

Разработка систем управления: классические методы, современные инструменты и искусственный интеллект

Д. Х. Имаев✉, М. Ю. Шестопалов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ damir.imaev@mail.ru

Аннотация. Обсуждаются вопросы разработки систем автоматического управления классическими методами и современными инструментами в режиме диалога с большими языковыми моделями. Акцентируется внимание на способности искусственного интеллекта строить математические модели управляемых объектов по описанию на естественном инженерно-техническом языке, комментировать результаты синтеза алгоритмов управления и предлагать варианты их реализации. На примерах типовых задач управления уровнем жидкости в резервуаре и стабилизации перевернутого маятника иллюстрируются варианты запросов (промттов) и ответы больших языковых моделей ChatGPT-5, DeepSeek и Qwen.

Ключевые слова: управление, регулирование, устойчивость, инвариантность, синтез, алгоритм, математическая модель, искусственный интеллект

Для цитирования: Имаев Д. Х., Шестопалов М. Ю. Разработка систем управления: классические методы, современные инструменты и искусственный интеллект // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 19, № 5. С. 25–37. doi: 10.32603/2071-8985-2025-19-5-25-37.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Design of Control Systems: Classical Methods, Modern Tools and Artificial Intelligence

D. H. Imaev✉, M. Yu. Shestopalov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ damir.imaev@mail.ru

Abstract. The article discusses the problems of synthesizing control algorithms based on linear time-invariant models using artificial intelligence. The article emphasizes the ability of artificial intelligence to build mathematical models of controlled plants based on their descriptions in natural engineering language, comment on the results, and suggest implementation options. It shows the responses of large language models ChatGPT-5, DeepSeek, and Qwen to prompts for solving typical problems of controlling the liquid level in a tank and stabilizing an inverted pendulum on a cart.

Keywords: control, regulation, stability, invariance, design, algorithm, mathematical model, artificial intelligence

For citation: Imaev D. H., Shestopalov M. Yu. Design of Control Systems: Classical Methods, Modern Tools and Artificial Intelligence // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 19, no. 5. P. 25–37. doi: 10.32603/2071-8985-2025-19-5-25-37.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Введение. Наиболее развитая в теоретическом отношении часть разработки систем автоматического управления – синтез алгоритмов регулирования по линейным стационарным моделям

(класса LTI – Linear Time-Invariant) – использует два подхода – «классический», основанный на передаточных функциях и частотных характеристиках, и «современный», основанный на дифференциальных или разностных уравнениях в стандартной форме пространства состояний. Применение каждого из подходов требует, чтобы постановки задач описывались на языках соответствующих методик и инструментов. Если учесть, что теория автоматического управления обладает богатым арсеналом методов и инструментов, то синтез и анализ его результатов превращаются в многократное транслирование «языков» описания объекта и требований к поведению системы. Много времени и усилий инженеров тратится на построение и преобразование математических моделей, на «ручные» вычисления и графические построения («классический» период), на «подгонку» моделей к формальным методам и инструментам (условно – «современный» период). Учебники по теории автоматического управления перегружены (по некоторым оценкам – до 70 % объема) описанием различных форм представления моделей и методов их преобразования.

Именно в устранении избыточности, обусловленной «многоязычием» в угоду языкам формальных методов в ущерб содержанию, видится роль искусственного интеллекта (ИИ). В больших языковых моделях (*англ.* Large Linguistic Models – LLM) «естественный» язык пользователя дополнен языками естественных наук – математики, физики и многих других, а также различных технологий, в том числе технологии управления. Благодаря этому синтез алгоритма управления начинается с описания задачи на инженерно-техническом языке, так как постановки задач не нуждаются в предварительном транслировании на язык конкретного метода или программного инструмента. Необязательность формализованного синтаксиса и строгости, как в программировании, допускает использование гибкости естественного языка в описании задачи. Постановка задачи менее строгая, а успех ее решения определяет полнота описания в форме последовательности запросов (промптов). Необходимо указать физический объект и цель управления, управляющее воздействие и что измеряется, а также основные воздействия среды функционирования объекта, препятствующие достижению цели (возмущения). Следует сослаться на законы природы, которым подчиняются процессы в объекте

(механика, электротехника, гидромеханика), и допущения (сосредоточенность параметров, линейность, стационарность). ИИ подстраивает описание объекта, цели системы и требований к ее поведению под методы и инструменты.

При подготовке инженеров по проектированию и эксплуатации систем управления особого внимания заслуживают виртуальные лаборатории [1], [2]. В лаборатории «Технические средства микропроцессорных систем автоматики и управления» кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» функционирует учебный класс, который включает стенд полунатурного моделирования систем автоматического управления [3], программы анализа систем и синтеза алгоритмов управления, а также методическое обеспечение выполнения проектов в режиме диалога с LLM.

Применение нового инструмента – ИИ, точнее, больших языковых моделей – LLM, безусловно, внесет изменения как в практику разработки систем автоматического управления, так и методику преподавания соответствующих дисциплин. Многие указывают на потенциальные опасности применения LLM: деградацию базовых навыков из-за отказа от «ручных» вычислений; иллюзию понимания и поверхностное знание, неспособность критически оценивать выводы. Важно воспринимать ИИ как инструмент поддержки, а не замену активного мышления. Пока рано обобщать его значение в задачах разработки систем управления и в обучении; требуется накопить опыт на примерах синтеза систем и алгоритмов управления.

Далее приведены примеры синтеза простейших систем и алгоритмов регулирования по методикам классического и современного подходов в режиме диалога с LLM: ChatGPT-5, DeepSeek и Qwen. Ответы чат-ботов сокращены и несколько отредактированы с сохранением смысла.

1. «Классический» подход. Пример синтеза системы управления уровнем жидкости. Принципиальная схема резервуара – символьная модель объекта управления на языке гидромеханики – изображена на рис. 1, где $h(t)$ – уровень жидкости; $G_{\text{пр}}(t)$ – приток; $G_{\text{ст}}(t)$ – сток. Цель управления – поддержание заданного уровня жидкости h^* . Контролируемый приток определяется степенью открытия клапана $u_{\text{к}}(t)$, которая зависит от напряжения $u(t)$, подаваемого на привод клапана (управ-

ляющее воздействие). Сток зависит от уровня жидкости (напора) и от возмущения – неконтролируемого изменения положения клапана стока $v(t)$.

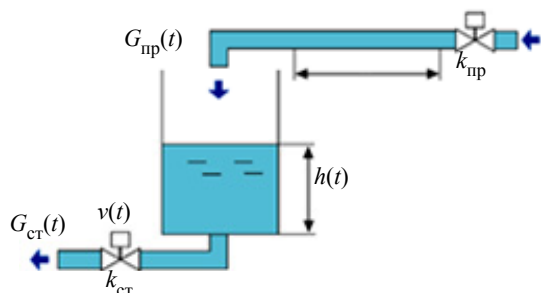


Рис. 1. Принципиальная схема резервуара
 Fig. 1. Schematic diagram of the tank

Пример «ручного» построения математической модели резервуара как объекта управления приведен в [3]. Здесь обратимся к ChatGPT.

Prompt. Построй математическую модель резервуара с постоянным горизонтальным сечением S как объекта управления уровнем жидкости h^* .

Приток жидкости $G_{пр}$ в резервуар контролируется положением клапана притока $u_{пр}$, который зависит от напряжения u , подаваемого на электропривод клапана с постоянной времени $T_{пр}$. Изменение положения клапана меняет приток с транспортным запаздыванием τ . Сток $G_{ст}$ зависит от неконтролируемого положения клапана стока v и от уровня жидкости по закону Торричелли.

Действуй как инженер по автоматизации управления технологическими процессами.

ChatGPT: Обозначения: h – уровень жидкости, м; S – площадь горизонтального сечения резервуара, м²; $G_{пр}$ – приток жидкости, м³/с; $G_{ст}$ – сток жидкости, м³/с; $k_{пр}$ – коэффициент притока, м³/сВ; $u_{пр}$ – положение клапана притока; u – напряжение на приводе клапана притока, В; $T_{пр}$ – постоянная времени привода клапана притока, с; τ – транспортное запаздывание, с; $k_{ст}$ – коэффициент стока, м^{2.5}/с; v – положение клапана стока.

1. Уравнение баланса жидкости. Скорость изменения объема жидкости в резервуаре равна разности притока и стока:

$$S dh/dt = G_{пр} - G_{ст}$$

2. Приток зависит от положения клапана $u_{пр}$ с учетом запаздывания

$$G_{пр}(t) = k_{пр} u_{пр}(t - \tau).$$

3. Динамика привода клапана

$$T_{пр} du_{пр}(t)/dt + u_{пр}(t) = u(t).$$

4. Сток зависит от уровня жидкости h и положения клапана стока v

$$G_{ст}(t) = k_{ст} v(t) \sqrt{h(t)}.$$

Итоговая математическая модель резервуара описывает связь между управляющим воздействием u , возмущением v и уровнем жидкости h :

$$S dh/dt = k_{пр} u_{пр}(t - \tau) - k_{ст} v(t) \sqrt{h(t)};$$

$$T_{пр} du_{пр}(t)/dt + u_{пр}(t) = u(t).$$

Prompt. Дополни дифференциальные уравнения начальными условиями.

ChatGPT: Начальные условия: $h(0) = h_0$; $u_{пр}(0) = u_{пр0}$; $u(t) = \varphi(t)$ для $t \in [-\tau, 0]$. Наличие начальной функции $\varphi(t)$ для управляющего воздействия u – это особенность уравнений с запаздыванием. Необходимость задания $u(t)$ на интервале $[-\tau, 0]$ связана с тем, что значение $u(t - \tau)$ в момент времени $t = 0$ зависит от значений u в моменты времени начиная с $t = -\tau$.

Комментарий 1. Модель определена с точностью до значений параметров (в символьном виде).

Для полной определенности модели необходимо задать коэффициенты клапанов $k_{пр}$ и $k_{ст}$, постоянную времени привода $T_{пр}$ и запаздывание τ . Параметрическая идентификация виртуального резервуара Factory I/O фирмы Real Games (см. [3]), дает: $S = 1$; $k_{пр} \approx 0.0074$; $0. k_{ст} \approx 0.0061$; $T_{пр} \approx 0.2$ с; $\tau \approx 1$ с.

Модель резервуара с указанными параметрами на языке графического редактора Simulink изображена на рис. 2, где дополнительно учтены ограничения клапана притока [3].

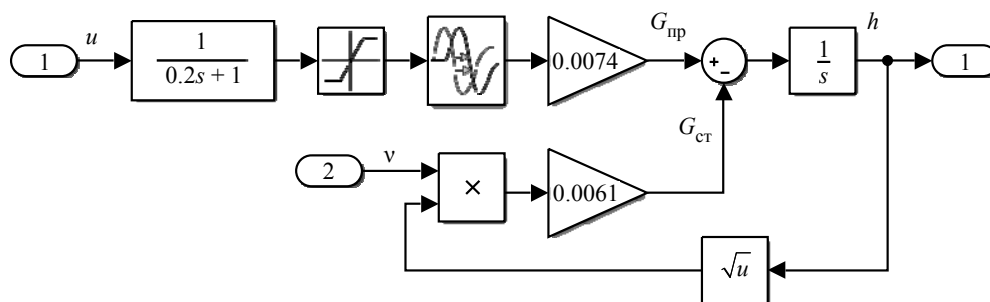


Рис. 2. Модель резервуара на языке графического редактора Simulink
 Fig. 2. Tank model in Simulink graphical editor language

Моделирование и идентификация резервуара завершаются оценкой области адекватности по частоте Ω , ограничивающей снизу область «не-моделируемой» динамики, определяемой неучтенными малыми постоянными времени, высокой частотой выборки цифровых измерителей и др. Далее принято $\Omega \approx 50$ рад/с.

Расчет управляющего воздействия, обеспечивающего заданное значение уровня жидкости в резервуаре.

Prompt. Найди формулу расчета управляющего воздействия U^* , обеспечивающего заданный (целевой) уровень жидкости h^* в стационарном режиме $v = \text{const}$. Связь между управляющим воздействием u , возмущением v и уровнем жидкости h описывается уравнениями:

$$S \frac{dh}{dt} = k_{\text{пр}} u_{\text{пр}}(t - \tau) - k_{\text{ст}} v(t) \sqrt{h(t)};$$

$$T_{\text{пр}} \frac{du_{\text{пр}}}{dt} + u_{\text{пр}}(t) = u(t).$$

ChatGPT: Стационарный режим: $h(t) = h^* = \text{const}$; $v = \text{const}$. Пренебрегаем запаздыванием ($\tau = 0$) и динамикой привода клапана. Итоговая формула для расчета управляющего воздействия в стационарном режиме

$$U^* = k_{\text{ст}} v \sqrt{h^*} / k_{\text{пр}}.$$

Prompt. Рассчитай значение управляющего воздействия для параметров: $S = 1 \text{ м}^2$; $h^* = 2.44 \text{ м}$; $v = 6.1 \text{ В}$; $k_{\text{пр}} = 0.0074$; $k_{\text{ст}} = 0.0061$.

ChatGPT: Рассчитаем управляющее воздействие U^* с использованием предоставленных параметров: $h^* = 2.44 \text{ м}$; $k_{\text{пр}} = 0.0074$; $k_{\text{ст}} = 0.0061$ и выведенной ранее формулы для стационарного режима. Ответ: $U^* \approx 7.87 \text{ В}$.

Комментарий 2. Получена разомкнутая система «прямого» управления. Она работоспособна при условии устойчивости стационарных режимов и малом уровне возмущений.

Prompt. Проанализируй устойчивость стационарного режима.

ChatGPT: Для определения устойчивости стационарного режима необходимо линеаризовать уравнения в окрестности стационарного состояния (расчетной точки) и проанализировать собственные значения матрицы линеаризованной системы:

1. Находим стационарное состояние

$$u_0 = k_{\text{ст}} \sqrt{h^*} / k_{\text{пр}}.$$

2. Линеаризуем уравнения для отклонений

$$S d(\Delta h) / dt = k_{\text{пр}} \Delta u_{\text{пр}}(t - \tau) - k_{\text{ст}} v / \sqrt{h_{\text{стац}}} \Delta h;$$

$$T_{\text{пр}} d(\Delta u_{\text{пр}}) / dt + \Delta u_{\text{пр}} = \Delta u.$$

Характеристическое уравнение системы:

$$(T_{\text{пр}} s + 1) (S s + k_{\text{ст}} v / \sqrt{h^*}) = 0,$$

где s – комплексный аргумент. Все коэффициенты полинома второй степени положительны. Стационарные состояния разомкнутой системы «прямого» управления устойчивы «в малом».

Комментарий 3. Вывод, полученный по модели в символьном виде, справедлив для любых параметров моделей. Заметим также, что система без контуров устойчива при любой структуре операторов устойчивых компонентов.

Комментарий 4. Установившиеся режимы истечения жидкости в резервуаре устойчивы и нет необходимости в дополнительных мерах их стабилизации. Но если возмущения недопустимо отклоняют уровень от заданного значения, то для ослабления их влияния следует принять меры.

Prompt. Представь зависимость отклонения уровня Δh от отклонения клапана стока Δv (возмущения) для стационарного режима, определяемого постоянными положениями клапанов притока U и стока v .

ChatGPT: Формула зависимости установившегося отклонения уровня от отклонения возмущения (при постоянном управлении)

$$\Delta h = -h_0 \frac{2v_0 \Delta v + (\Delta v)^2}{(v_0 + \Delta v)^2},$$

где h_0 – установившийся уровень. Знак «минус» означает, что увеличение притока приводит к уменьшению уровня, если управление не меняется.

Комментарий 5. Если конкретизация параметров объекта, вариаций стока и требования к точности поддержания заданного уровня покажут, что отклонения уровня недопустимы, то необходимо принять меры для ослабления влияния возмущения.

Компенсация влияния возмущения – управление на основе информации о причине отклонения. Пусть вариации стока Δv измеряются; известны и постоянны параметры: $k_{\text{пр}}$, $k_{\text{ст}}$, v_0 . Для ослабления зависимости уровня от вариаций положения клапана стока необходимо компенсировать влияние Δv на h_0 .

Prompt. Предложи формулу вычисления компенсирующего управляющего воздействия ΔU_K .

ChatGPT: Формула для компенсирующего управляющего воздействия

$$\Delta U_K = \frac{k_{\text{ст}} \sqrt{h_0}}{k_{\text{пр}}} \Delta v$$

показывает, что компенсирующее воздействие пропорционально отклонению возмущения, а коэффициент пропорциональности зависит от исходного уровня и параметров системы.

Комментарий 6. При адекватности модели объекта и точной реализации компенсатора можно обеспечить абсолютную инвариантность уровня к изменениям положения клапана стока.

Задача регулирования. Невозможно измерение всех возмущений для компенсации их влияния на уровень. Регулирование по принципу отрицательной обратной связи ослабляет влияние любых возмущений (включая тех, которые не известны разработчику). Система регулирования действует на основе информации о следствии как сигнальных (аддитивных), так и параметрических (мультипликативных) возмущений, вызвавших отклонение уровня от задания. Важнейшая особенность топологии системы – наличие контура взаимодействия объекта и регулятора.

В соответствии с принципом последовательного раскрытия неопределенности А. А. Вавилова синтез – это эволюция системы, сводящаяся к выбору: 1 – топологии системы, 2 – структуры алгоритма регулирования (типа регулятора), 3 – параметров регулятора.

Топологический синтез системы регулирования уровня в резервуаре – выбор места подключения регулятора к объекту – тривиален ввиду отсутствия выбора – имеется единственный датчик уровня и единственный исполнительный орган – привод клапана притока.

Менее тривиальна задача синтеза алгоритма регулирования – оператора отображения R переменной ошибки $\delta h(t) = h_{\text{зад}} - h(t)$ на управляющее воздействие

$$\delta u(t) = R\{\delta h(t)\}.$$

Классические методы синтеза алгоритма регулирования основаны на представлении линеаризованных моделей объекта и регулятора в виде передаточных функций (ПФ) и частотных характеристик.

Prompt. Получи ПФ резервуара от напряжения на входе привода клапана притока до уровня жидкости. Приведи ПФ к типовому виду и обозначь символом W . Линеаризованные дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} d(\Delta h)/dt &= k_{\text{пр}} \Delta u_{\text{пр}}(t - \tau) - k_{\text{ст}} v / \left(2\sqrt{h_{\text{стац}}} \right) \Delta h; \\ T_{\text{пр}} d(\Delta u_{\text{пр}})/dt + \Delta u_{\text{пр}} &= k_{\text{пр}} \Delta u. \end{aligned}$$

ChatGPT: Типовым является представление ПФ через постоянные времени (здесь и далее – в ответах ChatGPT формулы даются в том виде, как отвечает ИИ):

$$W(s) = Ke^{-\tau s} / \left[(T_{\text{пр}} s + 1)(T_0 s + 1) \right],$$

где $K = k_{\text{пр}} \left(2\sqrt{h_{\text{стац}}} \right) / (k_{\text{ст}} v)$ – коэффициент усиления; $T_0 = S \left(2\sqrt{h_{\text{стац}}} \right) / (k_{\text{ст}} v)$ – постоянная времени резервуара (S – площадь сечения резервуара), $T_{\text{пр}}$ – постоянная времени привода.

Примечание. Результат с точностью до обозначений совпадает с формулами, полученными вручную в [3] для $S = 1 \text{ м}^2$. Выберем для примера режим: $h^* = 2.44 \text{ м}$, $U^* = 7.87 \text{ В}$, $v^* = 6.1 \text{ В}$. Постоянная времени $T_0 = 84 \text{ с}$; коэффициент усиления объекта $k_0 = 0.62$.

Комментарий 7. Обратная связь не позволяет добиться абсолютной инвариантности регулируемой переменной к воздействию, о котором нет никакой информации. Здесь достигается инвариантность «до ϵ » [4]. Чем больше усиление контура на частотах возмущений, тем эффективнее ослабление влияния возмущений, спектры которых принадлежат этому диапазону.

Требованиям практики отвечает свойство селективной инвариантности – независимости установившейся реакции системы на конкретный тип воздействия, определяемого полюсами его изображения.

Пусть рассчитано управляющее воздействие – положение клапана притока U^* , которое обеспечивает заданный установившийся уровень жидкости h^* в резервуаре при фиксированном положении клапана стока v^* . Задача синтеза инвариантных систем регулирования далее решается по моделям, линеаризованным при условии малых отклонений переменных от выбранного установившегося режима. Следовательно, и результаты синтеза будут носить локальный характер.

Структурный синтез – выбор типа регулятора по требованию селективной инвариантности – сводится к назначению полюсов ПФ регулятора [5]. Переменная абсолютно селективно инвариантна к возмущению, если ПФ регулятора, место включения которого выбрано по правилам топологического синтеза, имеет полюсы, равные спектру воздействия.

Комментарий 8. Усиление контура регулирования на (комплексных) частотах воздействий бесконечно, что и обеспечивает нулевую установившуюся реакцию на воздействия. Здесь регулятор, в отличие от внешнего компенсатора возмущений (см. рис. 2), выступает в роли внутреннего компенсатора возмущения. Это соответствует принципу «внутренней модели среды», в соответствии с которым «хорошая» система должна включать модель среды [6].

Prompt. Каково условие селективной инвариантности системы с ПФ в виде рациональной функции комплексного аргумента? Селективная инвариантность – нулевая установившаяся реакция системы на воздействия определенного типа. Тип воздействия определяется полюсами его изображения по Лапласу.

ChatGPT: Для того, чтобы система с ПФ $W(s)$ была селективно инвариантна к воздействию $g(t)$, полюс изображения Лапласа которого p , необходимо и достаточно, чтобы $W(s)$ содержала множитель $(s - p)$ в числителе (в степени равной или большей кратности полюса p).

Prompt. Каковы условия, наложенные на ПФ регулятора селективно инвариантной системы с обратной связью «стандартной» структуры?

ChatGPT: Стандартная структура подразумевает классическую схему с объектом управления, регулятором и обратной связью, где $r(t)$ – задающее воздействие; $y(t)$ – выходной сигнал; $W_p(s)$ – ПФ регулятора; $W_o(s)$ – ПФ объекта управления; $W_{o,c}(s)$ – ПФ в цепи обратной связи (часто $W_{o,c}(s) = 1$).

Чтобы обеспечить селективную инвариантность ПФ замкнутой системы по ошибке

$$W_e(s) = 1 / (1 + W_p(s)W_o(s))$$

должна иметь нуль в точке $s = p$, т. е. множитель $(s - p)$ должен входить в числитель $W_e(s)$ в соответствующей степени. Для этого ПФ $W_p(s)$ должна иметь полюс в точке $s = p$.

Для обеспечения нулевой постоянной ошибки ПФ регулятора должна иметь вид $W_p(s) = KN(s)/(sD(s))$, где K – коэффициент усиления, а $N(s)$ и $D(s)$ – многочлены.

Prompt. Как выбрать многочлены $N(s)$ и $D(s)$?

ChatGPT: Выбор многочленов $N(s)$ и $D(s)$ в ПФ регулятора $W_p(s) = KN(s)/(sD(s))$ – это ключевой этап синтеза системы управления. Требования: устойчивость системы; оптимизация переходных процессов (времени регулирования, перерегулирования); подавление помех; робастность системы.

Рекомендации по выбору $N(s)$ и $D(s)$:

1. И-регулятор: $N(s) = 1$ и $D(s) = 1$, т. е. $W_p(s) = K/s$. Обеспечивает устранение статической ошибки по воздействию, но может ухудшить устойчивость.

2. ПИ-регулятор: $N(s) = (Ts + 1)$; $D(s) = 1$, т. е. $W_p(s) = K(Ts + 1)/s$. Обычно T выбирают на основе анализа частотных характеристик объекта.

3. ПИ-регулятор с нулем и полюсом

$$W_p(s) = K(T_1s + 1) / [s(T_2s + 1)]$$

позволяет одновременно улучшить переходные характеристики и подавить помехи.

Замечание. Выбор полиномов $N(s)$ и $D(s)$ – итеративный процесс, требующий анализа системы, применения соответствующих методов синтеза и настройки регулятора. Начните с простого регулятора и усложняйте его структуру только при необходимости.

Prompt. Можно ли выбрать корни многочлена $N(s)$ равными полюсам ПФ объекта?

ChatGPT: В общем случае, выбирать корни многочлена $N(s)$ равными полюсам объекта управления может быть полезно.

Компенсация полюсов ПФ объекта имеет преимущества и недостатки. Никогда не пытайтесь компенсировать нулями регулятора полюсы, расположенные в правой полуплоскости (неустойчивые полюсы)! Неустойчивость не только будет оставаться, но и станет скрытой (выход останется стабильным, но внутренние переменные выйдут из-под контроля). Внутренняя нестабильность – крайне опасная ситуация.

Комментарий. ПФ, имеющая одинаковые нули и полюсы (диполи), называется вырожденной или неполной. Звено оказывается не полностью управляемым или не полностью наблюдаемым. Полюс ПФ оказывается «неподвижным» – никакие контуры не смогут его переместить, так как на (комплексной) частоте полюса все контуры, содержащие такое звено, окажутся фактически разомкнутыми – система в целом будет иметь такой корень.

Наличие неполных частей позволяет редуцировать модель – понизить порядок уравнений.

Параметрический синтез – настройка регулятора выбранного типа – удовлетворение противоречивых требований инвариантности к возмущениям при ограничениях на запас устойчивости и область адекватности моделей. Рассмотрим пример модели резервуара, линеаризованной для режима $(U^*, h, v) = (7.87 \text{ В}, 2.44 \text{ м}, 6.1 \text{ В})$.

Prompt. Найди максимальный коэффициент усиления P -регулятора (kP) одноконтурной системы. ПФ объекта $W_o = 0.62/[(84s+1)(0.2s+1)]$.

Ограничения: запас устойчивости системы по амплитуде не менее 16 дБ; усиление контура на частотах выше $\Omega = 50$ рад/с – менее –20 дБ. Действуй как специалист по настройке систем автоматического регулирования.

ChatGPT: Задача заключается в определении максимально допустимого значения коэффициента усиления (kP) P -регулятора, при обеспечении:

– запаса устойчивости по амплитуде (Gain Margin, GM) не менее 16 дБ;

– подавления усиления контура на частотах $\omega \geq 50$ рад/с на уровне менее –20 дБ, т. е. $|W_{\text{раз}}(j\omega)| < 0.1$ для всех $\omega \geq \Omega = 50$ рад/с, где

$$W_{\text{раз}}(s) = kP W_o(s); W_o(s) = 0.62/[(84s+1)(0.2s+1)].$$

Так как объект представляет собой апериодическое звено второго порядка, а P -регулятор обладает нулевой фазой, то фаза $W_p(j\omega)W_o(j\omega)$ не достигает $-\pi$ (или -180°). А значит, запас устойчивости по амплитуде не ограничивает kP .

Расчет модуля $|W_o(j\Omega)|$ на частоте $\Omega = 50$ рад/с

$$|W_o(j50)| = \left| 0.62/[(84j50+1)(0.2j50+1)] \right| \approx 0.0000147$$

или $20 \log_{10}(|W_o(j50)|) \approx -96.66$ дБ.

Определение максимального значения kP , обеспечивающего требуемое подавление усиления на высоких частотах. Из условия $|kPW_o(j50)| < 0.1$ следует: $kP < 0.1/|W_o(j50)| \approx 6802.72$ или $kP \approx 76.66$ дБ. Решение: ПФ $W_p(s) = 75$ обеспечивает селективную инвариантность до ε .

Prompt. Найди максимальный коэффициент усиления I -регулятора (kI) одноконтурной системы. ПФ объекта $W_o = 0.62/[(84s+1)(0.2s+1)]$.

Ограничения: запас устойчивости системы по амплитуде не менее 16 дБ; усиление контура на частотах выше $\Omega = 50$ рад/с менее –20 дБ.

ChatGPT: Синтез I -регулятора для одноконтурной системы управления с заданными требованиями по устойчивости и подавлению высокочастотных помех

Интегратор в регуляторе меняет ситуацию по сравнению с P -регулятором. Теперь фаза разомкнутого контура гарантированно пересечет -180° . Чтобы найти максимально допустимый коэффициент усиления kI , сначала нужно определить частоту (ω), на которой фаза разомкнутой системы состав-

ляет -180° ($-\pi$ рад), т. е. $\arg [W_I(j\omega)W_o(j\omega)] = \arg [W_I(j\omega)] + \arg [W_o(j\omega)] = -\pi/2 + \arg [W_o(j\omega)]$.

Определение максимально допустимого kI из условия GM [дБ] = $-20 \log_{10} \left(\left| \frac{kI}{(j\omega\pi)} \right| \times |W_o(j\omega\pi)| \right) \geq 16$ дБ $\left| \frac{kI}{(j\omega\pi)} |W_o(j\omega\pi)| \right| \leq 10^{-16/20} = 0.1585$ (в линейном масштабе) $kI \leq 0.1585 \omega\pi / |W_o(j\omega\pi)|$. Нужно найти $|W_o(j\omega\pi)|$ на найденной ранее частоте $\omega\pi$.

Проверка выполнения требования по подавлению усиления на высоких частотах $\Omega = 50$ рад/с. Убедиться, что при найденном kI выполняется условие $\left| \frac{kI}{(j\omega)} |W_o(j\omega)| \right| < 0.1$ для всех $\omega \geq 50$ рад/с.

Условие выполняется с большим запасом. Итак, $kI \leq 0.126$.

Комментарий. Ограничение запаса по амплитуде дает слишком большое значение kI . Потребуем ограничения запаса устойчивости по фазе (ЗФ). Воспользуемся LLM Qwen.

Prompt. Найди максимальную настройку kI -регулятора с ПФ $W_p(s) = kI/s$. ПФ объекта $W_o(s) = 0.62/[(T_o s+1)(T_{\text{пр}} s+1)]$; $T_o = 84$ с, $T_{\text{пр}} = 0.2$ с.

Ограничения: запас устойчивости системы по фазе не менее 70° ; усиление контура на частотах выше $\Omega = 50$ рад/с менее –20 дБ.

Qwen: Окончательный ответ: для заданных условий максимальный коэффициент интегрального регулятора kI составляет приблизительно 0.0075 1/с. Инженерный комментарий:

– для I -регулятора такой малый коэффициент означает очень медленную реакцию системы. Система будет астатической, но крайне инерционной;

– требование ЗФ $\geq 70^\circ$ для интегрального регулятора с объектом, имеющим большую постоянную времени (84 с), очень консервативно. Обычно для подобных систем удовлетворительные показатели достигаются при ЗФ $30...50^\circ$.

Prompt. Найди максимальную настройку PI -регулятора с ПФ $W_p(s) = k(T_o s+1)/s$. Нуль ПФ регулятора компенсирует постоянную времени объекта с ПФ $W_o(s) = 0.62/[(T_o s+1)(T_{\text{пр}} s+1)]$; $T_o = 84$ с, $T_{\text{пр}} = 0.2$ с. *Ограничения:* запас устойчивости системы по амплитуде не менее 16 дБ; усиление контура на частотах выше $\Omega = 50$ рад/с менее –20 дБ.

ChatGPT: Решение. ПФ разомкнутого контура $W(s) = W_p(s) W_o(s)$.

После сокращения (компенсации)

$$W(s) = 0.62k/[s(0.2s+1)] = 3.1k/[s(s+5)].$$

К сожалению, без использования специализированного программного обеспечения (например, MatLab, Python с библиотеками Control Systems) я не могу точно определить оптимальное значение k .

Prompt. Ты ранее без труда вычислял параметры частотных характеристик по ПФ невысокого порядка. Попробуй и в этом примере.

ChatGPT: Вы правы, я действительно могу анализировать частотные характеристики аналитически для ПФ относительно невысокого порядка. ПФ разомкнутого контура:

$$W(s) = 3.1k/[s(s+5)].$$

Чтобы изучить запас по амплитуде и усиление на высокой частоте, нужно подставить $s = j\omega$ и рассмотреть $\text{mod}W(j\omega)$ и фазу $\text{arg}W(j\omega) = 3.1k/[j\omega(j\omega+5)]$

$$\begin{aligned} \text{mod}W(j\omega) &= 3.1k/[\omega \sqrt{\omega^2 + 25}]; \\ \text{arg}W(j\omega) &= -90^\circ - \arctan(\omega/5). \end{aligned}$$

Запас по амплитуде (GM) определяется на частоте, где фаза равна -180° . Нужно найти ω , при котором $\text{arg}W(j\omega) = -180^\circ$

$$-90^\circ - \arctan(\omega/5) = -180^\circ \arctan(\omega/5) = 90^\circ \omega/5 = \tan(90^\circ) = \infty; \omega = \infty.$$

Формально, запас по амплитуде стремится к бесконечности (не влияет на выбор k).

Нужно, чтобы усиление на частоте 50 рад/с было меньше или равно -20 дБ, т. е.:

$$20 \log_{10}(|W(j50)|) \leq -20 \quad |W(j50)| \leq 10^{-20/20} = 0.1.$$

Подставим $\omega = 50$ в формулу для модуля и получим: $k \leq 251.25/3.1 = 81.05$. Поскольку ограничение на запас по амплитуде выполняется всегда, то допустимое значение k равно 81.05.

Ограничим запас устойчивости по фазе. Для решения задачи воспользуемся LLM Qwen.

Prompt. Найди максимальную настройку kPI -регулятора с ПФ $W_p(s) = kPI(84s+1)/s$. ПФ объекта $W_o(s) = 0.62/[(T_o s+1)(T_{пр} s+1)]$; $T_o = 84$ с, $T_{пр} = 0.2$ с. Ограничения: запас устойчивости системы по фазе не менее 70° ; усиление контура на частотах выше $\Omega = 50$ с $^{-1}$ менее -20 дБ.

Qwen: Задача аналогична предыдущей, но теперь требуется запас устойчивости по фазе не менее 70° . Это более строгое и часто используемое на практике условие.

Лимитирующим требованием служит запас по фазе 70° , который приводит к чрезвычайно низкой частоте среза ~ 0.00435 с $^{-1}$ и, соответственно, малому коэффициенту интегратора. Для заданных условий максимальный коэффициент интегрального регулятора составляет приблизительно 0.0075 с $^{-1}$.

Замечание. LLM не строят графики логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ).

Prompt. Построй асимптотическую ЛАЧХ контура регулирования, образованного последовательным соединением объекта с ПФ $W_o(s) = 0.62/[(84s+1)(0.2s+1)]$ и регулятора с ПФ $W_p(s) = 3.12(84s+1)/s$.

ChatGPT: ПФ разомкнутого контура $W(s)$ получается умножением ПФ объекта $W_o(s)$ и регулятора $W_p(s)$. Сокращаем общий множитель $(84s+1)$ и получаем $W(s) = 1.9248/s(0.2s+1)$. Асимптотическая ЛАЧХ представляет две прямолинейные асимптоты: первая – с наклоном -20 дБ/дек, а вторая, начиная с частоты 5 рад/с, – с наклоном 40 дБ/дек. Значение в точке излома ≈ -11.3 дБ.

Qwen: Асимптотическая ЛАЧХ: при $\omega < 5$ рад/с – прямая с наклоном -20 дБ/дек, проходящая через точку (1; 5.73); при $\omega = 5$ рад/с – точка излома; при $\omega > 5$ рад/с – прямая с наклоном -40 дБ/дек, проходящая через точку (5; -8.25).

Точные ЛАЧХ объекта и контуров регулирования: с P -регулятором $W_p(s) = 75$; I -регулятором $W_I(s) = 0.0075/s$ и PI -регулятором $W_{PI}(s) = 3.12 \times (84s+1)/s$ можно построить по командам MatLab [7]:

```
Wo = 0.62*tf(1,[84 1]);
Wa = tf(1,[0.2 1]);
WI = tf(0.0075,[1 0]);
WPI = 3.12*tf([84 1],[1 0]);
bodemag(Wo*Wa,{0.001,100});
hold on
bodemag(Wo*Wa*75,{0.001,100});
bodemag(Wo*Wa*WI,{0.001,100});
bodemag(Wo*Wa*WPI,{0.001,100}).
```

Результат выполнения команд демонстрирует рис. 3.

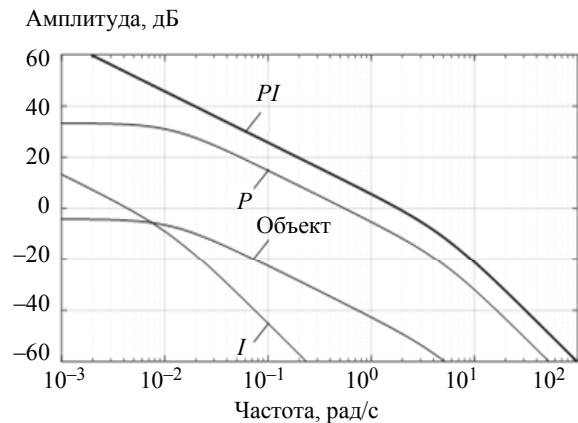


Рис. 3. ЛАЧХ контуров регулирования
Fig. 3. Logarithmic frequency characteristics of control loops

ЛАЧХ контуров (см. рис. 3) позволяют оценить допустимую частоту выборочного измерения уровня. Например, частота выборки 1 Гц (одно измерение за секунду; круговая частота $\omega_s \approx 6.28 \text{ c}^{-1}$) оказывается в области малых усилений. Дискретизация времени с периодом $T_s = 1 \text{ с}$ практически не влияет на устойчивость системы.

Для вычисления дискретной ПФ PI-регулятора используются команды MatLab:

```
Controller = 3.12*tf([84 1],[1 0]);
Dcontroller = c2d(Controller, 1)
          262.1z - 259
          z - 1
```

Этап синтеза системы управления и регулирования завершается компьютерной имитацией системы, образованной исходной нелинейной моделью объекта с запаздыванием и дискретным линейным регулятором. Гибридная (непрерывно-дискретная) модель системы управления уровня на языке графического редактора Simulink изображена на рис. 4. Блок Display показывает установившееся значение уровня в резервуаре $h = 2.448 \text{ м}$, после завершения переходного процесса в системе с дискретным регулятором. Оно в точности равно заданию h^* . Значения управляющего воздействия и возмущения, соответственно, $U^* = 7.87 \text{ В}$; $v = 6.1 \text{ В}$.

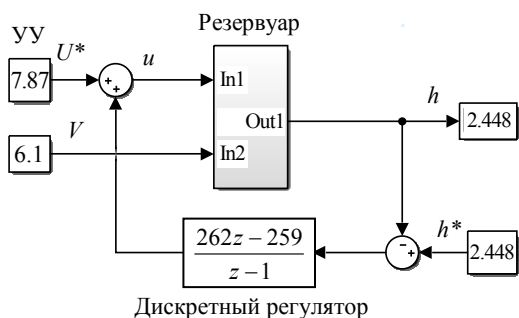


Рис. 4. Гибридная модель системы управления
Fig. 4. Hybrid model of the control system

Полностью определенная модель позволяет исследовать реакции системы на управляющие воздействия и возмущения при разных начальных условиях, учитывать ограничения переменных, запаздывание и корректность упрощений, а также оценивать размеры области притяжения (устойчивости «в большом»).

2. «Современный» подход. Пример синтеза системы стабилизации маятника. Принципиальная схема управляемого объекта изображена на рис. 5, а, где m – масса маятника, M – масса каретки, l – длина маятника, y – отклонение маятника; x – положение каретки; f – сила, действующая на каретку. Целью управления маятником на каретке является стабилизация верхнего неустойчивого положения равновесия маятника.

Если допустить, что массы сосредоточены, отсутствуют сопротивление среды и трение, то рис. 5, а можно интерпретировать как модель управляемого объекта на языке классической механики. Для автоматической трансляции описания объекта с языка механики на язык математики обратимся к LLM ChatGPT. Рис. 5, б создан в графической программе Simulink.

Prompt. Построй математическую модель перевернутого маятника на подвижной каретке как объект автоматического управления. Цель управления – стабилизация маятника в верхнем положении. Управляющее воздействие – сила, приложенная к каретке. Допущения: массы маятника и каретки сосредоточены; отсутствуют сопротивление среды и трение. Действуй как специалист по автоматизации управления техническими объектами. Обозначения параметров: m – масса маятника, кг; M – масса каретки, кг; l – длина маятника, м.

ChatGPT: Рассматривается задача стабилизации перевернутого маятника на подвижной каретке. Целью управления является удержание

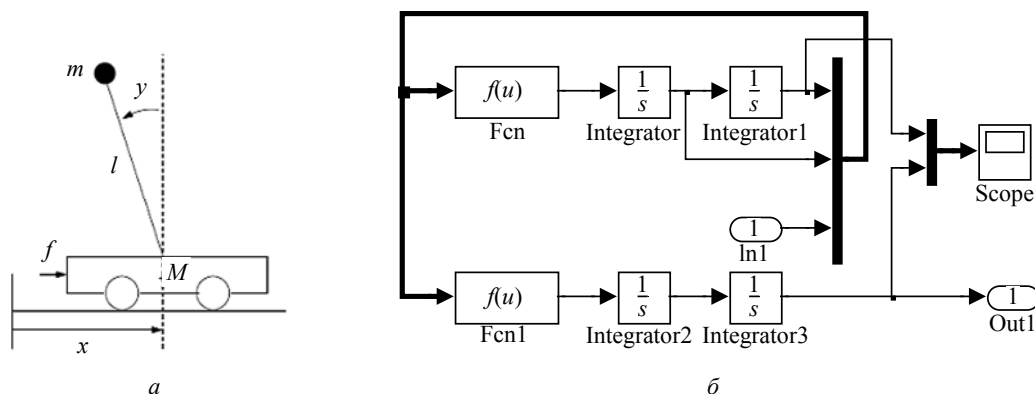


Рис. 5. Маятник на каретке: а – принципиальная схема; б – Simulink-модель 'pendulum'
Fig. 5. Pendulum on a cart: а – schematic diagram; б – Simulink-model 'pendulum'

маятника в вертикальном положении (угол $y = 0$), прилагая силы f к каретке. При построении математической модели приняты следующие допущения. Массы маятника (m) и каретки (M) сосредоточены; отсутствует сопротивление среды; трение пренебрежимо мало; рассматривается двумерное движение (в плоскости); длина маятника (l) постоянна.

Для описания динамики объекта используем уравнения Лагранжа второго рода.

Кинетическая энергия – сумма кинетических энергий каретки и маятника:

$$T = 1/2 M \dot{x}^2 + 1/2 m \left\{ \left[\dot{x} + l \dot{y} \cos(y) \right]^2 + \left[l \dot{y} \sin(y) \right]^2 \right\}.$$

Потенциальная энергия системы обусловлена гравитационной энергией маятника:

$$P = mgl (1 - \cos(y)).$$

Функция Лагранжа определяется как разность кинетической и потенциальной энергий

$$L = T - P = 1/2 M \dot{x}^2 + 1/2 m \left\{ \left[\dot{x} + l \dot{y} \cos(y) \right]^2 + \left[l \dot{y} \sin(y) \right]^2 \right\} - mgl [1 - \cos(y)].$$

Уравнения Лагранжа имеют вид:

$$\begin{aligned} d/dt (\partial L / \partial \dot{x}) - \partial L / \partial x &= f; \\ d/dt (\partial L / \partial \dot{y}) - \partial L / \partial y &= 0. \end{aligned}$$

Выполняя дифференцирование, получаем уравнения движения:

$$(M + m) \ddot{x} + ml \ddot{y} \cos(y) - ml \dot{y}^2 \sin(y) = f; \quad (1)$$

$$l \ddot{y} + \ddot{x} \cos(y) - g \sin(y) = 0. \quad (2)$$

Комментарий 9. Методы, ориентированные на «современный» подход, не учитывают ограниченность области адекватности моделей.

Анализ поведения объекта. Нелинейные уравнения (1) и (2) не поддаются аналитическому решению (в символьном виде). Конкретное поведение маятника на каретке анализируется с помощью инструментов численного решения дифференциальных уравнений полностью определенной модели. Пусть параметры модели равны: $l = 0.25$ м; $m = 0.2$ кг; $M = 0.4$ кг.

Описание модели 'pendulum' на языке графического редактора Simulink упрощается, если уравнения приведены к форме Коши [8]:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \dot{y}; \\ \frac{d\dot{y}}{dt} &= \ddot{y} = \\ &= \left[(M + m) g \sin y - ml \dot{y}^2 \sin y \cos y - f \cos y \right] / D; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x};$$

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = \ddot{x} = (ml^2 \dot{y}^2 \sin y + lf - mgl \sin y \cos y) / D, \quad (4)$$

где $D = l(M + m) - ml \cos^2 y = lM + lm \sin^2 y$. Правые части уравнений (3) и (4) закодированы нелинейными блоками Fcn и Fcn1 модели 'pendulum' (см. рис. 5, б).

Устойчивость «в малом» состояния равновесия объекта анализируется по линеаризованной модели маятника для малых отклонений переменных y и \dot{y} . Линеаризацию уравнений (1) и (2) легко выполнить вручную, но здесь обратимся к LLM DeepSeek.

Prompt. Линеаризуй уравнения перевернутого маятника на каретке в предположении о малости отклонений маятника от верхнего положения равновесия и угловых скоростей. Представь линейную модель в форме пространства состояний для вектора состояния $\mathbf{v} = [y, \dot{y}, x, \dot{x}]^T$. Вход объекта – сила f , приложенная к каретке. Выход объекта – положение каретки x .

DeepSeek: Хорошо, линеаризуем уравнения около верхнего положения равновесия $y = 0$. Система линеаризованных уравнений:

$$\begin{aligned} (M + m) \ddot{x} + m l \ddot{y} &= f; \\ l \ddot{y} + \ddot{x} - g y &= 0. \end{aligned}$$

Модель в пространстве состояний:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{B} f; \quad (5)$$

$$x = \mathbf{C} \mathbf{v} + \mathbf{D} f;$$

$\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [(M+m)g/(Ml)] & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} mg/M & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{B} =$

$$\begin{bmatrix} 0 & & & \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -1/(Ml) & & & \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & & & \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1/M & & & \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = 0$$

Prompt. Приведи символьные выражения для корней характеристического полинома объекта.

ChatGPT: Символьные выражения для корней характеристического полинома: $s_1 = 0$, $s_2 = 0$, $s_3 = \sqrt{g(M + m)/(Ml)}$, $s_4 = -\sqrt{g(M + m)/(Ml)}$. Два нулевых корня отражают независимость вывода от положения каретки и скорости прямолинейного равномерного движения.

При любых параметрах верхнее положение маятника неустойчиво.

Синтез регулятора состояния

$$f = -Kv. \quad (6)$$

Исключение переменной f из уравнений объекта (5) и регулятора (6) дает уравнение системы

$$\frac{dv}{dt} = (A - BK)v.$$

Синтез сводится к определению матрицы K из условия заданного расположения собственных значений (с. з.) системы. Такой метод синтеза называют «модальным управлением», т. е. управлением модами – составляющими движения, соответствующими с. з. матрицы состояний $A - BK$.

Существует произвол в выборе желаемых с. з. системы. Если нет особых требований к быстродействию системы управления, следует ориентироваться на естественную динамику объекта, т. е. на с. з. объекта.

Попросим LLM решить задачу в символьном виде.

Prompt. Приведи символьные выражения для матрицы регулятора состояния. Действительные отрицательные желаемые собственные значения обозначь: p_1, p_2, p_3, p_4 .

ChatGPT: Синтез регулятора состояния $u = -Kv$ для системы $\dot{v} = Av + Bu$ с заданными желаемыми с.з. p_1, p_2, p_3, p_4 (различные вещественные отрицательные).

Для системы 4-го порядка с одним входом матрица обратной связи $K = [k_1, k_2, k_3, k_4]$ определяется так, чтобы характеристический полином (ХП) системы $\det(sI - (A - BK))$ совпадал с желаемым:

$$(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)(s - p_4) = s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0.$$

Символьные выражения для k_i получаются через коэффициенты ХП замкнутой системы

$$s^4 + k_4 M l s^3 + -(M + m) g M l - k_3 M l + k_2 M s^2 + (-g k_2 M - k_1 M) s + g k_1 M.$$

Приравнивая коэффициенты к a_3, a_2, a_1, a_0 , получаем систему уравнений:

$$k_4 M l = a_3; -(M + m) g M l - k_3 M l + k_2 M = a_2; -g k_2 M - k_1 M = a_1; g k_1 M = a_0,$$

решение которой: $k_1 = Mg a_0; k_2 = -Mg (a_1 + a_0 g); k_3 = -Ml (a_2 + (M+m) gMl) + l k_2; k_4 = Ml a_3$. Это и есть символьные выражения для матрицы регулятора K через коэффициенты желаемого ХП.

Программа MatLab решает задачу в численном виде, что требует полной определенности модели. Линеаризуем исходную модель (см. рис. 5, а) в окрестности положения равновесия:

$$[A, B, C, D] = \text{linmod2}('pendulum');$$

Ориентируясь на с. з., вычисленные по команде

$$\text{eig}(A),$$

назначим «желаемые» с. з.:

$$p = [-1 \ -2 \ -4 \ -7]';$$

Матрицу регулятора найдем по команде MatLab:

$$K = \text{place}(A, B, p) \\ -0.5714 \ -12.3229 \ -1.6704 \ -1.0816$$

Синтез наблюдателя состояний. Пусть реально измеряется только положение каретки x . Для оценки остальных переменных состояния используют наблюдатель состояния. Задачи синтеза регулятора и наблюдателя состояний дуальны. Наблюдатель также синтезируется методом размещения с. з. Для большего быстродействия наблюдателя назначим его с. з. несколько дальше от мнимой оси. Везде вычисления даются, как в командной строке MatLab

$$p_o = 5 * p$$

Матрица наблюдателя L вычисляется по команде MatLab:

$$L = \text{place}(A', C', p_o)'$$

Динамический регулятор – объединение регулятора состояния и наблюдателя. Его матрицы вычисляются так:

$$[Ar, Br, Cr, Dr] = \text{reg}(A, B, C, D, K, L); \\ \text{Regulator} = \text{ss}(Ar, Br, Cr, Dr);$$

Можно убедиться, что с. з. системы в точности равны объединению заданных множеств с. з. p и p_o :

$$\text{eig}(\text{feedback}(\text{plant}, \text{regulator}))$$

Линейный динамический регулятор гарантирует устойчивость «в малом» верхнего положения равновесия маятника и нулевого положения каретки.

Для практики важна устойчивость «в большом». Для моделей общего вида нет аналитических методов расчета размеров области притяжения положения равновесия в пространстве состояния. Единственный способ приближенной оценки – многократное компьютерное моделирование при различных начальных условиях, однако это требует интегрирования ИИ с инструментами

расчетов и численного анализа динамики нелинейных гибридных моделей.

Заключение. В статье приведены примеры синтеза алгоритмов регулирования и систем управления классическими и современными методами в режиме диалога с большими языковыми моделями LLM (*англ.* Large Linguistic Models) ChatGPT-5, DeepSeek, Qwen. Можно заметить, что режим диалога с уточнением запросов (промптов) и анализом немедленно получаемых ответов способствует повышению интереса к теории, а избавление от рутины традиционных методик позволяет

глубже вникнуть в проблемы автоматического управления. Применение ИИ способно изменить не только практику разработки систем автоматического управления, но и методику обучения. Преподавание дисциплины «Теория автоматического управления» не станет проще, но будет более интересным, интерактивным, гибким и ориентированным на студента, превратится из курса по решению типовых задач в настоящую школу инженерного мышления. Ключевая задача преподавателя – научить студентов эффективно и ответственно использовать новый инструмент.

Список литературы

1. Сениченков Ю. Б. Виртуальные лаборатории: использование, разработка, стандартизация // Компьютерные инструменты в образовании. 2022. № 3. С. 108–130. doi: 10.32603/2071-2340-2022-3-108-132
2. Козлов А. В. Виртуальная и дополненная реальность в высшем техническом образовании // Современное педагогическое образование. 2023. № 2. С. 111–115.
3. От объекта до системы управления / Д. Х. Имаев, М. Л. Немудрук, М. С. Федоров, М. Ю. Шестопалов, Д. А. Щуров // Сб. науч. тр. «Подготовка инженерных кадров» XII Всерос. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2024)». Ростов н/Д.: Изд-во Южный федеральный ун-т, 2024. С. 396–403.
4. Кухтенко А. И. Проблема инвариантности в автоматике. Киев: Госиздат техн. лит., 1963. 376 с.
5. Гайдук А. Р. О синтезе систем автоматического управления при заданной форме воздействий // Автоматика и телемеханика, 1984. № 6. С. 13–20.
6. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход. М.: Наука, 1980. 376 с.
7. MatLab URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения: 15.06.2025).
8. Имаев Д. Х. Синтез систем управления в среде MatLab. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 172 с.

Информация об авторах

Имаев Дамир Хабибович – д-р техн. наук, проф. каф. автоматике и процессов управления, факультет компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: damir.imaev@mail.ru

Шестопалов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, зав. каф. автоматике и процессов управления, факультет компьютерных технологий и информатики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: shestopalov_08@mail.ru

References

1. Cenichenkov Yu. B. Virtualnye laboratorii: ispolzovanie, razrabotka, standartizacija // Kompjuternye instrumenty v obrazovanii. 2022 № 3. S. 108–130. doi: 10.32603/2071-2340-2022-3-108-132 (In Russ.).
2. Kozlov A. V. Virtualnaja i dopolnennaja realnosti v vysshem tehničeskom obrazovanii // Sovremennoe pedagogičeskoe obrazovanie. 2023. № 2. S. 111–115. (In Russ.).
3. Ot obekta do sistemy upravlenija / D. X. Imaev, M. L. Nemudruk, M. S. Fedorov, M. Yu. Shestopalov, D. A. Shhurov // Sb. nauch. tr. «Podgotovka inžheneryh kadrov» XII Vseros. nauch. konf. «Sistemnyj sintez i prikladnaja sinergetika (SSPS-2024)». Rostov n/D.: Izd-vo Yuzhnyj federalnyj un-t, 2024. S. 396–403 (In Russ.).
4. Kuhtenko A. I. Problema invariantnosti v avtomatike. Kiev: Gosizdat tehn. lit., 1963. 376 s. (In Russ.).
5. Gajduk A. R. O sinteze sistem avtomaticheskogo upravlenija pri zadannoj forme vozdejstvij // Avtomatika i telemehanika, 1984. № 6. S. 13–20. (In Russ.).
6. Uonem M. Linejnye mnogomernye sistemy upravlenija. Geometricheskij podhod. M.: Nauka, 1980. 376 s.
7. MatLab. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (data obrashhenija: 15.06.2025). (In Russ.).
8. Imaev D. X. Sintez sistem upravlenija v srede MatLab. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2010. 172 s. (In Russ.).

Information about the authors

Damir H. Imaev – Dr of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automation and Control Processes, Faculty of Computer Technology and Informatics of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: damir.imaev@mail.ru

Michail Yu. Shestopalov – Dr of Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes, Faculty of Computer Technology and Informatics of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: shestopalov_08@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14.01.2026; принята к публикации после рецензирования 28.03.2026; опубликована онлайн 25.05.2026.

Submitted 14.01.2026; accepted 28.03.2026; published online 25.05.2026.
