

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Лобода Ю.О.

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания к практическим, лабораторным работам и организации
самостоятельной работы для студентов технических специальностей

Томск
2023

УДК 006.89

ББК 78.373.3

Л 72

Рецензент:

Антипин М.Е., доцент кафедры управления инновациями ТУСУР, кан. физ. мат. наук

Лобода, Юлия Олеговна

Л 72

Основы автоматического управления: методические указания к практическим, лабораторным работам и организации самостоятельной работы / Ю.О.Лобода – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 65 с.

Настоящие методические указания для студентов составлены с учетом требований федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО). Методические указания содержат рекомендации к проведению практических занятий, лабораторных работ и самостоятельной работе и предназначены для студентов технических специальностей.

Одобрено на заседании каф. управления инновациями,
протокол № 7 от 31.01.2022

УДК 006.89

ББК 78.373.3

© Лобода Ю.О., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023

Оглавление

Введение.....	4
1 Методические указания к проведению лабораторных работ	23
1.1 Лабораторная работа Исследование характеристик элементарных звеньев.....	23
1.2 Лабораторная работа Исследование переходных процессов	37
1.3. Лабораторная работа Устойчивость стационарных систем автоматического управления	45
1.4. Лабораторная работа Синтез ПИД-регулятора.....	52
2. Методические указания к проведению практических работ	60
3 Методические указания для организации самостоятельной работы	61
Основная и дополнительная литература	64

Введение

Методические указания к практическим, лабораторным работам и организации самостоятельной работы посвящены реализации учебно-методической поддержке дисциплин «Основы автоматического управления», «Системы автоматического управления» и «Основы управления техническими системами».

Данное пособие содержит задания для выполнения практических, лабораторных и самостоятельных работ позволяющие сформировать практические и теоретические навыки по построению и работе с системами автоматического управления.

Замену действий человека в рабочих операциях технологических процессов называют механизацией. Для правильного выполнения рабочих операций последними необходимо управлять (обеспечивать порядок выполнения действий, выделение ресурсов и т.д.). Эти функции выполняют операции управления. Совокупность управляющих операций образует процесс управления.

Замену действий человека в операциях управления называют автоматизацией, а технические устройства, выполняющие эту функцию, - автоматическими устройствами. Совокупность технических средств – машин, орудий труда, средств механизации, выполняющих технологический процесс, - является объектом управления. Совокупность средств управления и объекта образует систему управления. Систему, в которой все рабочие и управляющие операции выполняют автоматические устройства без участия человека, называют автоматической системой. Систему, в которой автоматизирована только часть операций, называют автоматизированной системой.

Любой технический процесс характеризуется совокупностью физических величин, называемых координатами, а иногда параметрами процесса. Термин «параметр» в этом смысле не следует применять, так как им обычно обозначают константы в математическом описании отдельных звеньев системы.

Алгоритм функционирования устройства (системы) – это совокупность предписанных действий, приводящих к правильному выполнению технического процесса в этом устройстве.

Совокупность предписаний, определяющих характер воздействий извне на объект управления с целью осуществления его алгоритма функционирования, называют алгоритмом управления. Процесс реализации воздействий, соответствующих алгоритму управления, называют управлением. В большинстве случаев управление не может полностью компенсировать влияние внешних возмущений на систему в каждый момент времени, поэтому алгоритм функционирования управляемой системы выполняется лишь приближенно.

Рассмотрим схему взаимодействия объекта управления (ОУ), управляющего устройства (УУ) и внешней среды (рис. 1). Физическая величина $x(t)$, которая характеризует состояние объекта и которую целенаправленно изменяют или поддерживают постоянной в процессе управления, называют управляемой величиной (или управляемой координатой, управляемой переменной).

Управляемой величиной может служить физическая величина, которая либо измеряется на выходе объекта, либо вычисляется косвенно. Управляемыми величинами первого типа могут быть, например, температура, давление, напряжение, скорость и т.д. Примерами величин второго типа служат коэффициент полезного действия энергетической установки, соотношение двух величин.

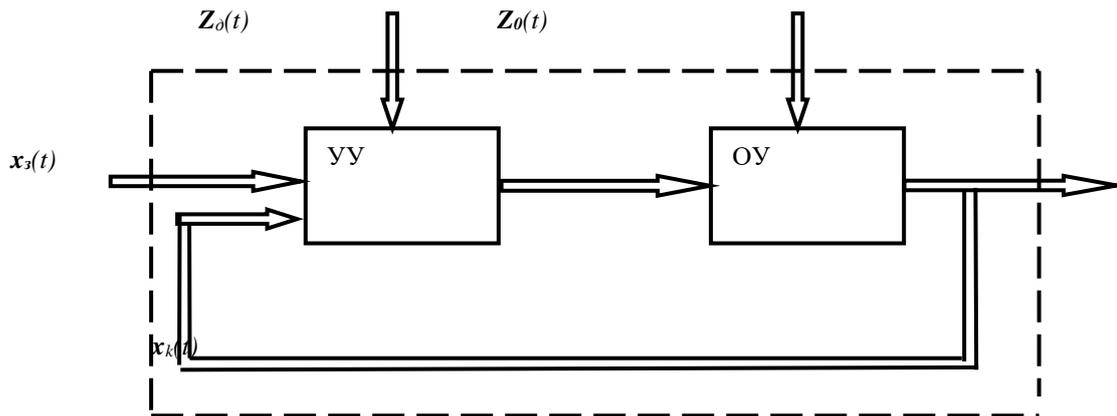


Рис. 1. Обобщенная структура автоматической системы управления

Если состояние управляемого объекта определяется несколькими величинами $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, то принято говорить об n -мерном векторе состояния объекта $x(t)$. Объект в этом случае называют многомерным.

Управляемая величина является выходной величиной объекта и зависит от двух входных воздействий: возмущающего $Z(t)$ и управляющего $u(t)$. В общем случае эти воздействия могут быть также векторными величинами. Под действием возмущающих воздействий на систему управляемая величина отклоняется от заданного значения, и управляющее устройство должно выработать такое управляющее воздействие $u(t)$, которое компенсировало бы влияние возмущений.

Кроме основного возмущения $Z_0(t)$, действующего на объект, на работу системы может влиять дополнительное возмущение $Z_d(t)$, приложенное к управляющему устройству УУ. Обычно такие возмущения возникают от нестабильности напряжения источников питания УУ, а также при изменении температурного режима и т.д.

Как показано на рис. 1, в самом общем случае на вход УУ, помимо задающего воздействия $x_3(t)$, поступает также информация о текущем состоянии объекта в виде контрольного воздействия $x_k(t)$, а в отдельных случаях – и информация о возмущающих воздействиях. УУ обрабатывает получаемую информацию по определенному заложенному в нем алгоритму. В результате на его выходе формируется управляющее воздействие.

На рис. 2 изображена функциональная схема одномерной системы автоматического управления (САУ), на которой показаны основные составные части управляющего устройства (УУ): чувствительные устройства (ЧУ), вычислительное устройство (ВУ) и исполнительное устройство (ИУ).

Чувствительные устройства (измерительные устройства) служат для измерения переменных $x(t), x_3(t), Z(t)$.

Вычислительное устройство реализует алгоритм работы управляющего устройства, соответствующим образом обрабатывая поступающую от чувствительных устройств входную информацию. В простейшем случае оно осуществляет простые математические операции, а в более сложных случаях ВУ может представлять собой управляющую ЭВМ и даже комплекс таких машин.

Исполнительные устройства предназначены для непосредственного управления объектом, т.е. изменения его состояния в соответствии с сигналом, выдаваемым вычислительным устройством.

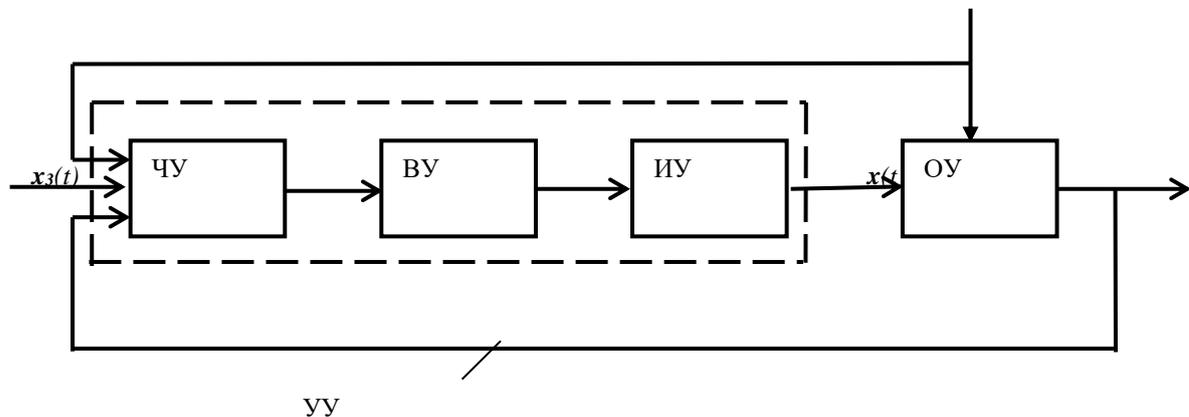


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического управления

Помимо перечисленных выше частей в состав УУ могут входить различные специальные согласующие устройства.

Фундаментальные принципы управления

В основе построения САУ лежат общие фундаментальные принципы управления, определяющие, каким образом согласуются алгоритмы функционирования и управления с фактическим функционированием или причинами, вызывающими отклонение функционирования от заданного. В технике известны и применяются три фундаментальных принципа: разомкнутого управления, компенсации и обратной связи.

Принцип разомкнутого управления состоит в том, что алгоритм управления вырабатывается только на основе заданного алгоритма функционирования и не контролируется по другим факторам – возмущениям или выходным координатам процесса (рис. 3, а). Задание $x_3(t)$ алгоритма функционирования может вырабатываться как специальным техническим устройством – задатчиком программы, так и выполняться заранее при проектировании системы и затем непосредственно использоваться при конструировании УУ. В последнем случае задатчик программы отсутствует. В обоих случаях схема имеет вид разомкнутой цепи, в которой основное воздействие передается от входа к выходу, как показано стрелками. Несмотря на очевидные недостатки (низкая точность управления при изменении возмущающих воздействий и отсутствие контроля выходной координаты) этот принцип используют очень широко.

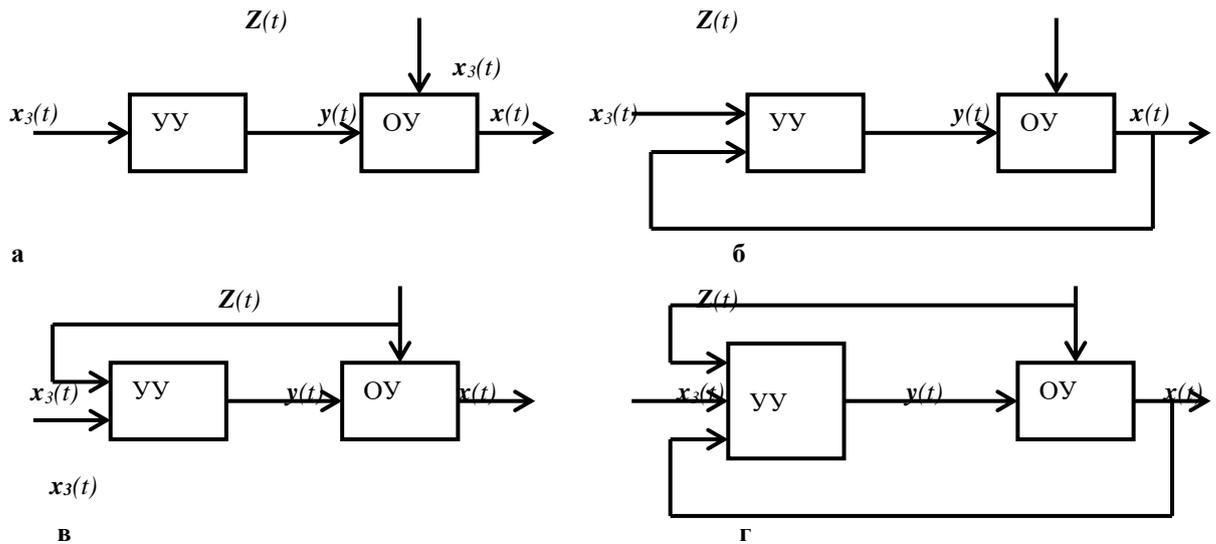


Рис. 3. Функциональные структуры систем управления с цепями воздействий: разомкнутой - а, в, замкнутой - б и комбинированной - г

Принцип компенсации (управление по возмущению). Если возмущающие воздействия настолько велики, что разомкнутая цепь не обеспечивает требуемой точности выполнения алгоритма функционирования, то для повышения точности вводят коррективы в алгоритм управления, которые компенсируют бы влияние измеряемого возмущения (рис. 3,в).

Принципиальная схема системы стабилизации напряжения электромашиного усилителя (ЭМУ) путем компенсации возмущения приведена на рис. 4. Задающее воздействие $u_{в}$ подается на задающую обмотку возбуждения ОУ1 и определяет величину выходного напряжения ЭМУ. Возмущающим воздействием является ток нагрузки i ЭМУ, при увеличении которого (за счет уменьшения сопротивления нагрузки R_n) снижается выходное напряжение U из-за падения напряжения на сопротивлении продольной цепи якоря ЭМУ: $U = E - iR_{я}$, где $R_{я}$ – полное сопротивление цепи якоря, E – ЭДС ЭМУ. При увеличении тока якоря увеличивается пропорционально ему падение напряжения на дополнительном сопротивлении R , предназначенном для измерения возмущения. Это напряжение поступает на управляющую обмотку возбуждения ОУ2 и увеличивает поток возбуждения Φ_2 . Суммарный поток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ возрастает, и величина напряжения на выходе ЭМУ восстанавливается.

Если возмущающее воздействие не может быть непосредственно измерено, то его определяют косвенным путем, что приводит к снижению точности управления. Если же возмущающее воздействие измеряемо, то можно добиться его полной компенсации с нулевой ошибкой отклонения выходной координаты в статическом режиме.

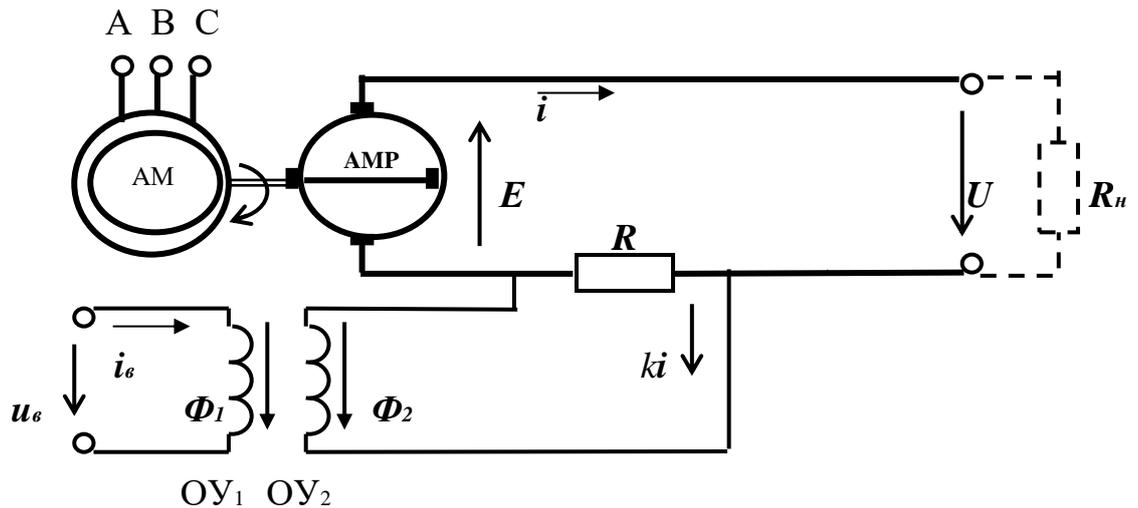


Рис. 4. Система стабилизации напряжения ЭМУ

Принцип обратной связи. Регулирование по отклонению. Систему можно построить и так, чтобы точность выполнения алгоритма обеспечивалась и без измерения возмущения. На рис. 3, в показана структура САУ, в которой коррективы в алгоритм управления вносятся по фактическому значению выходной координаты. На вход управляющего устройства поступают как внешнее (задающее) воздействие, так и внутреннее (контрольное). Внутреннее воздействие образует цепь отрицательной обратной связи по выходной координате и делает систему замкнутой.

Управляющее воздействие $y(t)$ в замкнутой системе формируется в большинстве случаев в зависимости от величины и знака отклонения истинного значения выходной (управляемой) координаты от ее заданного значения:

$$y(t) = A_y[\varepsilon(t)],$$

где $\varepsilon(t) = x_z(t) - x(t)$ – сигнал ошибки (называемый также сигналом рассогласования). Замкнутые системы называют часто «САУ по отклонению».

В замкнутой системе контролируется непосредственно выходная координата, и тем самым при формировании управляющих воздействий учитывается действие всех возмущений, влияющих на выходную координату. В этом заключается преимущество замкнутых систем. В то же время сам принцип действия замкнутых систем (принцип управления по отклонению) допускает нежелательные изменения выходной координаты: вначале возмущение должно появиться на выходе, система «почувствует» отклонение и лишь потом выработает управляющее воздействие, направленное на устранение отклонения. Такая инерционность снижает эффективность управления. Несмотря на определенные недостатки этот принцип имеет широкое применение.

На рис. 5 представлена принципиальная схема системы управления частотой вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения М. Управление двигателем осуществляется от электромашинного усилителя АМР, который приводится во вращение асинхронным двигателем (АМ). Частота вращения ω приводного двигателя измеряется датчиком скорости ВР. Сигнал, пропорциональный частоте вращения, через усилитель (У) поступает на одну из обмоток управления ОУ2 в качестве сигнала главной отрицательной обратной связи по частоте вращения. Обмотка управления ОУ1 является задающей и определяет заданное значение частоты вращения. Так как обмотки управления включены

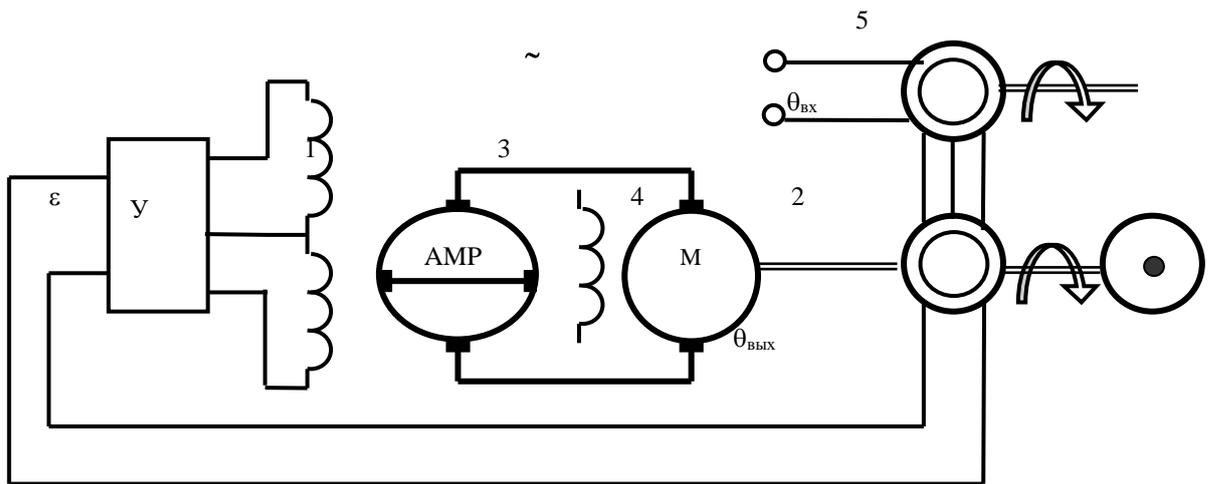


Рис. 6. Следящая система

В качестве примера следящей системы на рис. 6 приведена упрощенная схема отработки угла. Регулируемой величиной является угол поворота $\theta_{вых}$ управляемого объекта 2. Приводной двигатель 3 питается от ЭМУ 1. Входное воздействие подается на сельсин-датчик 5 в виде угла поворота $\theta_{вх}$ его ротора. Соединенные по трансформаторной схеме сельсин-датчик и сельсин-приемник 4, механически связанный с управляемым объектом, вырабатывают напряжение, пропорциональное рассогласованию $\varepsilon = \theta_{вх} - \theta_{вых}$ между входным и выходным валами следящей системы. Напряжение ошибки усиливается усилителем У и ЭМУ 1 и поступает на якорь исполнительного двигателя 3, вращающего одновременно объект 2 и ротор сельсина-приемника до тех пор, пока рассогласование не станет равным нулю.

Системы с поиском экстремума показателя качества. В ряде процессов показатель качества или эффективности процесса может быть выражен в каждый момент времени функцией текущих координат системы, и управление можно считать оптимальным, если оно обеспечивает поддержание этого показателя в точке максимума, например, настройку энергоустановки на максимальный коэффициент полезного действия. Такое управление обладает одной нежелательной особенностью: когда точка настройки под воздействием различных возмущений окажется смещенной от экстремума, неизвестно, в каком направлении следует воздействовать на регулирующий орган объекта, чтобы вернуть ее к экстремуму. Поэтому экстремальное управление начинают с поиска: сначала выполняют небольшие пробные движения в каком-то выбранном направлении, затем анализируют реакцию системы на эти пробы и после этого по результатам анализа вырабатывают управляющее воздействие в виде импульса, приближающего систему к экстремуму.

Оптимальное управление. Оптимальное управление применяется как в технических системах для повышения эффективности производственных процессов, так и в системах организационного управления.

В управлении динамическими техническими системами оптимизация чаще всего существенна именно для переходных процессов, в которых показатель эффективности зависит не только от текущих значений координат (как в экстремальном управлении), но и от характера изменения в прошлом, настоящем и будущем, и выражается некоторым функционалом от координат, их производных и, может быть, времени.

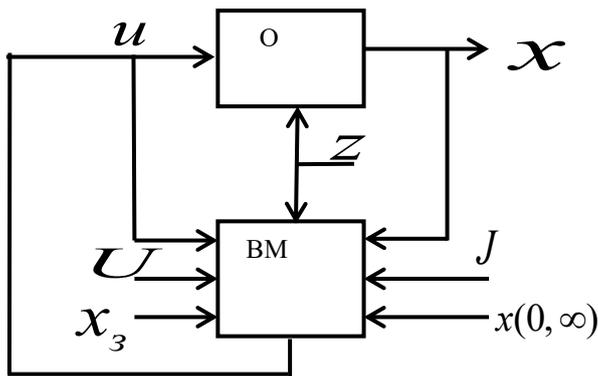


Рис. 7. Оптимальное управление

Нахождение оптимального управления в подобных системах требует решения достаточно сложной математической задачи методами вариационного исчисления или математического программирования. Таким образом, органической составляющей частью системы оптимального управления становится вычислительное устройство. Принцип поясняется на рис. 7.

На вход вычислительного устройства ВМ поступает информация о текущих значениях координат x с выхода объекта О, об управлениях u с его входа, о внешних воздействиях z на объект, а также задание извне различных условий: значение критерия оптимальности J , граничных условий $x(0)$, $x(\infty)$ и т.д. Вычислительное устройство по заложенной в него программе вычисляет оптимальное управление u . Оптимальные системы могут быть как разомкнутыми, так и замкнутыми.

Адаптивные системы. Системы, автоматически изменяющие значение своих параметров или структуру при непредвиденных изменениях внешних условий на основании анализа состояния или поведения системы так, чтобы сохранялось заданное качество ее работы, называют адаптивными системами. Адаптивные системы с изменением значений параметров иногда называют самонастраивающимися, а системы с изменением структуры – самоорганизующимися.

Обычно адаптивная система содержит в качестве «ядра» схему, реализующую один из фундаментальных принципов управления, а контур адаптации пристраивают к ней как вторичный, осуществляющий коррекцию параметров. Контур адаптации, обычно состоящий из устройства измерения (ИУ), вычисления (ВУ) и управления (УУ), может быть разомкнут (рис. 8), если на его вход подается только входное воздействие, или замкнут (связь показана пунктиром), если он реагирует также и на выходную координату системы. Основной контур составляют объект О и регулятор Р.

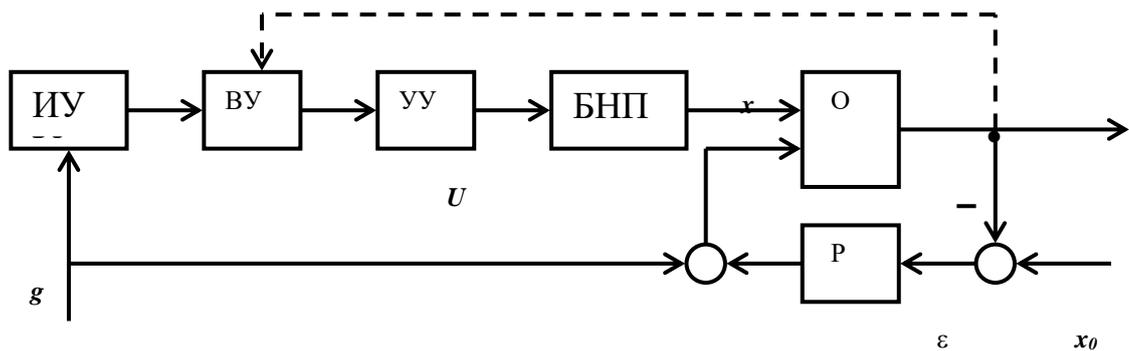


Рис. 8. Адаптивная САУ

Контур самонастройки воздействует на блок настройки параметров БНП, который может быть включен не только последовательно, как показано на рисунке, но и любым другим способом, например, в цепь обратной связи. Вычисление воздействий для коррекции параметров осуществляет ВУ в соответствии с программой.

Классификация САУ по другим признакам имеет более общий характер и слабо связана с фундаментальными принципами управления.

В зависимости от принадлежности источника энергии, при помощи которого создается управляющее воздействие, САУ могут быть прямого и непрямого действия. В системах прямого действия используется энергия управляемого объекта. В системах непрямого действия управляющее воздействие создается за счет энергии дополнительного источника.

По виду сигналов, действующих в системах, последние разделяют на непрерывные и дискретные. Дискретные системы, в свою очередь, разделяются на импульсные, релейные и цифровые.

САУ, у которых управляемая величина в установившемся режиме зависит от величины возмущающего воздействия, называются статическими, а САУ, у которых управляемая величина не зависит от возмущения, называются астатическими.

По виду дифференциальных уравнений, описывающих элементы систем, последние разделяют на линейные и нелинейные. В линейной системе все элементы описываются линейными алгебраическими и дифференциальными уравнениями. Если хотя бы один элемент системы имеет нелинейную зависимость выходной величины от входной, то вся система является нелинейной.

Основные законы регулирования

Законом регулирования называют математическую зависимость, в соответствии с которой управляющее воздействие на объект вырабатывалось бы безынерционным управляющим устройством.

Многие из законов регулирования, реализуемых различными регуляторами релейного, импульсного действия, экстремальными и т.п., рассматриваются далее. Здесь ограничимся рассмотрением наиболее распространенных законов, реализуемых регуляторами по отклонению непрерывного действия. В этих простейших законах управляющее воздействие линейно зависит от отклонения, его интеграла и первой производной по времени.

Пропорциональный закон (обозначаемый П): $y = k\epsilon$.

Регулятор, осуществляющий этот закон, называют пропорциональным. Постоянную k_p называют коэффициентом передачи регулятора, обратную величину – статизмом регулятора. С возрастанием статизма регулятора возрастает и статизм регулирования.

Интегральный закон (И):

$$y = \frac{1}{T} \int_0^t \varepsilon dt.$$

Постоянная T имеет размерность времени и ее называют постоянной времени интегрирования. Интегральный регулятор – астатический и именно с его помощью осуществляется астатическое регулирование.

Пропорционально-интегральный закон (ПИ):

$$y = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T} \int_0^t \varepsilon dt \right).$$

Иногда его называют пропорциональным законом с интегральной коррекцией. Регулятор ПИ также обеспечивает астатическое регулирование. В этом можно убедиться, представив уравнение в дифференциальной форме как $dy/dt = k_p(d\varepsilon/dt + \varepsilon/T)$. В состоянии равновесия при постоянных воздействиях должно быть $dy/dt = 0$; $d\varepsilon/dt = 0$; $\varepsilon/T = 0$, откуда равновесие может иметь место лишь при $\varepsilon = 0$ (при нулевой ошибке регулирования).

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД):

$$y = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right).$$

Постоянные T_i и T_d , соответственно, называют постоянными времени интегрирования и дифференцирования. Регулятор ПИД также обеспечивает астатическое регулирование. Производную $d\varepsilon / dt$ вводят в закон регулирования для повышения качества процесса регулирования.

В заключение дадим общую характеристику процессов, протекающих в системах автоматического управления. Как и в любой динамической системе, процессы в автоматической системе делятся на установившиеся и переходные.

При рассмотрении процессов в САУ важное значение имеют понятия «устойчивость системы», «качество процесса управления» и «точность управления».

Устойчивость – это свойство возвращаться в установившееся состояние после того, как она была выведена из этого состояния каким-либо возмущением. Такую устойчивость называют асимптотической или устойчивостью в точке. Замкнутые САУ весьма склонны к потере устойчивости, что чаще всего проявляется в возникновении расходящихся колебаний. В этом случае система становится неработоспособной.

В нелинейных системах большое значение имеет устойчивость в некоторой области, характеризующаяся возвратом в заданную область при уменьшении внешнего воздействия до нуля.

Качество процесса управления характеризуется тем, насколько процесс управления близок к желаемому.

Перейдем к математическому описанию линейных элементов и систем управления.

Линейные дифференциальные уравнения.

Наиболее общей и наиболее полной формой математического описания автоматических систем и их элементов является дифференциальное уравнение вида

$$a_0 d^n y(t)/dt^n + a_1 d^{n-1} y(t)/dt^{n-1} + \dots + a_n y(t) = b_0 d^m x(t)/dt^m + b_1 d^{m-1} x(t)/dt^{m-1} + \dots + b_m x(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – входная и выходная величины элемента или системы; a_i , b_i – коэффициенты уравнения.

Уравнение (2.1) устанавливает связь между входной и выходной величиной как в переходных, так и в установившихся режимах.

Коэффициенты дифференциального уравнения называются параметрами. Они зависят от различных физических констант, характеризующих скорость протекания процессов в элементах. Такими константами являются, например, массы движущихся частей, индуктивности и емкости электрических цепей, теплоемкости нагреваемых элементов.

Иногда параметры некоторых элементов систем изменяются во времени. Такую систему называют нестационарной или системой с переменными параметрами. Системой с переменными параметрами является, например, автоматическая система управления приводом поворота мощного экскаватора, если в процессе его поворота одновременно происходит выдвигания рукояти с ковшом.

В большинстве практических случаев коэффициенты уравнения существенно не изменяются и системы являются системами с постоянными параметрами. В дальнейшем будут рассматриваться только такие системы.

Для автоматических систем управления, описываемых линейным уравнением, справедлив принцип наложения или суперпозиции, согласно которому изменение выходной величины $y(t)$, возникающее при действии на систему нескольких входных сигналов $x_i(t)$, равно сумме изменений $y_i(t)$ величины $y(t)$, вызываемых каждым сигналом в отдельности.

Это свойство линейных систем имеет большое практическое значение, так как благодаря ему значительно облегчаются все расчеты.

Рассмотрим типовые формы записи линейного дифференциального уравнения (1), используемые в различных задачах теории автоматического управления.

Все физические переменные, входящие в уравнение, могут быть выражены в относительных единицах. Для этого каждое слагаемое делят на постоянную величину, имеющую размерность той переменной, которая входит в это слагаемое. Постоянные величины называют базовыми. В качестве базовых величин обычно принимают номинальные или установившиеся значения переменных y и x .

Удобной формой записи линейных дифференциальных уравнений является символическая или операторная. Переход к операторной форме осуществляют введением сокращенного условного обозначения операции дифференцирования: $d / dt = p$. Соответственно, k -ю производную переменной y обозначают

$$d^k y(t) / dt^k = p^k y(t), \quad (2)$$

тогда уравнение (2.1) в символической форме будет иметь вид

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) y(t) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) x(t). \quad (3)$$

Многочлены от p степени n и m , находящиеся в левой и правой частях уравнения (2.3), называются дифференциальными операторами. Каждый такой оператор устанавливает соответствие между функцией времени и определенной совокупностью производных этой функции. Многочлен

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = D(p) \quad (4)$$

называют собственным оператором, а многочлен

$$b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m = K(p) \quad (5)$$

называют входным оператором или оператором воздействия.

Название «собственный оператор» обусловлено тем, что многочлен $D(p)$ характеризует собственное (свободное) движение элемента, т.е. движение при отсутствии внешних воздействий. Оператор $D(p)$ называют также характеристическим.

У всех реальных элементов и систем порядок наивысшей производной во входном операторе не может быть больше порядка наивысшей производной в собственном операторе, т.е. всегда $m \leq n$. Если это условие не выполняется, то уравнение соответствует физически нереализуемой системе.

Уравнения элементов невысокого порядка ($n < 3$) в теории автоматического управления принято записывать в так называемой стандартной форме. При стандартной форме записи уравнение преобразовывают таким образом, чтобы коэффициент при выходной величине был равен единице. При этом коэффициент перед входной величиной в правой части уравнения становится равным передаточному коэффициенту, а коэффициенты при производных выходной величины будут иметь размерность времени в степени, равной порядку соответствующей производной. Например, уравнение второго порядка

$$(a_0 p^2 + a_1 p + a_2) y(t) = (b_0 p + b_1) x(t) \quad (6)$$

путем деления всех членов на коэффициент a_2 может быть приведено к стандартной форме

$$(T_2 p^2 + T_1 p + 1) y(t) = k(T p + 1) x(t), \quad (7)$$

где $k = b_1/a_2$; $T = b_0 / b_1$; $T_1 = a_1/a_2$; $T_2 = a_0 / a_2$.

Коэффициенты T , T_1 , T_2 принято называть постоянными времени, характеризующими динамические свойства элемента.

Временные характеристики

Дифференциальное уравнение является самой общей формой описания элемента и не дает наглядного представления о передаточных свойствах элемента. Наглядное представление об этих свойствах дает функция $y(t)$, являющаяся решением дифференциального уравнения. Но одно и то же дифференциальное уравнение может иметь множество решений, зависящих от начальных условий и вида внешнего воздействия $x(t)$. Поэтому принято динамические свойства элементов и систем характеризовать решением, соответствующим нулевым начальным условиям и одному из типовых воздействий. В качестве типового воздействия принимают единичное ступенчатое, дельта-функцию или гармоническое воздействие.

Наиболее наглядное представление о динамических свойствах элемента дает его переходная функция (характеристика). Переходной функцией $h(t)$ называют изменение выходной величины $y(t)$ во времени, возникающее после подачи на вход единичного ступенчатого воздействия, при нулевых начальных условиях. Переходная функция может быть задана в виде графика или аналитически.

Переходная функция $h(t)$, как и любое решение неоднородного дифференциального уравнения, имеет две составляющие: вынужденную $h_v(t)$ и свободную $h_c(t)$. Вынужденная составляющая переходного процесса представляет собой частное решение исходного уравнения. При ступенчатом воздействии вынужденная составляющая равна установившемуся значению выходной величины, которое для статических элементов может быть определено непосредственно из дифференциального уравнения (при нулевых производных):

$$h_v(t) = y(\infty) = b_m / a_n. \quad (8)$$

Свободная составляющая $h_c(t)$ может быть найдена как решение однородного дифференциального уравнения (при отсутствии одинаковых корней):

$$h_c(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{\lambda_k t}, \quad (9)$$

где λ_k – корни характеристического уравнения; C_k – постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий.

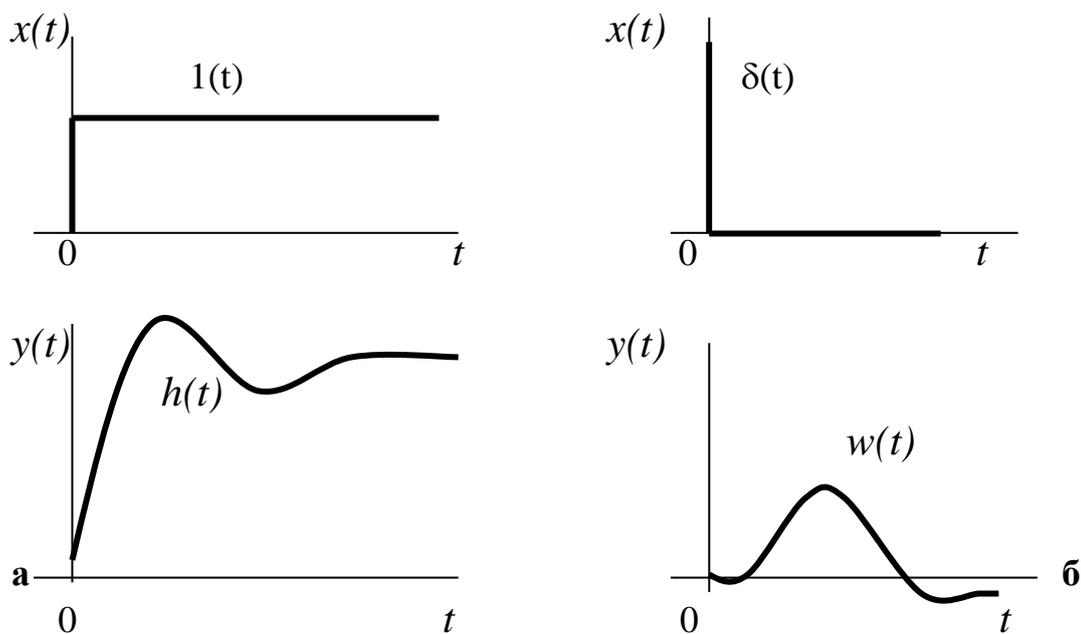


Рис. 9. Переходная (а) и импульсная (б) характеристики

Переходная функция определится как сумма вынужденной и свободной составляющих.

Характеристическое уравнение, соответствующее определенному дифференциальному уравнению, представляет собой алгебраическое уравнение, степень и коэффициенты которого совпадают с порядком и коэффициентами левой части этого уравнения. Для дифференциального уравнения, записанного в форме (2.6), характеристическое уравнение имеет вид

$$a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (10)$$

Структура характеристического уравнения (2.10) совпадает со структурой левой части уравнения (3) и со структурой собственного оператора $D(p)$. Поэтому при записи характеристического уравнения часто вместо символа λ , обозначающего неизвестную переменную алгебраического уравнения, используют символ p . Но при этом p означает уже не операцию дифференцирования, а некоторое комплексное число, которое является решением (корнем) характеристического уравнения.

Для линейных элементов и систем, кроме принципа суперпозиции, справедливо еще одно общее правило: реакция $y(t)$ на неединичное воздействие $a_0 1(t)$ равна $a_0 h(t)$.

Импульсной переходной функцией $w(t)$ называют изменение выходной величины $y(t)$, возникающее после подачи на вход дельта-функции, при нулевых начальных условиях.

Импульсная переходная функция $w(t)$ равна производной от переходной функции $h(t)$:

$$w(t) = dh(t)/dt, \quad (11)$$

и наоборот, переходная функция равна интегралу от импульсной переходной функции:
$$h(t) = \int w(t)dt. \quad (12)$$

Переходные характеристики называют также временными.

Операционный метод и передаточная функция

Наиболее распространенным методом описания и анализа автоматических систем является операционный метод. В основе метода лежит преобразование Лапласа:

$$X(p) = L\{x(t)\} = \int_0^{\infty} x(t)e^{-pt} dt, \quad (13)$$

которое устанавливает соответствие между функциями действительной переменной t и функциями комплексной переменной p . Функцию времени $x(t)$, входящую в интеграл Лапласа, называют оригиналом, а результат интегрирования – функцию $X(p)$ – изображением функции $x(t)$ по Лапласу.

Преобразование Лапласа выполнимо лишь для таких функций времени, которые равны нулю при $t < 0$. Это условие обеспечивается обычно умножением функции $x(t)$ на единичную ступенчатую функцию $1(t)$. С математической и физической точек зрения такой искусственный прием вполне корректен, так как функции $x(t)$ описывают процессы в автоматических системах, начинающиеся с некоторого момента времени, а этот момент времени всегда может быть принят за начало отсчета.

Наиболее важными свойствами преобразования Лапласа являются свойства, формулируемые обычно в виде правил:

при нулевых начальных условиях дифференцированию оригинала $x(t)$ по переменной t соответствует умножение изображения $X(p)$ на комплексную переменную p , а интегрированию оригинала соответствует деление $X(p)$ на p .

Именно на этих двух свойствах основан операционный метод решения дифференциальных уравнений, который заключается в следующем. Исходное дифференциальное (или интегро-дифференциальное) уравнение, записанное относительно искомой выходной функции $y(t)$, заменяют на алгебраическое уравнение относительно изображения $Y(p)$ (это называется алгебраизацией дифференциального уравнения), затем, решая алгебраическое уравнение при заданном $X(p)$, находят изображение $Y(p)$ и, наконец, по изображению $Y(p)$ определяют функцию $y(t)$. Этот обратный переход от изображений к оригиналам в большинстве практических задач может быть осуществлен при помощи таблиц, имеющих в специальных справочниках по операционному исчислению.

Широкое распространение операционного метода в теории автоматического управления обусловлено тем, что с его помощью определяют так называемую передаточную функцию, которая является самой компактной формой описания динамических свойств элементов и систем.

Применим преобразование Лапласа к линейному дифференциальному уравнению (2.1), полагая, что до приложения внешнего воздействия система находилась в покое и все начальные условия равны нулю. Используя свойство линейности и правило дифференцирования, можно получить алгебраическое уравнение в изображениях:

$$D(p)Y(p) = K(p)X(p), \quad (14)$$

где

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n,$$
$$K(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m.$$

Сравнивая уравнение (14) с уравнением в символической форме (3), можно заметить полную аналогию их структур. Различие уравнений лишь в значении символа p : в первом уравнении он обозначает операцию дифференцирования, во втором – комплексную переменную.

Введем понятие передаточной функции. Передаточной функцией $W(p)$ называют отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{L\{y(t)\}}{L\{x(t)\}}. \quad (15)$$

Для системы, описываемой уравнением (2.1), передаточная функция равна отношению входного оператора $K(p)$ к собственному оператору $D(p)$:

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (16)$$

Как следует из (2.15) и (2.16), передаточная функция представляет собой некоторый динамический оператор, характеризующий прохождение сигналов через линейный элемент.

Рассмотрим основные свойства и особенности передаточных функций автоматических систем и их элементов.

Передаточная функция элемента связана с его импульсной переходной функцией преобразованием Лапласа:

$$W(p) = L\{w(t)\} = \int_0^{\infty} w(t) e^{-pt} dt. \quad (17)$$

Для реальных элементов, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями, передаточная функция представляет собой правильную рациональную дробь, у которой степень многочлена числителя меньше или равна степени многочлена знаменателя, т.е. $m < n$. Все коэффициенты передаточной функции – действительные числа, характеризующие параметры элемента.

Передаточная функция является функцией комплексной переменной $p = \alpha \pm j\beta$, которая может при некоторых значениях переменной p обращаться в нуль или бесконечность. Значение переменной p , при котором функция $W(p)$ обращается в нуль, называют нулем, а значение, при котором обращается в бесконечность, – полюсом передаточной функции. Очевидно, что нулями передаточной функции являются корни полинома $K(p)$, а полюсами – корни полинома $D(p)$. Корни полиномов числителя и знаменателя могут быть комплексными, мнимыми и вещественными числами (в том числе и нулевыми). Если эти корни известны, то передаточная функция может быть представлена в следующем виде:

$$W(p) = \frac{b_0 (p - \gamma_1)(p - \gamma_2) \dots (p - \gamma_m)}{a_0 (p - \lambda_1)(p - \lambda_2) \dots (p - \lambda_n)}, \quad (18)$$

где γ_i – корни многочлена $K(p)$ (нули $W(p)$); λ_i – корни многочлена $D(p)$ (полюсы $W(p)$).

По распределению нулей и полюсов передаточной функции на комплексной плоскости с координатами α и $j\beta$ можно судить о свойствах элемента или системы.

Частотные характеристики

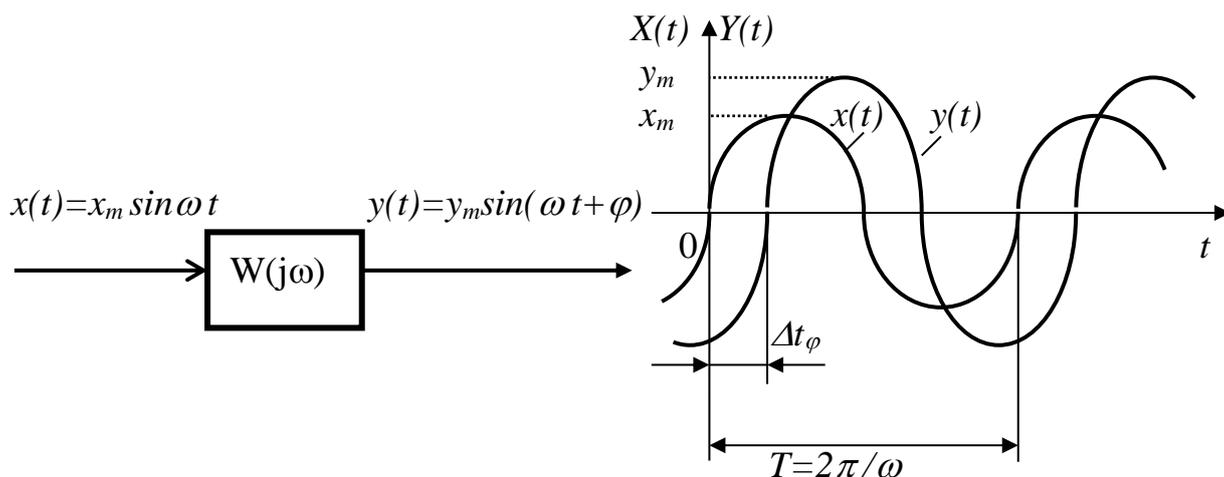


Рис. 10. Сигналы на входе и выходе звена

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и систем в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием.

Рассмотрим сущность и разновидности частотных характеристик. Пусть на вход линейного элемента (рис. 10) в момент времени $t=0$ приложено гармоническое воздействие определенной частоты ω :

$$x(t) = x_m \sin \omega t. \quad (19)$$

Через некоторое время, необходимое для протекания переходного процесса, элемент войдет в режим установившихся вынужденных колебаний, а выходная величина $y(t)$ будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой ω , но с другой амплитудой y_m и со сдвигом Δt_φ :

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (20)$$

где $\varphi = (\Delta t_\varphi / T)360$ – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами в градусах.

Изменяя частоту ω (от 0 до ∞) при фиксированном x_m , можно установить, что амплитуда и фазовый сдвиг выходного сигнала конкретного элемента зависят от частоты воздействия. Следовательно, зависимости амплитуды y_m и сдвига φ от значений частоты ω могут служить характеристиками динамических свойств элементов.

Так как амплитуда выходного сигнала зависит еще от амплитуды входного сигнала, то целесообразно при описании свойств элементов рассматривать отношение амплитуд y_m / x_m .

Зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигнала от частоты называют амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) и обозначают $A(\omega)$ (рис. 11,а).

Зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты называют фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) $\varphi(\omega)$ (рис. 11,б). Аналитические выражения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ называют соответственно амплитудной и фазовой частотными функциями.

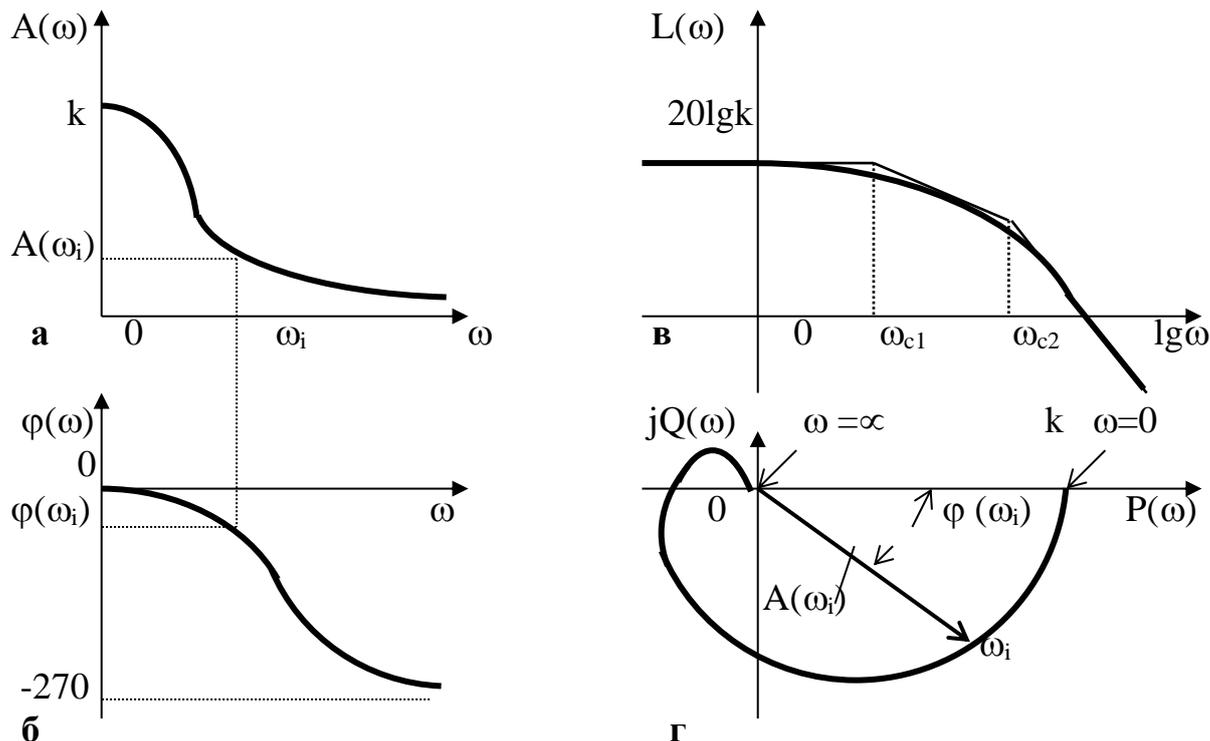


Рис. 11. Частотные характеристики: а – амплитудная; б – фазовая; в – амплитудно-фазовая; г – логарифмическая

АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты. Оценка пропускания производится по отношению амплитуд u_m / x_m . АЧХ имеет размерность, равную отношению размерности выходной величины к размерности входной. ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент на различных частотах.

Амплитудную и фазовую частотные характеристики можно объединить в одну общую - амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ или АФХ). Амплитудно-фазовая частотная характеристика $W(j\omega)$ представляет собой функцию комплексного переменного $j\omega$, модуль которой равен $A(\omega)$, а аргумент равен $\varphi(\omega)$. Каждому фиксированному значению частоты ω_i соответствует комплексное число $W(j\omega_i)$, которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину $A(\omega_i)$ и угол $\varphi(\omega_i)$ (рис. 11,г). Отрицательные значения $\varphi(\omega)$, соответствующие отставанию выходного сигнала от входного, принято отсчитывать по часовой стрелке от положительной вещественной оси.

При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор $W(j\omega)$ поворачивается вокруг начала координат, при этом одновременно увеличивается или уменьшается длина вектора. Кривая (годограф), которую опишет конец вектора, и есть АФХ. Каждой точке характеристики соответствует определенное значение частоты.

Проекция вектора $W(j\omega)$ на действительную и мнимую оси называют соответственно действительной и мнимой частотными характеристиками и обозначают $P(\omega)$, $Q(\omega)$. Действительная частотная характеристика всегда четная функция частоты, а мнимая характеристика всегда нечетная функция.

Аналитическое выражение для АФХ конкретного элемента можно получить из его передаточной функции путем подстановки $p=j\omega$:

$$W(j\omega) = W(p) \Big|_{p=j\omega} \quad (21)$$

А.ф.х. $W(j\omega)$, как и любая комплексная величина, может быть представлена в показательной форме:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (22)$$

алгебраической форме:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (23)$$

или тригонометрической форме:

$$W(j\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega) + jA(\omega) \sin \varphi(\omega). \quad (24)$$

Связь между различными частотными функциями следующая:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}, \quad (25)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg(Q(\omega) / P(\omega)). \quad (26)$$

Поскольку АФХ $W(j\omega)$, так же, как и передаточная функция, представляет собой обычно дробь, то ее модуль может быть найден как отношение модуля числителя к модулю знаменателя:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = |K(j\omega)| / |D(j\omega)|, \quad (27)$$

а аргумент функции – как разность аргументов числителя и знаменателя:

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arg K(j\omega) - \arg D(j\omega). \quad (28)$$

При практических расчетах автоматических систем удобно использовать частотные характеристики, построенные в логарифмической системе координат (рис. 11,в). Такие характеристики называют логарифмическими. Они имеют меньшую кривизну и поэтому могут быть приближенно заменены ломаными линиями, составленными из нескольких прямолинейных отрезков. Причем эти отрезки в большинстве случаев удается построить без громоздких вычислений по некоторым простым правилам. Частоты, соответствующие точкам стыковки отрезков, называют сопрягающими и обозначают ω_c . Кроме того, в логарифмической системе координат легко находить характеристики различных соединений элементов, так как умножению и делению обычных характеристик соответствует сложение и вычитание ординат логарифмических характеристик.

За единицу длины по оси частот логарифмических характеристик принимают декаду. Декада – интервал частот, заключенный между произвольным значением ω_i и его десятикратным значением $10\omega_i$. Отрезок логарифмической оси частот, соответствующий одной декаде, равен 1.

В расчетах используют логарифмическую амплитудную частотную характеристику (л.а.ч.х.):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (29)$$

ординаты которой измеряют в логарифмических единицах - беллах (Б) или децибеллах (дБ). Например, если имеется число $N=100$, в децибеллах $L=20\lg 100=40$ дБ.

При построении фазовой частотной характеристики логарифмический масштаб применяют только для оси абсцисс.

По виду частотных характеристик все элементы и системы делятся на минимально-фазовые и неминимально-фазовые. Минимально-фазовыми являются элементы (системы), у которых все полюсы и нули передаточной функции $W(p)$ имеют отрицательные действительные части. Такие элементы дают минимальный фазовый сдвиг $\varphi(\omega)$ по сравнению с любыми другими элементами.

1 Методические указания к проведению лабораторных работ

Общие рекомендации по работе с генераторами сигнала и осциллографом. Смоделировать в программе исследуемое звено. Подключить на вход звена генератор колебаний. Установить действующее значение напряжения выходного сигнала генератора (входного сигнала схемы). При этом амплитуда выходного сигнала схемы соответствует величине $A(\omega)$ в вольтах.

На выход схемы подключается построитель ЧХ (частотных характеристик). От выхода генератора необходимо провести параллельный провод, подключенный к осциллографу. Соединение с выходом генератора осуществляется через точку In прибора, соединение с выходом звена – через точку Out. Для снятия характеристик панель прибора необходимо развернуть соответствующей кнопкой. Частота сигнала в режиме построения ЧХ задается на панели прибора.

1.1 Лабораторная работа Исследование характеристик элементарных звеньев

Любая система автоматического управления (САУ) состоит из взаимосвязанных элементов, которые могут иметь различные принципы действия, физическую природу и конструктивное исполнение. Для осуществления анализа и синтеза САУ все эти элементы представляются типовыми звеньями, имеющими определенное математическое описание зависимости выходной величины $y(t)$ от входного воздействия $x(t)$. Типовыми динамическими звеньями называются звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями не выше второго порядка.

Из типовых динамических звеньев составляются алгоритмические структурные схемы систем управления. Знание характеристик типовых звеньев необходимо для анализа и синтеза систем управления.

Классификацию типовых звеньев можно получить из рассмотрения частных случаев дифференциального уравнения второго порядка

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = b_0 \frac{dx(t)}{dt} + b_1 x(t).$$

Цель работы - изучение математических моделей и характеристик основных типовых динамических звеньев систем автоматического управления (САУ).

1. Краткие теоретические сведения

Элементы, используемые в системах автоматического управления, могут иметь самые различные принципы действия, физическую природу и конструктивное исполнение. Для упрощения анализа и синтеза САУ все эти элементы объединяются в типовые звенья по единству их математического описания. Каждому типовому звену соответствует определенного типа математическое соотношение между входной и выходной величиной. Если это соотношение является простейшим, то звено называется элементарным.

Звенья с математическим описанием обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка называются типовыми динамическими звеньями.

Из типовых динамических звеньев составляются алгоритмические структурные схемы систем управления. Знание характеристик типовых звеньев значительно облегчает изучение свойств таких систем.

Классификацию типовых звеньев удобно осуществить, рассматривая различные частные случаи общего дифференциального уравнения

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = b_0 \frac{dx(t)}{dt} + b_1 x(t). \quad (1.1)$$

Коэффициенты уравнения (1) для каждого звена определенного типа приведены в табл. 1.

Звенья, у которых коэффициенты $a_2 \neq 0$ и $b_1 \neq 0$, обладают статизмом (однозначной связью между входной и выходной переменными в статическом режиме) и поэтому называются еще статическими.

Звенья, у которых $a_2 \neq 0$, $a_1 \neq 0$ и $a_0 \neq 0$ инерционностью.

Есть звенья, у которых только два коэффициента не равны нулю. Они являются простейшими или элементарными. Все остальные звенья могут быть образованы из элементарных звеньев.

Таблица 1.1

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	k	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	T	1	0	k	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 > 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	T	1	0	0	k	
6	Реальное дифференцирующее	0	T	1	k	0	
7	Изодромное (пропорционально-интегрирующее)	1	1	0	k_1	k	
8	Форсирующее (пропорционально-дифференцирующее)	0	0	1	k_1	k	
9	Интегро-дифференцирующее с преобладанием интегрирующих свойств	0	T	1	k_1	k	$k_1/k < T$
10	Интегро-дифференцирующее с преобладанием дифференцирующих свойств	0	T	1	k_1	k	$k_1/k > T$

Характеристики основных типовых динамических звеньев приведены на рис. 12 – 16.

На рисунках приведены характеристики:

- нули и полюсы передаточной функции;
- амплитудная и фазовая частотные характеристики;
- переходная характеристика;
- логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики;
- импульсная переходная функция;
- амплитудно-фазовая характеристика.

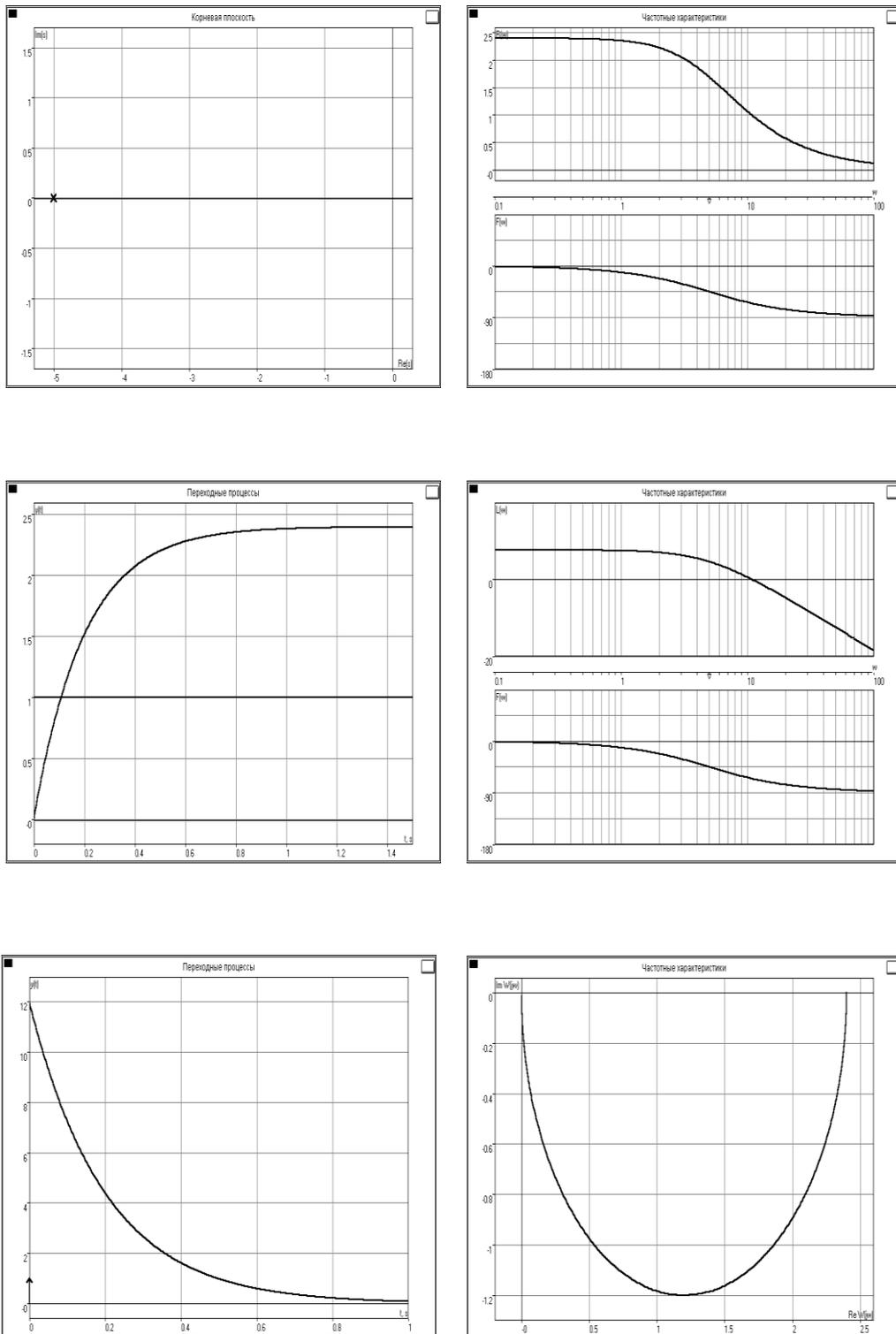


Рис. 12. Характеристики апериодического звена первого порядка

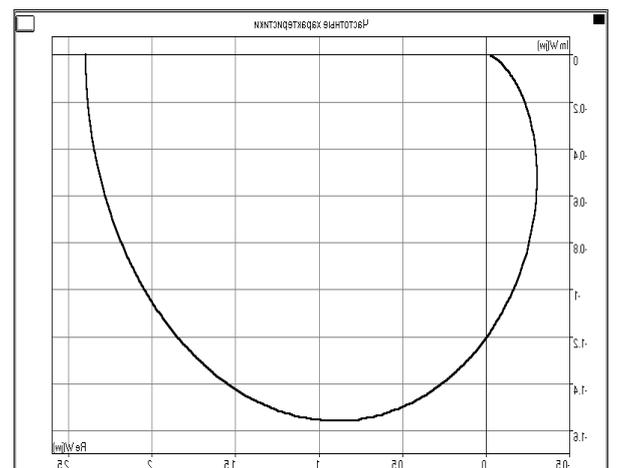
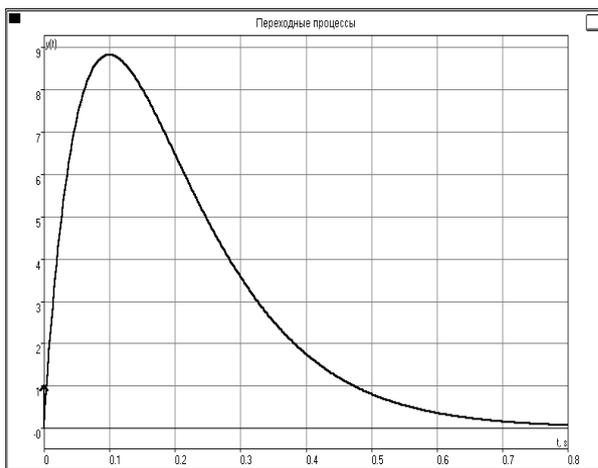
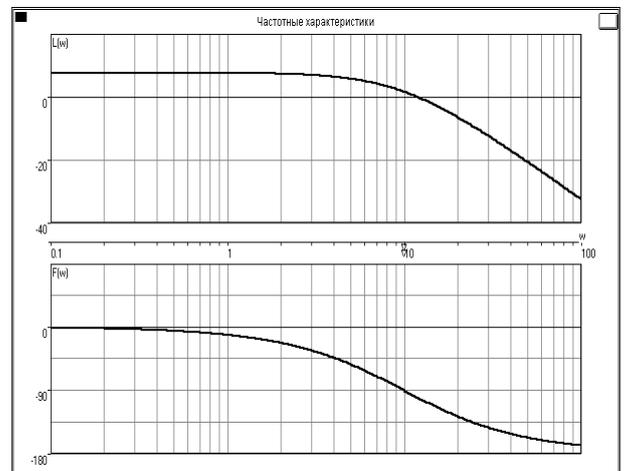
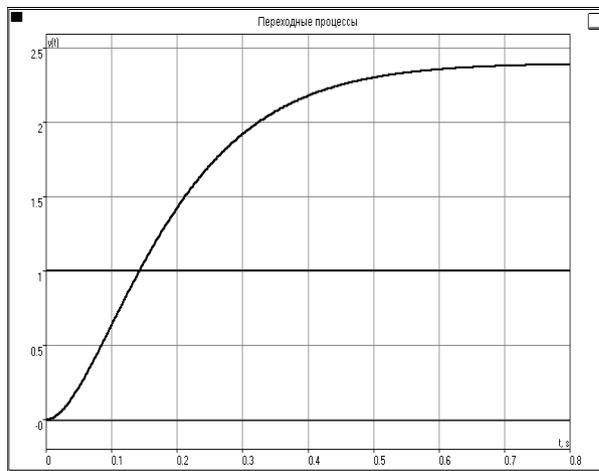
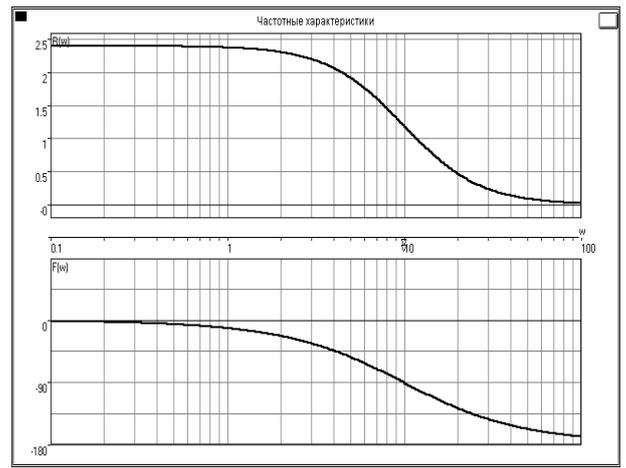
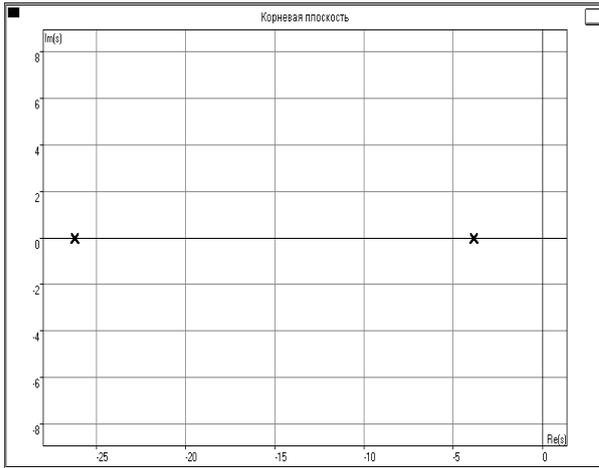


Рис. 13. Характеристики аperiodического звена второго порядка

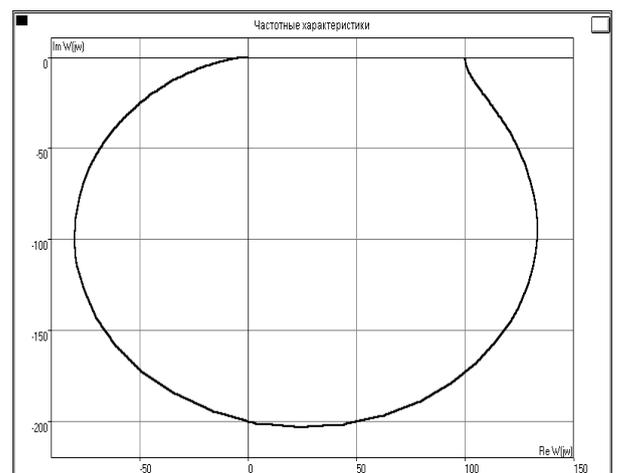
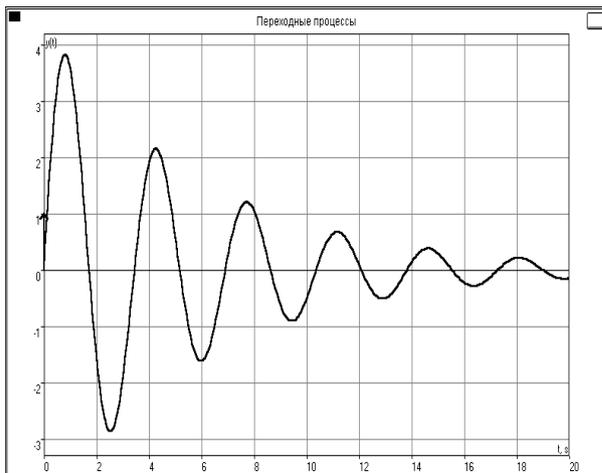
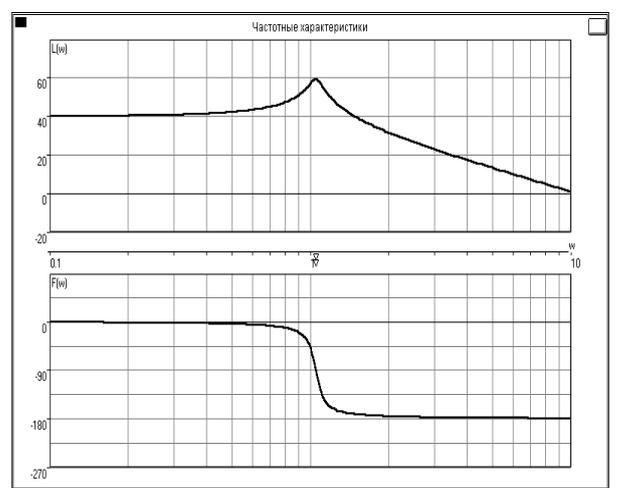
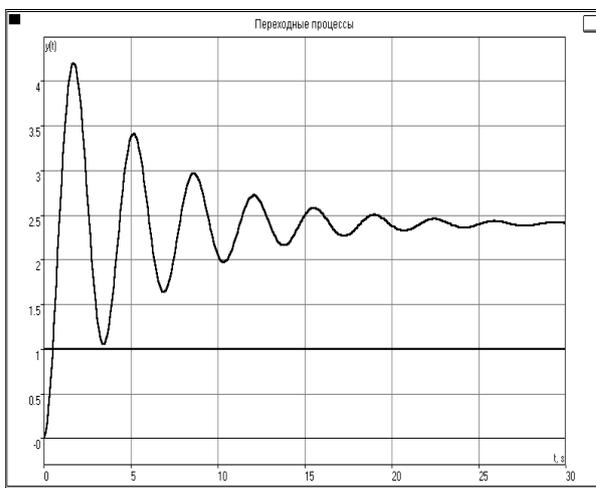
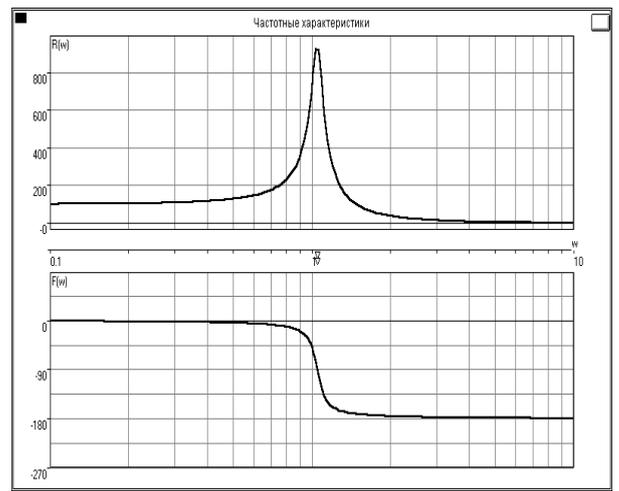
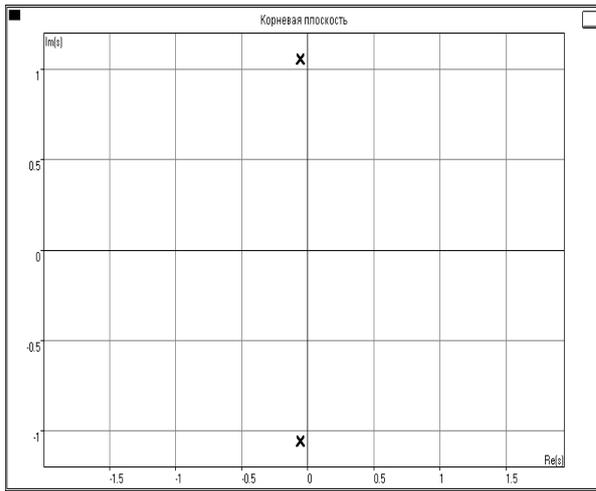


Рис. 14. Характеристики колебательного звена второго порядка

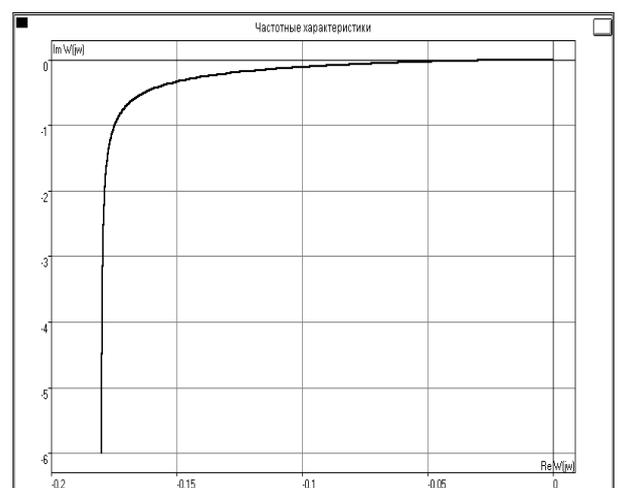
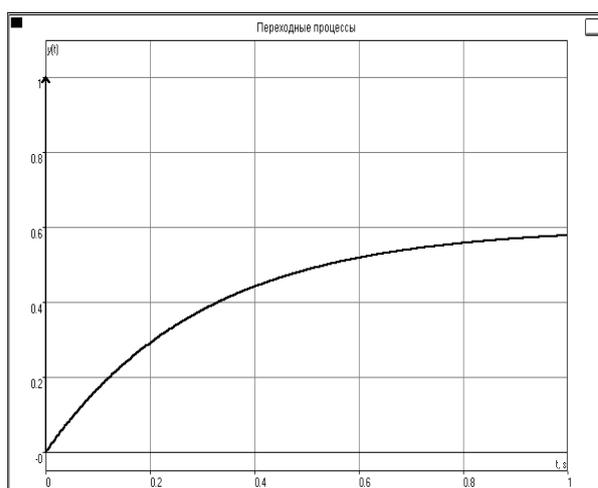
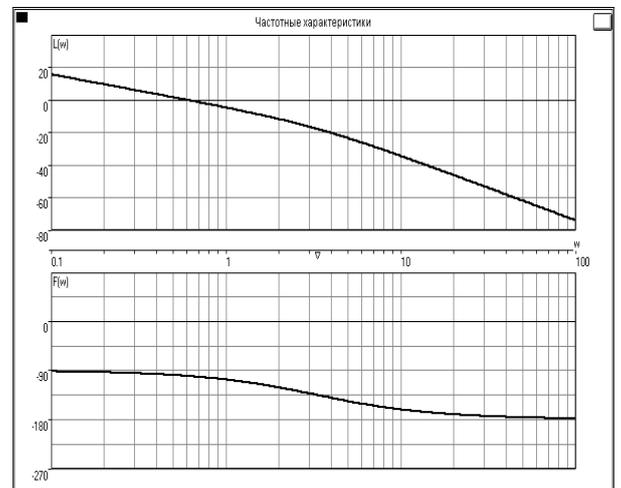
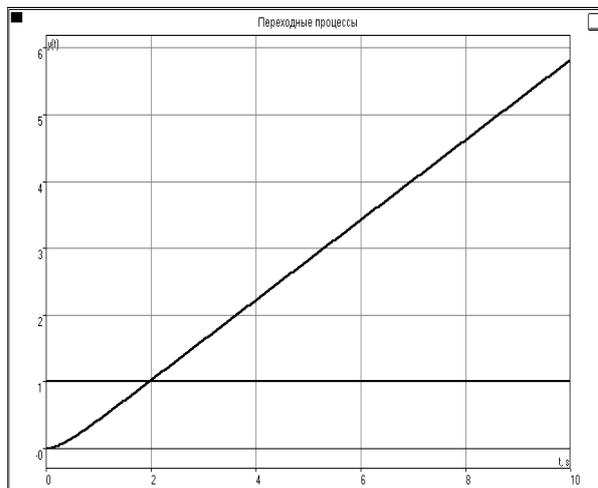
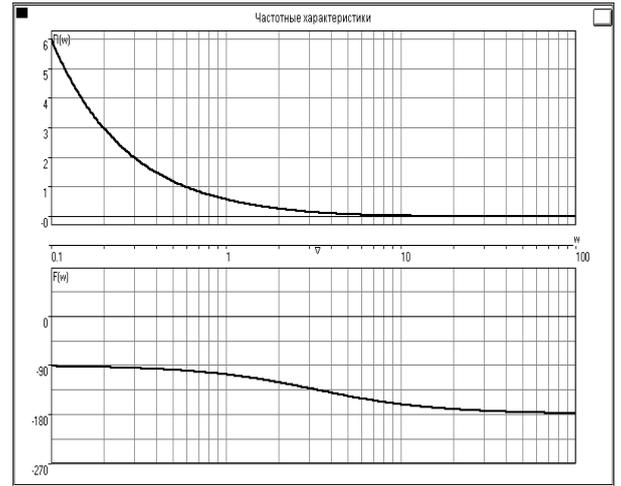
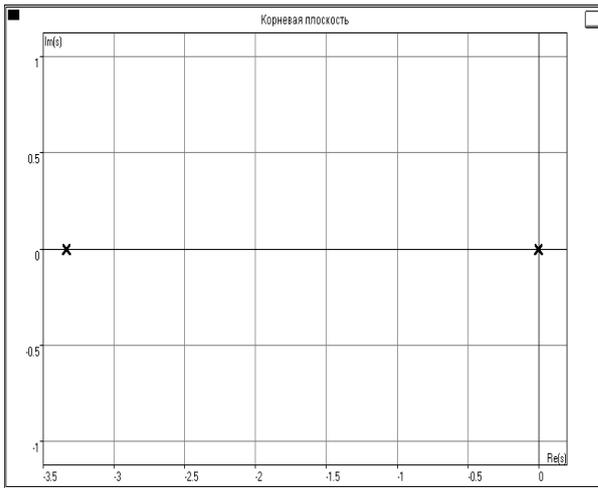


Рис. 15. Характеристики реального интегрирующего звена

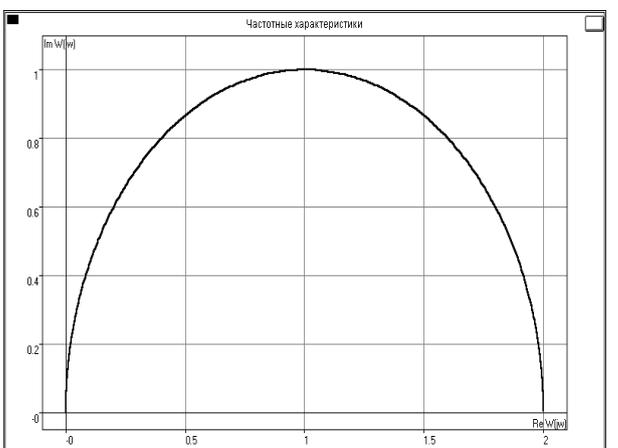
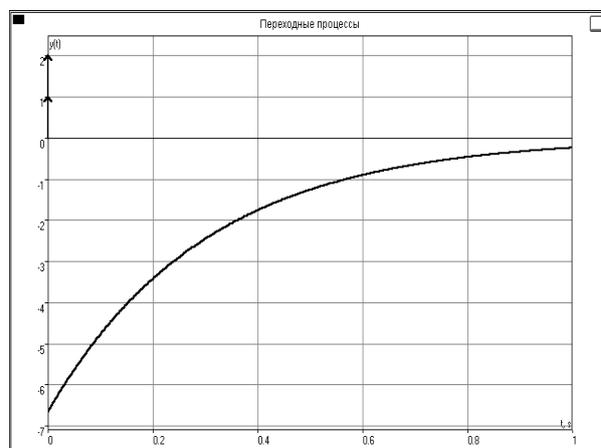
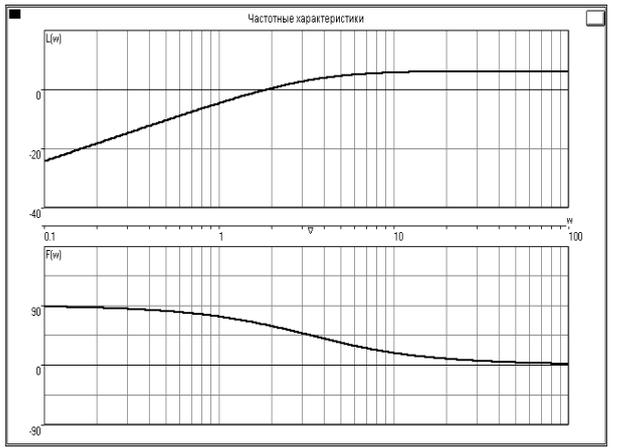
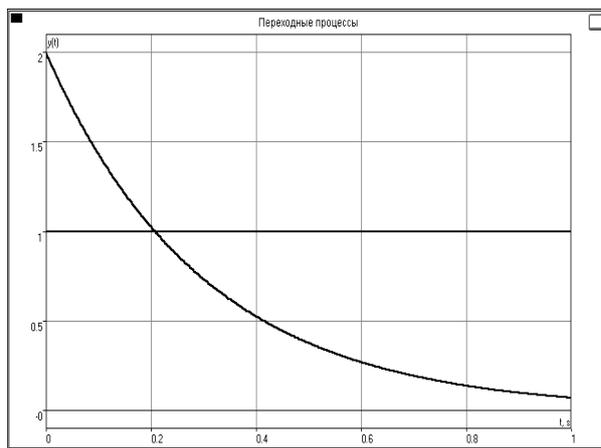
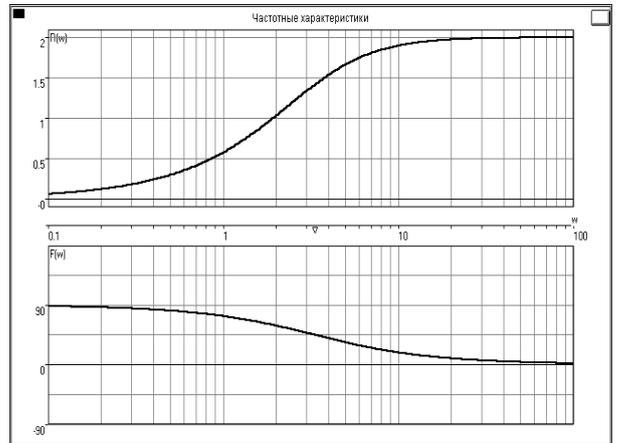
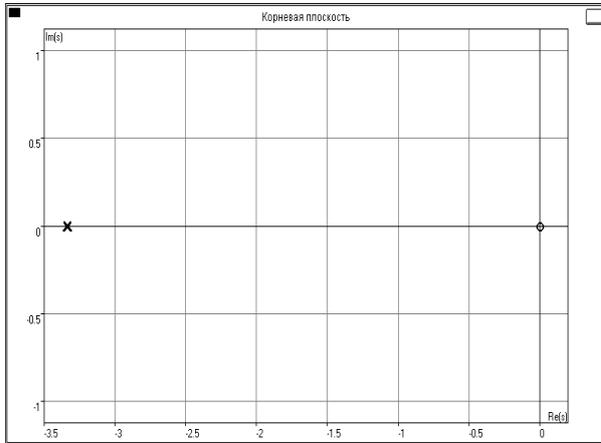


Рис. 16. Характеристики реального дифференцирующего звена

2. Пояснения к работе

Работа выполняется в среде моделирующей системы CLASSIC-3. Для выполнения программы работы необходимо в окне редактирования установить единственное звено, назначив его входным и выходным одновременно (рис. 17).

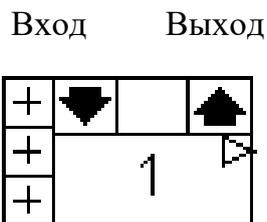


Рис. 17. Исследуемое звено

Таблица 1.2, вариант 1

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	10	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,1	1	0	10	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,1	1	0	10	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,1	0,1	1	0	10	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,1	1	0	0	10	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,1	1	10	0	

Таблица 1.2, вариант 2

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	20	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,2	1	0	20	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,2	1	0	20	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,5	0,2	1	0	20	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,2	1	0	0	20	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,2	1	20	0	

Таблица 1.2, вариант 3

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	30	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,3	1	0	30	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,3	1	0	30	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,3	0,3	1	0	30	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,3	1	0	0	30	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,3	1	30	0	

Таблица 1.2, вариант 4

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	40	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,4	1	0	40	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$5,8 \cdot 10^{-3}$	0,4	1	0	40	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,4	0,4	1	0	40	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,4	1	0	0	40	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,4	1	40	0	

Таблица 1.2, вариант 5

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	50	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,5	1	0	50	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,5	1	0	50	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,5	0,5	1	0	50	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,5	1	0	0	50	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,5	1	50	0	

Таблица 1.2, вариант 6

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	60	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,6	1	0	60	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,06	0,6	1	0	60	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,6	0,6	1	0	60	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,6	1	0	0	60	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,6	1	60	0	

Таблица 1.2, вариант 7

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	70	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,7	1	0	70	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,07	0,7	1	0	70	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,7	0,7	1	0	70	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,7	1	0	0	70	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,7	1	70	0	

Таблица 1.2, вариант 8

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	80	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,8	1	0	80	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,08	0,8	1	0	80	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,8	0,8	1	0	80	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,8	1	0	0	80	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,8	1	80	0	

Таблица 1.2, вариант 9

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	90	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	0,9	1	0	90	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,09	0,9	1	0	90	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	0,9	0,9	1	0	90	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	0,9	1	0	0	90	
6	Реальное дифференцирующее	0	0,9	1	90	0	

Таблица 1.2, вариант 10

№ п.п.	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безынерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	100	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	1	1	0	100	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	0,1	1	1	0	100	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	1	1	1	0	100	$T_1 < 2T_2$
5	Реальное интегрирующее	1	1	0	0	100	
6	Реальное дифференцирующее	0	1	1	100	0	

Передаточную функцию звена необходимо каждый раз редактировать в соответствии с типом исследуемого звена. Исследованию подлежат звенья 1 – 8 согласно табл. 1.

Передаточная функция звена конкретного типа определяется по выражению (1) и табл. 1. Параметры звеньев приведены в табл. 2., согласно варианту.

Чтобы результаты исследований не терялись из-за возможных зависаний программы, рекомендуется отредактированные модели звеньев сохранять отдельными файлами со своими именами.

Моделирующая система при построении частотных характеристик чаще всего устанавливает начальное значение частоты $\omega = 1$, из-за чего начальные участки логарифмических частотных характеристик и амплитудно-фазовой характеристики не изображаются. Для устранения этого недостатка необходимо в режиме просмотра логарифмических характеристик установить начальное значение частоты $\omega = 0,001$. Это же начальное значение частоты необходимо установить и в режиме просмотра амплитудно-фазовой характеристики.

3. Программа работы

1. Для каждого типового звена 1 – 6 (табл. 1) в соответствии с его параметрами (табл. 2) и вариантом вывести выражения передаточных функций.

2. Для каждого звена по его передаточной функции записать операторное уравнение.

3. Последовательно отредактировать модель каждого звена и провести анализ характеристик во временной и частотной областях. Отметить отличительные особенности каждого звена.

4. Для инерционных звеньев по логарифмическим частотным характеристикам определить частоты сопряжения и среза.

5. Определить значения полюсов и нулей передаточных функций, и оценить их влияние на характер переходного процесса.

6. Оценить влияние параметра k на переходный процесс, увеличив значение параметра в два раза.

4. Содержание отчета

В отчете представить результаты выполнения программы работы, анализ результатов и выводы.

5. Вопросы

1. Что такое передаточная функция элемента?
2. С какой целью и каким образом выделяют типовые динамические звенья САУ?
3. Какие звенья называются апериодическими?
4. Как проходят через инерционное звено первого порядка гармонические сигналы низкой и высокой частоты?
5. Какими примерами можно охарактеризовать безынерционное звено?
6. Какими примерами можно охарактеризовать реальное интегрирующее звено?
7. Какими примерами можно охарактеризовать реальное дифференцирующее звено?

1.2 Лабораторная работа Исследование переходных процессов

1. Цель работы

Экспериментальное построение амплитудной частотной и фазовой частотной характеристик стационарной системы, выяснение физического смысла частотных характеристик.

Краткие теоретические сведения

Частотные характеристики представляют собой зависимость амплитуды и фазы выходного сигнала звена или системы в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале неизменной амплитуды и изменяемой частоты.

Частотные характеристики имеют важное значение для исследования систем автоматического управления, так как они характеризуют передаточные свойства звеньев и систем

Рассмотрим подробнее разновидности частотных характеристик. Если на вход линейной системы (рис. 18) в момент времени $t=0$ приложено гармоническое воздействие определенной частоты ω

$$x(t) = x_m \sin \omega t, \quad (2.1)$$

то после окончания переходного процесса в системе установится режим установившихся вынужденных колебаний, а выходная величина $y(t)$ будет изменяться по гармоническому закону с той же частотой ω , но с другой амплитудой y_m и со сдвигом Δt во времени

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.2)$$

где $\varphi = (\Delta t / T) \cdot 360$ – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами в градусах.

Изменяя частоту ω от 0 до ∞ при постоянном значении x_m , можно установить, что амплитуда и фазовый сдвиг выходного сигнала элемента зависят от частоты входного сигнала. Зависимости амплитуды y_m и сдвига φ от значений частоты ω характеризуют динамические свойства элементов. Так как амплитуда выходного сигнала определяется также значением амплитуды входного сигнала, то возникает необходимость рассматривать отношение амплитуд y_m / x_m .

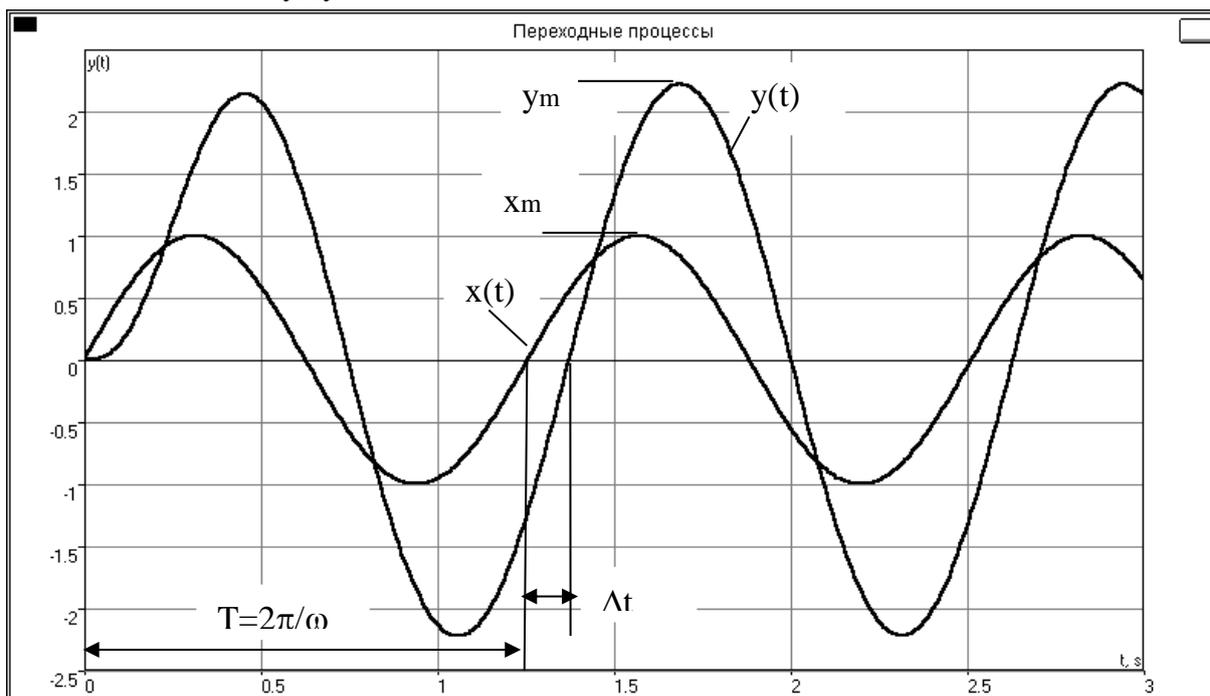


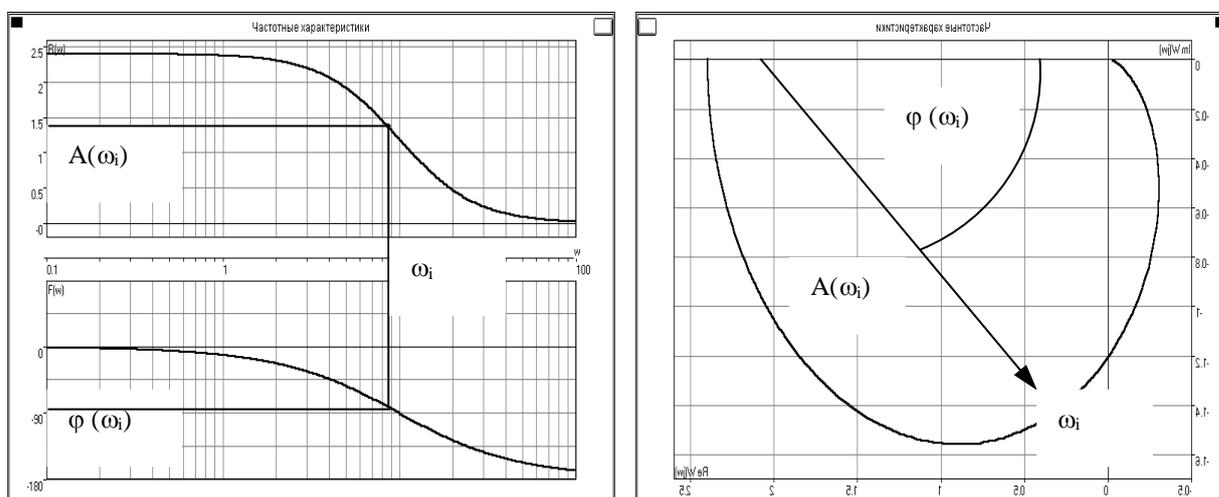
Рис. 18. Гармоническое воздействие на систему: входной и выходной сигналы

Зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигнала от частоты называют амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) и обозначают $A(\omega)$ (рис.19,а).

Зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты называют фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) $\varphi(\omega)$ (рис. 19,а). АЧХ характеризует пропускание элементом сигналов различной частоты. Пропускание оценивается по отношению амплитуд u_m / x_m .

При объединении амплитудной и фазовой частотных характеристик в одну получают амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ или АФХ). Амплитудно-фазовая частотная характеристика $W(j\omega)$ является функцией комплексного переменного $j\omega$. Модуль АФХ равен $A(\omega)$, а аргумент равен $\varphi(\omega)$. Каждому значению частоты ω_i соответствует комплексное число $W(j\omega_i)$, представленное на комплексной плоскости изображающим вектором длиной $A(\omega_i)$ и расположенным к вещественной положительной оси под углом $\varphi(\omega_i)$ (рис. 19,б). Положительные значения $\varphi(\omega)$ принято отсчитывать против часовой стрелки от положительной вещественной оси.

При вариации частоты в пределах $0 < \omega < \infty$ вектор $W(j\omega)$ поворачивается относительно начала координат, изменяясь по величине. Траектория движения конца вектора (годограф) и есть АФХ. Каждая точка характеристики соответствует конкретному значению частоты.



а **б**
Рис. 19. Частотные характеристики: а – амплитудная и фазовая; б – амплитудно-фазовая

Зависимости проекций вектора $W(j\omega)$ на действительную и мнимую оси от частоты называют соответственно действительной $P(\omega)$ и мнимой $Q(\omega)$ частотными характеристиками. Действительная частотная характеристика всегда является четной функцией частоты, а мнимая характеристика всегда является нечетной функцией.

Выражение для амплитудно-фазовой характеристики конкретного элемента можно получить из его передаточной функции подстановкой $s=j\omega$:

$$W(j\omega) = W(s), s = j\omega \quad (2.3)$$

АФХ $W(j\omega)$ может быть представлена в показательной форме

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.4)$$

алгебраической

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (2.5)$$

или тригонометрической

$$W(j\omega) = A(\omega)\cos\varphi(\omega) + jA(\omega)\sin\varphi(\omega). \quad (2.6)$$

3. Пояснения к работе

Представлена функциональная схема исследуемой системы управления скоростью электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Двигатель СЛ-367, управляемый преобразователем напряжения УП с пренебрежимо малым выходным сопротивлением, вращает нагрузку.

Функциональной схеме соответствует структурная схема САУ, приведенная к одноконтурной схеме с единичной отрицательной обратной связью (рис. 21). Коэффициент передачи датчика скорости ДС вошел в передаточную функцию регулятора скорости. Будем считать, что на двигатель воздействуют только динамические моменты вращающихся узлов приборного устройства, в составе которого он работает.

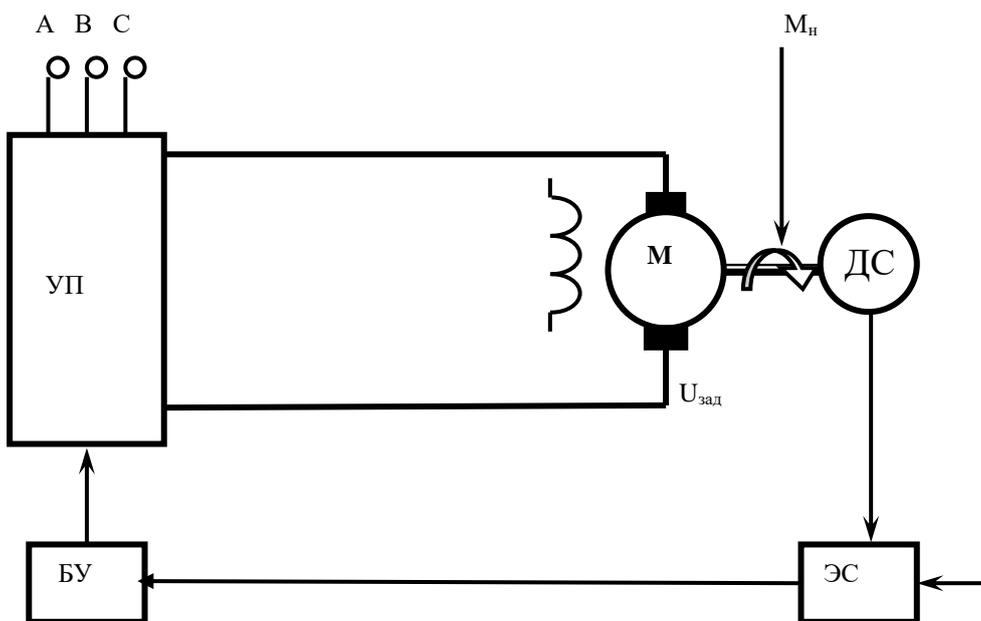


Рис. 20. Функциональная схема системы регулирования скорости

вращения двигателя независимого возбуждения: Д – двигатель; УП – управляемый преобразователь напряжения; БУ – блок управления преобразователем; ДС – датчик скорости вращения; ЭС – элемент сравнения

На структурной схеме обозначены: $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора скорости, состоящего из ДС, ЭС, БУ и УП; $W_d(s)$ – передаточная функция двигателя по управлению. В общем виде передаточные функции

$$W_p(s) = \frac{K_p}{(T_1s + 1)}, \quad (2.7)$$

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_\theta T_M s^2 + T_M s + 1}, \quad (2.8)$$

где K_p , K_d – коэффициенты передачи регулятора и двигателя соответственно;
 T_0 , T_1 , T_θ , T_M – постоянные времени.

Расчетные формулы для определения параметров двигателя по паспортным данным (если за выходную величину принять угловую частоту вращения ω) следующие:

$$K_d = \frac{1}{c} = \frac{2\pi n_{ном}}{60 (U_{ном} - I_{я ном} R_\gamma)}; \quad T_M = \gamma \frac{(J_\partial + J_H)(R_\gamma + R_i)}{c^2}; \quad T_\theta = \frac{L_\gamma + L_i}{R_\gamma + R_i},$$

где индекс «ном» соответствует номинальным значениям величин, указанным в паспорте; $\gamma = 1, 1, 2$ – коэффициент, учитывающий моменты инерции редуктора и соединительных валов; $J^*_{н}$ – момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя; $J_{д}$ – момент инерции двигателя; $(L_{я} + L_i)$ – полная индуктивность цепи якоря; $(R_{я} + R_i)$ – полное сопротивление цепи якоря.

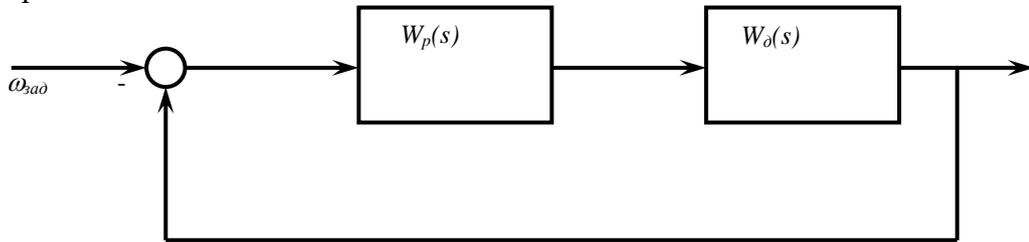


Рис. 21. Структурная схема САУ

При приведенном к валу двигателя моменте инерции $J^*_{н} = 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и паспортных данных: $P_{ном} = 32 \text{ Вт}$, $U_{ном} = 110 \text{ В}$, $I_{я ном} = 0,9 \text{ А}$, $J_{д} = 0,069 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $R_{я} = 1,5 \text{ Ом}$, $L_{я} = 0,03 \text{ Гн}$, $n_{ном} = 2500 \text{ об/мин}$ по приведенным выше формулам определим

$$c \cong 0,416; K_{д} \cong 2,4 \text{ рад}/(\text{В} \cdot \text{с}); T_{м} \cong 0,12 \cdot 10^{-2} \text{ с}; T_{э} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}.$$

Так как постоянная времени $T_{м} < T_{э}$, то двигатель эквивалентен колебательному звену с параметрами

$$W_{д}(s) = \frac{K_{д}}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} = \frac{2,4}{(5 \cdot 10^{-3})^2 s^2 + (1,25 \cdot 10^{-3}) s + 1} \quad (2.9)$$

4. Программа работы

Применительно к структурной схеме САУ (рис.21) при заданной передаточной функции двигателя $W_{д}(s)$ согласно (9) проделать следующую работу.

1. Построить на основе экспериментальных данных в совмещенных по оси ω системах координат амплитудную частотную $A(\omega)$ и фазовую частотную $\varphi(\omega)$ характеристики замкнутой стационарной САУ.

Вариант с параметрами передаточной функции регулятора задается преподавателем.

2. По экспериментальным характеристикам определить:

- показатель колебательности $M = A(\omega_p)/A(0)$;
- резонансную частоту ω_p ;
- частоту незатухающих колебаний ω_0 ;
- частоту пропускания ω_p .

3. Построить экспериментальные частотные характеристики $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ для разомкнутой системы.

4. По частотным характеристикам разомкнутой системы определить запасы устойчивости по модулю ΔA и по фазе $\Delta \varphi$.

5. Из совместного рассмотрения частотных характеристик разомкнутой системы определить частоту среза $\omega_{ср}$.

6. Сравнить все экспериментально построенные частотные характеристики с соответствующими характеристиками, определенными при помощи программы CLASSIC-3.

Варианты значений коэффициента K_p передаточной функции регулятора $W_p(s)$ при $T_1 = 0,002$ с приведены в табл. 1.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
K_p	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8

4. Порядок выполнения работы

1. Работа выполняется в среде моделирующей системы CLASSIC-3.

2. Для получения входного гармонического сигнала изменяемой частоты в программе CLASSIC-3 необходимо в окне переходного процесса установить входной сигнал синусоидальным.

Измерить временной сдвиг Δt входного и выходного сигналов. Временной сдвиг измерять после окончания переходного процесса. При малых значениях установленной частоты фазовый сдвиг незначителен и будет малозаметен. По мере увеличения частоты фазовый сдвиг будет увеличиваться.

Измерить в установившемся режиме амплитуду $A(\omega)$ выходного сигнала.

Фазу определить в градусах по выражению

$$\varphi = \frac{\Delta t \cdot 360}{T} \quad (2.10)$$

Данные экспериментов и расчетов при изменении частоты входного сигнала занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

ω							
$A(\omega)$							
Δt							
$\varphi(\omega)$							

2. Для каждого нового установленного значения частоты пункты 2,...,5 повторяются. Эксперимент и расчеты проводить до тех пор, пока текущее значение амплитуды не примет значение $A(\omega) \leq 0,1A(0)$.

3. По результатам данных таблицы построить частотные характеристики. При построении характеристики $\varphi(\omega)$ необходимо учитывать, что из-за отставания во времени выходного сигнала его фаза имеет отрицательное значение.

4. Разомкнуть САУ. Для разомкнутой САУ по приведенной выше методике построить характеристики $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$.

5. По частотным характеристикам определить запасы устойчивости по модулю $\Delta A = 1 - A_p(\omega)$ при $\varphi = \pi$ и по фазе $\Delta \varphi = \pi - |\varphi_p(\omega_{ср})|$, где частота среза $\omega_{ср}$ соответствует значению модуля $A_p(\omega) = 1$.

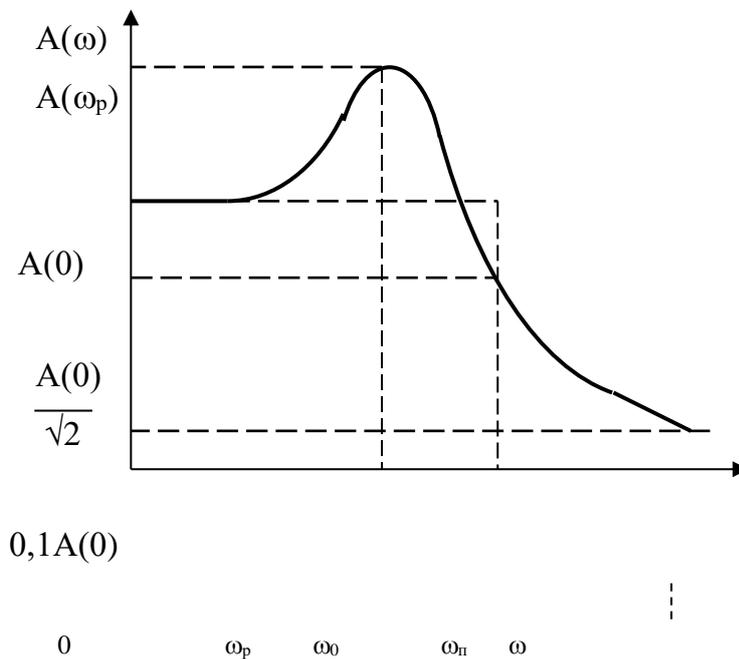


Рис. 22. Параметры амплитудной частотной характеристики

5. Содержание отчета

В отчете необходимо привести задание для выполнения лабораторной работы, структурную схему исследуемой системы, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, частотные характеристики и результаты их обработки, сделать выводы и ответить на поставленные вопросы.

6. Вопросы

1. Каков физический смысл частотных характеристик?
2. Чем объяснить отставание по фазе выходного сигнала по отношению к входному сигналу при гармоническом характере входного сигнала?
3. Чем обусловлено увеличение фазового сдвига выходного сигнала статических систем по мере увеличения частоты входного сигнала?
4. К какому пределу стремится модуль амплитудной частотной характеристики при бесконечном увеличении частоты входной величины?

1.3. Лабораторная работа Устойчивость стационарных систем автоматического управления

1. Цель работы

Экспериментальное исследование условий устойчивости замкнутых САУ, оценка устойчивости при помощи критериев устойчивости, определение запасов устойчивости.

2. Краткие теоретические сведения

Устойчивость является одним из необходимых условий, обеспечивающих нормальное функционирование автоматических систем. Поэтому чрезвычайно важно выяснить те условия, которые обеспечивают принципиальную работоспособность системы, ее устойчивость.

Признаком устойчивости САУ является существование установившегося состояния. Если отклонение выходной координаты от заданного значения (т.е. ошибка управления) не стремится к постоянной величине или к нулю, а возрастает или испытывает колебания, то САУ неустойчива. Причинами неустойчивости могут быть инерционность элементов и большой коэффициент передачи разомкнутой системы: многократно усиленное рассогласование, возвращающееся по цепи обратной связи на вход системы, не успевает из-за запаздывания в инерционных элементах обрабатываться.

Не останавливаясь на теоремах, доказанных Ляпуновым, рассмотрим, как можно оценить устойчивость линейных систем, описываемых дифференциальным уравнением вида

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j x^{(j)}(t). \quad (3.1)$$

Решение этого уравнения содержит две составляющие, одна из которых $u_{св}(t)$ (свободная, или переходная, составляющая) определяется решением однородного дифференциального уравнения

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)}(t) = 0 \quad (3.2)$$

при начальных условиях: $y(0) \neq 0$; $y' \neq 0$; $y'' \neq 0$; ...

В линейных системах, для которых справедлив принцип суперпозиции, $u_{св}(t)$ не зависит от воздействий, а определяется только параметрами системы. В соответствии с определением устойчивости по Ляпунову САУ асимптотически устойчива, если с течением времени при $t \rightarrow \infty$ свободная (переходная) составляющая решения линейного дифференциального уравнения будет стремиться к нулю. На рис. 23,а показаны $u_{св}(t)$, соответствующие устойчивым, а на рис.23,б – неустойчивым системам.

Поведение свободной составляющей определяется решением однородного дифференциального уравнения

$$y_{св}(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{p_i t}, \quad (3.3)$$

где A_i – постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий; p_i – корни характеристического уравнения $a_0 + a_1 p + \dots + a_n p^n = 0$.

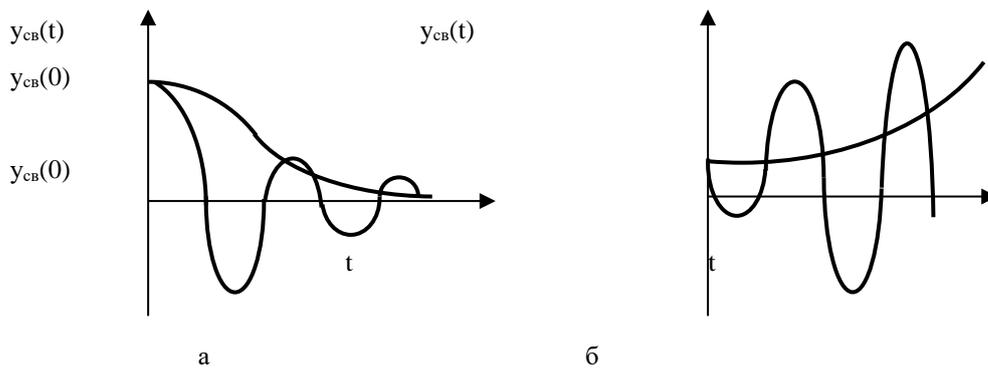


Рис.23. Свободные составляющие переходного процесса в устойчивых (а) и в неустойчивых (б) САУ

Для оценки условий устойчивости необходимо выяснить, когда выражение (3) будет стремиться к нулю. Так как система линейная, на значение свободной составляющей влияют только корни характеристического уравнения, которые зависят от структуры и параметров системы. Эти параметры – вещественные числа. Следовательно, вещественными являются и коэффициенты характеристического уравнения, определяемые параметрами системы и их комбинациями, а это означает, что корни уравнения могут быть либо только вещественными, либо комплексно-сопряженными:

$$p_k = \alpha_k; \quad p_{k+1} = \alpha_{k+1} + j\omega_{k+1}; \quad p_{k+2} = \alpha_{k+1} - j\omega_{k+1}. \quad (3.4)$$

Если вещественных корней s , а комплексно-сопряженных n - s , то свободная составляющая может быть записана в следующем виде:

$$y_{cv}(t) = \sum_{i=1}^s A_i e^{\alpha_i t} + \sum A_r e^{\alpha_r t} \sin(\omega_r t + \varphi_r), \quad (3.5)$$

откуда следует, что $y_{cv}(t) = 0$ при $t \rightarrow \infty$ тогда, и только тогда, когда все α_i и α_r отрицательны.

На комплексной плоскости корней корни с отрицательными вещественными частями располагаются на левой полуплоскости и называются левыми, а корни, расположенные в правой полуплоскости, называются правыми.

Необходимое и достаточное условие устойчивости линейной системы, следовательно, может быть сформулировано так: линейная система устойчива, если все корни ее характеристического уравнения являются левыми.

Так как при расположении корней слева от мнимой оси система устойчива, а справа – неустойчива, то мнимую ось называют границей устойчивости. Если хотя бы один корень расположен на этой оси, то систему нельзя считать работоспособной: малейшие изменения параметров могут привести к потере устойчивости.

Правило, позволяющее оценивать устойчивость системы (определять местоположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости) без непосредственного вычисления корней, называется критерием устойчивости. Критерии устойчивости разделяются на алгебраические и частотные.

Строгое математическое обоснование критериев устойчивости приводится в ТАУ. Здесь же отметим только, что алгебраические критерии устанавливают связь между коэффициентами характеристического уравнения и расположением его корней на комплексной плоскости. Критерий Михайлова устанавливает связь условий устойчивости с видом годографа функции комплексного переменного, представляющей собой левую часть характеристического уравнения (годограф Михайлова) и формулируется следующим образом:

автоматическая система будет устойчива, если при изменении частоты в пределах $0 < \omega < +\infty$ характеристический вектор $F(j\omega)$, начав движение от вещественной оси комплексной

комплексной плоскости, вращаясь против часовой стрелки и нигде не обращаясь в ноль, обходит последовательно n квадрантов (где n – степень характеристического уравнения системы).

Критерий Найквиста показывает связь условий устойчивости замкнутых систем основного типа с видом АФХ или ЛАЧХ разомкнутой системы и имеет формулировку:

если система устойчива в разомкнутом состоянии, то для устойчивости соответствующей замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФХ разомкнутой системы для $0 < \omega < +\infty$ не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$;

если система неустойчива в разомкнутом состоянии и имеет m корней в правой полуплоскости, то для устойчивости соответствующей замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФХ разомкнутой системы для $0 < \omega < +\infty$ охватывала $m/2$ раз точку с координатами $(-1, j0)$.

3. Пояснения к работе

На рис. 24 представлена принципиальная схема исследуемой системы управления скоростью электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения М2 типа МИ-42. Управление двигателем осуществляется от электромашинного усилителя АРД типа ЭМУ-50А3, который приводится во вращение асинхронным двигателем М1. Частота вращения исследуемого двигателя измеряется датчиком скорости ВР. Сигнал, пропорциональный частоте вращения, через усилитель У поступает на одну из обмоток управления ОУ2 в качестве сигнала главной отрицательной обратной связи по частоте вращения. Обмотка управления ОУ1 является задающей и определяет заданное значение частоты вращения. Так как обмотки управления включены встречно, то они же выполняют и функцию элемента сравнения. Потенциометр R предназначен для настройки коэффициента передачи цепи обратной связи.

Двигатель МИ-42, управляемый по якорной цепи, через редуктор с передаточным числом $q = 256$ приводит во вращение нагрузку с моментом инерции $J_n = 6900 \text{ кг.м}^2$. Момент инерции, приведенный к валу двигателя, определяется как $J^* = J_n / q^2$. Для определения параметров двигателя по методике, изложенной в лабораторной работе «Частотные характеристики стационарных систем», необходимо воспользоваться его паспортными данными: $R_{ном} = 3,2 \text{ кВт}$, $U_{ном} = 220 \text{ В}$, $I_{я ном} = 18 \text{ А}$, $J_d = 0,065 \text{ кг.м}^2$, $R_{я} = 0,376 \text{ Ом}$, $L_{я} = 0,004 \text{ Гн}$, $n_{ном} = 2500 \text{ об/мин}$.

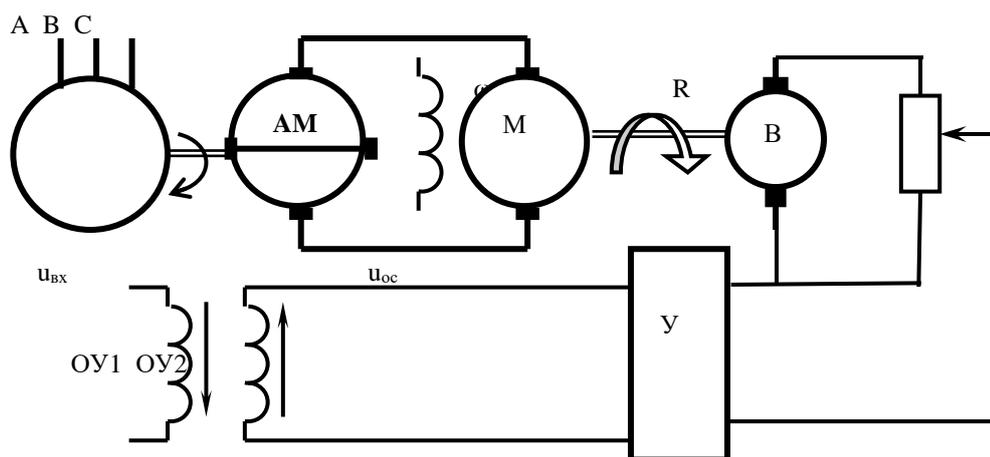


Рис. 24. Принципиальная схема САУ

Согласно паспортным данным передаточная функция двигателя в числовом выражении имеет вид

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o T_m s^2 + T_m s + 1} = \frac{1,24}{0,0076s^2 + 0,4s + 1} \approx \frac{1,24}{1 + 0,4s} \quad (3.6)$$

Параметры ЭМУ определяются также по паспортным данным, которые имеют следующие значения для ЭМУ-50А3: $R_{эму} = 4 \text{ кВт}$; $U_{эму} = 230 \text{ В}$; $I_{вх} = 10 \text{ мА}$; $r_{вх} = 2100 \text{ Ом}$; $L_{вх} = 100 \text{ Гн}$; $r_1 = 3,35 \text{ Ом}$; $L_1 = 0,6 \text{ Гн}$.

Передаточную функцию ЭМУ соответственно приведенным паспортным данным можно представить как:

$$W_{эму}(s) = \frac{K_{эму}}{(T_{вх} + 1)(T_{эму}s + 1)} \approx \frac{11}{(1 + 0,5s)(1 + 0,2s)}, \quad (3.7)$$

где $K_{\text{эму}} = u_{\text{эму}} / I_{\text{вхгвх}} \cong 11$; $T_{\text{эму}} = L1/r1 = 0,178$ с; $T_{\text{вх}} = L_{\text{вх}}/r_{\text{вх}} = 0,0478$ с.

Исследуемой САУ соответствует структурная схема, приведенная на рис. 25. На схеме обозначены $K_{\text{ос}}$ – коэффициент передачи цепи обратной связи, $U_{\text{вх}}(s)$ – изображение входного напряжения.

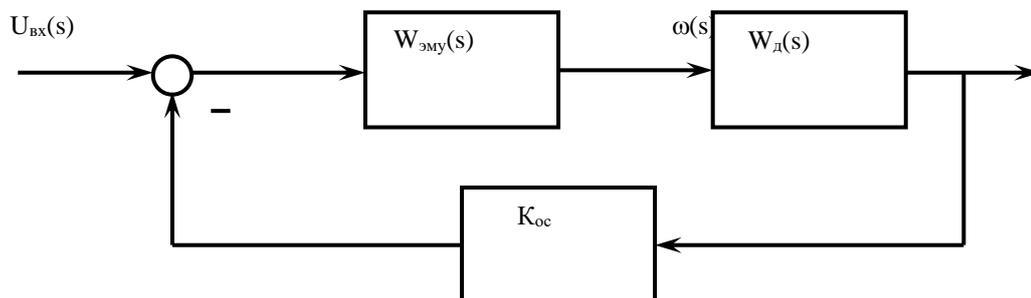


Рис. 25. Структурная схема САУ

4. Программа работы

Лабораторная работа выполняется в среде моделирующей системы CLASSIC-3. Применительно к структурной схеме САУ (рис. 25) при заданных и неизменных передаточных функциях ЭМУ $W_{эм}(s)$ и двигателя $W_d(s)$ по варианту значения коэффициента обратной связи $K_{ос}$ (вариант задается преподавателем) проделать следующую работу.

Определить значения полюсов передаточной функции замкнутой САУ, проанализировать их характер и сделать заключение об устойчивости САУ.

Снять переходную характеристику $h(t)$.

Разомкнуть САУ и оценить устойчивость по критерию Найквиста.

Снять логарифмическую амплитудную частотную и логарифмическую фазовую частотную характеристики разомкнутой системы. При совместном рассмотрении частотных характеристик определить запасы устойчивости по модулю и по фазе.

Построить при помощи моделирующей системы годограф Михайлова. Сделать вывод об устойчивости САУ по критерию Михайлова.

На основании алгебраического критерия Рауса-Гурвица рассчитать предельное значение $K_{ос}$, при котором САУ теряет устойчивость. Произвести экспериментальную проверку предельного значения $K_{ос}$.

Варианты значений $K_{ос}$ приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{ос}$	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,20

5. Порядок выполнения работы

1. Набрать структурную схему замкнутой САУ в формате моделирующей системы CLASSIC-3.

2. Отредактировать параметры структурной схемы согласно заданному варианту.

3. В режиме работы моделирующей системы «Расчеты» выполнить п. 1 и 2 программы работы.

4. Разомкнуть цепь обратной связи перед входным звеном модели САУ. При этом необходимо назначить выходным звеном звено обратной связи. Развернув на весь экран амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой САУ, выполнить п. 3 и 4 программы работы.

Для построения годографа Михайлова в CLASSIC-3 штатной процедуры не существует. Но можно воспользоваться следующим приемом. Для замкнутой САУ определить передаточную функцию и записать (запомнить) ее знаменатель. Знаменатель передаточной функции является характеристическим полиномом $D(s)$, который используется для построения годографа Михайлова. Затем необходимо открыть новое окно редактирования. В окне редактирования модели разместить фиктивное звено с передаточной функцией $W(s) = D(s)$ и назначить его одновременно входным и выходным звеном. Очевидно, что амплитудно-фазовая характеристика этого фиктивного звена будет соответствовать годографу Михайлова, так как математический аппарат построения АФХ и годографа Михайлова один и тот же. Для анализа начальной области годографа необходимо увеличить масштаб его изображения.

6. Для определения предельного значения $K_{ос}$ требуется вывести выражение характеристического полинома замкнутой системы, в котором бы коэффициент $K_{ос}$ был записан в общем виде, а все остальные коэффициенты – в числовом выражении. Далее необходимо составить определитель Гурвица, приравнять первый диагональный минор к нулю и найти искомое предельное значение коэффициента. Равенство нулю диагонального минора означает, что САУ находится на границе устойчивости.

6. Содержание отчета

В отчете необходимо привести задание для выполнения лабораторной работы, структурную схему исследуемой системы с передаточными функциями ее отдельных элементов, экспериментальные и расчетные графики, данные по результатам экспериментов и результаты обработки данных, сделать необходимые заключения и ответить на поставленные вопросы.

7. Вопросы

Какие причины лежат в основе возможной неустойчивости автоматической системы?

Как оценивается устойчивость САУ по поведению свободной составляющей решения линейного дифференциального уравнения?

С какой целью выясняются условия устойчивости САУ?

Что называется критерием устойчивости?

Какие критерии устойчивости наиболее часто используются в теории автоматического управления?

Как оценивается устойчивость САУ по поведению свободной составляющей решения линейного дифференциального уравнения?

В чём заключается необходимое условие устойчивости САУ?

В чём заключается достаточное условие устойчивости САУ?

Что называется критерием устойчивости?

Какие критерии устойчивости наиболее часто используются в теории автоматического управления системами?

Как оценить устойчивость системы по критерию Гурвица?

Приведите примеры алгебраических и геометрических критериев устойчивости системы?

Какое уравнение является исходным для критерия Михайлова?

Как влияют на устойчивость параметры K и T ?

1.4. Лабораторная работа Синтез ПИД-регулятора

1. Цель работы

Изучение влияния настроечных параметров регулятора на динамические свойства САУ и методик настройки САУ на МО и СО.

2. Краткие теоретические сведения

САУ может быть приведена к простейшей одноконтурной алгоритмической схеме (рис. 26).

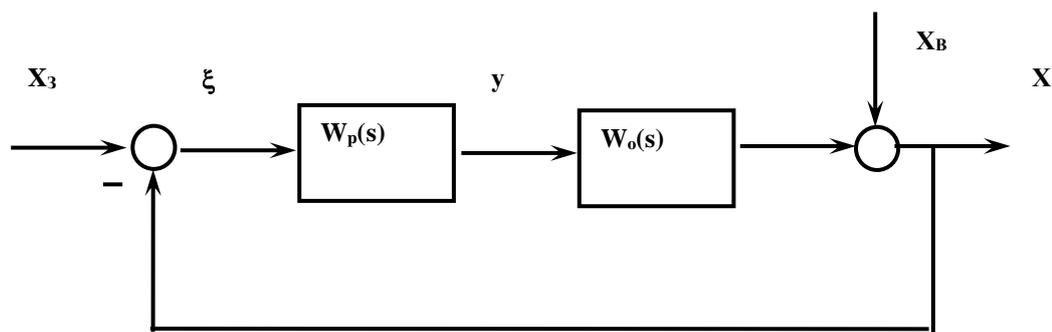


Рис. 26. Алгоритмическая схема типовой одноконтурной системы

На схеме $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_o(s)$ – передаточная функция объекта управления.

Простейший типовой алгоритм управления реализуется при помощи безынерционного звена с передаточной функцией

$$W_p(s) = y(s)/\xi(s) = \kappa_n. \quad (4.1)$$

Этот закон регулирования называется пропорциональным (П).

Преимущество П-регулятора – простота и быстродействие, недостаток – ограниченная точность.

Закон регулирования, которому соответствует передаточная функция регулятора

$$W_p(s) = \kappa_u / s, \quad (4.2)$$

называется интегральным (И). И-регулятор реагирует на длительные отклонения управляемой величины от заданного значения. Кратковременные отклонения сглаживаются таким регулятором.

Преимущества интегрального закона по сравнению с пропорциональным законом – лучшая точность в установившихся режимах, недостатки – худшие свойства в переходных режимах (меньшее быстродействие и большая колебательность).

Наибольшее распространение получил пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования

$$W_p(s) = \kappa_n + \kappa_u / s. \quad (4.3)$$

Наличие интегральной составляющей в ПИ-законе обеспечивает высокую точность в установившихся режимах, а при определенном соотношении коэффициентов κ_n и κ_u обеспечивает хорошие показатели и в переходных режимах.

Наилучшее быстродействие достигается при пропорционально-дифференциальном (ПД) законе регулирования

$$W_p(s) = \kappa_n + \kappa_d s. \quad (4.4)$$

ПД-регулятор реагирует не только на величину сигнала ошибки, но и на скорость его изменения. Благодаря этому при управлении достигается эффект упреждения. Недостатком пропорционально-дифференциального закона регулирования является ограниченная точность.

Наиболее универсальным является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон

$$W_p(s) = \kappa_n + \frac{\kappa_u}{s} + \kappa_d s, \quad (4.5)$$

который сочетает в себе преимущества более простых ранее рассмотренных законов.

В литературе принято ПИД-закон записывать в форме [2]

$$W_p(s) = \kappa_p \frac{T_u + T_d}{T_u} + \frac{\kappa_p}{T_u s} + \kappa_p T_d s, \quad (4.6)$$

где

$$\kappa_n = \kappa_p \frac{T_u + T_d}{T_u}; \quad \kappa_u = \frac{\kappa_p}{T_u}; \quad \kappa_d = \kappa_p T_d;$$

κ_p – передаточный коэффициент регулятора; T_u – постоянная времени интегрирования; T_d – постоянная времени дифференцирования.

Связь между коэффициентами уравнений (5) и (6) очевидна из почленного сравнения этих уравнений.

Если допустить, что САУ имеет ПИД-регулятор, то алгоритмическая схема типовой одноконтурной системы представляется в виде, показанном на рис. 27.

В зависимости от типа и порядка объектов, а также соотношений между их постоянными времени настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию модульного оптимума (МО), либо по критерию симметричного оптимума (СО).

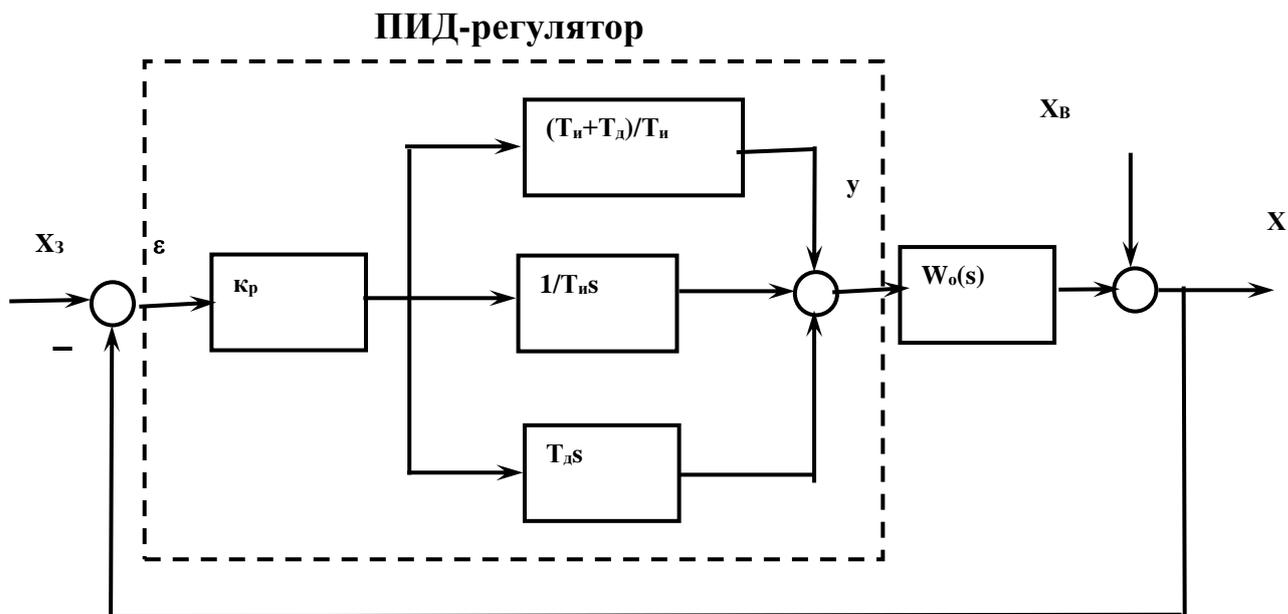


Рис. 27. Одноконтурная САУ с ПИД-регулятором

Изложим сущность метода оптимизации амплитудной характеристики для расчета настроечных параметров типовых регуляторов, используемых для управления следующими объектами без запаздывания:

$$W_0(s) = k_0 / s(T_0 s + 1), \quad (4.7)$$

$$W_0(s) = k_0 / (T_0 s + 1)(T_0 s + 1), \quad (4.8)$$

$$W_0(s) = k_0 / s(T_0 s + 1)(T_0 s + 1), \quad (4.9)$$

$$W_0(s) = k_0 / (T_0 s + 1)(T_0 s + 1)(T_0 s + 1), \quad (4.10)$$

где $T_0 < T_0 < T_0$, причем в общем случае сомножитель с наименьшей постоянной времени T_0 приближенно заменяет собой несколько инерционных звеньев с еще более малыми постоянными времени $T_0 i$.

Моделями (7) - (10) обычно пользуются для приближенного описания объектов, входящих в типовые контуры регулирования систем управления электроприводами (контуры регулирования напряжения, тока и частоты вращения).

Таблица 3.1

Передаточная функция объекта $W_0(p)$	Условия применения	Критерий	Параметры регулятора		
			k_p	T_u	T_d
$\frac{k_0}{(T_{01} p + 1)(T_{02} p + 1)}$ $(T_{01} < T_{02})$	$T_{02} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	T_{02}	-
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}}{2k_0 T_{01}}$	$4T_{01}$	-

$\frac{k_0}{p(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$	$T_{02} \ll T_{01}$	СО	$\frac{1}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	-
	$T_{01} < T_{02}$	СО	$\frac{1}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
$\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)(T_{03}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02} < T_{03})$	$T_{03} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{03}}{2k_0T_{01}}$	T_{03}	T_{02}
	$T_{03} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{03}}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}T_{03}}{8k_0T_{01}^2}$	T_{02}	$4T_{03}$

В зависимости от типа и порядка (4.7) - (4.10), а также соотношений между их постоянными времени, настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию МО, либо по критерию СО (табл. 3.1).

Настроечные параметры регуляторов кр, Ти и Тд, обеспечивающие получение определенных показателей качества, будем называть гарантирующими.

Если у объекта второго порядка (4.8) $T_{02} \leq 4T_{01}$, то предпочтителен критерий МО. Для выполнения требований критерия применяют ПИ-регулятор

$$W_p(s) = k_p (T_i s + 1) / T_i s \quad (4.11)$$

с постоянной времени интегрирования Ти, равной наибольшей постоянной времени объекта $T_i = T_{02}$. Тем самым достигается полная компенсация этой наибольшей постоянной времени.

Передаточная функция разомкнутого контура принимает вид

$$W(s) = W_p(s)W_0(s) = k_p k_0 / [T_i s(T_{01} s + 1)] \quad (4.12)$$

и совпадает с передаточной функцией разомкнутого контура колебательной модели, для которой критерий МО сводится к условию $\xi = 0.7$. Отсюда в соответствии с ранее приведенными формулами для колебательной модели $kT_{01} = 1/4\xi^2$; $T_{01} = T/2\xi$ находим

$$k = 1/4\xi^2 T_{01} = 1/2T_{01}. \quad (4.13)$$

Учитывая, что для рассматриваемого контура с ПИ - регулятором

$$k = k_p k_0 / T_i \text{ и } T_i = T_{02}, \quad (4.14)$$

получим, кроме (4.13), второе условие настройки на МО

$$k_p = T_{02}/2k_0T_{01} .$$

$$(4.15)$$

На рис. 28,а показаны логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутого контура и переходная характеристика замкнутой системы с объектом (4.10) и ПИ-регулятором, настроенным на МО.

На рис. 28,б приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика и переходная характеристика разомкнутой системы, настроенной на симметричный оптимум. Из рис. 28,б видно, что логарифмическая амплитудно-частотная характеристика имеет симметричную форму, поэтому подход к выбору настроек регулятора получил название симметричного оптимума. Переходный процесс в одноконтурной замкнутой системе при этом характеризуется большим перерегулированием.

Выводы о влиянии критериев настройки и параметров регулятора на показатели переходного процесса:

Увеличение передаточного коэффициента k_p приводит к уменьшению перерегулирования.

Увеличение постоянной интегрирования T_i приводит к увеличению времени переходного процесса и снижению перерегулирования.

Критерий МО предпочтителен при оптимизации систем, обрабатывающих в основном задающее воздействие.

Критерий СО целесообразно применять при настройке стабилизирующих систем, обрабатывающих в основном возмущающее воздействие.

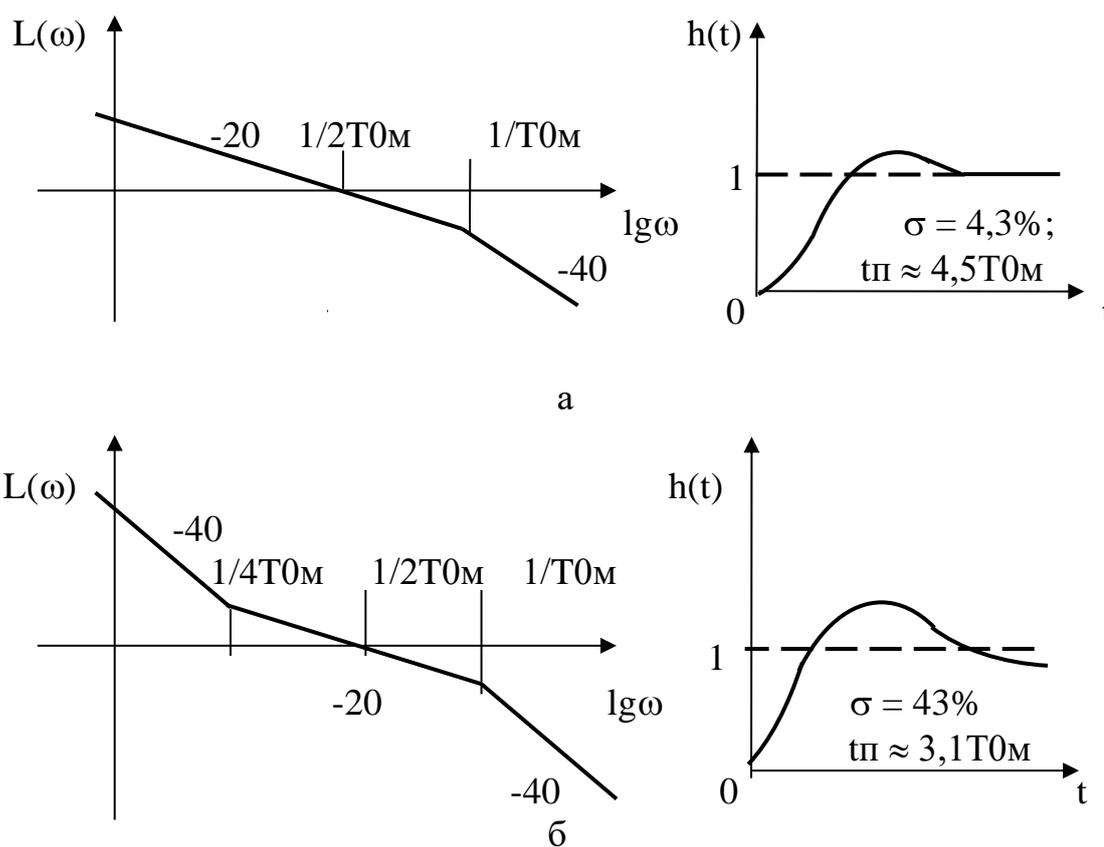


Рис. 28. Частотные и переходные характеристики одноконтурной системы регулирования, настроенной по критериям модульного (а) и симметричного (б) оптимумов

3. Задание для выполнения работы

Изучить основные законы регулирования.

Изучить структуры регуляторов, соответствующих законам регулирования.

Произвести выбор типа регулятора в зависимости от структуры объекта управления и расчет настроечных параметров регулятора.

Провести экспериментальное исследование свойств САУ с различными типами регуляторов.

4. Порядок выполнения работы

Набрать структурную схему одноконтурной замкнутой САУ с ПИД-регулятором в среде моделирующей программы CLASSIC-3 (рис. 29). Передаточную функцию по возмущающему воздействию установить равной

$$W_B(s) = 0.1 / (s + 2.2s^2 + 1.2s^3).$$

Возмущающее воздействие установить равным нулю, а обратную связь установить единичной.

Отредактировать передаточную функцию объекта управления согласно (8) по заданному варианту табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
K_0	10	11	15	14	13	12	10	9
T_{01}	0,10	0,12	0,14	0,15	0,11	0,14	0,15	0,12
T_{02}	0,30	0,36	0,42	0,45	0,33	0,36	0,40	0,30

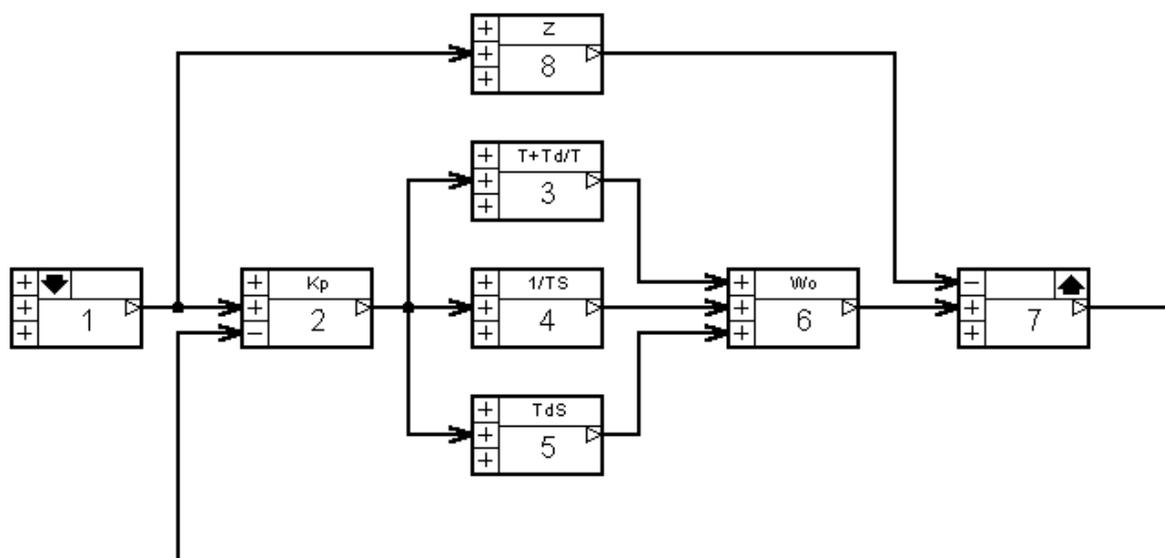


Рис. 29. Структурная схема одноконтурной САУ

1. Определить по табл. 1 тип регулятора, критерий оптимума и рассчитать настроечные параметры регулятора k_p , T_i , T_d . Если дифференциальная составляющая в регуляторе не должна присутствовать, то ее передаточная функция в структурной схеме приравнивается нулю. Данные занести в табл.4.3.

2. Снять переходный процесс в системе и определить его длительность и перерегулирование σ при возмущающих воздействиях $Z=0$ и $Z=1$. График переходного

процесса зарисовать или скопировать программно-аппаратными средствами компьютера.

3. Разомкнуть систему (рис. 30).
4. Снять логарифмическую амплитудно-частотную характеристику разомкнутой САУ.
5. Определить частоты среза $\omega_{ср}$ и сопряжения $\omega_{сопр}$. Проверить соответствие $\omega_{ср} = 1/2T_{01}$, $\omega_{сопр} = 1/T_{01}$.

Таблица 4.3

Настроечный параметр	Расчетная формула	Расчетное значение	Критерий оптимума
K_p			
T_u			
T_d			

Отредактировать передаточную функцию (9) объекта управления согласно заданному в табл. 3 варианту.

Выполнить задания по пунктам 3, 4 и 5.

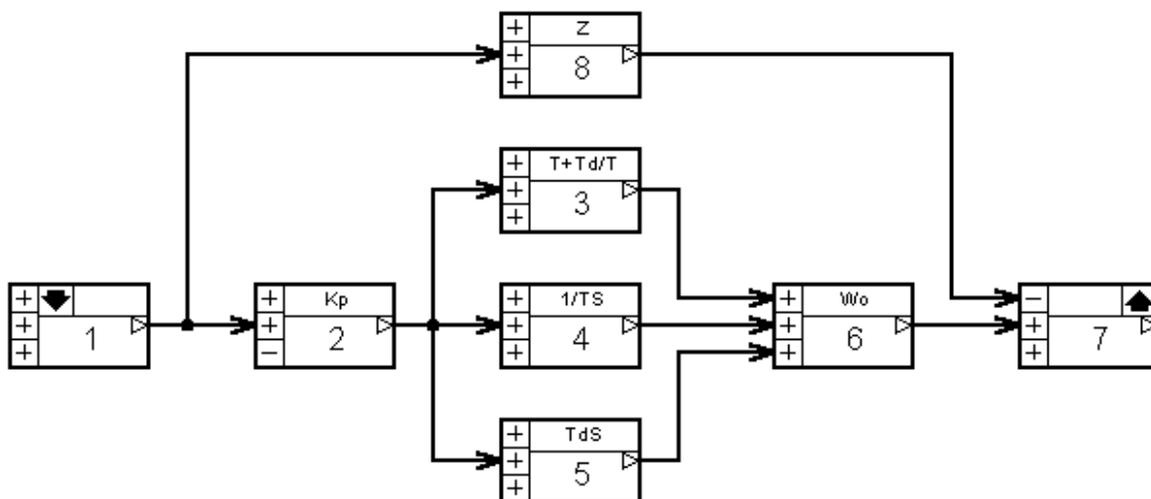


Рис. 30. Структурная схема разомкнутой САУ

5. Содержание отчета

В отчете привести задание на выполнение лабораторной работы, структурные схемы исследуемых систем, расчеты настроечных параметров регуляторов, экспериментальные переходные характеристики, логарифмические амплитудно-частотные характеристики, выводы и ответы на вопросы.

6. Вопросы

1. Как называются основные законы регулирования?
2. Какими достоинствами и недостатками характеризуются каждый из законов регулирования?
3. Перечислите достоинства и недостатки коррекции с помощью интегрирующего звена?

4. Перечислите достоинства и недостатки коррекции с помощью дифференцирующего звена?
5. Какие показатели качества улучшила коррекция с помощью дифференцирующего звена?
6. Какие показатели качества улучшила коррекция с помощью интегрирующего звена?

2. Методические указания к проведению практических работ

Практическое занятие – это форма систематических учебных занятий, с помощью которых студенты изучают тот или иной раздел определенной учебной дисциплины, входящей в состав учебного плана. Для того чтобы практические занятия приносили максимальную пользу, необходимо при подготовке к практическим занятиям использовать материал лекций, который должен закрепляться на практических занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью решения проблемных ситуаций и задач. При подготовке к практическим занятиям следует использовать основную литературу из представленного списка, а также руководствоваться данными указаниями и рекомендациями. Рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию: - открыть методические указания по практическим работам к данной дисциплине - ознакомиться с целью практического занятия - просмотреть необходимый теоретический материал из методических указаний - просмотреть материал из рекомендуемых источников по данной теме практического занятия - ознакомиться с вариантами заданий для данного практического занятия.

Примерные темы, выносимые на рассмотрение на практических занятиях:

1. Схемы систем управления. Принципы управления
2. Описание систем в виде дифференциальных уравнений
3. Переходная характеристика и весовая функция систем управления
4. Преобразование Лапласа и его свойства
5. Разложение дробно-рациональной функции на простые дроби
6. Передаточная функция
7. Вычисление частотных характеристик систем управления
8. Определение характеристик элементарных звеньев
9. Преобразование структурных схем систем управления
10. Критерий устойчивости Гурвица
11. Критерий устойчивости Михайлова
12. Критерий устойчивости Найквиста
13. Частотные критерии оценки качества управления
14. Корневые критерии оценки качества управления
15. Последовательные корректирующие звенья
16. Параллельная коррекция
17. Корректирующие обратные связи

3 Методические указания для организации самостоятельной работы

3.1 Общие положения

Целями самостоятельной работы являются систематизация, расширение и закрепление теоретических знаний.

Самостоятельная работа студента по дисциплине включает следующие виды активности:

1. Изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки.
2. Подготовка к практическим работам.
3. Подготовка к лабораторным работам.
4. Выполнение индивидуальных заданий.

3.2 Изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки

Изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки к разделам:

- 1 Математическое описание систем управления
- 2 Структурный анализ систем управления
- 3 Устойчивость систем управления
- 4 Качество управления
- 5 Синтез систем управления

Рекомендуемая литература:

1. Озеркин, Д. В. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Д. В. Озеркин. — Москва : ТУСУР, 2012. — 179 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10906125741> (дата обращения: 26.12.2022)
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 5-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/125741125741> (дата обращения: 26.12.2022)

3.3 Подготовка к лабораторным работам

В рамках выполнения подготовки к лабораторным работам рекомендуется детально познакомиться с теоретическим материалом по темам лабораторных работ.

Рекомендуемая литература:

1. Озеркин, Д. В. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Д. В. Озеркин. — Москва : ТУСУР, 2012. — 179 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10906> (дата обращения: 26.12.2022)
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беяев, Т. А. Пьявченко. — 5-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/125741> (дата обращения: 26.12.2022)

3.4 Выполнение индивидуального (творческого) задания (ИЗ)

В рамках выполнения индивидуального (творческого) задания (ИЗ) необходимо подготовить 7 минутный доклад, раскрывающий одну из следующих тем:

Вариант индивидуального задания определяется преподавателем в индивидуальном порядке, основываясь на уровень знаний и студента.

Примеры тем:

Принципы автоматического управления.

Законы регулирования.

Временные характеристики САУ.

Частотные характеристики САУ.

Решение дифференциальных уравнений с помощью преобразования Лапласа.

Передаточная функция САУ.

Характеристики апериодического звена 1 порядка.

Правила структурных преобразований САУ.

Характеристики усилительного звена.

Характеристики колебательного звена.

Характеристики интегрирующего звена.

Характеристики дифференцирующего звена.

Характеристики форсирующего звена.

Критерий устойчивости Гурвица.

Критерий устойчивости Найквиста.

Критерий устойчивости Михайлова.

Точность САУ в установившемся режиме.

Статическая ошибка. Динамическая ошибка.

Оценка качества переходного процесса.

Методы повышения качества САУ.

Синтез корректирующего устройства.

Характеристики интегрирующего корректирующего устройства.

Характеристики дифференцирующего корректирующего устройства.

Основная и дополнительная литература

Основная литература:

1. Озеркин, Д. В. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебное пособие / Д. В. Озеркин. — Москва : ТУСУР, 2012. — 179 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/10906> (дата обращения: 26.12.2022).
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. — 5-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — URL: <https://e.lanbook.com/reader/book/125741> (дата обращения: 26.12.2022).
3. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 152 с.

Дополнительная литература:

1. Власов, К.П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета: Учебное пособие / К.П. Власов. - Харьков: Гуман. Центр, 2013. - 544 с.
2. Власов, К.П. Теория автоматического управления. Основные положения .Программы расчета / К.П. Власов. - М.: Гуманитарный Центр, 2013. - 544 с.
3. Гайдук, А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления(полиномиальный подход) / А.Р. Гайдук. - М.: Физматлит, 2012. - 360 с.
4. Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. 2-е изд., испр / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев и др.. - СПб.: Лань, 2011. - 464 с.
5. Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: Учебное пособие. 3-е изд., стер / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев и др.. - СПб.: Лань, 2016. - 464 с.
6. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / А.А. Ерофеев. - СПб.: Политехника, 2008. - 302 с.
7. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. учебник и практикум для академического бакалавриата / Д.П. Ким. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 276 с.
8. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. 2-е изд., испр и доп. / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2010. - 312 с.
9. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд., испр.и доп. / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 440 с.
10. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 312 с.
11. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 440 с.
12. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев.. - СПб.: Лань, 2010. - 224 с.
13. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие. 3-е изд., пер. и доп. / Б.И. Коновалов. - СПб.: Лань, 2010. - 224 с.
14. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие. 4-е изд., стер / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. - СПб.: Лань, 2016. - 224 с.
15. Кудинов, Ю.И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB - SIMULINK): Учебное пособие / Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пашенко. - СПб.: Лань, 2016. - 256 с.
16. Ощепков, А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / А.Ю. Ощепков. - СПб.: Лань, 2013. - 208 с.
17. Подчукаев, В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы) / В.А. Подчукаев. - М.: Физматлит, 2005. - 392 с.
18. Савин, М.М. Теория автоматического управления: Учебное пособие / М.М. Савин, В.С.

- Елсуков, О.Н. Пятина; Под ред. В.И. Лачин.. - Рн/Д: Феникс, 2007. - 469 с.
19. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления. 4-е изд., пер. и доп. / Е.И. Юревич. - СПб.: ВНУ, 2016. - 560 с.
20. Теория автоматического управления. В двух частях. /Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 844 с.
21. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
22. Имаев Д.Х., Ковальски З., Яковлев В.Б., Пошехонов Л.Б., Цапко Г.П. Анализ и синтез систем управления. Санкт-Петербург, Гданьск, Сургут, Томск, 1998. – 264 с.
23. Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1973. - 527 с.
24. Яшугин Е.А. Теория линейных непрерывных систем автоматического управления в вопросах и ответах. Справочное пособие. – Минск.: Высшейшая школа, 1986. - 256 с.
25. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. - 392 с.
26. Зайцев А.П., Митаенко А.Д. Моделирование линейных систем автоматического управления. Учебно-методическое пособие. – Томск.: Изд. ТПУ, 1999. - 44 с.