

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теория автоматического управления (ТАУ) – раздел технической кибернетики – одна из важнейших технических наук, теоретическая база для исследования и проектирования любых автоматических и автоматизированных систем во всех областях науки и техники: в ТАУ формулируются принципы построения структурных схем автоматического управления (САУ), изучаются методы анализа качества статических и динамических режимов, а также вопросы аналитического выбора параметров и синтеза структуры систем на основе предъявляемых к ним требований.

Теория автоматического управления начала складываться в технике как теория автоматического регулирования в конце прошлого столетия в связи с созданием паровых, а также других машин и механизмов эпохи первой промышленной революции в Европе. Работы Дж. К. Максвелла, И. А. Вышнеградского и А. Стодолы, посвященные задачам регулирования скорости хода паровых машин и гидравлических турбин, положили начало первой фазы так называемого классического периода формирования и развития теории автоматического управления.

Трудами многих известных ученых к началу XX века теория автоматического регулирования предстала как вполне сложившаяся техническая наука. В этой науке возникло и утвердилось важнейшее определяющее понятие-понятие системы регулирования (впоследствии системы управления), состоящей из взаимодействующих между собой объекта регулирования и регулятора. Простейшие дифференциальные уравнения и алгебраические методы анализа устойчивости стали на первых порах основным средством исследования систем регулирования. С развитием техники, в частности электротехники и радиотехники, с ростом сложности объектов управления к середине 30-х годов XX века возникает необходимость в новых, более эффективных методах исследования. Такими методами становятся частотные методы исследования устойчивости, а впоследствии и качества процессов регулирования и управления в линейных системах.

Вместе с тем необходимость учета нелинейных эффектов при разработке систем автоматического регулирования заставляет исследователей искать новые пути и обращаться к глубоким математическим теориям и методам. Труды А. М. Ляпунова по общей теории устойчивости оказывают решающее влияние на дальнейшее развитие нелинейной ТАУ. В 40-х и 50-х годах методы А. М. Ляпунова прочно входят в ТАУ. В это же время распространяются и утверждаются как эффективные средства исследования автоматических систем методы теории нелинейных колебаний, а также теории вероятностей и случайных процессов.

На этом фундаменте трудами многих выдающихся отечественных и зарубежных ученых формируются новые направления этой науки. Возникают и быстро развиваются методы синтеза систем, теории релейных, импульсных и дискретных систем, теории инвариантности и другие теории, отвечающие

запросам быстро развивающейся техники и производства. ТАУ становится высокоразвитой научной дисциплиной основанной на строгих и глубоких математических методах.

В конце 50-х годов с развитием производства и сложных объектов техники, энергетики и технологии, в особенности в авиации, ракетостроении и космонавтике, возникают новые проблемы управления. Высокая степень сложности объектов управления, многомерность, неопределенность условий функционирования, возрастающие требования к качеству управления, необходимость осуществления совершенных процессов обработки информации и другие особенности управления новой техникой порождают новые идеи, новые принципы управления, требующие разработки новых теорий и методов. Особое значение имеет возникновение в это время и бурное развитие теории оптимального управления. Решающее значение и в разработках, и в реализации новых систем приобретает вычислительная техника.

В курсе ТАУ изучаются общие свойства систем автоматического управления (САУ) и математические методы их анализа и синтеза. Теоретической основой дисциплины являются курсы «Высшая математика», «Физика» и частично «Теоретические основы электротехники», а в части курсовой работы и лабораторного практикума – «Программное обеспечение персональных электронных вычислительных машин» и «Цифровое моделирование».

Структурно, в учебном плане, курс «Теория автоматического управления» состоит из двух дисциплин: «Математические основы теории автоматического управления» – шестой семестр; и непосредственно «Теория автоматического управления» – седьмой семестр.

В процессе изучения дисциплин студенты должны усвоить классические и современные принципы и способы математического описания, оценки качества работы. Анализа и синтеза САУ, а также овладеть навыками машинного, на базе ЦВМ, подхода к проектированию и расчету систем управления.

Очевидно, что в рамках учебного плана и ограниченных сроков подготовки специалиста невозможно дать в учебном курсе полное изложение современной ТАУ. Вместе с тем преподавание курса ТАУ должно отвечать современному состоянию этой научной дисциплины. Будущий специалист должен иметь твердые знания, высокую математическую культуру и практические навыки, достаточные для успешной производственной и научной деятельности.

Учебным планом предусмотрены следующий объем и структура курса:	
Всего часов.....	230
Из них аудиторных занятий.....	170
В том числе:	
лекций.....	85
практических занятий.....	34
лабораторных работ.....	51

Самостоятельная работа.....	60
В том числе:	
курсовая работа.....	40
расчетные задания.....	20

Таблица

Название раздела	Всего часов		
	Лекции	Практика	Лабораторные работы
1	2	3	4
1. Введение	2	-	-
2. Основные понятия и определения теории автоматического управления	6	-	4
3. Характеристики линейных непрерывных систем	18	6	10
4. Устойчивость и качество линейных систем	10	8	10
5. Синтез корректирующих устройств линейных систем	14	6	10
6. Заключение	3	-	-

Изучив дисциплину, студенты должны знать характеристики и передаточные функции типовых динамических звеньев САУ, уметь составить структурные схемы, передаточные функции и уравнения разомкнутых и замкнутых систем, иметь навыки анализа и синтеза систем.

По окончании изучения курса студенты сдают экзамен в 6-м семестре, зачет-в7-м семестре.

1. ПРОГРАММА КУРСА

1.1. Теоретическая часть.

1.1.1. Введение

Предмет, цели и задачи дисциплины, связь с другими курсами специальности. Исторические предпосылки развития теории автоматического управления. Вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие теории регулирования. Практическое значение и перспективы дальнейшего развития.

Указания по изучению раздела

На основе изучения литературных источников необходимо сформулировать предмет, цели и задачи настоящей дисциплины, определить

причины и временной период становления теории автоматического управления как науки, а также необходимо уяснить основные этапы формирования теории автоматического управления, перспективы и направления дальнейшего развития, а также области ее практического приложения. Студент должен знать авторов, работы которых составили исходную базу ТАУ, и уметь охарактеризовать вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие отдельных разделов настоящей дисциплины.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте предмет, цели и задачи теории автоматического управления.
2. Дайте историческую справку о применении систем автоматического управления в практической деятельности.
3. Чем обусловлена историческая необходимость создания теории автоматического управления?
4. Кто являются основоположниками теории автоматического управления?
5. Назовите отечественных и зарубежных ученых в работах которых теория автоматического управления получила существенное развитие.
6. Охарактеризуйте тенденции и технические средства дальнейшего развития теории автоматического управления.

1.1.2. Основные понятия и определения теории автоматического управления

Понятие об управлении и его принципах. Управление по разомкнутому и замкнутому циклам. Принцип обратной связи. Принцип компенсации. Основные термины и определения.

Структура автоматической системы и ее основные элементы. Объект и система управления. Состав системы управления. Классификация объектов по степени априорной информации об их свойствах. Функциональные схемы САУ. Одномерные и многомерные САУ.

Понятие оператора системы. Классификация автоматических систем по характеру ее оператора: линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные, непрерывные и дискретные, детерминированные и стохастические.

Режимы работы систем автоматического управления: стабилизация, программное движение, слежение.

Адаптивные и оптимальные системы.

Указания по изучению раздела

После изучения этого раздела студент должен сформулировать понятие автоматического управления, его отличия от неуправляемого процесса, а также от ручного и автоматизированного управления. Должен знать фундаментальные принципы управления, уяснить преимущества и недостатки управления в разомкнутой и замкнутой системах и в системе работающей по принципу компенсации, знать влияние и принцип действия обратной связи, иметь представление о статическом и астатическом регулировании.

Необходимо знать из каких функциональных элементов может состоять в общем случае система автоматического управления. Уметь изобразить ее в виде функциональной или структурной схемы, выделив на них объект управления и непосредственно систему управления. Уметь объяснить понятие переменных состояния (координат, сигналов) и параметров системы. Знать, что такое входы и выходы системы и, соответственно, входные (управляющие и возмущающие) и выходные переменные. Различать одномерные и многомерные системы.

Студент должен знать, что называют оператором системы, уметь классифицировать их по виду оператора и по режимам работы.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение и характеристику понятия – автоматическое управление.
2. Начертите функциональные схемы разомкнутой системы, системы с обратной связью и системы работающей по принципу компенсации. Дайте их сравнительный анализ.
3. Изобразите функциональную и структурную схемы замкнутой системы автоматического управления. В чем их различие? Покажите на схемах и охарактеризуйте входные, выходные, промежуточные переменные. Где на структурных схемах учитываются параметры системы?
4. Чем отличаются одномерные и многомерные системы?
5. В чем особенности статического и астатического управления?
6. Дайте классификацию систем по виду оператора. Для каких систем справедлив принцип суперпозиции? В чем его сущность?
7. Дайте классификацию систем по алгоритмам функционирования.

1.1.3. Характеристики линейных стационарных детерминированных систем

Задание оператора системы в форме дифференциального уравнения. Представление оператора в виде системы дифференциальных уравнений. Линеаризация дифференциальных уравнений. Понятие пространства состояний. Векторы состояний. Уравнения состояния. Преобразование

Лапласа, его основные теоремы. Связь преобразования Лапласа с преобразованием Фурье. Понятие передаточной функции.

Принципы задания характеристик линейных систем по их реакции на типовые сигналы. Виды типовых сигналов. Единичная импульсная функция, единичное ступенчатое воздействие, гармонический сигнал. Весовая функция, переходная функция, частотные характеристики. Способы определения и взаимосвязь различных характеристик линейной системы.

Структурное представление систем автоматического управления. Элементарные (типовые) звенья, их характеристики: передаточные, частотные функции, временные характеристики. Соединения звеньев и систем. Структурные схемы. Структурные преобразования. Передаточные функции и характеристики разомкнутых и замкнутых систем. Структурные схемы многомерных систем. Матричные передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем.

Указания по изучению раздела

При изучении данного раздела необходимо усвоить методологию математического описания отдельных элементов и систем в целом с помощью дифференциальных уравнений, на основе физических законов, согласно которым они функционируют. Уметь перейти от дифференциального уравнения высокого порядка к системе дифференциальных уравнений первого порядка и наоборот. Следует хорошо изучить процедуры линеаризации уравнений САУ согласно метода малых приращений. Необходимо уметь записать уравнения состояния системы в векторно-матричной форме, используя понятие пространства и вектора состояния.

Студент должен уметь заменить реальные физические параметры системы входящие в математическое описание обобщенными параметрами.

Требуется знать и понимать преобразования Лапласа и Фурье, их взаимосвязь. Хорошо усвоить основные правила и теоремы операционного исчисления, уметь свободно ими пользоваться, знать изображения основных элементарных функций. Нужно усвоить понятие передаточной функции на основе преобразования Лапласа и уметь формально ее записать по дифференциальным уравнениям.

Необходимо знать характеристики типовых входных воздействий и уметь формулировать на их основе понятия переходной функции, импульсной переходной функции (весовой функции) и частотной передаточной функции. Представлять определение частотной передаточной функции согласно преобразованию Фурье. Уметь формально записать выражение частотной передаточной функции по виду передаточной функции. Знать способы получения временных характеристик и представлять, как можно получить выражения весовой и переходной функций на основе правил и теорем операционного исчисления. Нужно уметь рассчитывать и строить все частотные характеристики САУ и ее элементов.

Студент должен понимать пользу структурного представления систем автоматического управления. Необходимо знать передаточные функции типовых динамических звеньев и уметь свободно получать их временные и частотные характеристики, в том числе и логарифмические. Необходимо твердо усвоить правила структурных преобразований линейных САУ любой сложности. Уметь получить передаточные функции и другие характеристики разомкнутой системы и совокупность передаточных функций замкнутой системы. Знать особенности начертания структурных схем многомерных систем, уметь записывать для них матричные передаточные функции.

Вопросы для самоконтроля

1. Составьте дифференциальные уравнения для типовых RL, RC и RLC цепей.
2. Составьте дифференциальные уравнения для операционного усилителя обвязанного типовыми RC цепями.
3. Составьте дифференциальные уравнения для двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
4. Перепишите полученные выше уравнения введя обобщенные параметры.
5. Каким образом производится линеаризация нелинейных уравнений движения? Проиллюстрируйте конкретным примером.
6. Запишите общие векторные уравнения состояния и наблюдения. Дайте расшифровку матриц A, B, C.
7. Преобразуйте дифференциальные уравнения RLC-цепи и двигателя постоянного тока независимого возбуждения к форме уравнений состояния.
8. Покажите связь между преобразованиями Лапласа и Фурье. Какие ограничения накладываются на эти преобразования?
9. Каким образом по изображениям можно определить начальное и установившееся значения переходного процесса?
10. Как получить изображение производных оригинала при известном его изображении?
11. Что такое нулевые начальные условия и способы их учета?
12. Найдите изображения для типовых входных воздействий.
13. Определите передаточную функцию для RC-цепи и получите по ней все временные и частотные характеристики.
14. Определите передаточную функцию двигателя постоянного тока, независимого возбуждения и получите из нее все временные и частотные характеристики.
15. Перечислите основные типовые динамические звенья линейных систем, запишите все их характеристики.
16. Какие звенья относятся к неминимально-фазовым?
17. Сформулируйте основные правила структурных преобразований линейных систем.

18. Как построить логарифмические частотные характеристики последовательно соединенных звеньев?

19. Запишите передаточные функции замкнутой системы: главную, по ошибке от управления, по возмущению, по ошибке от возмущения при известной передаточной функции разомкнутой системы.

1.1.4. Устойчивость и качество линейных систем

Определение устойчивости. Общее условие устойчивости. Устойчивость стационарных линейных систем. Критерии устойчивости Рауса, Гурвица, Михайлова, Найквиста в приложении к непрерывным системам.

Понятие невозмущенного, возмущенного движения и переходного процесса. Общие методы их построения. Переходная функция как стандартный переходный процесс. Способы построения переходной функции непрерывных систем в классической и современной постановках. Способы оценки динамических свойств САУ по виду переходной функции. Параметры переходной функции как оценки качества и способы их вычисления. Прямые и косвенные оценки качества. Интегральные оценки качества.

Установившиеся ошибки линейных систем. Систематические и случайные ошибки. Статические и астатические системы. Вычисление систематических ошибок. Коэффициенты ошибок. Связь коэффициентов ошибок с видом частотных характеристик разомкнутой системы.

Указания по изучению раздела

При изучении данного раздела необходимо сформулировать понятие устойчивости линеаризованных систем исходя из определения устойчивости движения по Ляпунову. Необходимо знать общее условие устойчивости, подробно разобраться с критериями устойчивости и уметь их использовать для исследования конкретных САУ. Следует ознакомиться с методами выделения областей устойчивости.

Правильно спроектированная система должна быть не только устойчивой, но и обеспечивать требуемое качество процесса в динамических режимах. Необходимо различать прямые и косвенные оценки качества, знать основные методы косвенных оценок качества, которые применяются в настоящее время: корневые, частотные и интегральные. Особое внимание следует уделить частотным методам анализа качества управления, получившим наибольшее распространение в инженерной практике. Следует хорошо ознакомиться со всеми способами построения кривых переходного процесса и уметь применять их с учетом простоты и требуемой точности.

Третья часть раздела посвящена изучению установившихся режимов работы САУ. Необходимо усвоить понятие установившегося режима на основе вынужденной составляющей процесса управления. Уметь находить значения постоянных ошибок с помощью теоремы о конечных значениях. Студент

должен уметь определять точность системы с помощью частотных характеристик, знать, что такое добротность системы, как по виду передаточной функции и частотных характеристик определить порядок астатизма. Уметь рассчитать коэффициенты ошибок и точность системы при произвольных входных воздействиях. Знать связь коэффициентов ошибок с видом частотных характеристик разомкнутой системы.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте общие условия устойчивости. Зависит ли устойчивость линейной САУ от правой части дифференциального уравнения?
2. Как выглядит необходимое условие устойчивости? Дайте его обоснование.
3. Перечислите известные критерии устойчивости, объясните их сущность и укажите области их применения.
4. Как построить области устойчивости пользуясь критерием Гурвица, критерием Михайлова?
5. Как определить запасы устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам?
6. Перечислите и поясните основные показатели качества управления в динамических режимах.
7. Что подразумевают под прямыми и косвенными оценками качества управления?
8. Что понимают под запасами устойчивости по модулю и по фазе, как они связаны с показателями качества?
9. Как оценить показатели качества корневыми методами?
10. Каким образом можно судить о качестве переходного процесса по виду вещественной частотной характеристики?
11. Перечислите и оцените основные способы построения кривых переходного процесса.
12. Перечислите основные интегральные показатели качества, сформулируйте их сущность, дайте их оценку.
13. Как определить статические характеристики системы из уравнений динамики?
14. Что такое статизм системы, как его вычислить?
15. Что такое добротность системы, как она влияет на точность?
16. Как вычислить коэффициенты ошибок по передаточным функциям САУ?
17. Как можно использовать частотные характеристики для оценки точности системы?
18. Как влияет порядок астатизма системы на значения коэффициентов ошибок? Дайте пояснения на основе теоремы о конечных значениях.

1.1.5. Синтез корректирующих устройств (регуляторов) линейных систем

Основные задачи синтеза. Средства стабилизации автоматических систем (последовательная коррекция, параллельная коррекция, неединичная обратная связь, коррекция по внешним воздействиям). Понятие инвариантности к внешнему воздействию.

Синтез корректирующих устройств методом логарифмических частотных характеристик.

Понятие об управляемости и наблюдаемости автоматических систем, их физический смысл. Постановка задачи синтеза регуляторов в пространстве состояний.

Понятие об оптимальных фильтрах, подчиненном и модальном управлении.

Указания по изучению раздела

Если при анализе САУ необходимо определить переходные процессы, то при синтезе, по заданным процессам или требованиям к ним требуется найти систему, в которой они могут быть осуществлены. Нетрудно заметить, что задача синтеза значительно сложнее и для ее успешного решения важно в полной мере владеть математическим аппаратом, основы которого изучались в предыдущих разделах. Следует подробно ознакомиться с основными методами синтеза САУ, что позволит использовать те из них, которые решают с максимальной эффективностью и минимальной затратой труда и времени поставленную задачу синтеза в каждом конкретном случае. При этом наиболее правильная с технической точки зрения постановка задачи синтеза состоит в том, что бы выбрать не просто наилучшую систему, а наилучшую из сравнительно простых систем, либо простейшую из систем, процессы в которой удовлетворяют поставленным требованиям или близки к наилучшим. Следует помнить, что часто необходимо решить задачу ограниченного синтеза -выбрать структурную схему и значения параметров части системы, когда остальная часть (обычно силовая) системы задана.

Наибольшее внимание следует обратить на частотные методы синтеза САУ, в частности базирующиеся на использовании логарифмических частотных характеристик. Необходимо детально разобраться с понятием оптимальных фильтров и принципом подчиненного и модального управления, ознакомиться с понятиями управляемости и наблюдаемости, представлять процедуру синтеза регуляторов в пространстве состояний.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие возможны способы коррекции систем автоматического управления?

2. Укажите особенности применения средств последовательной и параллельной коррекции.
3. Как влияют на качество регулирования дифференцирующие и интегрирующие звенья?
4. Чем определяется выбор коэффициента усиления системы?
5. Что такое жесткая и гибкая обратная связь, их влияние на характеристики звена?
6. Что такое изотропное регулирование?
7. Какие системы называют инвариантными? Покажите принципиальную возможность их реализации с помощью коррекции по внешним воздействиям и неединичной обратной связи.
8. Как построить желаемую логарифмическую амплитудную частотную характеристику? Как с ее помощью получить ЛАЧХ последовательного корректирующего звена?
9. В чем сущность настройки системы на модульный оптимум, на симметричный оптимум?
10. В чем сущность подчиненного регулирования переменных?
11. В чем сущность модального управления?
12. Дайте определение понятий наблюдаемости и управляемости системы.

1.2. Практические занятия

Целью практических занятий является активное изучение математических методов теории управления и приобретение навыков самостоятельного их применения для анализа и синтеза систем автоматического управления. Тематика практических занятий следующая:

1. Составление математического описания некоторых типичных элементов систем автоматического управления.
2. Линеаризация дифференциальных уравнений САУ на основе метода малых приращений.
3. Типовые динамические звенья, их передаточные функции, временные и частотные характеристики.
4. Структурные схемы САУ, структурные преобразования, передаточные функции и частотные характеристики замкнутых систем.
5. ЛАЧХ и ЛФЧХ последовательно соединенных звеньев.
6. Устойчивость САУ. Анализ, построение областей устойчивости различными методами.
7. Построение переходных характеристик, анализ качества прямыми и косвенными методами.
8. Точность систем в установившемся режиме. Расчет установившейся ошибки САУ.
9. Синтез последовательного корректирующего устройства частотным методом.

10. Синтез параллельного корректирующего устройства методом модального управления.

11. Расчет передаточных функций разомкнутой $W(z)$ и замкнутой $\Phi(z)$ импульсной системы.

12. Построение логарифмических амплитудной и фазовой частотной характеристик импульсной системы.

13. Анализ и построение областей устойчивости импульсной системы различными методами.

14. Расчет устойчивости, амплитуды и частоты автоколебаний в нелинейной системе.

15. Расчет среднеквадратичной ошибки выходного сигнала линейной системы при известном случайном входном сигнале.

1.3. Лабораторный практикум

Целью лабораторного практикума является закрепление основных положений теории и развития навыков самостоятельного исследования элементов и систем автоматического управления. Для выполнения предлагается следующий перечень лабораторных работ:

1. Исследование типовых звеньев и определение их параметров по временным характеристикам.

2. Исследование частотных характеристик типовых звеньев и определение их параметров.

3. Анализ устойчивости и качества переходных процессов линейных систем автоматического управления.

4. Исследование установившихся ошибок линейных стационарных систем.

5. Синтез последовательных корректирующих устройств линейных САУ.

1.4. Курсовая работа

Курсовая работа закрепляет знания основных положений классической теории автоматического управления в приложении к задачам электропривода.

Исходные данные задаются в виде структурной схемы объекта управления и требований к качеству работы автоматической системы. Объект управления соответствует реальной системе подчиненного регулирования промышленного электропривода.

Студенты выполняют синтез последовательного корректирующего устройства частотным методом, анализ устойчивости, исследование качества по реакции на линейно изменяющийся управляющий и ступенчатый возмущающий сигналы, вычисление установившихся систематических ошибок и ошибок при наличии синусоидальных помех на входе. В заключение рассматривают техническую реализацию корректирующего устройства в виде схемы аналогового активного фильтра (четыреполюсника) и программы работы цифрового фильтра.

2. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

2.1. Общие указания

Учебным планом по курсу “Непрерывные системы управления” студентами заочной формы обучения предусмотрено выполнение трех контрольных работ. Каждую из работ следует выполнять в отдельной тетради с указанием на обложке названия дисциплины, номера контрольной работы, шифра специальности, номера зачетной книжки, фамилии, имени, отчества студента. Здесь же, при необходимости, указываются почтовый адрес и другие сведения о студенте.

Формулы, используемые при расчетах, сначала записывают в буквенных обозначениях, затем в формулу подставляют числа в том же порядке, что и соответствующие буквы. После этого записывают результат. Промежуточные выкладки не приводят. Однотипные расчеты на основе одинаковых формул приводят один раз, а остальные результаты сводят в таблицу. Графики и рисунки могут быть выполнены карандашом на миллиметровой бумаге.

Работы должны быть аккуратно оформлены с пояснением всех принятых обозначений и указанием ссылок на литературу.

2.2. Контрольная работа №1

Расчет передаточной функции пассивной электрической цепи.

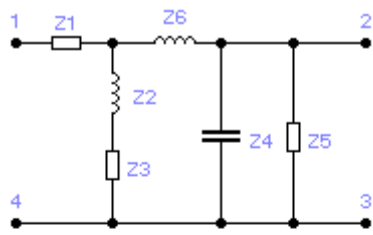
Для заданной пассивной цепи:

1. Рассчитать передаточную функцию $W(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)}$ пассивной цепи.
2. Построить ЛЧХ цепи.
3. Построить АФХ цепи.

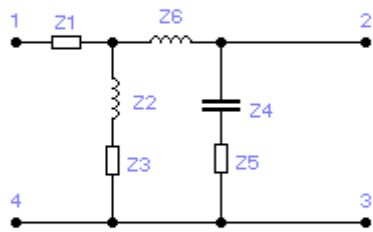
Таблица номиналов

	1	2	3	4	5
R(кОм)	1	3	10	30	100
C(нФ)	10	3	1	0,3	0,1
L(Гн)	1	0,3	0,1	0,03	0,01

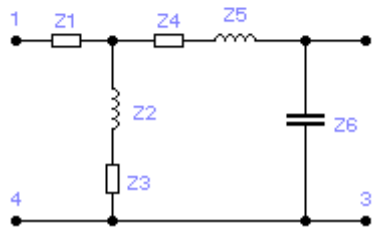
1.



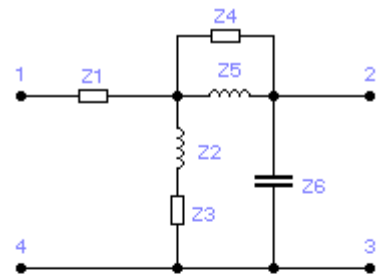
2.



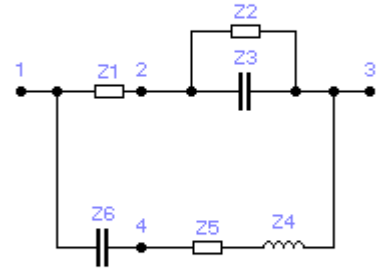
3.



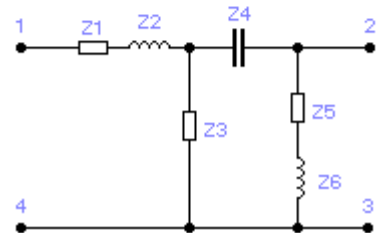
4.



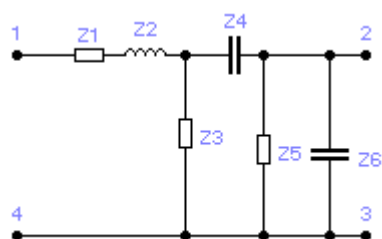
5.



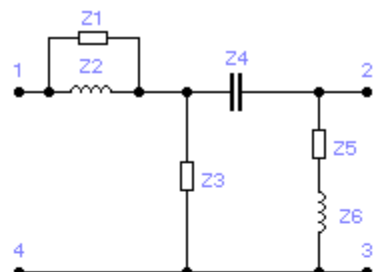
6.



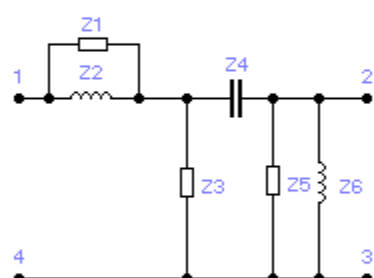
7.



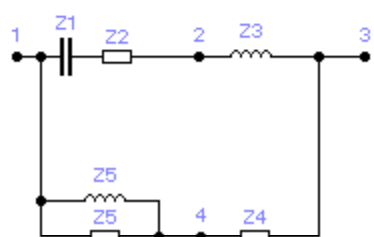
8.



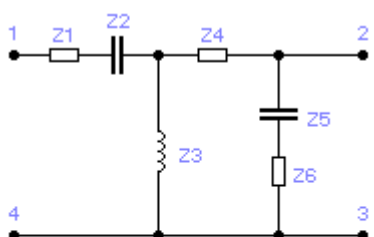
9.



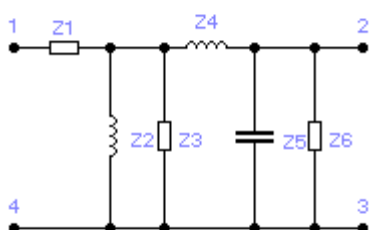
10.



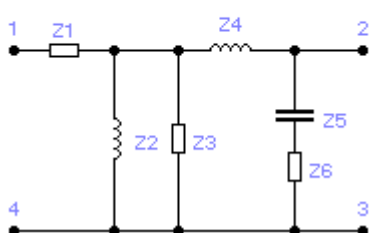
11.



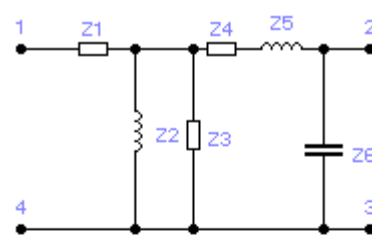
12.



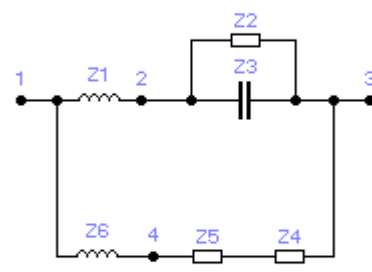
13.



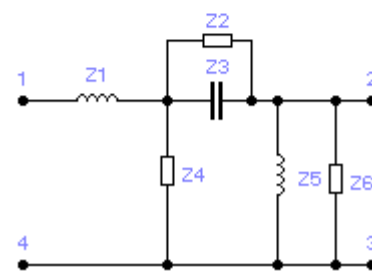
14.



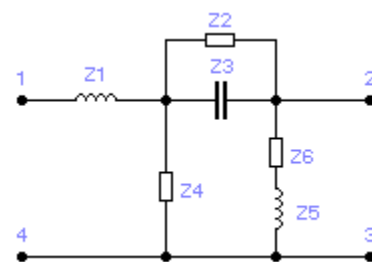
15.



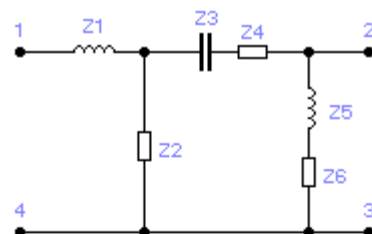
16.



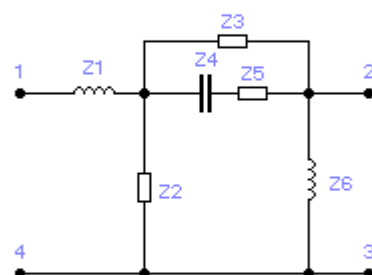
17.



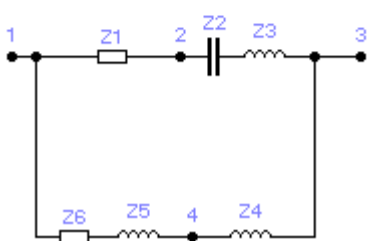
18.



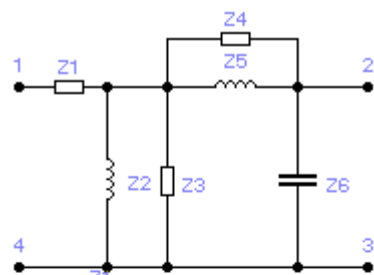
19.



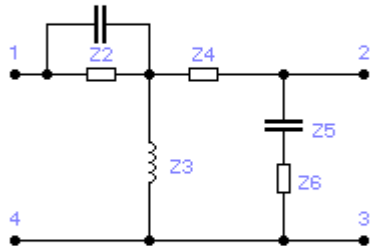
20.



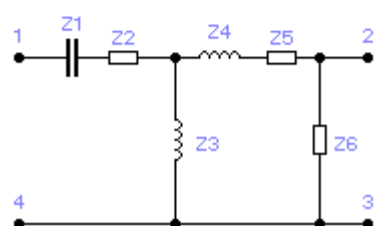
21.



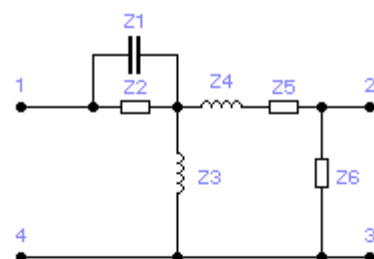
22.



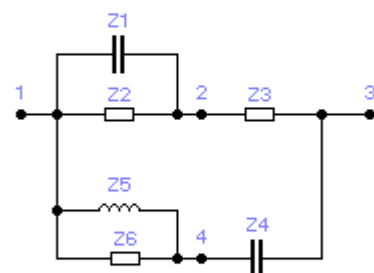
23.



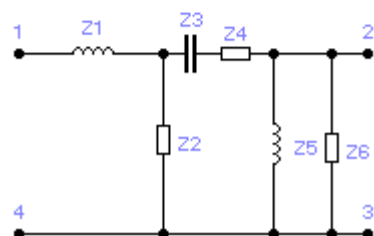
24.



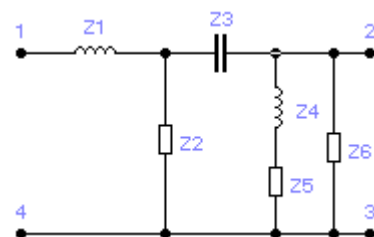
25.



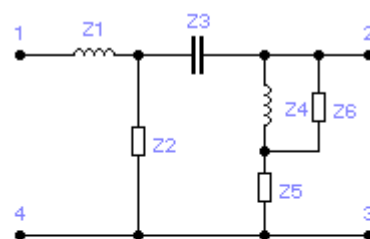
26.



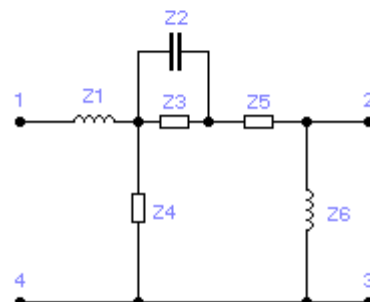
27.



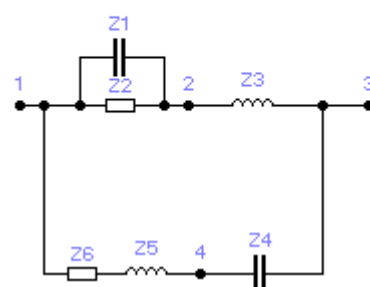
28.



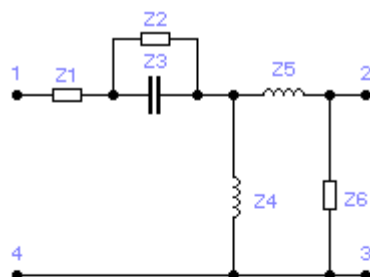
29.



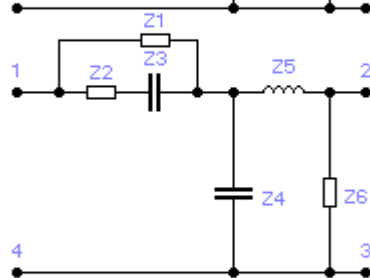
30.



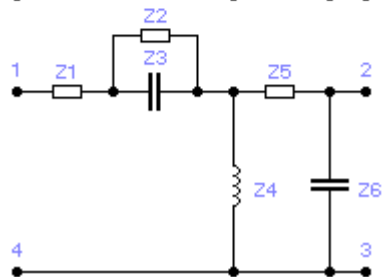
31.



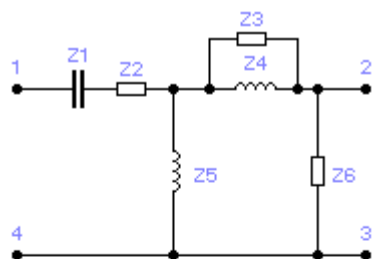
32.



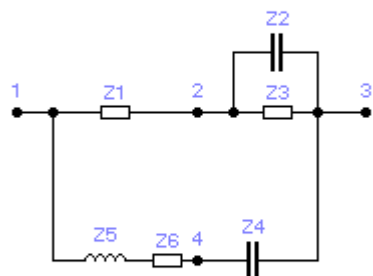
33.



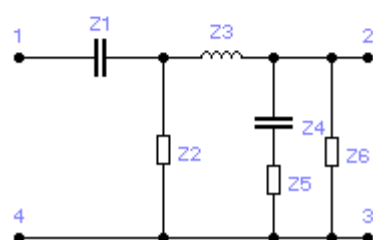
34.



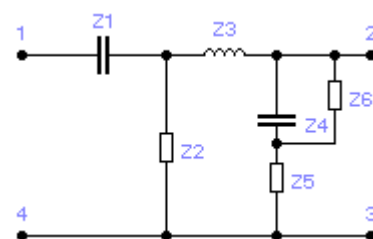
35.



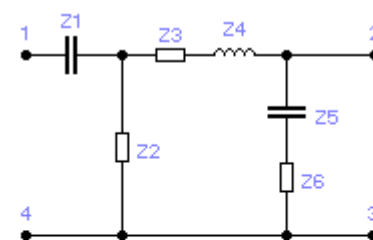
36.



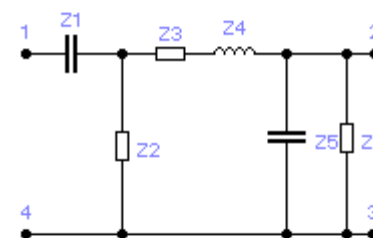
37.



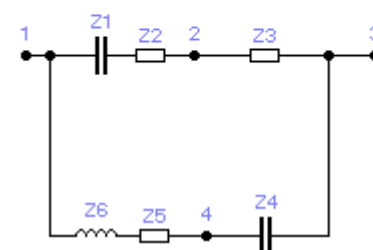
38.



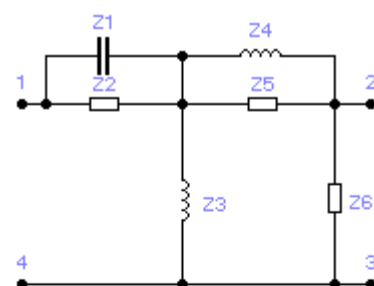
39.



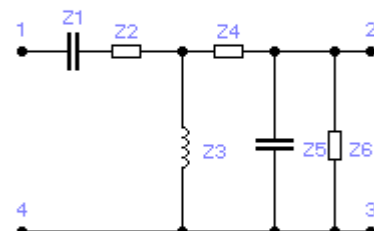
40.



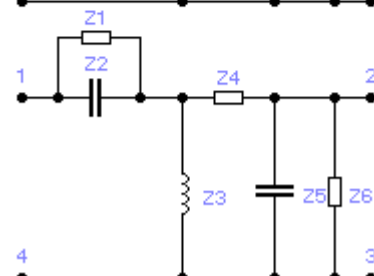
41.



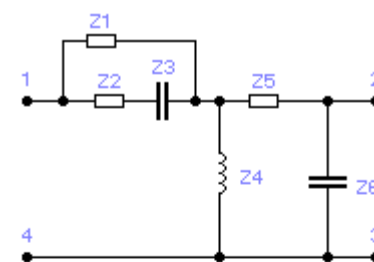
42.



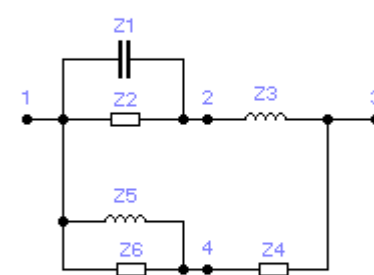
43.



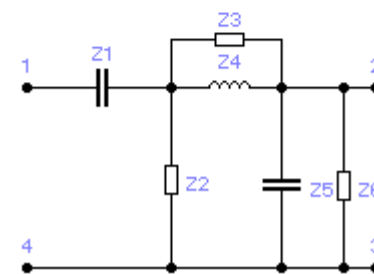
44.



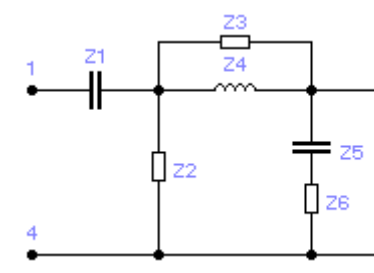
45.



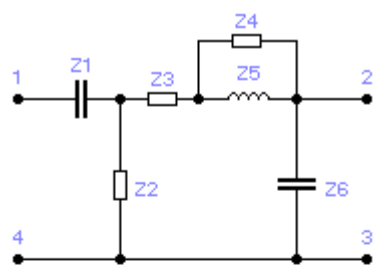
46.



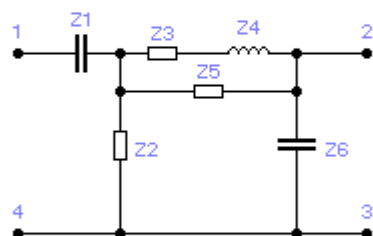
47.



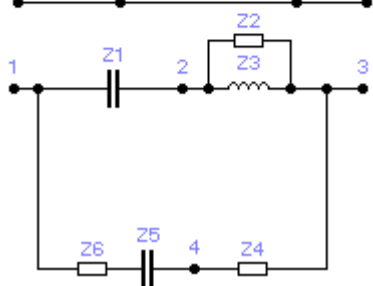
48.



49.



50.



2.3. Контрольная работа №2

Синтез последовательного корректирующего устройства.

1. Построить ЛЧХ некорректированной САР и определить запасы устойчивости;
2. По заданным показателям качества $[\gamma, \omega_c]$ произвести расчет желаемой ЛАХ;
3. Определить ЛАХ и ПФ последовательного корректирующего устройства;
4. Рассчитать ошибку (установившуюся), с которой система воспроизводит выходной сигнал $g(t)$.

$$W(p) = \frac{K(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{p^v (T_3^2 p^2 + 2\xi_3 T_3 p + 1)(a T_4^2 p^2 + 2\xi_4 T_4 p + 1)}$$

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆		Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆
1.	2	1	1	4	5	2	26.	3	3	1	2	4	5
2.	2	2	1	5	3	3	27.	1	2	1	4	1	3
3.	3	1	1	2	3	5	28.	1	4	1	2	2	5
4.	2	1	1	5	2	4	29.	3	1	4	3	2	1
5.	1	4	4	4	2	1	30.	3	4	2	1	3	1
6.	2	2	4	2	1	4	31.	1	5	2	2	4	4
7.	2	2	5	5	4	5	32.	3	1	3	1	5	4
8.	5	1	3	2	4	4	33.	2	4	5	3	3	1
9.	5	3	4	1	3	5	34.	3	5	3	1	3	2
10.	2	1	2	2	1	3	35.	3	1	1	1	2	1
11.	2	2	2	3	4	1	36.	1	4	3	3	2	5
12.	3	1	2	3	5	5	37.	1	2	4	4	3	4
13.	5	1	4	3	5	5	38.	5	3	3	1	3	1
14.	4	1	5	3	3	1	39.	3	4	3	3	1	5
15.	1	4	3	3	5	2	40.	2	3	1	4	2	2
16.	5	5	1	4	3	3	41.	1	5	1	5	2	3
17.	2	4	2	3	1	4	42.	1	3	3	2	3	4
18.	4	4	2	3	5	3	43.	4	1	3	3	5	2
19.	3	3	4	1	2	5	44.	4	2	1	1	3	5
20.	2	1	1	2	1	3	45.	2	3	2	3	4	5
21.	5	4	3	4	5	2	46.	4	4	3	4	2	5
22.	3	4	5	5	1	3	47.	2	1	3	2	4	2
23.	1	4	3	5	2	1	48.	3	2	1	3	3	1
24.	5	2	4	2	3	2	49.	4	1	2	4	4	2
25.	2	3	1	3	2	3	50.	1	4	3	5	5	3

вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K	400	400	-250	$6,3 \cdot 10^2$	-160	40	-630	$4 \cdot 10^3$	-250
n	0	1	0	0	0	2	0	1	0
T ₁	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0
x ₁	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0
T ₂	3,2	0,25	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0	2	0,04	$2,5 \cdot 10^{-3}$
T ₃	25	0,1	$5 \cdot 10^{-4}$	5	0,05	0,1	1	$6,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
x ₃	0,2	0,125	1,25	0,2	0,05	0,5	1,87	1,4	1,03
a	1	0	-1	1	-1	0	-1	0	-1
T ₄	8	0,02	$2 \cdot 10^{-3}$	2	0,13	0	1,3	10^{-3}	10^{-2}
x ₄	1,03	1	1,25	0,1	0,46	0	1,4	0,5	1,05
S	2	2	3	3	2	3	2	2	2
g	55	20	35	20	40	40	25	30	35
w _c	0,4	25	$6,3 \cdot 10^3$	10	100	3,16	6,3	1600	200
g(t)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
K	250	10^3	400	-400	400	-100	400	100	10^4
n	0	0	0	0	1	0	0	0	2
T ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	$1,6 \cdot 10^{-2}$
x ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	1,03
T ₂	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,63	0,25	0,1	0,13	$6,3 \cdot 10^{-2}$	0,04	0
T ₃	$4 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	2	0,63	0,025	0,05	0,02	0,13	$6,3 \cdot 10^{-3}$
x ₃	1,03	1,11	1,11	1,11	1,11	0,3	1,25	-0,1	0,2
a	1	-1	1	-1	0	-1	1	1	0
T ₄	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,8	2	0,16	0,25	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0
x ₄	0,05	1	1,25	0,23	0,5	0,48	1,11	1,25	0
S	3	3	2	2	3	2	2	2	3
g	30	40	20	35	40	45	40	30	60
w _c	1600	250	200	2,5	25	63	160	16	80
g(t)	10	1	2	3	4	5	6	7	8
вариант	19	20	21	22	23	24	25	26	27
K	-160	10^3	-630	100	-400	100	-630	10^5	630
n	0	1	0	0	0	0	0	1	0
T ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂	0,1	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,63	0,04	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
T ₃	0,05	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,8	0,13	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$
x ₃	0,3	0,2	1,4	1,4	1,25	0,05	1,11	1,11	-0,2
a	-1	0	-1	1	-1	1	-1	0	1
T ₄	0,16	0,04	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	2	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
x ₄	0	0,5	0	1,11	0,47	1,25	1,8	1	1,4
S	3	2	2	2	2	3	3	2	3
g	35	50	25	50	20	40	55	60	35
w _c	100	630	250	$2,4 \cdot 10^4$	20	16	1000	2000	250
g(t)	9	10	1	2	3	4	5	6	7

вариант	28	29	30	31	32	33	34		
K	63	-250	$6,3 \cdot 10^5$	-630	10^4	160	1000		
n	0	0	2	0	1	0	0		
T ₁	0	0	10^{-3}	0	0	0	0		
x ₁	0	0	0,25	0	0	0	0		
T ₂	0,4	$8 \cdot 10^{-3}$	0	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0,1	0,02		
T ₃	0,2	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,01		
x ₃	1,11	1,25	1,11	0,2	0,32	-0,1	0,05		
a	1	-1	0	-1	0	1	1		
T ₄	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	0	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,05	$2,5 \cdot 10^{-3}$		
x ₄	1,4	0,28	0	0,98	1	0,6	1,25		
S	2	3	1	3	3	2	3		
g	60	35	35	40	25	45	25		
w _c	100	100	5000	250	250	100	4000		
g(t)	8	9	10	1	2	3	4		
вариант	35	36	37	38	39	40	41	42	43
K	-100	400	-100	4000	-160	630	1000	0,1	-250
n	0	0	0	1	0	0	0	2	0
T ₁	0	0	0	0	0	0	0	8	0
x ₁	0	0	0	0	0	0	0	1,74	0
T ₂	0,04	0,25	0,13	0,013	0,32	0,16	0,016	0	$2,5 \cdot 10^{-3}$
T ₃	0,032	2	0,05	0,063	0,8	0,13	0,032	63	0,01
x ₃	1,25	1,03	0,5	1,11	1,25	1,25	-0,2	0,3	1,03
a	-1	1	-1	0	-1	1	1	0	-1
T ₄	0,13	0,63	0,25	0,1	1,6	0,032	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0	0,01
x ₄	0	1,11	-0,48	0,5	0,47	1,03	1,11	0	-1,05
S	3	3	3	3	3	2	2	2	3
g	50	25	25	35	25	35	60	55	55
w _c	16	2,5	63	250	2	630	250	1	200
g(t)	5	6	7	8	9	10	1	2	3
вариант	44	45	46	47	48	49	50	51	52
K	2500	-400	250	-160	250	-250	630	160	630
n	1	0	0	0	0	0	1	0	1
T ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂	0,04	0,01	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,032	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0,32	0,01
T ₃	0,16	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0,05	0,01	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,8	0,063
x ₃	1,4	1,74	1,4	0,1	1,03	1,25	1,03	1,25	0,1
a	0	-1	1	-1	1	-1	0	1	0
T ₄	0,13	0,016	$5 \cdot 10^{-4}$	0,13	0,01	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1,6	0,05
x ₄	1	0,75	1,25	-0,46	1,4	-0,23	1	1,11	1
S	2	3	3	3	3	2	3	2	3
g	45	20	45	20	45	60	55	35	20
w _c	316	10^3	6300	100	200	6300	400	2	10
g(t)	4	5	6	7	8	9	10	1	2

вариант	53	54	55	56	57	58	59	60	61
K	-630	400	63	16	-250	1600	-250	100	400
n	0	0	0	2	0	1	0	0	0
T ₁	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0
x ₁	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0
T ₂	10	0,01	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0	$8 \cdot 10^{-3}$	0,025	0,5	0,08	3,2
T ₃	2	$6,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	1	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,063	0,13	0,032	25
x ₃	0,05	1,74	-0,5	1,03	0,2	0,2	1,11	2,13	-0,2
a	-1	1	1	0	-1	0	-1	1	1
T ₄	5	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0	$4 \cdot 10^{-3}$	0,02	1,3	0,02	8
x ₄	0	1,03	0,1	0	-0,22	1	0,62	0,316	1,03
S	3	2	2	3	3	2	2	3	2
g	60	55	55	30	40	30	30	20	45
w _c	10	1000	5000	3,16	1600	130	25	250	0,4
g(t)	3	4	5	6	7	8	9	10	1
вариант	62	63	64	65	66	67	68		
K	63	100	160	-400	160	-160	4000		
n	0	0	1	0	0	0	2		
T ₁	0	0	0	0	0	0	$3,2 \cdot 10^{-2}$		
x ₁	0	0	0	0	0	0	0,5		
T ₂	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,08	0,4	0,063	0,0063	0,0063	0		
T ₃	10^{-3}	0,032	0,25	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0,04		
x ₃	0,6	2,13	1,4	1,11	1,4	0,4	1,25		
a	1	1	0	-1	1	-1	0		
T ₄	$5 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,04	0,02	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	0		
x ₄	0,1	-0,3	0,5	0,75	0,2	-1,1	0		
S	3	2	3	2	2	2	2		
g	20	30	40	30	30	20	50		
w _c	5000	250	20	160	800	800	100		
g(t)	2	3	4	5	6	7	8		
вариант	69	70	71	72	73	74	75	76	77
K	-100	1600	-630	250	-103	250	-100	630	-630
n	0	1	0	0	0	0	0	1	0
T ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂	0,4	0,01	0,16	0,5	0,02	$8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,032	0,16
T ₃	0,063	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,032	1,3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,032	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,032	0,032
x ₃	1,4	2,13	1,03	1,11	1,25	1,03	1	1,74	1,03
a	-1	0	-1	1	-1	1	-1	0	-1
T ₄	0,2	0,013	0,13	0,13	0,01	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,08	0,13
x ₄	0,48	1	-1,4	1,03	0	1,25	1,11	0,5	1,4
S	3	2	2	3	2	3	3	3	3
g	40	50	45	40	45	55	40	60	25
w _c	160	800	630	25	4000	100	$2,5 \cdot 10^4$	100	630
g(t)	9	10	1	2	3	4	5	6	7

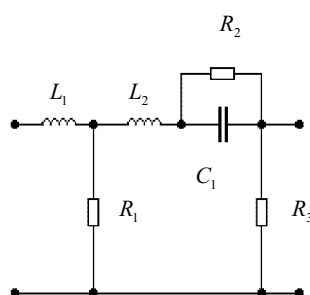
вариант	78	79	80	81	82	83	84	85	86
K	400	1000	$6,3 \cdot 10^4$	-160	100	-400	630	-250	630
n	0	0	2	0	1	0	0	0	0
T ₁	0	0	0,02	0	0	0	0	0	0
x ₁	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0
T ₂	$4 \cdot 10^{-4}$	0,02	0	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,063	2	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
T ₃	$5 \cdot 10^{-4}$	0,01	$8 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0,13	$6,3 \cdot 10^{-3}$	1	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,01
x ₃	1,25	-0,1	1,03	0,2	1,11	1,4	2,13	0,05	1,11
a	1	1	0	-1	0	-1	1	-1	1
T ₄	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0	$5 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,02	1,3	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
x ₄	1,74	1,25	0	1,1	0,5	-0,75	1,4	0,23	1,4
S	2	3	3	3	2	3	3	3	3
g	50	55	25	40	25	50	60	35	30
w _c	$2 \cdot 10^4$	4000	63	800	50	160	6,3	1600	1000
g(t)	8	9	10	1	2	3	4	5	6
вариант	87	88	89	90	91	92	93	94	95
K	-400	400	-100	1000	250	$2,5 \cdot 10^5$	-400	4000	-250
n	0	1	0	0	0	2	0	1	0
T ₁	0	0	0	0	0	0,063	0	0	0
x ₁	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0
T ₂	3,2	0,1	0,08	0,016	0,5	0	$4 \cdot 10^{-4}$	0,01	$8 \cdot 10^{-3}$
T ₃	8	0,016	0,032	0,032	0,13	0,032	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
x ₃	1,03	0,05	2,13	0,15	1,11	0,5	1,74	1,4	0,1
a	-1	0	-1	1	-1	0	-1	0	-1
T ₄	25	0,13	0,02	$6,3 \cdot 10^{-3}$	1,3	0	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
x ₄	0	1	0	1,11	-0,62	0	0,75	0,5	0,22
S	3	3	3	3	3	2	3	2	2
g	20	35	35	25	60	60	60	45	20
w _c	0,4	31,6	250	250	25	250	$2 \cdot 10^4$	1600	1600
g(t)	7	8	9	10	1	2	3	4	5
вариант	96	97	98	99	100	101	102		
K	100	-63	160	630	1600	630	160		
n	0	0	0	0	1	0	0		
T ₁	0	0	0	0	0	0	0		
x ₁	0	0	0	0	0	0	0		
T ₂	0,13	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	10	0,01	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,1		
T ₃	0,25	$5 \cdot 10^{-4}$	0,05	5	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,16		
x ₃	1,11	0,3	0,05	-0,1	1,11	0,3	0,2		
a	1	-1	1	1	0	1	1		
T ₄	0,05	10^{-3}	0,13	2	0,04	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,05		
x ₄	0,1	0	1,11	0,2	0,5	1,4	0,5		
S	2	3	2	2	3	2	2		
g	35	30	30	40	55	60	45		
w _c	63	5000	100	10	400	250	100		
g(t)	6	7	8	9	10	1	2		

$g_1(t)$	$g_2(t)$	$g_3(t)$	$g_4(t)$	$g_5(t)$
$0,5 \cdot 1(t)$	$3t$	$0,1 \cdot \sin 10 \cdot \omega_{cp}(t)$	$2 \cdot 1(t)$	$6 \cdot \sin 30 \cdot \omega_{cp}(t)$

$g_6(t)$	$g_7(t)$	$g_8(t)$	$g_9(t)$	$g_{10}(t)$
$5t$	$10 \cdot 1(t)$	$0,2t$	$3 \cdot \cos 0,5 \cdot \omega_{cp}(t)$	$0,2 \cdot \sin 0,1 \cdot \omega_{cp}(t)$

Пример №1

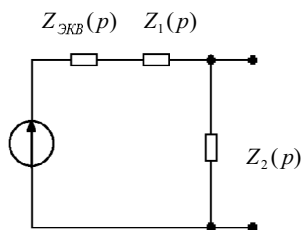
Дано: $L_1=10^{-1}[\Gamma\text{H}]$
 $L_2=10^{-2}[\Gamma\text{H}]$
 $R_1=3 \cdot 10^3[\text{OM}]$
 $R_2=3 \cdot 10^4[\text{OM}]$
 $R_3=10^3[\text{OM}]$
 $C_1=10^{-10}[\Phi]$



Разбиваем схему на два звена. Находим передаточную функцию $W_1(p)$ и передаточную функцию второго звена $W_2(p)$ с учетом внутреннего сопротивления первого звена методом эквивалентного генератора.

$$Z_{\text{экв}}(p) = \frac{L_1 R_1 p}{L_1 p + R_1}; \quad Z_1(p) = \frac{R_2 \frac{1}{C_1 p}}{R_2 + \frac{1}{C_1 p}} + L_2 p = \frac{R_2 + (R_2 C_1 p + 1) L_2 p}{R_2 + \frac{1}{C_1 p}};$$

$$Z_2(p) = R_3;$$



$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2'(p);$$

$$W_1(p) = \frac{R_1}{L_1 p + R_1}; \quad W_2'(p) = \frac{Z_2(p)}{Z_{\text{экв}}(p) + Z_1(p) + Z_2(p)};$$

$$W(p) = \frac{R_1 R_3 (L_1 p + R_1) (R_2 C_1 p + 1)}{(L_1 p + R_1) [L_1 R_2 p + (L_1 L_2 + R_1 R_2 C_1 L_2 + L_1 R_1 R_2 C_1 + R_3 R_2 C_1 L_1) p^2 + (L_1 R_2 + R_1 L_2 + L_1 R_1 + R_3 R_1 R_2 C_1 + R_3 L_1) p + R_1 R_2 + R_1 R_3]} =$$

$$= \frac{R_1 R_3 (R_2 C_1 p + 1)}{L_1 R_2 C_1 L_2 p^3 + (L_1 L_2 + R_1 R_2 C_1 L_2 + L_1 R_1 R_2 C_1 + R_3 R_2 C_1 L_1) p^2 + (L_1 R_2 + R_1 L_2 + L_1 R_1 + R_3 R_1 R_2 C_1 + R_3 L_1) p + R_1 R_2 + R_1 R_3} =$$

В полученные выражения подставим численные значения

$$W(p) = \frac{0.03(3 \cdot 10^6 p + 1)}{0.03 \cdot 10^{15} p^3 + 2.46 \cdot 10^{11} p^2 + 0.37 \cdot 10^4 p + 1}$$

Представим ПФ в виде произведения типовых звеньев.

Для этого найдем ее полюса по методу Лина [1]. Используя подстановку $p = S \cdot 10^5$, знаменатель преобразуем к виду:

$$G(s) = 0.03 \cdot S^3 + 0.025 S^2 + 3.7 \cdot S + 1 = (rs + 1)(b_0 S^2 + b_1 S + 1)$$

Используя итерационные формулы, расчеты сведем в таблицу:

i	$r_i = 3,7 - b_{1,i-1}$	$b_{ci} = 0,03/r_i$	$p_i = 0,25 - b_{0i}$	$b_{ii} = p_i/r_i$
1	3,7	0,008	0,24	0,065
2	3,65	0,008	0,24	0,065

$$G(s) = (3,63S + 1)(0,008S^2 + 0,065S + 1)$$

$$W(p) = \frac{0,03(3 \cdot 10^6 p + 1)}{(3,63 \cdot 10^3 p + 1)(0,008 \cdot 10^{10} p^2 + 0,065 \cdot 10^5 p + 1)}$$

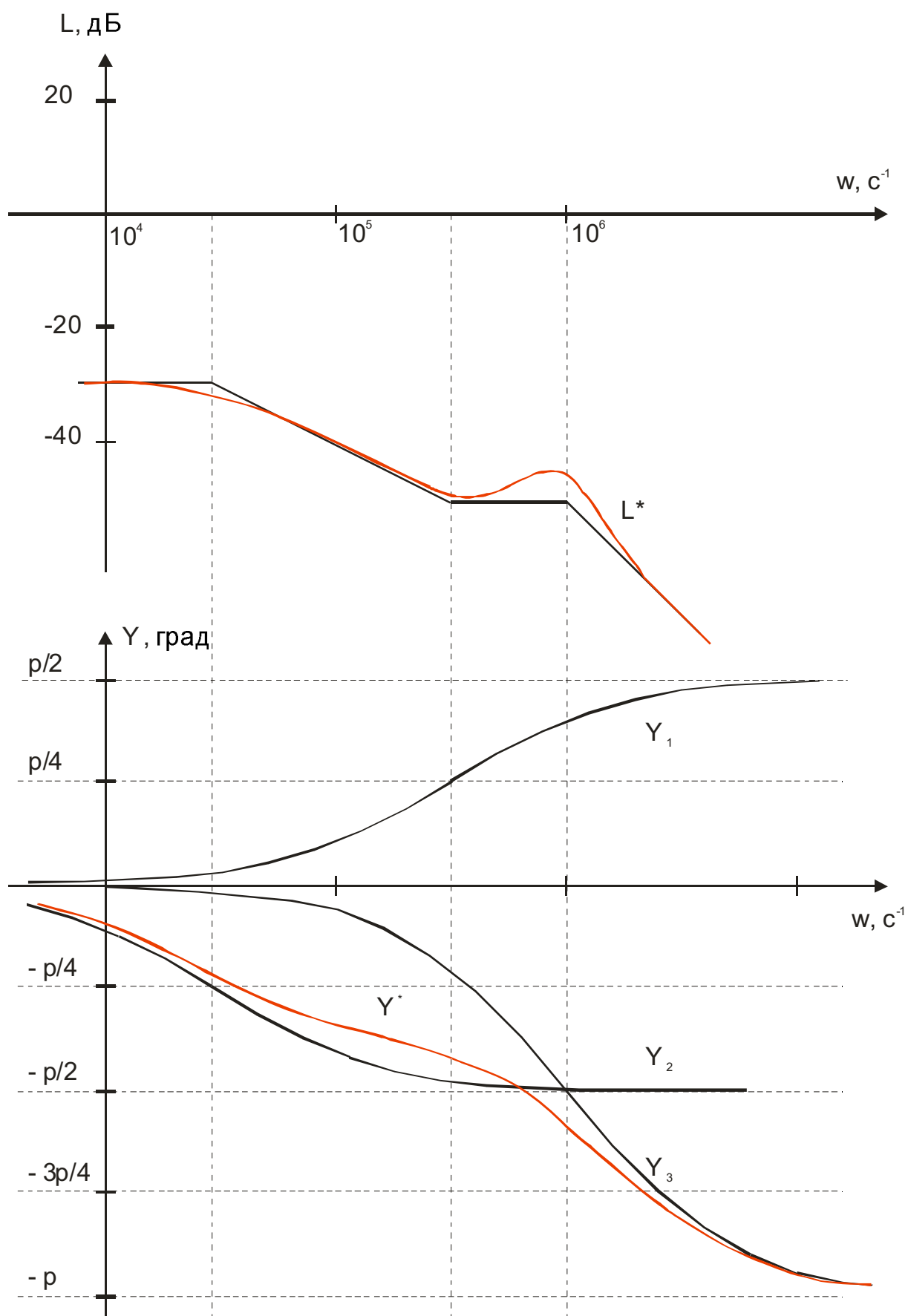
Эту ПФ можно представить в виде: $W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3^2 p^2 + 2\xi T T_3 p + 1)}$;

где $K=0,03$; $T_1=3 \cdot 10^{-6}$; $T_2=3,63 \cdot 10^{-5}$; $T_3=0,09 \cdot 10^{-5}$; $\xi=0,36$

Определяем сопрягающие частоты

$\omega_1=0,33 \cdot 10^6$; $\omega_2=0,27 \cdot 10^5$; $\omega_3=11,11 \cdot 10^5$;

По полученным данным построим амплитудную и фазовую ЛЧХ.



Пример №2

Дано: $W(p) = \frac{K(T_5 p + 1)}{p(T_6 p + 1)^2 (T_3 p + 1)}$; $S = -2$; $\omega_c = 200 \text{ с}^{-1}$; $K = 2500$; $T_6 = 0,05 \text{ с}^{-1}$;
 $T_5 = 0,001 \text{ с}^{-1}$; $T_3 = 0,01$; $g(t) = 0,2t$; $v = -1$; $\gamma = 20^\circ$

1. Строим ЛАХ нескорректированной системы

$$W(p) = \frac{2500(0,001p + 1)}{p(0,05p + 1)^2 (0,01p + 1)}$$

$$20 \lg K = 20 \lg 2500 = 67,95 \quad \omega_6 = 1/T_6 = 20 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_5 = 1/T_5 = 1000 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_3 = 1/T_3 = 100 \text{ с}^{-1};$$

Нескорректированная система не имеет запаса устойчивости по фазе и амплитуде.

2. Синтезируем желаемую ЛЧХ согласно исходных данных, используя литературу [2] (См. Пример №1). Для данного типа ЖЛАХ определяем сопрягающие частоты ω_4 и ω_2 .

$$a = \frac{\pi}{2} - \Delta\gamma(\omega_c) = \frac{3,14}{2} - 0,35 = 1,22;$$

$$\omega_4 = \frac{a}{2(S-1)} \omega_c = \frac{1,22 * 200}{2} = 122;$$

$$\frac{1}{T_2 + T_5} = \frac{2\omega_c}{a} = \frac{2 * 200}{1,22} = 327,87; \quad \omega_2 = \frac{1}{0,003 - 0,001} = 500;$$

Строим ЖЛАХ.

3. Строим ЛЧХ корректирующего устройства:

$$L_k = L_{\text{ж}} - L_{\text{н}}; \quad \Psi_k = \Psi_{\text{ж}} - \Psi_{\text{н}};$$

ПФ корректирующего устройства:

$$W_k(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_5 p + 1)^2};$$

ПФ ЖЛАХ:

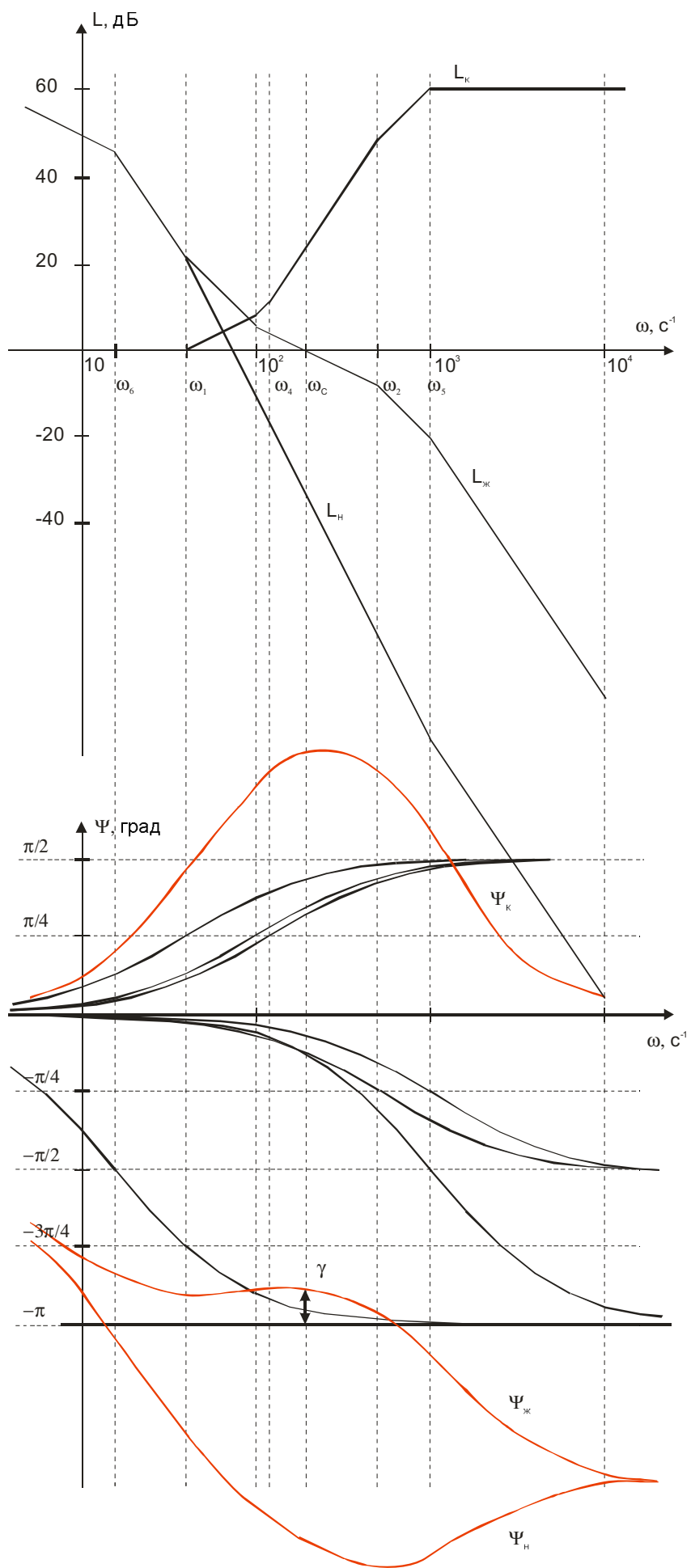
$$W_{\text{жк}}(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_4 p + 1)K}{p(T_6 p + 1)^2 (T_2 p + 1)(T_5 p + 1)};$$

4. Ошибка от задающего воздействия:

$$\xi_{\text{густ}} = \lim_{p \rightarrow 0} p \Phi_{\xi g}(p) * g(p);$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{\xi g}(p) &= \frac{1}{1+W_{\text{жс}}(p)} = \frac{1}{1+\frac{K(T_4p+1)(T_1p+1)}{p(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)}} = \\
&= \frac{p(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)}{p(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)+K(T_4p+1)(T_1p+1)}; \\
g(p) &= \frac{0,2}{p^2};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\xi_{\text{gycm}} &= \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{p(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)}{p(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)+K(T_4p+1)(T_1p+1)} * \frac{0,2}{p^2} = \\
&= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{0,2(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)}{p(T_6p+1)^2(T_5p+1)(T_2p+1)+K(T_4p+1)(T_1p+1)} = \\
&= \frac{0,2}{2500} = 0,00008
\end{aligned}$$



2.4. Контрольная работа №3

Методика синтеза параллельных КУ (местных обратных связей)

1. Выбрать физически реализуемую охваченную часть:

$$W_2(p) = \frac{100(0,001p + 1)}{p(0,05p + 1)}$$

2. ПФ неохваченной части: $W_1(p) = \frac{25}{(0,05p + 1)(0,01p + 1)}$

3. ПФ обратной связи $W_{нк}(p)$ находим из выражения:

$$W_{нк}(p) = \frac{W_1}{W_{жс}}$$

при выполнении условия(*): $|W_{нк}(j\omega)W_2(j\omega)| \gg 1$ в диапазоне частот до $10\omega_c$

Строим ЛАХ $L_1(\omega) = 20\lg |W_1(j\omega)|$, $L_{жс}(\omega)$, $L_{нк}(\omega) = L_1(\omega) - L_{жс}(\omega)$

По ЛАХ $L_{нк}(\omega)$ записываем ПФ звена обратной связи:

$$W_{нк}(p) = \frac{k_{нк}p(T_2p + 1)(T_5p + 1)(T_6p + 1)}{(T_1p + 1)(T_3p + 1)(T_4p + 1)(T_дp + 1)}; T_д = 2,5 \cdot 10^{-3} c$$

Если степень числителя больше степени знаменателя, то для физической реализуемости $W_{нк}(p)$ вводим дополнительные звенья.

4. Проверка:

ПФ скорректированной системы:

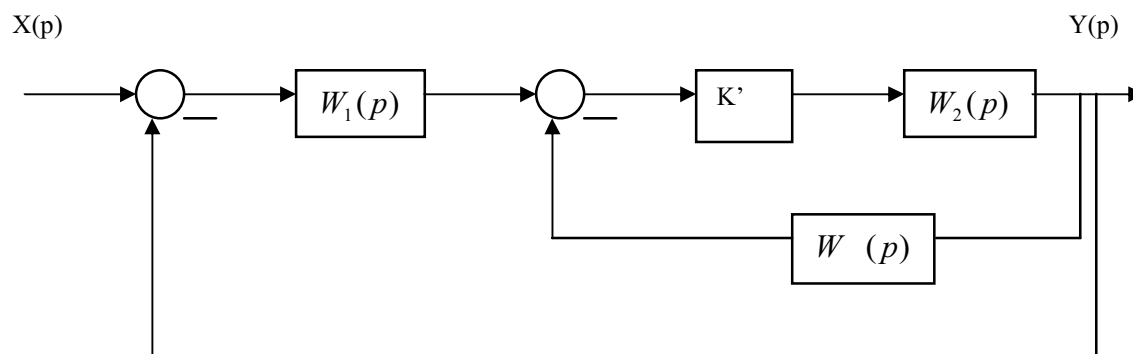
$$W_{нк}(p) = \frac{k_1 W_1 W_2}{1 + k' W_2 W_{нк}} = \frac{W_1}{W_{нк}} \cdot \frac{k_1 W_2 W_{нк}}{1 + k' W_{жс} W_{нк}}$$

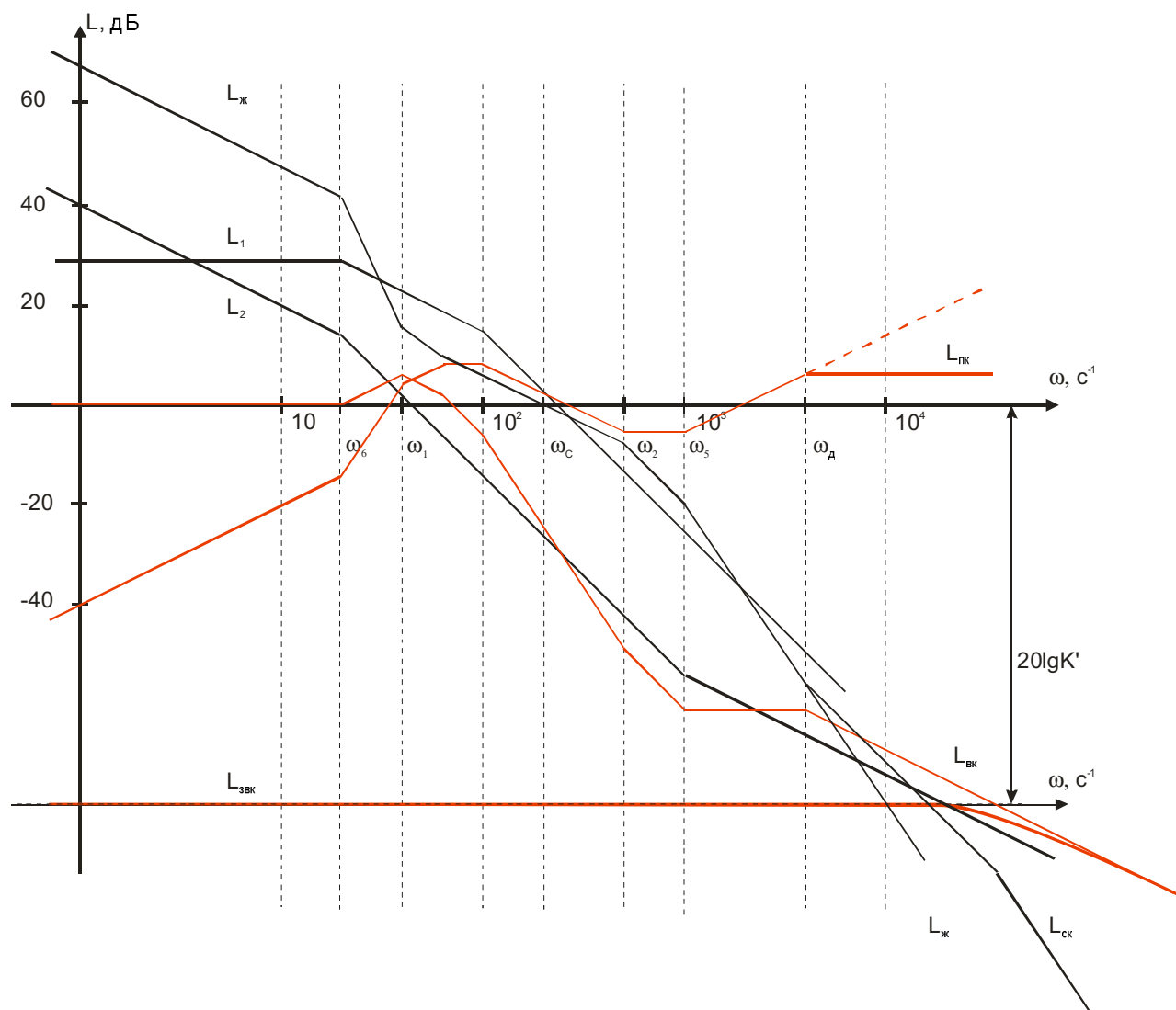
ПФ разомкнутого внутреннего контура:

$$W_{вк} = k' W_2 \cdot W_{нк}. \text{ Первоначально } k' = 1$$

Строим ЛЧХ $20\lg |W_{вк}(j\omega)|$.

Т.к. условие (*) не выполняется, то в прямую цепь контура введем дополнительный коэффициент k' . В результате получаем систему со следующей структурой:





2.5. Исходные данные для контрольных работ №№4, 5.

1. Задана функциональная схема (рис. 2.1.) системы стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

На входе полупроводникового усилителя ПУ сравниваются два напряжения: напряжение управления U_y , пропорциональное заданному значению скорости, и напряжение тахогенератора $U_{тг}$ пропорциональное скорости вращения вала двигателя ω . Разность этих напряжений ΔU усиливается усилителем ПУ и затем напряжение $U_{пу}$ поступает на вход управляемого тиристорного преобразователя ТП, на выходе которого формируется напряжение якорной цепи U_a двигателя.

Объект управления - двигатель постоянного тока М с обмоткой независимого возбуждения ОВД. Управляющее воздействие - напряжение U_y снимаемое с потенциометра R. Управляемая величина - скорость вращения ω . Возмущающее воздействие - момент сопротивления M_c рабочего механизма. Датчик скорости - тахогенератор ТГ с независимой обмоткой возбуждения ОВТГ.

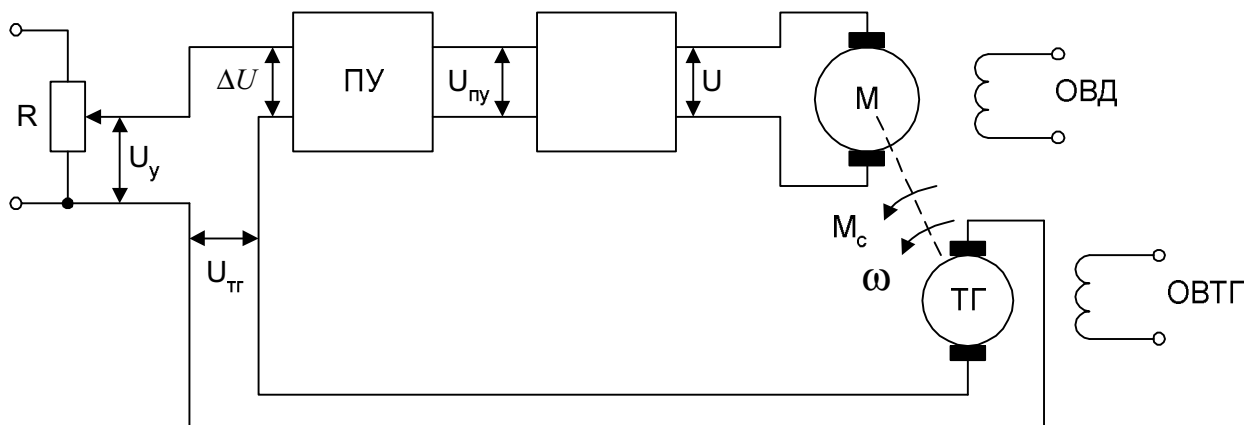


Рис. 2.1

Связь между входными и выходными переменными каждого из элементов системы характеризуется следующими уравнениями:

промежуточный усилитель:

$$U_{пу} = K_{пу} \cdot \Delta U,$$

где $\Delta U = U_y - U_{тг}$ - рассогласование;

тиристорный преобразователь:

$$T_{тп} \frac{dU_a}{dt} + U_a = K_{тп} U_{пу} \quad ;$$

двигатель:

$$T_{\text{я}} \frac{dM_{\text{ЭМ}}}{dt} + M_{\text{ЭМ}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{ДВ}}} U_{\text{я}} - \frac{1}{K_{\text{ДВ}}} \omega;$$

$$T_{\text{ЭМ}} \frac{d\omega}{dt} = K_{\text{ДВ}} (M_{\text{ЭМ}} \pm M_{\text{с}});$$

тахогенератор:

$$U_{\text{ТГ}} = K_{\text{ТГ}} \cdot \omega.$$

Здесь $K_{\text{ПУ}}$, $K_{\text{ТП}}$, $K_{\text{ТГ}}$, $K_{\text{д}}$ и $K_{\text{ДВ}}$ – коэффициенты передачи промежуточного усилителя, тиристорного преобразователя, тахогенератора, двигателя по управлению и двигателя по возмущению соответственно; $T_{\text{ТП}}$, $T_{\text{я}}$, $T_{\text{ЭМ}}$ – постоянная времени тиристорного преобразователя, электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя и электромеханическая постоянная времени двигателя.

Варианты значений параметров элементов системы приведены в табл. 2.1.

2. Задана функциональная схема следящего электропривода (рис. 2.2).

Измеритель рассогласования, который образуется путем включения по трансформаторной схеме двух вращающихся трансформаторов, ротор одного из которых связан с задающей осью (вращающийся трансформатор ВТ-Д), а ротор другого с исполнительной осью (вращающийся трансформатор ВТ-П), формирует на выходе переменное напряжение $U_{\text{у}}$. Амплитуда напряжения пропорциональна разности заданного угла поворота $\theta_{\text{з}}$ ротора ВТ-Д и текущего значения угла поворота $\theta_{\text{вых}}$ ротора ВТ-П, соединенного с валом рабочего органа РО. Напряжение $U_{\text{у}}$ усиливается предварительным усилителем переменного тока U_1 и демодулируется (преобразуется) в постоянное напряжение величина которого пропорциональна амплитуде $U_{\text{у}}$, а знак

Табл. 2.1.

Параметры	Варианты значений параметров									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{\Pi\Upsilon}$	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
$K_{\Pi\Pi}$	30	30	30	35	35	35	35	40	40	40
$K_{\Gamma\Gamma}, \text{В} \cdot \text{с}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$K_{\text{д}}, (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$	1,25	1,4	1,2	1,35	1,5	1,45	1,1	1,15	1,3	1,6
$K_{\text{дв}}, (\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с})^{-1}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$T_{\Pi\Pi}, \text{с} \cdot 10^{-3}$	8	8	8	7	7	6	6	5	5	5
$T_{\text{я}}, \text{с} \cdot 10^{-3}$	12	12	24	24	36	36	48	48	36	24
$T_{\text{эм}}, \text{с} \cdot 10^{-3}$	56	48	48	36	36	38	36	48	56	36

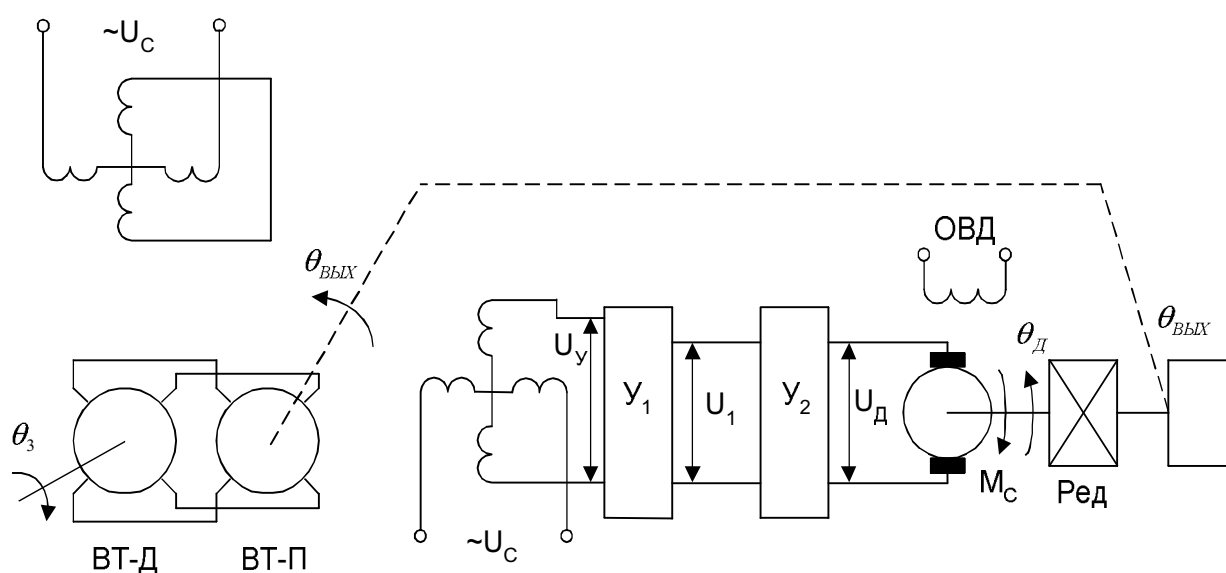


Рис. 2.2.

определяется знаком рассогласования. Усилитель мощности Y_2 из выходного сигнала демодулятора формирует напряжение $U_{\text{д}}$ питающее якорную цепь исполнительного двигателя постоянного тока независимого возбуждения M . Вал исполнительного двигателя через редуктор соединен с валом рабочего органа.

Управляющее воздействие - угол поворота θ_3 ротора вращающегося трансформатора ВТ-Д. Управляемая величина - угол поворота $\theta_{\text{вых}}$ оси рабочего органа РО. Возмущающее воздействие - момент статических сопротивлений M_C , приведенный к валу двигателя.

Связь между входными и выходными переменными каждого из элементов системы характеризуется следующими уравнениями:

Измеритель рассогласования:

$$U_Y = K_u \Delta\theta,$$

где K_u - крутизна характеристики (коэффициент передачи) измерителя рассогласования в линейной зоне; $\Delta\theta = \theta_3 - \theta_{\text{вых}}$ - ошибка слежения (рассогласования),

усилитель U_1 совместно с демодулятором:

$$T_1 \frac{dU_1}{dt} + U_1 = K_1 U_Y,$$

где K_1 и T_1 – коэффициент усиления и постоянная времени усилителя U_1 ; усилитель мощности U_2 :

$$U_D = K_2 U_1,$$

где K_2 – коэффициент передачи усилителя мощности, исполнительный двигатель:

$$T_{\text{ЭМ}} \frac{d^2\theta_D}{dt^2} + \frac{d\theta_D}{dt} = K_D U_D \pm K_{\text{ДВ}} M_C,$$

где $T_{\text{ЭМ}}$ – электрохимическая постоянная времени двигателя; K_D , $K_{\text{ДВ}}$ – коэффициент передачи двигателя по управлению и возмущению соответственно;

редуктор:

$$\theta_{\text{вых}} = \frac{1}{i_P} \theta_D,$$

где i_P - передаточное число редуктора.

Варианты значений параметров элементов системы приведены в табл. 2.2.

3. Задана функциональная схема автоматической системы стабилизации напряжения генератора (рис. 2.3.).

Таблица 2.2.

Параметры	Варианты значений параметров									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{u, В/рад}$	10	15	20	25	30	35	40	35	30	25
K_1	80	70	60	50	40	30	60	50	40	30
K_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\dot{i}_p$	40	40	50	50	50	50	40	40	40	40
$K_D, (В \cdot с)^{-1}$	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6
$K_{ДВ}, (Н \cdot м \cdot с)^{-1}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$T_1, с \cdot 10^{-2}$	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
$T_{ЭМ}, с \quad T_{ЭМ}, с$	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,45	0,5	0,5	0,55

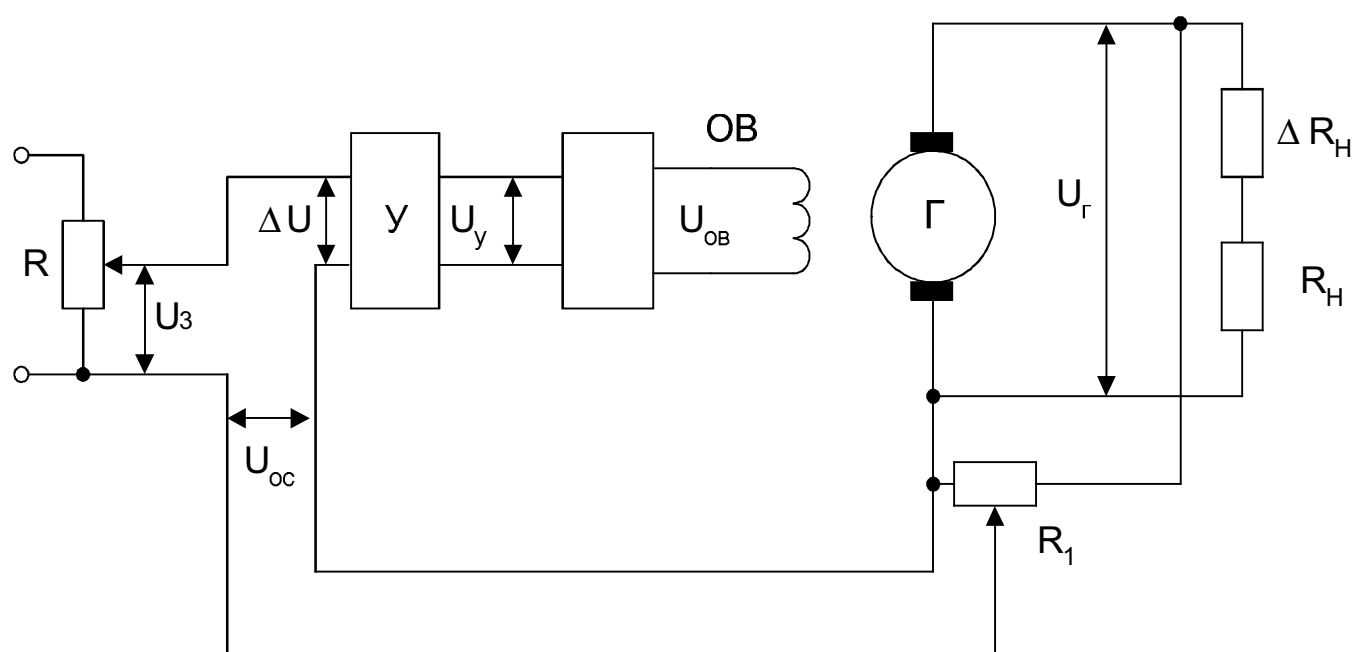


Рис. 2.3

Напряжение обратной связи U_{OC} , снимаемое с потенциометра R_1 , сравнивается с управляющим напряжением U_3 , которое определяет заданное напряжение генератора. Разность этих напряжений ΔU поступает на вход

промежуточного усилителя У, а затем, на тиристорный преобразователь ТП. Напряжение с тиристорного преобразователя U_{OB} поступает на обмотку возбуждения ОВ генератора.

Объект управления - генератор постоянного тока Г с обмоткой независимого возбуждения ОВ. Управляющее воздействие - напряжение U_3 снимаемое с потенциометра R. Управляемая (стабилизируемая) величина - напряжение U_{Γ} генератора. Возмущающее воздействие - изменение нагрузки ΔR_H . Связь между входными и выходными переменными каждого из элементов системы характеризуется следующими линеаризованными уравнениями:

промежуточный усилитель

$$U_Y = K_1 \Delta U,$$

где K_1 – коэффициент передачи усилителя; $\Delta U = (U_3 - U_{OC})$ - рассогласование; тиристорный преобразователь:

$$T_{TP} \frac{dU_{OB}}{dt} + U_{OB} = K_{TP} U_Y,$$

где K_{TP} , T_{TP} – коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного преобразователя;

генератор постоянного тока:

$$T_{B\Gamma} \frac{dE_{\Gamma}}{dt} + E_{\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot U_{OB},$$

где K_{Γ} - коэффициент передачи генератора, $T_{B\Gamma}$ - постоянная времени обмотки возбуждения генератора;

якорная цепь генератора:

$$T_{\Gamma} \frac{di_{\Gamma}}{dt} + i_{\Gamma} = \frac{1}{R_{\Gamma}} (E_{\Gamma} - U_{\Gamma}),$$

$$U_{\Gamma} = i_{\Gamma} \cdot R_{HO} + i_{\Gamma O} \cdot \Delta R_H,$$

$$i_{\Gamma O} = \frac{U_{\Gamma O}}{R_{HO}},$$

где T_{Γ} , R_{Γ} - постоянная времени и сопротивление якорной цепи генератора без учета сопротивления R_H нагрузки; E_{Γ} , U_{Γ} , i_{Γ} - отклонения ЭДС, напряжения

и тока генератора от установившегося значения; $i_{ГО}, U_{ГО}, R_{НО}$ - ток напряжение генератора Г и сопротивление нагрузки до возмущения (до изменения R_H); $\Delta R_H = (R_H - R_{НО})$ - приращения сопротивления нагрузки;

цепь обратной связи:

$$U_{OC} = K_{OC} \cdot U_G,$$

где K_{OC} - коэффициент передачи цепи обратной связи.

Варианты значений параметров элементов системы приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Параметры	Варианты значений параметров									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_{OC}		0,5	1	0,8	0,7	0,6	0,75	1	0,9	0,9
$K_{ТП}$	20	20	20	30	30	30	35	35	40	40
K_I, K_r	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$T_{ТП}, C \cdot 10^{-3}$	5	5	5	6	6	6	8	8	8	8
$T_{ВГ}, C$	0,2	0,36	0,28	0,15	0,24	0,48	0,1	0,1	0,32	0,44
$T_{Я}, C \cdot 10^{-2}$	1	1,5	2	1,3	2,2	3	3,5	2	2,5	3
$R_{Я}, Ом \cdot 10^{-1}$	3	1,7	1,5	0,86	0,51	0,278	1,87	0,728	0,096	0,062

Сопротивление нагрузки принять $R_{НО} = 9 R_{Я}$; напряжение генератора - $U_{ГО} = 230 В$.

2.6. Контрольная работа №4

Цель работы – закрепить материал по разделам классической теории линейных систем автоматического управления, основанной на структурном представлении и преобразовании математического описания САУ, на базе понятия передаточной функции и частотных методов анализа и синтеза.

Исходные данные:

Исходным для расчетов является вариант системы автоматического управления функциональная схема которой представлена на одном из рисунков 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 и соответствующие этой схеме параметры приведенные в таблицах 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3.

Номер варианта студент выбирает по двум последним цифрам номера зачетной книжки согласно таблицы 2.3.1. Если две последние цифры превышают значение 30, то номер варианта выбирают путем вычитания из них числа кратного 30. Например: последние цифры номера зачетной книжки – 78, тогда номер варианта – $78 - 2 \cdot 30 = 18$

Таблица 2.1

Вариант	Задание (номер рисунка)	Вариант исходных данных	Критерий исследования на устойчивость
1	2	3	4
0	1	0	Г
1	1	1	Н
2	1	2	М
3	1	3	Г
4	1	4	Н
5	1	5	М
6	1	6	Г
7	1	7	Н
8	1	8	М
9	1	9	Г
10	2	0	Г
11	2	1	Н
12	2	2	М
13	2	3	Г
14	2	4	Н
15	2	5	М
16	2	6	Г
17	2	7	Н
18	2	8	М
19	2	9	Г
20	3	0	Г
21	3	1	Н
22	3	2	М
23	3	3	Г
24	3	4	Н
25	3	5	М
26	3	6	Г
27	3	7	Н
28	3	8	М
29	3	9	Г

В четвертом столбце таблицы следует читать: Г - Гурвица, Н - Найквиста, М - Михайлова.

Задание

1. По дифференциальным уравнениям, соответствующим заданной функциональной схеме, записать передаточные функции и составить структурные схемы для каждого элемента системы.
2. Составить структурную схему системы автоматического управления в целом.
3. Определить передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы по управляющему и возмущающему воздействиям, а также передаточные функции по ошибке от этих воздействий.
4. В соответствии с вариантом задания исследовать систему на устойчивость методом Гурвица, Найквиста или Михайлова.
5. Определить установившиеся ошибки в системе от постоянных (единичных) управляющего и возмущающего воздействий.

Указания по выполнению контрольной работы № 4

Методология расчетов при выполнении этой контрольной работы в пояснениях не нуждается, так как детально изложена во всех учебниках по теории автоматического управления, в частности в тех, список которых приведен в конце настоящей разработки [1-11]. Примеры подобных расчетов приведены на с. 54 – 80.

2.7. Контрольная работа №5

В современной теории автоматического управления большое распространение получил метод математического описания, в основе которого лежит понятие состояния динамической системы [1,3]. Это понятие соответствует минимально необходимой информации, позволяющей судить о поведении системы в настоящем и будущем. Состояние системы в общем случае характеризуется n фазовыми координатами (переменными состояния). Эти переменные удобно принять за координаты n - мерного вектора состояния и использовать при описании системы мощный аппарат векторно - матричных представлений.

Описание в пространстве состояний полностью выявляет внутреннюю структуру системы и позволяет весьма эффективно и широко использовать при проектировании средства цифровой вычислительной техники.

Настоящая контрольная работа посвящена исследованию системы автоматического управления методом основанном на понятии пространства состояния.

Исходные данные

При расчетах использовать исходные данные и результаты контрольной работы №1.

Задание:

1. Составить уравнения состояния по структурной схеме системы автоматического управления.
2. Составить уравнения состояния по передаточной функции замкнутой системы автоматического управления по управляющему воздействию.
3. Определить устойчивость системы, используя уравнения состояния, полученные в пункте 1 или 2.
4. Произвести синтез модального регулятора при условиях:
 - все переменные состояния доступны измерению;
 - синтез регулятора произвести только для управляющего воздействия, полагая возмущающее воздействие равным нулю;
 - желаемый характеристический полином замкнутой системы принять в виде полинома соответствующего фильтру Баттерворта 3-го порядка:

$$D_{ж(p)} = p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3, \quad (*)$$

где $\omega_0 = 1/T$ – постоянная, характеризующая желаемое быстродействие. Принять $T = 0.02$ с.

Указания по выполнению контрольной работы № 5

Линейная система автоматического управления в общем виде может быть описана следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = B_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + B_{m-2} \frac{d^{m-2} u}{dt^{m-2}} + \dots + B_1 \frac{du}{dt} + B_0 u$$

Скалярное уравнение n-го порядка всегда можно привести к системе из n уравнений первого порядка и записать эту систему в виде векторно – матричного уравнения состояния:

$$\dot{\bar{X}}(t) = A\bar{X}(t) + B\bar{U}(t)$$

где A – собственная матрица параметров системы, характеризует динамические свойства системы; B – входная матрица системы, характеризует воздействие входных величин на переменные состояния; $X(t)$ – вектор переменных состояний; $U(t)$ – вектор входных переменных.

Систему дифференциальных уравнений переменных состояний необходимо дополнить алгебраическим уравнением выхода системы (уравнением наблюдения)

$$Y(t) = C X(t) + D U(t),$$

где C – выходная матрица системы, характеризует связь выходных координат Y_i с переменными состояния; D – матрица обхода, при описании систем электропривода, обычно равна нулю.

Перейти от общего уравнения системы к уравнениям пространства состояний можно различными способами. При этом можно получить бесконечно большое число форм представления уравнений состояния и наблюдения, а, следовательно, и бесконечное количество наборов переменных состояния. Следует отметить, что для всех этих форм собственные параметрические матрицы имеют различный вид, но одни и те же собственные значения. Одной и той же остается связь между входными и выходными переменными.

В практических расчетах используют канонические формы представления уравнений состояния, то есть формы, для которых собственная параметрическая матрица содержит максимальное количество нулевых элементов. При этом стремятся в качестве переменных состояния использовать реальные физические переменные системы доступные измерению, хотя не исключено, что часть переменных могут быть фиктивными или неизмеряемыми.

Составление уравнений состояния возможно непосредственно по общему дифференциальному уравнению системы, по структурной схеме системы, по известной передаточной функции системы.

Так одна из канонических форм уравнений состояния и выхода, исходя из общего уравнения системы, может быть записана в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{n-1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_{n-2} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{n-1} \\ B_{n-2} \\ \dots \\ B_1 \\ B_0 \end{bmatrix} U,$$

$$y = x_1,$$

где переменные состояния

$$\begin{aligned}
x_1 &= y(t), \\
x_2 &= \dot{x}_1 + a_{n-1}x_1 - b_{n-1}u, \\
x_3 &= \dot{x}_2 + a_{n-2}x_1 - b_{n-2}u, \\
&\dots\dots\dots \\
x_n &= \dot{x}_{n-1} + a_1x_1 - b_1u.
\end{aligned}$$

Соответствующая этой форме записи уравнений состояния детализированная структурная схема системы приведена на рис. 2.4.

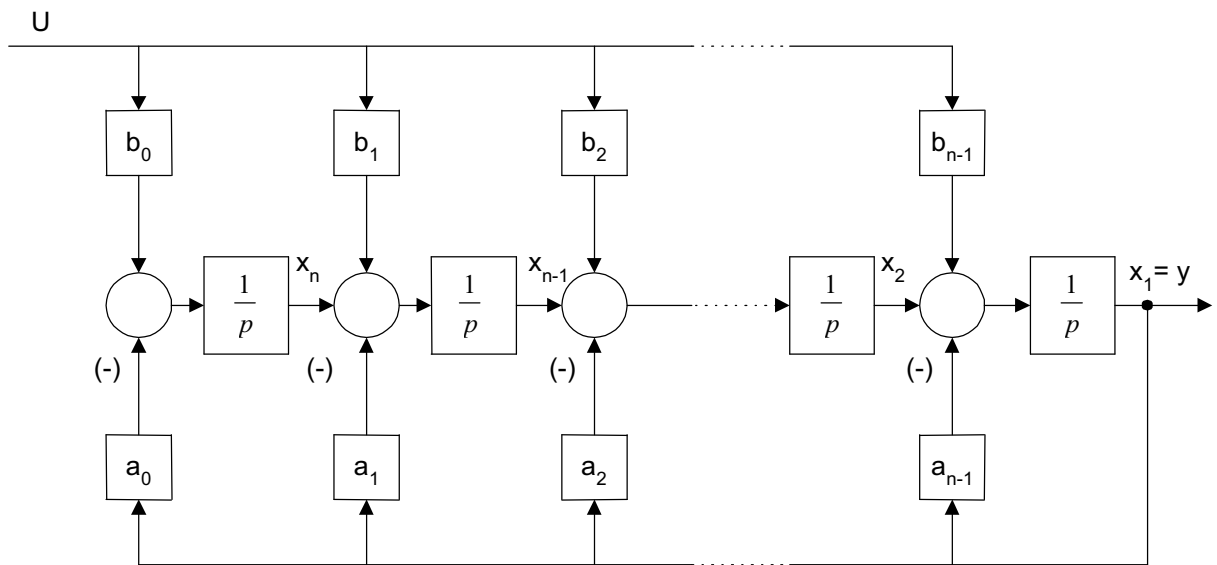


Рис. 2.4

При составлении уравнений состояния по структурной схеме системы целесообразно преобразовывать схему таким образом, чтобы она состояла только из интегрирующих и усилительных звеньев. Тогда выбор переменных и запись уравнений состояний затруднений не вызовет.

Один из вариантов записи уравнений состояния по передаточной функции может быть осуществлен следующим образом.

Для известной передаточной функции системы

$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}$$

запишем дифференциальное уравнение в символической форме, обозначив $p = d/dt$:

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

Введем новую переменную $x_1(t)$ такую, чтобы исходное уравнение можно было записать в виде двух уравнений:

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) x(t) = u(t),$$

$$(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) x(t) = y(t).$$

Первое из этих уравнений можно привести к системе уравнений первого порядка, принимая в качестве переменных состояния новую переменную $X_1(t)$ и ее $n-1$ производные:

$$p x_1 = x_2,$$

$$p x_2 = x_3,$$

$$p x_n = [u(t) - a_1 x_{n-1} - a_2 x_{n-2} - \dots - a_n x_1] \cdot a_0^{-1}.$$

Тогда второе уравнение при условии $m < n$ вырождается в алгебраическое

$$y(t) = b_0 x_{m+1} + b_1 x_m + \dots + b_m x_1.$$

Структурная схема соответствующая этим уравнениям показана на рис. 2.5.

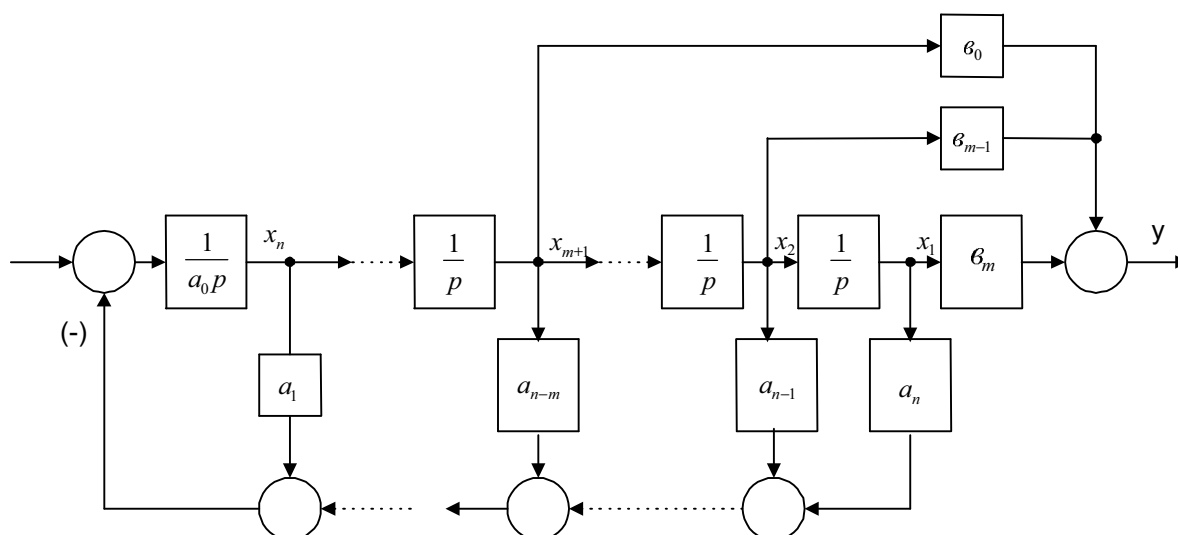


Рис. 2.5

Уравнения состояния и выхода примет соответственно вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\frac{a_n}{a_0} & -\frac{a_{n-1}}{a_0} & \dots & -\frac{a_1}{a_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, y = [b_m \dots b_0 \ 0 \dots 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix}.$$

С другими методами и формами записи уравнений состояния можно ознакомиться в [1,3].

Качество переходного процесса системы определяется значениями корней ее характеристического уравнения, или по-другому, собственными значениями матрицы A .

Модальное управление – это методы формирования цепей обратных связей, придающих замкнутой системе заранее выбранное расположение корней [1, 3, 12].

Обычно задаются желаемым характеристическим полиномом замкнутой системы. Если для системы третьего порядка принять

$$D_{ж(p)} = p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3,$$

то время регулирования составит $t_p \approx 7/\omega_0$, при перерегулировании $\sigma = 10\%$. Здесь параметр ω_0 выбирается из желаемого быстродействия.

Пусть исходная линейная система описывается уравнением состояния

$$\dot{X} = AX + BU.$$

Для получения желаемого быстродействия и характеристического полинома системы $D_{ж(p)}$ введем линейную обратную связь по переменным состояния в соответствии с уравнением (считаем, что все координаты системы доступны измерению):

$$U = V - KX,$$

где V - вектор входных воздействий в синтезируемой системе, U - вектор входных воздействий в исходной системе; K – матрица коэффициента обратных связей.

Если U и V скаляры (например, система одномерная), то K является матрицей - строкой, элементы которой - коэффициенты обратных связей по всем составляющим вектора X .

Исходная система и линейная обратная связь по состоянию образуют замкнутую систему (рис. 2.6).

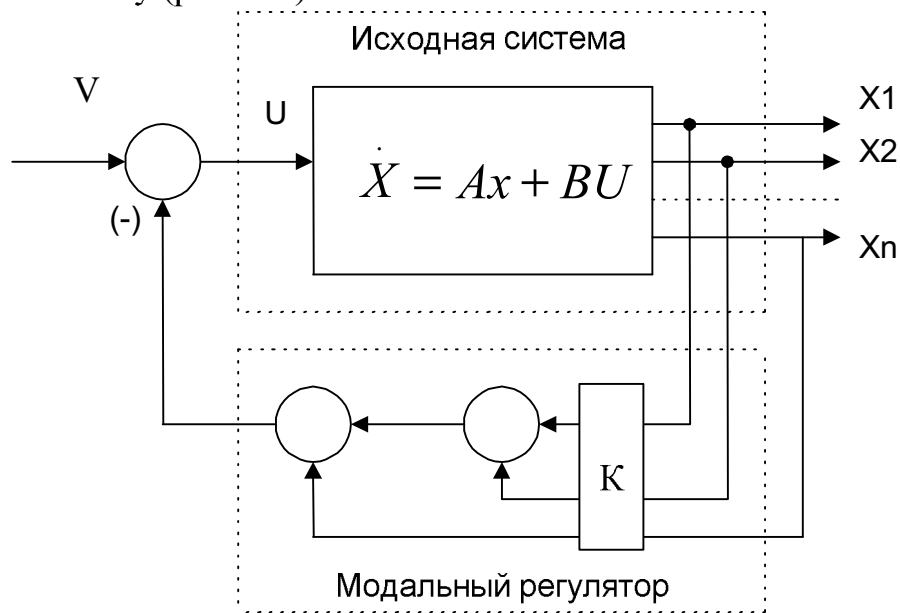


Рис. 2.6

Подставив последнее выражение в уравнение состояния исходной системы получим уравнение состояния замкнутой системы

$$\dot{X} = (A - BK)X + BV.$$

Динамические свойства полученной системы определяются матрицей $A_1 = A - BK$. Чтобы замкнутая система обладала желаемыми свойствами необходимо равенство определителя матрицы $(pE - A_1)$ желаемому характеристическому полиному $D_{ж(p)}$, то есть:

$$\det(pE - A_1) = D_{ж(p)},$$

где E – единичная матрица.

Приравнявая в последнем уравнении коэффициенты при p в одинаковой степени, можно вычислить значения элементов матрицы K .

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. Пособие для ВТУЗов 2 –е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит.. 1989.
2. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. М.: Энергия, 1980.
3. Теория автоматического управления. / Под ред. А. А. Воронова. М.: Высшая школа, 1986.
4. Основы автоматического управления. / Под В. С. Пугачева. М.: Наука. 1974.
5. Иващенко Н. И. Автоматическое регулирование. М.: Машиностроение, 1978.
6. Топчиев Ю. И., Цыплаков А. П. Задачник по теории автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1977.
7. Сборник задач по теории автоматического управления. / Под ред. В. А. Бессекерского, М.: Наука, 1978.
8. Задачник по теории автоматического управления. / Под ред. А. С. Шаталова, М.: Энергия, 1979.
9. Андрищенко В. А. Теория систем автоматического управления: Учеб. пособие. Л., Изд - во Ленингр. ун. 1990.
10. Яшугин Е. А. Теория линейных непрерывных систем автоматического управления в вопросах и ответах: Справ. пособие, - Минск: Высш. шк. 1986.
11. Изаков Ф. Я., Ройтман А. Х., Задачник по теории автоматического управления. – М.: Агропромиздат, 1991.
12. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.
13. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. 3. Часть I. Теория нестационарных, нелинейных и самонастраивающихся систем автоматического регулирования. / Под ред. В. В. Солодовникова, М.: Машиностроение, 1969.
14. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z – преобразования. М.: Наука, 1971.
15. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода. М.: Энергоатмиздат, 1987.
16. И.М. Макаров, Б.М. Менский. Линейные автоматические системы. Л. «Машиностроение», 1982г.
17. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления. Под общей ред. проф. Е.А. Санковского. Мн. «Высшая школа», 1973г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Общие сведения	3
1.	Программа курса	5
1.1.	Теоретическая часть	5
1.2.	Практические занятия	13
1.3.	Лабораторный практикум	14
1.4.	Курсовая работа	14
2	Контрольные работы	14
2.1	Общие указания	15
2.2	Контрольная работа №1	15
2.3	Контрольная работа №2	21
2.4.	Контрольная работа №3	34
2.5.	Исходные данные для контрольных работ №№4, 5.	36
2.6.	Контрольная работа №4	42
2.7.	Контрольная работа №5	44
	Литература	51