П. Попов был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

После демобилизации из армии в 1971 г. Е.П. Попов вернулся в МВТУ им. Н.Э. Баумана. Одним из инициаторов этого перехода был тогдашний ректор МВТУ академик Г.А. Николаев, с которым Е.П. Попов регулярно встречался на собраниях Академии наук. Вначале он стал заведующим кафедрой прикладной математики, но уже вскоре был назначен заведующим кафедрой «Автоматические системы». К этому времени на кафедре сложилось новое научное направление – дистанционно управляемые манипуляционные системы, которым руководили профессора Н.А. Лакота и В.С. Кулешов. Вышедшая в 1971 г. книга этих авторов «Динамика систем управления манипуляторами» была первой монографией, изданной в СССР по теории и методам проектирования манипуляционных систем. В ней уже содержались элементы новой науки – робототехники. Оставалось найти способы автоматического управления манипулятором без участия человека. Перспективы этого направления были быстро оценены новым заведующим кафедрой. Под руководством и при самом активном участии Е.П. Попова сложилась группа преподавателей и научных сотрудников Университета, начавших работу в области робототехники. Разрабатываются теоретические основы робототехники, начинается издание серии книг «Научные основы робототехники». Первые две книги этой серии: Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. «Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы» и Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. «Системы управления манипуляционными роботами» были изданы в издательстве «Наука» в 1978 году. В дальнейшем, в написании книг этой серии приняли участие, пожалуй, все ведущие специалисты, работавшие в области робототехники, в том числе, Э.В. Попов, А.А. и А.Е. Кобринские, Ф.М. Кулаков, Г.В. Корнев, Г.С. Черноруцкий, А.М. Формальский и другие.

Один из принципов, которых придерживался Е.П. Попов в своей педагогической работе, состоял в том, чтобы сочетать собственно учебный процесс с активной научной работой студентов. Для реализации этого принципа

по инициативе академиков И.М. Макарова, Д.Е. Охочимского, Е.П. Попова и профессора Н.А. Лакоты в 1981 году был создан Научно-учебный Центр «Робототехника» Академии наук и Минвуза СССР. Руководителем Центра стал Е.П. Попов. Это было одно из первых научно-педагогических учреждений в России, в которых получила реализацию идея интеграции академической науки с вузовской наукой и с учебным процессом. В 1991 году Центр был преобразован в Научно-учебный Центр робототехники и автоматизации МГТУ им. Н.Э. Баумана и Российской Академии наук. Объединение в одном месте научных и педагогических сил, занятых решением общих проблем, позволило решать многие актуальные задачи промышленности и народного хозяйства, связанные с робототехникой. Были разработаны принципы построения робототехнической системы для обслуживания термоядерного реактора Токамак, построены мобильные роботы, участвовавшие в работах по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, проводились исследования в области манипуляторов космического базирования, результаты которых были использованы при создании тренажерных устройств для Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. Проводились исследования и по применению робототехнических систем в горной промышленности. За результаты, связанные с внедрением в практику робототехнических систем, в том числе гибких производственных систем в промышленности, Е.П. Попов в 1984 году был награжден третьей государственной премией.

В 90-е годы в робототехнике наметились новые тенденции, связанные с использованием методов искусственного интеллекта при управлении роботами, а также с групповым управлением роботами. Е.П. Попов активно поддержал эти новые направления научного поиска. Сотрудниками Центра при его непосредственном участии были разработаны способы адаптивного управления роботами с использованием системы технического зрения, внедренные в производство. Основные результаты научных работ в области робототехники в МВТУ нашли свое отражение в многотомной серии инженерных монографий «Автоматические манипуля-

торы и робототехнические системы» под общей редакцией Е.П. Попова, изданной в издательстве «Машиностроение». Будучи руководителем Научно-учебного Центра «Робототехника» МВТУ, Е.П. Попов постоянно заботился о поддержании научных и деловых связей Центра с Академией наук. В АН СССР был создан Научно-координационный Совет по научным исследованиям в области робототехники, который возглавил Е.П. Попов.

Е.П. Попов сочетал в себе качества выдающегося ученого и замечательного педагога. Написанные им во время работы в МВТУ учебники «Теория линейных систем автоматического управления» и «Теория нелинейных систем автоматического управления» до настоящего времени не имеют равных себе по лаконичности и ясности изложения. Эти книги были первыми в серии учебников по теории автоматического управления под редакцией Е.П. Попова, изданных в издательстве «Наука».

В 1990 г. Е.П. Попов ушел с должности заведующего кафедрой «Робототехнические системы», оставаясь научным руководителем Центра робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана. В 1992 году он был избран действительным членом Российской Академии Наук.

В 90-е годы наступили тяжелые времена для науки и для Университета, не избежал этих процессов и Центр робототехники. Промышленность на время потеряла интерес к роботам, но Евгению Павловичу удалось отстоять Роботоцентр. Ни на один день в нем не прекращался учебный процесс и научные исследования. На кафедре «Робототехнические системы» удалось сохранить и основной педагогический и научный коллектив.

Интерес к новому в науке, умение вовремя замечать это новое не покидали Е.П. Попова до конца жизни. Последней крупной монографией, в которой он участвовал как автор и редактор, была многотомная энциклопедия «Машиностроение», вышедшая в одноименном издательстве в 2000 году. Том 1-4 этого издания целиком посвящен теории автоматического управления. В написанном им разделе «Теория нелинейных систем» можно найти совершенно новые фрагменты, такие, как фазовое пространство систем высокого порядка и процессы воз-

никновения хаотических движений со странными аттракторами в динамических системах. Кажется, что автор стоял перед новыми открытиями и только уход из жизни в 1999 г. остановил непрерывный процесс научного поиска.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана портрет Евгения Павловича Попова размещен в галерее основате-

лей научных школ с надписью: «Е.П. Попов, академик РАН – основатель научных школ «Нелинейные системы автоматического управления» и «Теоретические основы робототехники».

Зенкевич Станислав Леонидович. Окончил Московское высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана в 1969 году и Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова в 1973 году. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 150 печатных работ, в том числе трёх монографий (1978, 2000, 2004 г.г.) Область научных интересов: управление роботами, моделирование и разработка программного обеспечения для распределенных робототехнических систем. E-mail: zenkev@bmstu.ru

Назарова Анаид Варгановна. Окончила МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1974 году и МГУ им. М.В.Ломоносова в 1977 году. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 печатных работ. Область научных интересов: системы логического управления роботами, моделирование и разработка программного обеспечения распределенных робототехнических систем. E-mail: avn@bmstu.ru

Котов Евгений Анатольевич. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 году. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: математическое моделирование и исследования сложных динамических систем.

Воротников Сергей Анатольевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 печатных работ, в том числе нескольких монографий. Область научных интересов: сенсорные системы роботов, системы управления роботов, системы осязания и технического зрения. E-mail: vorotn@bmstu.ru