

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Отделение кафедры ЮНЕСКО (ОКЮ) «Новые материалы и технологии»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий ОКЮ
_____ Ю.М. Осипов
« ____ » _____ 2012 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для проведения: практических (семинарских) занятий, лабораторных работ и самостоятельной работы студента для подготовки магистров по дисциплинам «Теория эксперимента в исследованиях систем», «Статистическая динамика автоматических систем» и «Исследование динамики электромехатронных систем движения» по направлению 221000.68 «Мехатроника и робототехника» магистерской программы «Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения».

Методические указания для проведения: практических (семинарских) занятий, лабораторных работ и самостоятельной работы студента для подготовки магистров по дисциплине «Теория эксперимента в исследованиях систем» и «Исследование динамики электромехатронных систем движения» по направлению 221000.68 «Мехатроника и робототехника» магистерской программы «Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения», рассмотрены и утверждены на заседании Отделения кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» 27.03.2012 г., протокол № 8.

Разработчик:

Профессор ОКЮ,
д.т.н., д.э.н.

Ю.М.Осипов

1. Цель и задачи проведения практических (семинарских) занятий и лабораторных работ

1.1. Практические (семинарские) занятия (ПЗ) и лабораторные работы (ЛБ) играют важную роль в выработке у студентов навыков применения полученных знаний для решения практических задач совместно с преподавателем, направлены на расширение и детализацию лекционных знаний, на выработку и закрепление навыков профессиональной деятельности, на освоение практических навыков работы с инновационными системами и формирования инновационных идей, необходимых и востребованных рынком новшеств (инноваций) в области мехатроники и робототехники. Объем практических (семинарских) занятий – 18 часов, лабораторных работ – 18 часов.

1.2. Магистерская специализация предполагает предварительную самостоятельную работу студентов (СРС), овладение специальными средствами профессиональной деятельности в выбранной для специализации области науки или практики. Объем СРС – 54 часа.

1.3. Одной из распространенных форм практических занятий, наиболее часто встречаемых в изучении теоретических курсов является семинар. Семинар является одним из основных видов практических занятий по гуманитарным и техническим наукам. Он представляет собой средство развития у студентов культуры научного мышления. Семинар предназначен для углубленного изучения дисциплины, овладения методологией научного познания. Главная цель семинарских занятий – обеспечить студентам возможность овладеть навыками и умениями использования теоретического знания применительно к особенностям изучаемой отрасли.

2. Содержание и регламент проведения практических (семинарских) занятий.

2.1. По настоящему курсу «Теория эксперимента в исследованиях систем», «Статистическая динамика автоматических систем» и «Исследование динамики электромехатронных систем движения» предлагается проведение ПЗ в виде семинаров «Инновационные технологии управления. Электромехатроника» с докладом (реферат и презентация). Содержание проведения семинара.

а) одной из форм может быть развернутая беседа по заранее известному плану (см. таблицу заданий). Перед семинаром студенты получают темы задания (раздела курса), задание изучить проблему. Во время семинара преподаватель предлагает обсудить проблему, связанную с содержанием данной темы (раздела), в условиях групповой дискуссии, проводится обсуждение, сформулировать и объяснить ее суть. Объем развернутой беседы: опрос и дискуссия – 60 мин., анализ ответов во время опроса и дискуссии, а также подведение итогов дискуссии – 30 мин.;

б) доклады студентов с компьютерной презентацией материала. Доклады практикуются с целью акцентирования внимания студентов на какой-либо актуальной теме или на наиболее важных и существенных ее аспектах. Перед началом семинара студентам дается задание (см. таблицу заданий) написать реферат (объемом 15-20 с.) – выделить существенные стороны темы, проследить их связь с практикой общественной или трудовой деятельности. Доклад углубляет знания студентов, ориентирует их на активный поиск путей и способов решения затрагиваемой проблемы. Доклады предполагают оппонирование, которое осуществляет один из студентов группы семинарских занятий. Объем доклада: выступление докладчика с компьютерной презентацией материала – до 20 мин., выступление оппонента – до 10 минут, дискуссия (прения) по докладу (должен высказаться каждый студент) – 60 мин.

2.2. По итогам проведения каждого ПЗ преподавателем выставляется студентам

текущий рейтинг. Контроль полученных знаний оценивается рейтинговой раскладкой (п.11 РП).

Критерии оценки проведения каждым студентом практического (семинарского) занятия.

1. Оценка докладчика:

целенаправленность доклада: постановка проблемы, умение связать теорию с практикой (с использованием материала в будущей профессиональной деятельности);

планирование доклада: выделение главных вопросов, связанных с курсом, наличие в списке литературы доклада новинок по сравнению с рекомендуемой в рабочей программе литературой;

творчество в докладе: подготовка доклада, статьи на научную конференцию.

2. Оценка оппонента: умение критически оценить доклад, найти положительные стороны и указать на недостатки, сделать резюме по докладу.

3. Оценка участника семинара: умение поддержать дискуссию, конструктивность выступления, постановка острых вопросов докладчику и т.п.

2.3. Наименование практических (семинарских) занятий по курсу «Теория эксперимента в исследованиях систем»

№ п/п	Тематика практических занятий (семинаров)
1	Методы исследований мехатронных систем
2	Классификация экспериментов
3	Основные этапы экспериментального исследования.
4	Статистическая модель «черный ящик»

2.4. Наименование практических (семинарских) занятий по курсу «Статистическая динамика автоматических систем»

№ п/п	Тематика практических занятий (семинаров)
1	Формирование случайного сигнала с заданной спектральной плотностью
2	Анализ линейной системы при воздействии случайного возмущения и детерминированного полезного сигнала
3	Анализ линейной системы при воздействии случайного полезного сигнала и случайного шума

2.5. Наименование практических (семинарских) занятий по курсу «Исследование динамики электромехатронных систем движения»

№ п/п	Тематика практических занятий (семинаров)
1	Рассчитать силы трения покоя $F_{ст.ск.}$ и силы трения скольжения $F_{дин.ск.}$, возникающих в опорах электромехатронного модуля движения (ЭМД)
2	Рассчитать силовые характеристики ЭМД с опорами качения при работе в режиме разомкнутого управления.
3	Рассчитать силовые характеристики ЭМД с опорами скольжения при работе в режиме замкнутого управления.
4	Рассчитать точностные характеристики ЭМД с опорами скольжения при его работе в режимах разомкнутого управления.
5	Рассчитать точностные характеристики ЭМД с опорами скольжения при его работе в режимах замкнутого управления.
6	Рассчитать точностные характеристики ЭМД с опорами качения при его работе в

	режимах разомкнутого управления.
7	Рассчитать точностные характеристики ЭМД с опорами скольжения при его работе в режимах разомкнутого управления.
8	Рассчитать повторяемость перемещения ЭМД с опорами скольжения
9	Рассчитать повторяемость перемещения ЭМД с опорами качения

2.6. Отчет о выполненной практической работе должен содержать:
 Результаты аналитических расчетов;
 текст команд, выполненных в среде MATLAB;
 распечатки графиков, отображающих основные статистические характеристики процессов (выходной сигнал линейной системы, ее ошибку, математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию, спектральную плотность);

3. Содержание и регламент проведения лабораторных работ Технология и правила техники безопасности при проведении ЛБ.

3.1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с описанием, изучить порядок выполнения, приготовить необходимые таблицы и произвести необходимые расчеты, если таковые предшествуют эксперименту. Весьма важно уяснить назначение всех элементов экспериментальной установки и их взаимодействие.

3.2. После того, как бригада студентов полностью подготовилась к выполнению работ, преподаватель, ведущий занятия, проверяет степень готовности бригады к занятиям.

3.3. Полученные экспериментальные данные оцениваются студентами и сравниваются с теоретическими положениями, после чего предъявляются преподавателю для проверки. Если в процессе эксперимента допущена ошибка, преподаватель принимает решение о повторении опыта или отдельных его частей.

3.4. Экспериментальные данные обрабатываются, строятся необходимые графики, производятся расчеты и предоставляются в виде отчета, который должен содержать:

- 1) название работы и ее номер, дату выполнения работы, и состав бригады;
- 2) цель работы, программу работы и необходимые схемы эксперимента;
- 3) таблицы опытных и расчетных данных по каждому пункту программы исследований;
- 4) графики характеристик, построенные на основе опытных и расчетных данных с указанием на них номинальных величин и других характерных точек;
- 5) краткие выводы, объясняющие характер полученных зависимостей;
- 6) отчет составляется в соответствии с требованиями ЕСКД;
- 7) в случае своевременной подготовки и выполнения работы отчет составляется бригадой студентов, а при невыполнении этих требований – индивидуально.

3.5. Техника безопасности в лаборатории электромехатронных систем.

ВНИМАНИЕ! Лабораторный стенд оснащен источниками питания: 220 В – 50 Гц;

70 В постоянного тока.

3.5.1. Перед началом сборки схемы необходимо изучить расположение приборных панелей, элементов управления, источников питания лабораторного стенда.

3.5.2. Включать испытываемую схему под напряжением можно лишь после проверки преподавателем и только с его разрешения. Включение неверно собранных схем под напряжением может привести к выходу из строя измерительных приборов, элементов управления и исследуемых объектов. За причиненный ущерб студенты несут материальную ответственность.

3.5.3. **Категорически запрещается** студентам включать автомат общего питания лаборатории. Запрещается во время экспериментов касаться токоведущих частей, клемм приборов и других неизолированных элементов, при включенном питании.

3.5.4. Во время работы электромехатронных модулей движения необходимо исключить возможность попадания в них посторонних предметов, захвата частей тела вращающимися элементами.

3.5.5. При любом повреждении или несчастном случае немедленно выключить напряжение выключателем или автоматом питания лаборатории.

3.5.6. Студенты не допускаются к выполнению работы без предварительного инструктажа по технике безопасности и соответствующей записи об этом в специальном журнале.

3.5.7. Наименование лабораторных работ

Тема 1.
Определение статических характеристик электромехатронной системы (ЭМС).
ЛБ №1. Исследование силовых характеристик ЛЭМД с опорами скольжения при работе в режиме разомкнутого управления
ЛБ № 2. Исследование силовых характеристик ЛЭМД с опорами качения при работе в режиме разомкнутого управления
Тема 2.
Определение динамических характеристик ЭМС
ЛБ №3. Исследования точностных характеристик ЛЭМД в режимах разомкнутого управления
ЛБ №4. Исследования точностных характеристик ЛЭМД в режимах замкнутого управления
Тема 3.
Определение характеристик случайных процессов ЭМС
ЛБ №5. Исследование устойчивости одноиндукторных модулей движения.
ЛБ №6. Исследования качества одноиндукторных модулей движения.

4. Основные теоретические и методологические положения для проведения практических (семинарских) занятий и лабораторных работ.

4.1. Экспериментальные исследования силомоментных и точностных характеристик ЛЭМД с опорами скольжения и качения выполняются по аналогичной технологии испытаний дугового электромехатронного модуля движений (ДЭМД).

4.2. В ходе испытаний ДЭМД с опорами скольжения проведены исследования следующих основных показателей, определяющих качество его функционирования.

4.2.1. Определение статических характеристик электромехатронной системы.

Силомоментные характеристики ДЭМД с опорами скольжения при работе в режимах разомкнутого и замкнутого управления. Измерения силы трения покоя $F_{ст.ск.}$ и силы трения скольжения $F_{дин.ск.}$, возникающих в опорах ДЭМД, выполнялись при помощи измерительной установки, представленной на рис. 1.

Измерительная установка состоит из неподвижного основания 1, на котором посредством шарнирного элемента 2 подвижно закреплена площадка 3 с установленным на ней ДЭМД. Шарнирный элемент 2 обеспечивает свободное отклонение подвижной площадки 3 относительно неподвижного основания 1 на угол $\alpha = 0 - 30^\circ$. Зажим 4 чувствительного элемента динамометра 5 соединен с подвижным элементом ДЭМД тросом через блок 6. К зажиму 7 чувствительного элемента присоединена емкость с водой 8, выполняющая роль груза.

В качестве средства измерения в измерительной установке используется

динамометр электронный универсальный АЦДУ-0,5-И1, предназначенный для измерения статических сил растяжения $F_{\text{раст.}}$ и сжатия $F_{\text{сж.}}$. Динамометр имеет следующие основные технические характеристики: (табл. 1). Для измерения статического усилия трения $F_{\text{ст.ск.}}$ дуговой ротор ДЭМД устанавливают в среднее положение (рис. 1). Угол α между площадкой 3 и неподвижным основанием 1 выбирают таким образом, чтобы сила $F_{\text{тяж.}}$ была приложена к ротору ДЭМД нормально относительно радиальной линии, проведенной из центра дуги в точку прикрепления троса к ротору, после чего фиксируют подвижную площадку.

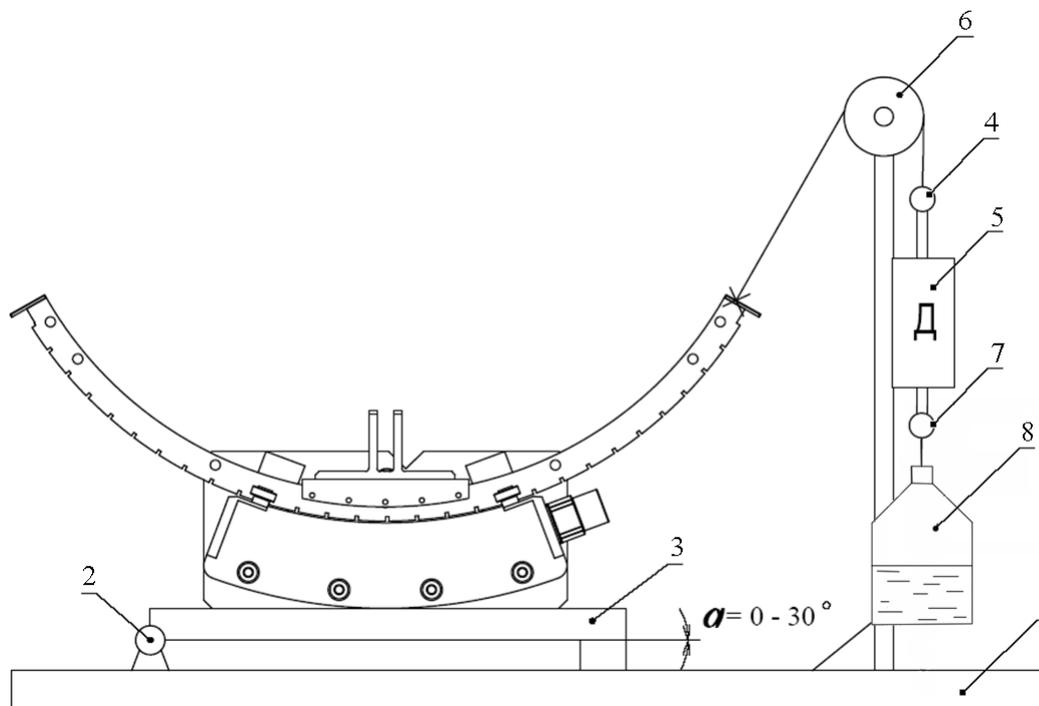


Рис. 1 – Кинематическая схема установки для измерения величины силы трения покоя в опорах ДЭМД

Таблица 1.

Основные характеристики динамометра АЦДУ-0,5-И1

Наибольший предел измерений, Н	500
Пределы допускаемого относительного размаха показаний, %	0,2
Пределы допускаемого относительного гистерезиса, %	±0,3
Пределы относительного изменения нулевых показаний, %	0,1
Пределы допускаемой погрешности градуировочной характеристики при периодической поверке, %	0,2
Размах результатов измерений при неизменном положении датчика силы, %	0,1
Наименьший предел измерения, Н	20
Дискретность цифрового отсчетного устройства, Н	0,02
Пределы относительной допускаемой суммарной погрешности, %	±0,24

Производят наполнение емкости 8 жидкостью, со скоростью не более 1л/мин, контролируя при этом показания цифрового отсчетного устройства динамометра и положение ротора. При $F_{\text{тяж.}} \geq F_{\text{ст.ск.}}$ произойдет сдвиг ротора с начального положения. Показание динамометра, при котором произошел сдвиг, фиксируют. Затем удаляют не менее 20% жидкости из емкости и переводят ротор в начальное положение. Повторяют измерение не менее 10 раз, после чего изменяют положение ротора, сдвинув его на 10° по

часовой стрелке. Установив требуемый угол между подвижной площадкой и неподвижным основанием, выполняют очередную серию измерений. Выполняют серии измерений для следующих положений ротора: 0° , 10° , 20° и 30° .

Для измерения динамического усилия трения скольжения $F_{\text{дин.ск.}}$ необходимо обеспечить равномерное движение ротора относительно индуктора ДЭМД в течение времени, превышающего время установления результатов измерения динамометра АЦДУ-0,5-И1. Для обеспечения этого условия ротор ДЭМД приводится в движение при помощи тихоходного электродвигателя 8 (рис. 2) на вал которого установлен шкив, с закрепленным тросом.

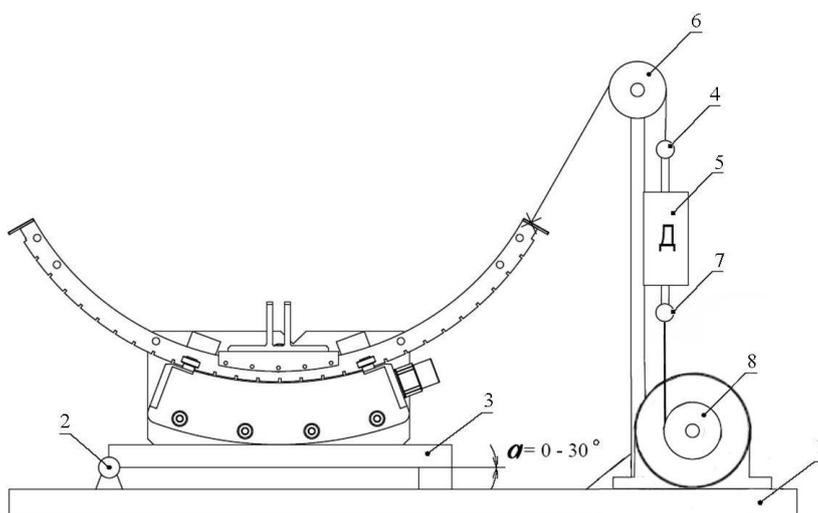


Рис. 2 – Кинематическая схема установки для измерения силы трения скольжения в опорах ДЭМД

Дуговой ротор ДЭМД устанавливают в крайнее левое положение (рис. 2.). Включают электродвигатель 8, и после начала равномерного движения ротора ДЭМД под действием силы $F_{\text{тяг.}}$, создаваемой электродвигателем начинают отслеживать показания цифрового отсчетного устройства динамометра в процессе движения ротора. Частоту вращения вала двигателя выбирают такой, чтобы скорость движения ротора не превышала 5 см/с. После того, как ротор ДЭМД перешел в среднее положение электродвигатель отключают и вручную переводят ротор в исходное положение. Выполняют не менее 20 повторных измерений.

Результаты экспериментальных исследований усилия трения в ДЭМД с опорами скольжения приведены в табл. 2

Таблица 2.

Результаты экспериментальных исследований усилия трения в ДЭМД с опорами скольжения

Делительный диаметр ДЭМД, мм	504 мм
Усилие трения покоя, $F_{\text{ст.ск.}}$, Н	$50,3 \pm 1,1$
Приведенный момент трения покоя, $M_{\text{ст.ск.}}$, Нм	$12,7 \pm 0,3$
Усилие трения скольжения, $F_{\text{дин.ск.}}$, Н	$33,8 \pm 0,5$
Приведенный момент трения скольжения, $M_{\text{дин.ск.}}$, Нм	$8,5 \pm 0,15$

В ходе эксперимента исследовались усилие удержания F_h , тяговое усилие $F_{\text{раб.}}$, максимально допустимые ускорение a_{max} и приемистость пуска V_{max} , обеспечиваемые

ДЭМД с опорами скольжения при его работе в режиме разомкнутого и замкнутого управления.

Измерение усилия удержания F_h производят при помощи измерительной установки (рис.1). Усилением удержания (моментом удержания) называют пиковое значение момента, при превышении которого со стороны внешних сил, вал электродвигателя (в рассматриваемом случае — дуговой ротор) повернется относительно удерживающего его электромагнитного поля. В таком режиме положение ротора является неконтролируемым.

Дуговой ротор ДЭМД устанавливают в среднее положение. Угол между площадкой 3 и неподвижным основанием 1 выбирают таким образом, чтобы сила $F_{тяж}$ была приложена к ротору ДЭМД нормально относительно радиальной линии, проведенной из центра дуги в точку прикрепления троса к ротору, после чего фиксируют подвижную площадку. Включают ДЭМД в режиме разомкнутого управления, задают ток в обмотки индуктора ДЭМД равный 30% от номинального. (Номинальный ток обмоток для исследуемого ДЭМД составляет 7А)

После того, как питание в обмотки ДЭМД подано, производят наполнение емкости 8 (рис. 1) жидкостью, со скоростью не более 1л/мин, контролируя при этом показания цифрового отсчетного устройства динамометра и положение ротора. При $F_{тяж} \geq F_{ст.ск.} + F_h$ произойдет сдвиг ротора относительно электромагнитного поля. Показание динамометра, при котором произошел сдвиг, фиксируют.

Приостанавливают подачу тока в обмотки индуктора ДЭМД, удаляют не менее 20% жидкости из емкости и переводят ротор в начальное положение. Повторяют измерение не менее 10 раз, после чего увеличивают амплитуду тока в обмотках на 10–15%. Выполняют серии измерений изменяя значения амплитуды тока в обмотках индуктора в диапазоне 30% – 110% от номинального.

Переводят ротор в исходное положение, включают ДЭМД в режиме замкнутого управления и выполняют серию измерений усилия удержания. Экспериментальные исследования ДЭМД в режиме замкнутого управления здесь и далее проводятся при заданной номинальной амплитуде токов в обмотках, так как в процессе автоматического регулирования скорости движения ротора амплитуда тока может быть изменена в широком диапазоне с целью коррекции ошибки.

Вследствие разомкнутости магнитопровода ДЭМД, при больших углах отклонения ротора от центрального положения возможно проявление краевых эффектов, приводящих к ухудшению таких характеристик ДЭМД как тяговое усилие, коэффициент мощности и КПД. Для оценки влияния краевых эффектов проводят измерения усилия удержания в крайних положениях ротора ДЭМД по вышеописанной методике в режиме разомкнутого и замкнутого управления. Результаты испытаний представлены в таблице 3 и графически на рис. 3. Кривая 1 (рис. 3) характеризует зависимость усилия удержания ДЭМД от токов в обмотках в центральной зоне дуги ротора, кривая 2 — в крайней зоне. Вследствие влияния краевых эффектов наблюдается снижение усилия удержания на больших углах отклонения, однако оно незначительно и составляет 5–10%.

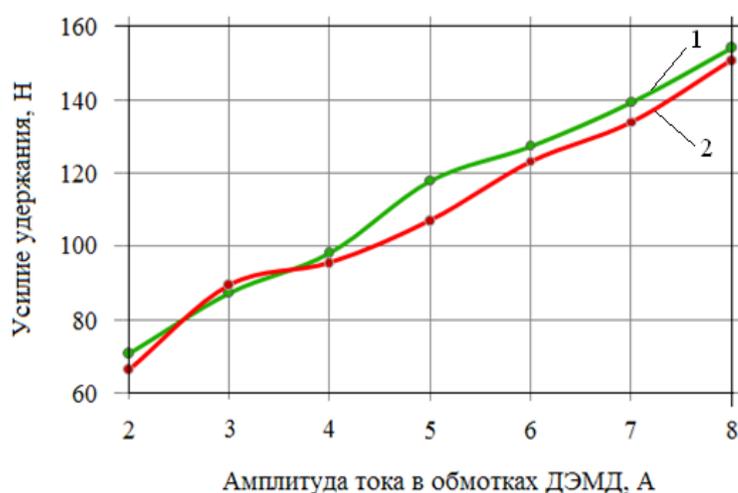


Рис. 3. Влияние краевых эффектов на усилие удержания ДЭМД при различных токах в режиме разомкнутого управления

Зависимости (рис.3.3), в целом, носят линейный характер, и даже при превышении номинального тока на 15% (8А) нелинейности характеристики не наблюдается. Это говорит о том, что электромагнитная система ДЭМД далека от насыщения, вследствие чего возможно повышение развиваемого усилия путем увеличения амплитуды тока, при наличии принудительного охлаждения обмоток.

Таблица 3.

Силомоментные характеристики ДЭМД с опорами скольжения при номинальном токе обмоток

	Режим управления	
	Разомкнутый	Замкнутый
Усилие удержания в центральной зоне, Н	162,5± 1,7	182,4 ± 1,2
Приведенный момент удержания в центральной зоне, Нм	41,1± 0,43	46,1± 0,3
Усилие удержания в крайней зоне, Н	151,1± 1,5	167,1 ± 2,2
Приведенный момент удержания в крайней зоне, Нм	38,2± 0,38	42,2 ± 0,55
Тяговое усилие, Н	46,0 ± 0,5	54,2 ± 0,5
Приведенный вращающий момент, Нм	11,6 ± 0,13	13,7 ± 0,13
Пусковая приемистость ДЭМД в режиме холостого хода, мм/с	700 ± 5	840 ± 5
Максимальное ускорение подвижной части ДЭМД в режиме холостого хода, м/с ²	7 ± 0,5	15 ± 0,5

Измерение тягового усилия $F_{\text{раб.ДЭМД}}$ производится при помощи измерительной установки (рис.1). Дуговой ротор устанавливают в среднее положение, задают амплитуду токов в обмотках индуктора ДЭМД на уровне 60% от номинальной, после чего включают ДЭМД в режиме разомкнутого управления.

Производят наполнение емкости 8 жидкостью, в объеме не более 500 мл, затем при помощи команды PAx задают перемещение ротора ДЭМД в крайнее левое положение, контролируя при этом его перемещение визуально. В случае если ротор отклонился на заданный угол, его перемещают в исходное положение и увеличивают объем жидкости в емкости 8 на 100–200 мл, после чего повторяют эксперимент. Таким образом, определяют

величину силы, при которой произойдет проскальзывание ротора относительно электромагнитного поля индуктора при его движении. После этого удаляют не более 50 мл жидкости из емкости 8, переводят ротор в исходное положение и повторяют эксперимент. Добиваются такой массы груза 8, при которой происходит уверенное перемещение ротора на заданный угол, записывают показания цифрового отсчетного устройства динамометра.

Выполняют серии измерений, изменяя значения амплитуды тока в обмотках индуктора в диапазоне 60% – 110% от номинального, после чего устанавливают номинальную амплитуду токов, включают ДЭМД в режиме замкнутого управления и повторяют эксперимент. Результаты испытаний представлены в таблице 3.3 и графически на рис. 4.

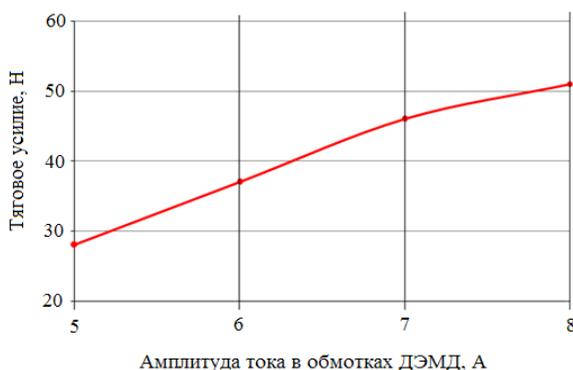


Рис.4. Зависимость тягового усилия ДЭМД от амплитуды тока в обмотках в режиме разомкнутого управления

Определение приемистости пуска и максимальной величины ускорения ДЭМД проведено косвенно, на основе информации о скорости и ускорении бегущего электромагнитного поля в соответствии со следующим допущением: в ДЭМД, являющемся вентильной электрической машиной положение ротора однозначно определяется положением бегущего электромагнитного поля индуктора. Таким образом, зная скорость и ускорение электро-магнитного поля можно однозначно определить скорость и ускорение подвижной части ДЭМД.

Для получения зависимости ускорения подвижной части ДЭМД от амплитуды тока в обмотках дуговой ротор устанавливают в одно из крайних положений, подают ток в обмотки индуктора равный 30% от номинального.

Задают скорость перемещения ротора 500 мм/с, ускорение — 1 м/с^2 . Производят перемещение ротора на 50° в другое крайнее положение, при этом визуально контролируя перемещение ротора. В случае если ротор переместился на заданный угол, увеличивают значение ускорения электромагнитного поля на $0,5\text{ м/с}^2$ и перемещают ротор в исходное положение. Увеличивают значение ускорения бегущего электромагнитного поля индуктора до тех пор, пока не произойдет проскальзывание ротора в процессе разгона относительно бегущего поля. Последовательно уменьшая величину ускорения поля на $0,05\text{ м/с}^2$, определяют значение, при котором ротор уверенно перемещается на заданный угол. Выполняют перемещение ротора при данном значении ускорения не менее 10 раз, и в случае, если проскальзывания ротора относительно поля не произошло, фиксируют полученное значение ускорения, после чего увеличивают амплитуду тока в обмотках на 10-15% и повторяют эксперимент. Выполняют серию измерений для значений токов в обмотках в диапазоне 30–110% от номинального, после чего устанавливают номинальную амплитуду токов, включают ДЭМД в режиме замкнутого управления и повторяют эксперимент.

Результаты испытаний представлены в таблице 3 и на рис. 5. Слабая зависимость максимального ускорения a_{max} ротора ДЭМД от амплитуды тока в обмотках (рис. 5) в режиме холостого хода обусловлена малой инерциальной массой подвижной части.

Для определения максимального ускорения, развиваемого ДЭМД при выполнении работы по перемещению полезной массы при номинальном токе на роторе ДЭМД размещают груз, массой 1 кг. В соответствии с методикой, описанной выше, определяют максимальную величину ускорения подвижной части ДЭМД при перемещении груза массой 1 кг при разомкнутом и замкнутом режиме управления. Фиксируют полученное значение, после чего увеличивают массу груза на 0,5 кг. Повторяют эксперимент для различных масс в диапазоне 1 – 5 кг. Результаты исследований представлены графически на рис. 6, кривая 1 характеризует разомкнутый режим управления, кривая 2 — замкнутый

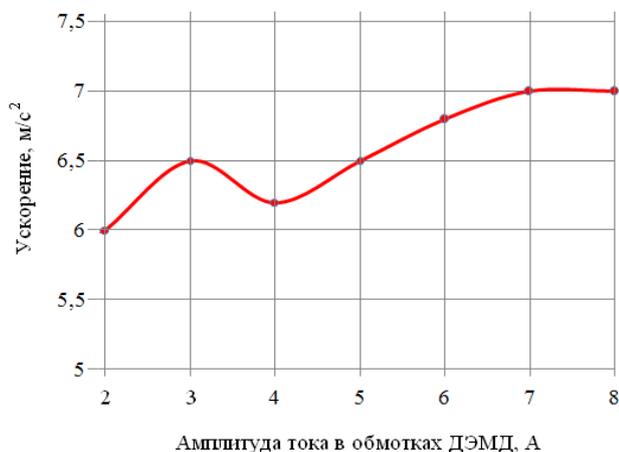


Рис. 5. Зависимость максимального ускорения подвижной части ДЭМД от амплитуды тока в обмотках при холостом ходе

Результаты, полученные в ходе исследований силомоментных характеристик ДЭМД с опорами скольжения для замкнутого и разомкнутого режимов управления при номинальном токе представлены в таблице 3.

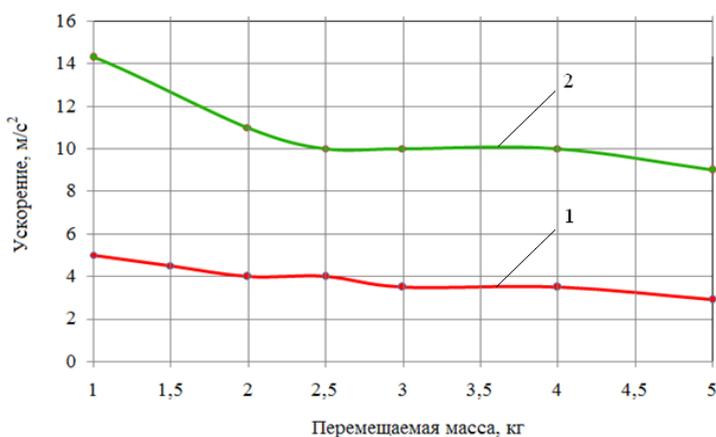


Рис. 6. Зависимость предельного ускорения ДЭМД от массы перемещаемого груза в режиме замкнутого и разомкнутого управления

4.2.2. Точностные характеристики ДЭМД с опорами скольжения при его работе в режимах разомкнутого и замкнутого управления.

В ходе эксперимента исследовались точность выхода подвижного элемента ДЭМД в заданную позицию Δ и повторяемость перемещения λ на холостом ходу и под нагрузкой в режиме разомкнутого и замкнутого управления.

Под точностью перемещения рабочего органа в пространстве в общем случае понимают степень совпадения реального положения РО при выходе в заданную точку, измеренного при помощи измерительной системы с истинным положением этой точки в пространстве

Повторяемость перемещения — диапазон значений положений, достигнутых РО при его неоднократном перемещении в одну и ту же позицию при одних и тех же условиях. Различают однонаправленную повторяемость, когда перемещение РО в заданную позицию осуществляется с одного направления и двунаправленную — при перемещении РО с двух направлений.

В качестве средства измерения точностных характеристик использована штатная измерительная система ДЭМД на основе инкрементального датчика положения *SIKOLE100-0007*, включающая в себя считывающее устройство 1 (рис. 7), расположенное неподвижно на индукторе 2 и магнитную ленту 3, наклеенную на роторе 4 ДЭМД. Система имеет следующие основные характеристики:

тип системы:	магнитная бесконтактная;
тип выходного сигнала:	синусно-косинусный аналоговый;
точность измерения, мкм	1;
разрешающая способность, мкм	0,1 (определяется СУ);
повторяемость результатов, мкм	1.

Для измерения точности и повторяемости перемещения в разомкнутом режиме управления командой *FX2* производят фиксацию привода, установив предварительно номинальный ток в обмотках ДЭМД. Измерения производятся при различных скоростях перемещения ротора, изначально, командой *FA* скорость задается на уровне 30 мм/с, ускорение — 1 м/с. Команда системы управления *PAx* задает перемещение рабочего органа в точку с абсолютным значением, относительно начала координат, установленным параметром *x*. Начало координат задается предварительно, и привязывается либо к началу периода магнитной ленты измерительной системы, либо к одной из концевых меток.

После того как привод отработал заданное перемещение производят опрос измерительной системы командой *DR*. Данная команда возвращает значение текущего положения рабочего органа в микрометрах. Далее переводят РО ДЭМД в исходное положение. Выполняют не менее 20 повторных измерений, после чего командой *FA* изменяют скорость перемещения ротора и повторяют эксперимент.

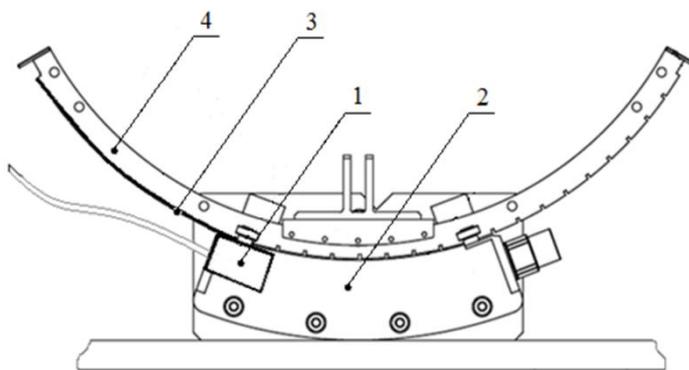


Рис. 7. Схема исследования точностных характеристик ДЭМД в режиме холостого хода

На рис. 8 представлены результаты проведенных измерений точности и повторяемости перемещения РО для трех различных скоростей движения: 30 мм/с, 100 мм/с и 300 мм/с. Точки X_1, X_2, X_3 соответствуют заданному положению ротора, точки X'_1, X'_2, X'_3 — математическому ожиданию реального положения подвижной части ДЭМД после перемещения в заданную точку со скоростью 30, 100 и 300 мм/с соответственно. $\Delta_{x.x.1}, \Delta_{x.x.2}, \Delta_{x.x.3}$ — точность, $\lambda_{x.x.1}, \lambda_{x.x.2}, \lambda_{x.x.3}$ — повторяемость перемещения рабочего органа для трех различных скоростей движения.

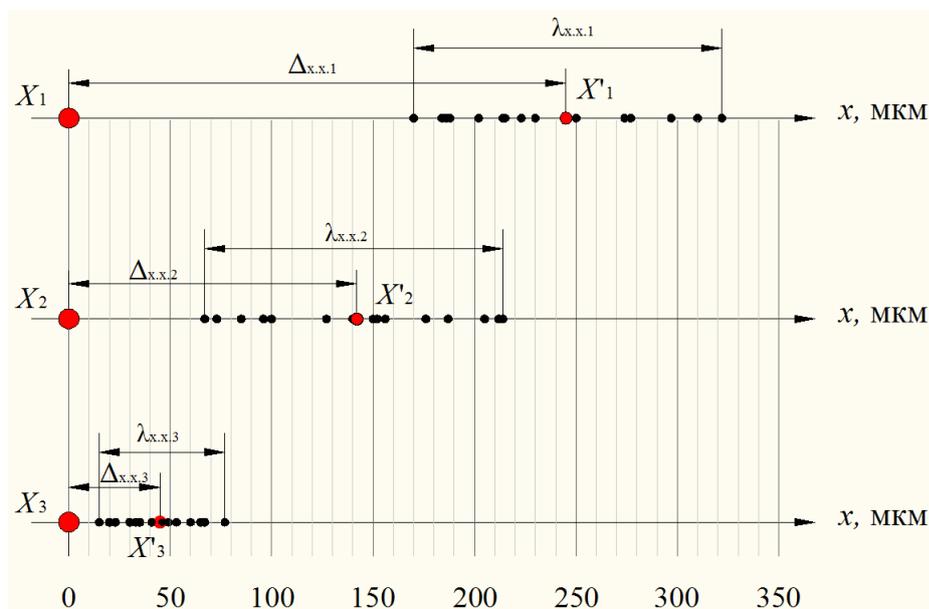


Рис. 8 Точность и повторяемость перемещения ротора ДЭМД в режиме холостого хода при разомкнутом управлении.

Точность и повторяемость перемещения при переводе в угловую меру определится:

$$\Delta_{\alpha} = \frac{360 \cdot X}{\pi \cdot D}, \quad (1)$$

где X – линейное значение точности или повторяемости, D – диаметр ротора.

Исследование точностных характеристик ДЭМД в режиме холостого хода при замкнутом управлении проводится по описанной выше методике, результаты исследований приведены в табл. 4.

Для исследования ДЭМД под нагрузкой его устанавливают в рабочее положение (рис.9), на ротор 1 при помощи штатного кронштейна 2 закрепляют груз 3 массой 1,5 кг. Проводят серию измерений по описанной выше методике, затем увеличивают массу груза до 5 кг и повторяют эксперимент.

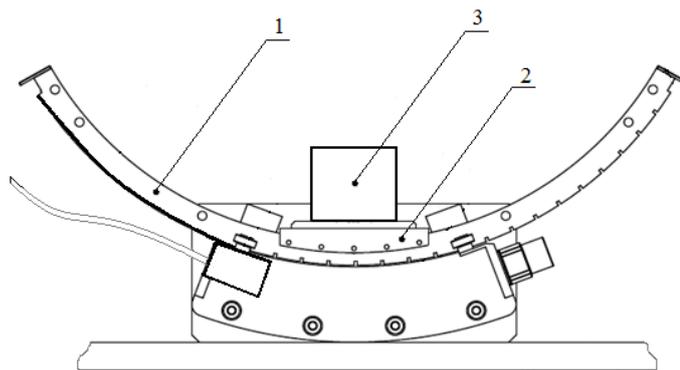


Рис. 9. Схема испытания точностных характеристик ДЭМД под нагрузкой

В результате анализа данных (табл. 4), полученных в ходе экспериментальных исследований точностных характеристик ДЭМД с опорами скольжения установлено следующее:

- высокие точностные характеристики ДЭМД с опорами скольжения можно получить только в режиме замкнутого управления, когда положение механического вектора определяется на основе информации с датчика положения;

- в режиме разомкнутого управления точность и повторяемость обработки ДЭМД управляющих сигналов резко снижается с понижением скорости. Это связано с повышенным статическим коэффициентом трения в опорах скольжения, в результате которого на малых скоростях ротор движется скачками, в связи с этим также затруднена обработка малых перемещений; Устранение данного эффекта без обеспечения замкнутого управления возможно путем применения направляющих с малым значением статического коэффициента трения;

- при работе ДЭМД под нагрузкой в режиме разомкнутого управления при увеличении скорости снижается точность позиционирования РО при практически неизменной повторяемости перемещения вследствие повышения инерционности РО.

Таблица 4

Точностные характеристики ДЭМД с опорами скольжения при работе в режиме холостого хода и под нагрузкой

Характеристика	Скорость перемещения РО, мм/с	Масса груза, кг	Значение ошибки	
			В линейной мере	В угловой мере
Разомкнутый режим управления				
Точность перемещения, мкм	30	х.х.	245 мкм	3.35'
		1,5	220 мкм	3.00'
		5	185 мкм	2.52'
	100	х.х.	140 мкм	1.91'
		1,5	135 мкм	1.84'
		5	160 мкм	2.18'
Повторяемость перемещения, мкм	30	х.х.	150 мкм	2.10'
		1,5	155 мкм	2.12'
		5	125 мкм	1.70'
	100	х.х.	145 мкм	2.00'
		1,5	140 мкм	1.91'
		5	145 мкм	2.00'
Замкнутый режим управления				
Точность перемещения, мкм	30	х.х.	3.2 мкм	2.69"
		1,5	4.0 мкм	3.27"
		5	3.8 мкм	3.11"
	100	х.х.	2.8 мкм	2.29"
		1,5	3.1 мкм	2.53"
		5	4.6 мкм	3.76"
Повторяемость перемещения, мкм	30	х.х.	1.0 мкм	0.82"
		1,5	1.5 мкм	1.23"
		5	1.8 мкм	1.47"
	100	х.х.	1.2 мкм	0.98"
		1,5	1.2 мкм	0.98"
		5	1.4 мкм	1.15"

4.2.3. Определение динамических характеристик ЭМС.

Исследование устойчивости одноиндукторных модулей движения. Перемещение подвижных частей ЭМД в пространстве может происходить с

регулярными и нерегулярными возвратно-поступательными и возвратно-угловыми движениями. Кроме того, МЭСД может быть установлен на подвижном объекте, например, на судне, дистанционно управляемом самоходном шасси, движущихся по пересеченной местности и т.п., тогда на него, на его составные части воздействует качка, вибрационные и ударные возмущения, обусловленные внешней технологической средой, а также силы тяжести. Поэтому, для нейтрализации возмущающих воздействий и организации рациональной технологической среды, необходимо знать качественные показатели функционального автомата. Для рассмотрения действия внешних механических возмущений воспользуемся наиболее распространенным видом возмущающих воздействий – качкой.

Нерегулярная качка рассматривается обычно как стационарный случайный процесс и для ее угла принимается корреляционная функция и спектральная плотность

$$R_{\theta}(\tau) = Q_{ck}^2 e^{-\mu/|\tau|} (\cos \lambda|\tau| + \mu/\lambda \sin \lambda|\tau|), \quad (2)$$

$$S_{\theta}(\omega) = 4\mu\theta_{ck}^2(\lambda^2 + \mu^2) / [(\lambda^2 + \mu^2 + \omega^2)^2 - 4\lambda^2\omega^2],$$

Если математическое ожидание угла качки равно нулю, дисперсия этого угла – θ_{ck}^2 , а μ и λ – коэффициент нерегулярности и преобладающая частота качки [1].

В данной работе рассматривается преимущественно регулярная качка, так как исследования и расчеты показывают, что для сферических электромеханизмов она соответствует тем же или более тяжелым режимам, по сравнению с нерегулярной при тех же значениях дисперсий углов, скоростей и ускорений. Кроме того, параметры случайной качки в действительности не остаются постоянными, а могут сами меняться.

Характеристики регулярной качки при расчете манипулятора практически всегда заранее известны в определенном диапазоне, должна быть задана наибольшая возможная частота качки $\omega_{км}$. Что касается наибольших амплитуд угла θ_m , скорости $d\theta_m/dt$ и ускорения $d^2\theta_m/dt^2$ качки, то они также должны быть заданы, но в общем случае их совокупность может быть задана в функции частоты качки $\omega \leq \omega_{км}$. Возможный вариант дан в [1]. Пусть во всех случаях здесь наибольшая амплитуда ускорения $d^2\theta/dt^2$ одна и та же. Зависимость 1 представляет амплитуду качки, а зависимость 2 – амплитуду скорости качки в функции ω ; θ_{mo} и $d\theta_{mo}/dt$ – некоторые значения амплитуд угла и скорости качки, соответствующие при каждом значении ω заданной величине $d^2\theta_m/dt^2$. Зависимости 1 и 2 определяются соотношениями

$$20 \lg \theta_m / \theta_{mo} = 20 \lg [(d^2 \theta_m / dt^2) / \omega^2 \theta_{mo}], \quad \omega \geq \omega_1$$

$$20 \lg [(d\theta_m / dt) / (d\theta_{mo} / dt)] = 20 \lg [(d^2 \theta_m / dt^2) / (\omega d\theta_{mo} / dt)], \quad \omega \geq \omega_2;$$

$$\omega_1 = \sqrt{(d^2 \theta / dt^2) / \theta_{mнаиб}}, \quad \omega_2 = (d^2 \theta_m / dt^2) / (d\theta_{mнаиб} / dt), \quad (3)$$

если заданы также наибольшие возможные амплитуды угла $\theta_{mнаиб}$ и скорости $d\theta_{mнаиб}/dt$ качки.

Существенным фактором, вызывающим возмущающие воздействия, является неуравновешенность для поступательно движущихся частей и несбалансированность для сферических электромеханизмов МЭМ. Несбалансированность обусловлена тем, что практически центр тяжести системы всегда смещен относительно осей электромеханизма, кинематика которого аналогична кинематике кардановых подвесов стабилизируемых платформ [1]. Кстати, МЭМ с сферическим электромеханизмом может выполнять задачу

стабилизации по положению технологических приспособлений, инструмента и т.п. с помощью специальной программы управления или гироскопов. Величина смещения, как и обусловленный им момент дисбаланса, практически для любой конструкции трудно поддается расчету. Практически при балансировке системы не удается выявить момент небаланса, меньший момента трения, поэтому максимальный момент дисбаланса относительно каждой оси подвеса может достигать величины

$$M_{неб} = M_{трmax} + \Delta M_{тр}(4)$$

Кроме этого момента, несбалансированностью обусловлены инерционные элементы, возмущающие МЭМ при воздействии на него ускорений. Составляющая инерционного момента относительно рассматриваемой оси электромеханизма равна

$$M_{ин} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{a}) \mathbf{x}_i, \quad (5)$$

где m – масса манипулятора или его подвижных частей; \mathbf{a} – линейное ускорение; \mathbf{r} – радиус-вектор центра тяжести системы относительно точки на рассматриваемой оси электромеханизма.

Очевидно, что если g – кажущее ускорение тяготения в условиях в которых изменен момент небаланса, то составляющая этого момента относительно данной оси равна

$$M_{неб} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{g}) \mathbf{x}_i. \quad (6)$$

Если \mathbf{r}^0 – единичный вектор направления \mathbf{r} , то следует

$$M_{ин} = M_{неб} g^{-1} (\mathbf{r}^0 \times \mathbf{a}) \mathbf{x}_i. (7)$$

Здесь исключено неизвестное обычно значение смещения центра тяжести; направление \mathbf{r}^0 должно, как правило, избираться наихудшему случаю. Имеется ввиду, что вездь входят все ускорения, действующие на МЭМ, включая суммарное ускорение качки и орбитального движения МЭМ или его составных частей. В частности, для составляющей ускорения \mathbf{a} , равной нормальному ускорению $\Omega^2 \mathbf{R}$ криволинейного движения с угловой скоростью Ω , где \mathbf{R} – радиус-вектор, соединяющий центр тяжести манипулятора или его подвижных частей с мгновенным центром этого движения.

$$M_{ин} = M_{неб} \Omega^2 g^{-1} (\mathbf{r}^0 \times \mathbf{R}) \mathbf{x}_i. (8)$$

Подобным движением может, например, являться орбитальное движение. Пусть здесь $\Omega = \Omega_m \sin vt$, тогда уравнение орбитального движение может иметь вид

$$M_{ин} = M_{ин m} \sin^2 vt = 1/2 M_{ин m} (1 - \cos 2vt), \quad (9)$$

где $M_{ин m} = M_{неб} \Omega_m^2 R / g$, т.е. создается постоянный возмущающий момент и момент с частотой $2v$. Отметим, что для нерегулярного орбитального движения МЭСД или его составных частей обычно принимаются [1] характеристики как для нерегулярной качки. Однако значения параметров вероятностных характеристик качки и орбитального движения взаимно не связаны.

Необходимо учесть, что рассмотренные возмущения, связанные с несбалансированностью, обусловлены смещением центра тяжести системы не только

статическим, но и динамическим, т.е. также из-за упругих деформаций конструкции под действием инерционных сил.

На МЭМ воздействуют линейные и угловые вибрации. Обычно их целесообразно описывать гармоническим законом, поскольку частоты высших гармоник практически отфильтровываются МЭМ. Частоты и амплитуды вибраций обычно известны весьма приближенно, причем они изменяются в зависимости от условий работы манипулятора и условий эксплуатации. Наконец, возможен случай, когда ускорение линейных вибраций может быть представлено в функции их частот ω [1].

Здесь a_m – амплитуда ускорений вибраций, а g – ускорение земного тяготения; ω – может изменяться в широких пределах. При $\omega \leq \omega_1$ примерно постоянная амплитуда вибраций θ_m° , здесь амплитуда ускорения вибраций, близких к гармоническим $a_m = d^2 \theta_m^{\circ} / dt^2 = \omega^2 \theta_m^{\circ}$, пропорциональна квадрату частоты. При $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ примерно постоянна амплитуда скорости вибраций $d\theta_m^{\circ} / dt$, тогда амплитуда ускорения вибраций $a_m = d^2 \theta_m^{\circ} / dt^2 = \omega d\theta_m^{\circ} / dt$ пропорциональна частоте. Наиболее тяжелым режимом являются обычно вибрации с частотами, близкими к резонансным частотам МЭСД. Рассмотрим качественные показатели МЭСД, определяющие динамику, на основе которых может проводиться его динамический синтез с использованием частотных методов. К ним будем относить наибольшие допустимые значения обобщенных координат и качество процессов регулирования. Их подразделяют на две группы: оценки точности и оценки запасов устойчивости (последние при использовании частотных методов отображают качество процессов регулирования). Такое разделение качественных показателей системы регулирования удобно при использовании частотных методов динамического синтеза привода манипуляторов. В МЭСД условия, накладываемые на передаточные функции системы, должны сводиться не только к оценке точностей; должны быть ограничения обобщенных координат, непосредственно не характеризующих точность МЭСД, но определяющих возможность его функционирования.

К таким координатам относятся: реакции в опорах осей подвижных частей МЭСД, изменения углов их разворота, взаимное влияние осей МЭСД и др. Поэтому в дополнение к рассматриваемым обычно оценкам точности необходимо использовать и другие оценки, связанные с общим представлением о допустимых наибольших значениях ряда обобщенных координат, включающих в себя ограничение погрешностей. Для этого во всех частотных диапазонах требуемые передаточные функции определяются ограничениями ряда обобщенных координат, а в области высоких частот – частотными критериями – в общем случае используется степень колебательности, в частных случаях – показатель колебательности [1].

Оценка качества одноиндукторных модулей движения по параметру неуравновешенности. В синтезированном ЭМСД имеется следующая совокупность элементов и узлов: датчики угловых перемещений, скоростей и ускорений, усилители, преобразователи и вычислители сигналов управления, моментные электродвигатели, совмещенные с рабочим органом. При исследовании динамики ЭППД он не может быть отделен от объекта управления, так как динамика большинства автоматических устройств, таких как манипуляторы роботов, достаточно сложна. Степень, а иногда и показатель колебательности, позволяют наиболее точно оценить качество процессов во временной области в случае процессов со сравнительно высокой колебательностью. В связи с этим при синтезе ЭППД, особенно многокоординатного, необходимые степени или показатели колебательности задаются на основе требуемой динамики автоматического устройства, в первую очередь, на основе допустимого числа колебаний процесса управления.

В синтезированном ЭМСД с уравниванием поступательно движущихся масс, в зависимости от степени уравнивания будут возникать (под действием

внешних возмущений, а также движущих электромагнитных сил) колебания звеньев электромеханической части.- Колебания будут влиять на точность обработки рабочего органа автоматического устройства, а в предельных случаях на работоспособность. Оценка качества уравнивания, а на этой основе и качества регулирования по параметрам неуравновешенности (небаланса) является важной характеристикой ЭМД. Оценку проведем на основе полученного выражения периода свободных колебаний элементов уравновешенного прямого электропривода. Так как усилия на качке, при вибрации переменны по величине и направлению, то результирующая сила, действующая на элементы электропривода, будет иметь разброс значений в некотором диапазоне. Это существенно влияет на стабильность динамических характеристик электропривода, так как период свободных колебаний элементов привода будет принимать различные значения. При некоторых из них электропривод может быть неустойчивым. Исследуем свободные колебания электропривода и его элементов при различной остаточной неуравновешенности для конкретных устройств, построенных в соответствии со структурой на с. 99 в работе [1].

Пример 1. Двухкоординатный модуль движения. Масса поступательно движущихся элементов уравновешенного линейного электропривода по одной координате $m_{лд} + m_{уп} = 0,6 \text{ кгс}^2/\text{м}$. Условия эксплуатации – гармонические вибрации основания, частота $\omega_m = 20 \text{ с}^{-1}$, амплитуда $A_{Вм} = 0,6 \text{ мм}$. Электромагнитное усилие F_m ЭМД при токах управления $I_H = 2,56 \text{ А}; 3,7 \text{ А}; 4,7 \text{ А}; 5,5 \text{ А}$ соответственно равно: $0,9 \text{ кг}; 1,75 \text{ кг}; 2,82 \text{ кг}; 3,9 \text{ кг}$.

Результаты вычислений приведены в табл. 5, на рис. 10 представлены зависимости $T = f(\delta m)$.

Таблица 5

$\Delta m, \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$	0,235	0,17	0,104	0,096	0,065	0,033	0,02	0,01	0,0053	0
$m_{лд} + m_{уп}, \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$	0,365	0,43	0,496	0,504	0,535	0,567	0,58	0,59	0,5947	0,6
δm	0,64	0,39	0,21	0,19	0,12	0,058	0,035	0,017	0,009	0
$\Delta m \omega_m^2 A_{Вм}, \text{ кг}$	2,21	1,59	0,98	0,90	0,61	0,307	0,192	0,096	0,05	0
$F_{Ав}, \text{ кг} (+)$	3,11	2,499	1,88	1,80	1,51	1,207	1,092	0,996	0,95	0,99
$J_H = 2,85 \text{ А} (-)$	-1,31	-0,69	-0,08	0	0,29	0,593	0,708	0,804	0,85	0,9
$T, \text{ с} (+)$	0,0108	0,013	0,016	0,017	0,019	0,0217	0,023	0,0243	0,025	0,0258
$T, \text{ с} (-)$	0,0167	0,025	0,077		0,043	0,0309	0,0286	0,0271	0,0264	
$F_{Ав}, \text{ кг} (+)$	3,96	3,5	3,34	2,73	2,36	2,057	1,942	1,846	1,8	1,75
$J_H = 3,7 \text{ А} (-)$	-0,46	0	0,16	0,77	1,14	1,443	1,558	1,654	1,7	
$T, \text{ с} (+)$	0,0096	0,0109	0,0113	0,0135	0,015	0,0166	0,0173	0,0179	0,0182	0,0185
$T, \text{ с} (-)$	0,028		0,052	0,0254	0,022	0,0198	0,0193	0,0188	0,0187	
$F_{Ав}, \text{ кг} (+)$	5,03	4,41	3,8	3,72	3,43	3,127	3,012	2,916	2,87	2,82
$J_H = 4,7 \text{ А} (-)$	0,61	1,23	1,84	1,92	2,21	2,513	2,628	2,724	2,77	

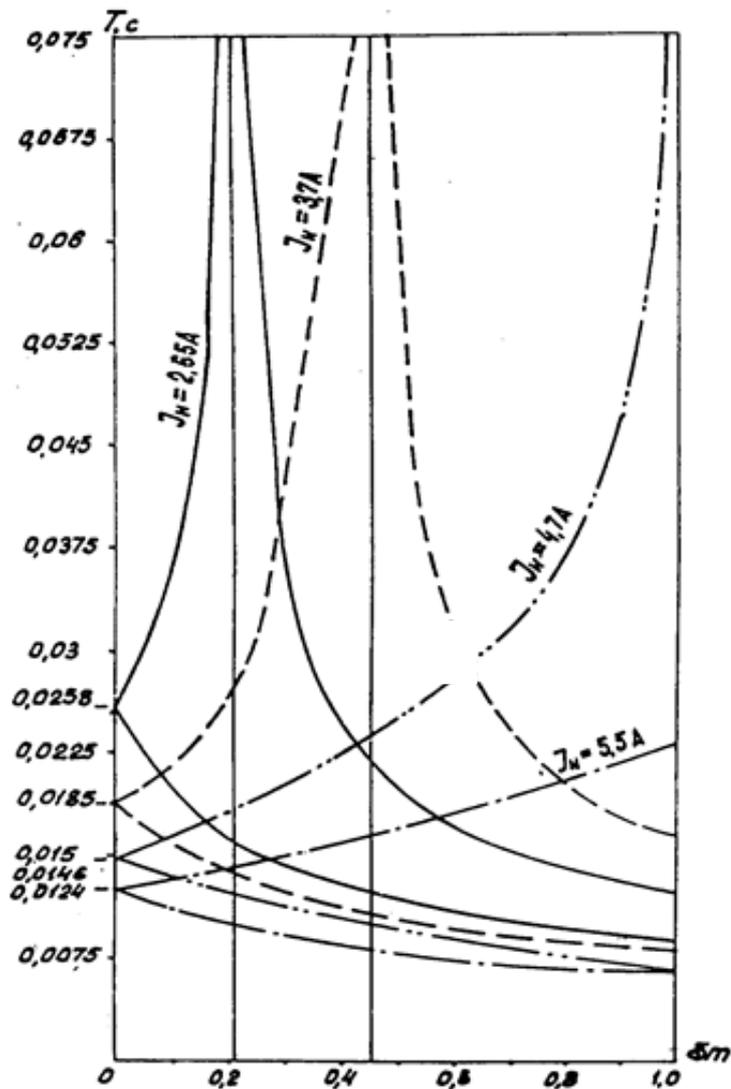


Рис.10. Зависимость $T=f(\delta m)$

Пример 2. Двухкоординатное крайбирующее устройство. Масса поступательно движущихся элементов уравновешенного линейного электропривода по одной координате $m_{лд} + m_{ур} = 0,0306 \text{ кгс}^2/\text{м}$. Условия эксплуатации – гармоническая вибрация основания, частота $\omega_m = 20 \text{ с}^{-1}$, амплитуда $A_{Bm} = 0,6 \text{ мм}$. Электромагнитное движущее усилие ЭМД $F_m = 0,2 \text{ кг}$.

Результаты вычислений приведены в табл. 6.

Таблица 6.

$\Delta m, \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$	0,0122	0,0091	0,0071	0,0051	0,0031	0,0015	0,001	0,0007	0,0003	0
$m_{лд} + m_{ур}, \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$	0,0184	0,0214	0,0235	0,0255	0,0276	0,029	0,0296	0,0299	0,03	0,0306
δm	0,67	0,43	0,3	0,2	0,11	0,053	0,034	0,024	0,01	0
$\Delta m \omega_m^2 A_{Bm}^2, \text{ кг}$	0,115	0,086	0,067	0,048	0,029	0,0144	0,2096	0,2067	0,0029	0
$F_{AB}, \text{ кг}$	(+) 0,315 (-) -0,085	0,286 0,114	0,267 0,133	0,248 0,152	0,229 0,171	0,2144 0,1856	0,2096 0,1904	0,2067 0,1933	0,2029 0,1971	0,2
$T, \text{ с}$	(+) 0,0038 (-) 0,0074	0,0043 0,0068	0,0047 0,0066		0,0055 0,0063		0,0059 0,0062			0,00616

Из зависимостей $T = f(\delta m)$ (рис. 10) видно, что с уменьшением δm сужается диапазон разброса значений T , в случае противоположного направления электромагнитных и инерционных сил, период T стремится к бесконечности. Компенсирующее звено синтезированной структуры описывается уравнением, где δm – коэффициент передачи, равный относительной остаточной неуравновешенности

$$X_{вых}(t) = \delta m X_{вх}(t), \quad (10)$$

Период свободных колебаний элементов электропривода может быть критерием оценки степени уравнивания, его целесообразно использовать в расчетах элементов конструкций манипулятора для определения предельных физических размеров манипуляционной системы автоматизированной системы (комплекса).

Передаточная функция разомкнутой системы по управляющему воздействию

$$W(p) = K_1 / p[(T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) + K], \quad (11)$$

где $K_1 = k_1 k_2 / k_E$, $K = k_2 k_4 / k_E$, $k_E = 1 / k_3 k_{PO}$, k_1 – коэффициент передачи чувствительного элемента; k_2 – коэффициент усиления по напряжению; k_3 – коэффициент передачи электродвигателя; k_4 – коэффициент передачи тахогенератора; k_{PO} – коэффициент передачи рабочего органа; T_1 – постоянная времени звена коррекции, представленного апериодическим звеном первого порядка.

Передаточная функция разомкнутой системы по возмущающему воздействию

$$W_F(p) = \delta m (T_1 p + 1) / p[(T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) + K]. \quad (12)$$

Передаточная функция замкнутой системы относительно регулируемой величины

$$\Phi(p) = K_1 / p[(T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) + K] + K_1. \quad (13)$$

Передаточная функция замкнутой системы управления по возмущающему воздействию

$$\Phi_F(p) = \delta m (T_1 p + 1) / p[(T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) + K] + K_1. \quad (14)$$

Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики уравнивающего ЭМСД для приведенных примеров 1 и 2 (со следующими параметрами элементов: $k_1[\text{В мм}^{-1}] = 0,08$, $k_2 = 250$, $k_3[\text{мм В}^{-1} \text{с}^{-1}] = 1,33$, $k_4[\text{В с мм}^{-1}] = 0,002$, $k_{PO} = 1,0$, $\delta m = 0$; 0,009; 0,017; 0,035; 0,042, $T = 0,0258 \text{ с}$, $T_1 = 0,1 \text{ с}$, $\xi = 0,2 \text{ с}$) построены по уравнениям и представлены на рис. 11.

Для оценки качества работы уравнивающего ЭМД особенно важно рассмотреть динамические показатели системы – точность и запасы устойчивости. Для определения величины запаса устойчивости удобно применить частотные критерии, не требующие большого объема вычислений, Эти требования мы рассматриваем в частотной области с применением показателя колебательности. Он характеризуется одним числом, имеющим для достаточно широкого класса систем сравнительно узкие пределы 1,5 – 2,5 [1]. Для того, чтобы оценить влияние остаточной неуравновешенности на запас устойчивости прямого электропривода и достоверно выбрать величину допустимой неуравновешенности, найдем связь показателя колебательности с величиной $\delta m_{ГП}$.

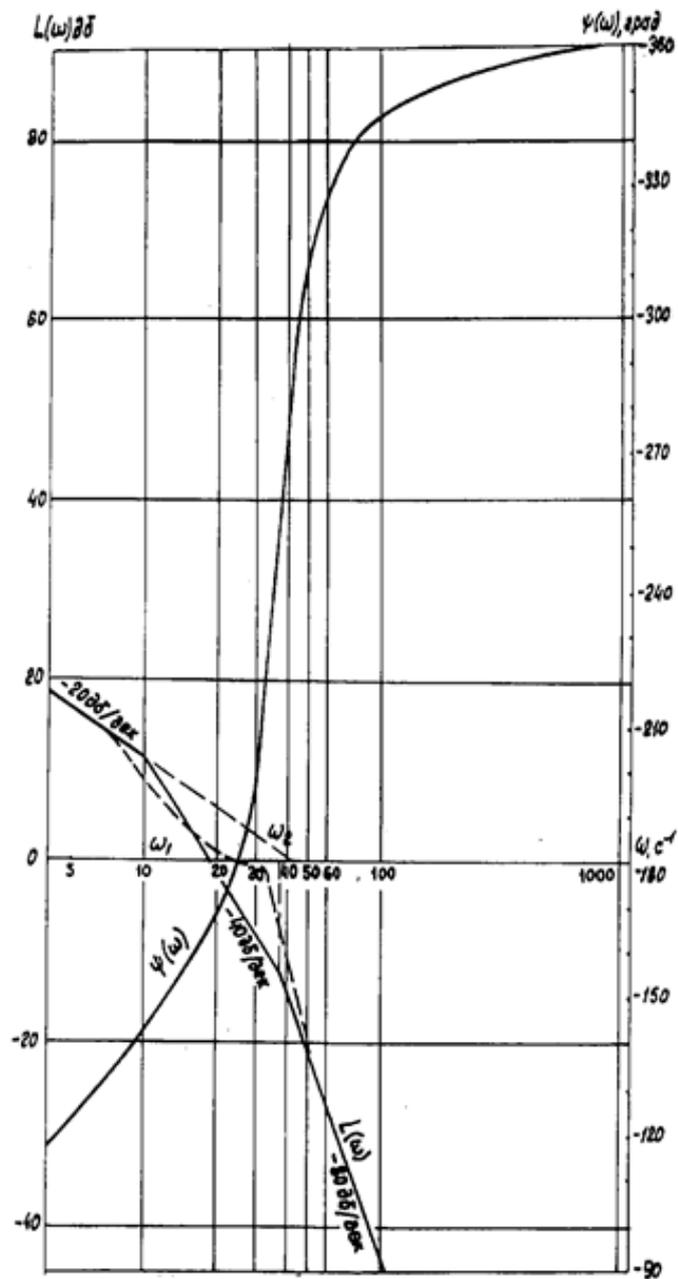


Рис.11. ЛАХ и ЛФХ уравновешенного МЭСД

$$L(\omega) = 20 \lg K_1 / \sqrt{[T_1 T^2 \omega^4 - (2\xi T + T_1) \omega^2]^2 + [(K+1)\omega - (T^2 + 2\xi T_1 T) \omega^3]^2} \quad (15)$$

$$\psi(\omega) = - \arctg [(k+1)\omega - (T^2 + 2\xi T_1 T) \omega^3] / [(T_1 T^2 \omega^4 - (2\xi T + T_1) \omega^2)] \quad (16)$$

Для нахождения показателя колебательности необходимо определить параметры окружности, которой касается амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой следящей системы.

Воспользуемся передаточной функцией разомкнутой следящей системы (11) для нахождения выражений для вещественной и мнимой частотных характеристик системы

$$Re W(j\omega) = K_1 [T_1 T^2 \omega^4 - (2\xi T + T_1) \omega^2] / \sqrt{[(K+1)\omega - (T^2 + 2\xi T_1 T) \omega^3]^2 + [T_1 T^2 \omega^4 - (2\xi T + T_1) \omega^2]^2} \quad (17)$$

$$\operatorname{Im} W(j\omega) = -jK_1[(K+1)\omega - (T^2 + 2\xi T_1 T)\omega^3] / \sqrt{[(K+1)\omega - (T^2 + 2\xi T_1 T)\omega^3]^2 + [\Gamma_1 T^2 \omega^4 - (2\xi T + T_1)\omega^2]^2} \quad (18)$$

В табл. 2.6 сведены значения $\operatorname{Re}W(j\omega)$, $\operatorname{Im}W(j\omega)$ для различных значений постоянной времени цепи Линейный двигатель – рабочий орган У, зависящий от δm (табл.5) при $\xi=0,2$, $T_1 = 0,1$ с, $K_1 = 26,6$, $K = 0,655$.

По их значениям построено семейство амплитудно-фазовых характеристик разомкнутой уравновешенной следящей системы линейного электропривода, изображенных на рис.12.

Для нахождения показателей колебательности необходимо найти окружности, которые касаются соответствующих амплитудно-фазовых характеристик.

Параметры окружностей связаны с показателями колебательности формулами

$$R = M / (M^2 - 1), \quad C = M^2 / (M^2 - 1),$$

где R - радиус окружности, а C - сдвиг центра окружности влево от начала координат. Результаты определения величины M сведены в таблице 7.

При $\delta m_{ГП} = 0$ (что равносильно полному уравниванию) период свободных колебаний элементов уравниваемого прямого электропривода принимает единственное значение, соответственно и показатель колебательности имеет единственное значение. Если же $\delta m_{ГП} \neq 0$, то величина периода в зависимости от направления и величины внешнего возмущения, увеличивается или уменьшается относительно его значений при $\delta m_{ГП} = 0$, т.е. постоянная времени цепи «линейный двигатель – рабочий орган» принимает значения в диапазоне от T_{min} до T_{max} .

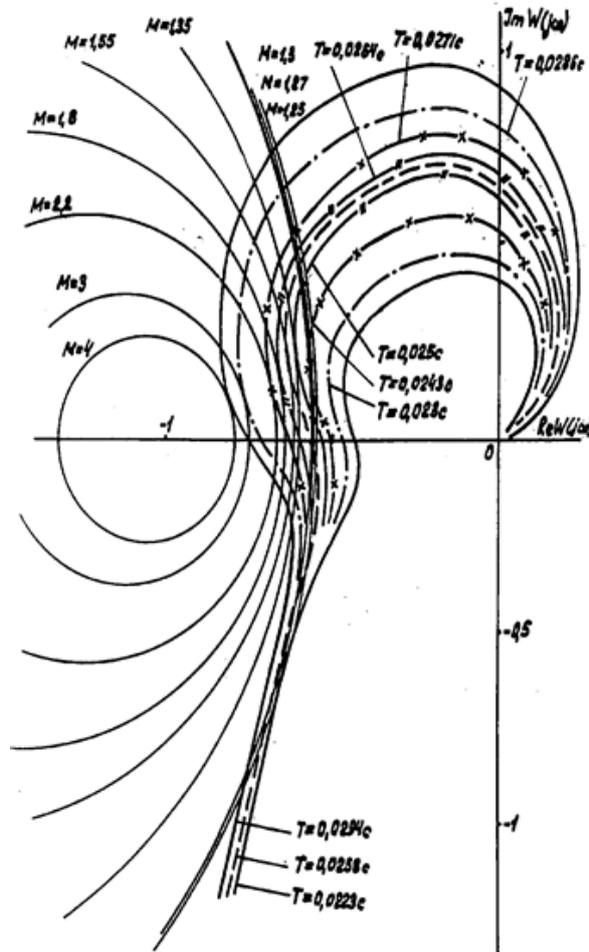


Рис.12. Амплитудно-фазовая характеристика уравниваемого ЭМСД

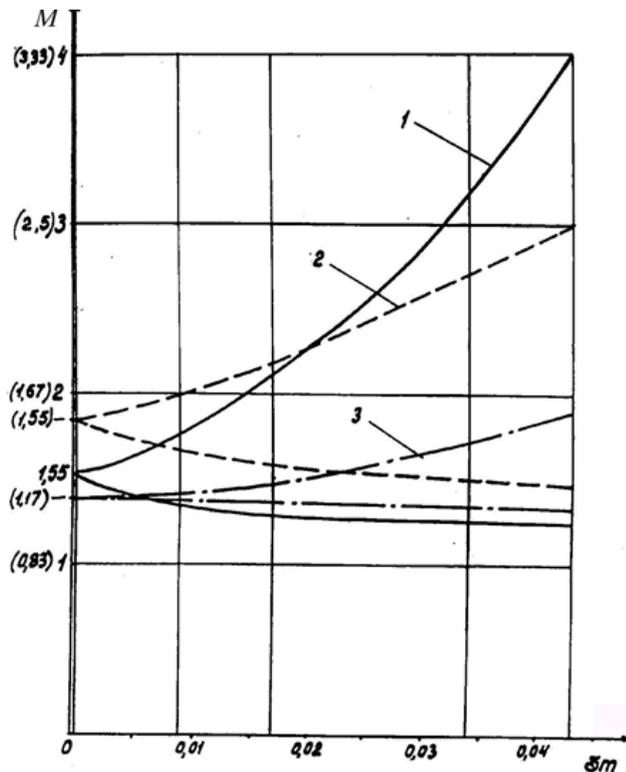


Рис. 13. Зависимость $M=f(\delta m)$

Была рассмотрена связь остаточной неуравновешенности с показателем колебательности для линейного электропривода двухкоординатного механизма с звеном коррекции с периодом $T_1 = 0,1$ с. Рассмотрим зависимость $M = f(\delta m)$ при отсутствии звена коррекции, т.е. $T_1 = 0$.

Электропривод становится менее демпфированным, повысится его колебательность.

Передаточная функция может быть записана в виде

$$W(p) = K_1 / (p(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) + K) = K_1 \sqrt{-2\xi\omega^2 T - j[(K+1)\omega - \omega^3 T^2]} / \sqrt{(2\xi\omega^2 T)^2 + [(K+1)\omega - \omega^3 T^2]^2} \quad (19)$$

Построим амплитудно-фазовые характеристики для этого случая при разных значениях остаточной неуравновешенности. Выражения для вещественной и мнимой характеристик системы имеют вид

$$ReW(j\omega) = -K_1 2\xi\omega^2 T / \sqrt{(2\xi\omega^2 T)^2 + [(K+1)\omega - \omega^3 T^2]^2} \quad (20)$$

$$ImW(j\omega) = -jK_1 \sqrt{[(K+1)\omega - \omega^3 T^2]} / \sqrt{(2\xi\omega^2 T)^2 + [(K+1)\omega - \omega^3 T^2]^2} \quad (21)$$

В табл. 7 сведены $ReW(j\omega)$, $ImW(j\omega)$ для различных значений постоянной времени цепи «линейный двигатель – рабочий орган», зависящий от δm (табл. 5) при $\xi = 0,2$; $K_1 = 19,6$; $K = 0,48$.

По их значениям построено семейство амплитудно-фазовых характеристик ЭПД с $T_1 = 0$; $0,1$ с. Результаты определения показателя колебательности M автоматизированного устройства с ЭПД для обоих случаев сведены в табл. 5.

Представлены кривые 2 и 3 (рис.12) в соответствии со значениями табл. 9. Из них следует, что склонность к колебаниям у системы четвертого порядка ниже, чем у системы третьего порядка. Следовательно, в хорошо демпфированных системах необходимого запаса устойчивости достигают при сравнительно больших величинах остаточной неуравновешенности. Допустимое значение показателя колебательности для большинства автоматизированных устройств принята равной 1,5-2,0, что требует

уравновешивания элементов ЭМСД с точностью до 1%. Практически, сегодняшними техническими средствами, выполнимо уравновешивание элементов ЭМСД с точностью до 0,01%.

Таблица 9

Показатели колебательности уравновешенного линейного электропривода для различных значений δm

$\delta m_{ГП}$	0,042	0,035	0,017	0,009	0
T_{max}	0,0294	0,0286	0,0271	0,0264	
T_{min}	0,0223	0,023	0,0243	0,025	
при $T_I = 0$					
R	2,22 0,48	2,0 0,55	1,78 0,78	1,56 0,94	1,11
C	2,78 1,19	2,57 1,25	2,35 1,43	2,13 1,57	1,72
M	1,25 2,5	1,28 2,25	1,32 1,83	1,37 1,66	1,55
при $T_I = 0,1c$					
R	4,08 1,0	3,8 1,37	3,68 2,4	3,56 2,73	3,17
C	4,61 1,64	4,33 1,96	4,22 2,95	4,09 3,27	3,71
M	1,13 1,6	4,14 1,43	1,145 1,23	1,15 1,2	1,17

4.4. Статистический анализ систем автоматического управления

Материал предназначен для самостоятельного проведения студентами цикла лабораторных работ по курсу «Статистическая динамика систем автоматического управления» на ПЭВМ с использованием программного пакета MATLAB. Такой курс предусмотрен в учебном плане ряда специальностей, связанных с автоматизацией, мехатроникой и робототехникой. Предполагается, что студенты знакомы с основным курсом теории автоматического управления и с теорией вероятностей. Для того чтобы облегчить проведение лабораторных работ, в методических указаниях даны основные соотношения из курса «Статистическая динамика систем автоматического управления», которые используются при статистическом анализе линейных стационарных автоматических систем. Приведено краткое описание возможностей пакета MATLAB 7 для проведения такого анализа.

В пособии даны указания к проведению трех лабораторных работ, объединенных в общий цикл. Вначале нужно построить нормирующий фильтр, позволяющий получить случайный процесс с заданными статистическими характеристиками. Затем провести исследование системы, на вход которой поступают детерминированный сигнал и случайная помеха. Наконец, предлагается исследовать замкнутую систему автоматического регулирования, ко входу которой приложен случайный сигнал, представляющий собой аддитивную смесь полезного случайного сигнала и случайного шума. Описание каждой лабораторной работы сопровождается примерами. Для того чтобы правильно интерпретировать получаемые результаты, мы рекомендуем предварительно выполнить статистическое исследование в аналитической форме с использованием приведенных в материале соотношений. Более подробную информацию о методах статистического анализа автоматических систем и о возможностях пакета MATLAB можно найти в литературе, список которой приведен в конце УМП [1 - 4].

4.4.1. Основные математические соотношения, используемые при статистическом анализе автоматических систем

Характеристики случайных процессов. Основными характеристиками случайных величин являются функция распределения вероятности и плотность распределения вероятности. Функция распределения случайной величины ξ , принимающей любые вещественные значения, определяется соотношением

$$F_{\xi}(x) = P\{\xi < x\} \quad (1)$$

и представляет собой вероятность того, что случайная величина ξ принимает значения, меньшие заданного значения x .

Плотность распределения вероятности случайной величины ξ может быть определена по функции распределения вероятности с использованием формулы

$$(2) \quad p_{\xi}(x) = \frac{dF_{\xi}(x)}{dx}.$$

Случайный процесс определяется множеством случайных реализаций $\xi(t), 0 \leq t \leq T$. Фиксируя произвольным образом моменты времени $t_i, i = 1, 2, \dots, N$, можно получить N -мерную случайную величину $\xi = [\xi(t_1), \xi(t_2), \dots, \xi(t_N)]$ т.е. случайный вектор, компонентами которого являются случайные величины, представляющие собой значения реализаций $\xi(t)$ в дискретные моменты времени. Таким образом, случайный процесс характеризуется множеством функций распределения вероятности, определяющих векторную случайную величину $\xi(t)$:

$$F_{\xi k}(x_1, x_2, \dots, x_k, t_1, t_2, \dots, t_k) = P\{\xi(t_1) < x_1, \xi(t_2) < x_2, \dots, \xi(t_k) < x_k\}, \quad (3)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$ или соответствующим множеством плотностей распределения вероятности:

$$p_{\xi k}(x_1, x_2, \dots, x_k, t_1, t_2, \dots, t_k) = \frac{\partial^k}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_k} F_{\xi k}(x_1, x_2, \dots, x_k, t_1, t_2, \dots, t_k), \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$.

Используя плотности распределения вероятности, можно определить моменты различного порядка для случайного процесса $\xi(t)$. Наиболее часто применяют начальный момент первого порядка (математическое ожидание):

$$m_{\xi}(t) = M\{\xi(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x p_{\xi 1}(x, t) dx \quad (5)$$

и центральный момент второго порядка (корреляционную (автокорреляционную) функцию):

$$K_{\xi}(t_1, t_2) = M\{\overset{\circ}{\xi}(t_1) \overset{\circ}{\xi}(t_2)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - m_{\xi}(t_1))(x_2 - m_{\xi}(t_2)) p_{\xi 2}(x_1, x_2, t_1, t_2) dx_1 dx_2. \quad (6)$$

Из последнего выражения можно также найти дисперсию случайного процесса:

$$D_{\xi}(t) = M\{\overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\xi}(t)\}. \quad (7)$$

Взаимокорреляционную функцию двух случайных процессов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ определяют по формуле

$$\begin{aligned}
K_{\xi\eta}(t_1, t_2) &= M\{\xi(t_1)\eta(t_2)\} = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - m_{\xi}(t_1))(x_2 - m_{\xi}(t_2)) p_{\xi\eta^2}(x_1, x_2, t_1, t_2) dx_1 dx_2. \quad (8)
\end{aligned}$$

Напомним, что случайный процесс $\xi(t)$ называется стационарным (в широком смысле), если его математическое ожидание постоянно, а корреляционная функция зависит только от разности аргументов:

$$m_{\xi}(t) = m_{\xi} = \text{const}, \quad (9)$$

$$K_{\xi}(t_1, t_2) = K_{\xi}(t_1 - t_2) = K_{\xi}(\tau). \quad (10)$$

Для стационарных процессов можно определить спектральную плотность случайного процесса как преобразование Фурье корреляционной функции:

$$S_{\xi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{\xi}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (11)$$

По заданной спектральной плотности можно определить корреляционную функцию:

$$K_{\xi}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\xi}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (12)$$

Из последней формулы следует и выражение для вычисления дисперсии стационарного случайного процесса по его спектральной плотности:

$$D^{\xi} = K^{\xi}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S^{\xi}(\omega) d\omega. \quad (13)$$

При статистической обработке случайных сигналов используются методы и формулы математической статистики.

Пусть на интервале времени $[0, T]$ экспериментально получено n реализаций случайного процесса $\xi(t)$, которые мы обозначим $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Тогда оценка математического ожидания случайного процесса может быть определена по формуле

$$\hat{m}_{\xi}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t). \quad (14)$$

Оценка (14) является несмещенной, т.е. $M\{\hat{m}_{\xi}\} = m_{\xi}$, и состоятельной, поскольку выполняется условие $\lim_{n \rightarrow \infty} D\{\hat{m}_{\xi}\} = 0$.

Вычислив оценку математического ожидания случайного процесса, можно найти оценку его автокорреляционной функции по формуле

$$\hat{K}_{\xi}(t_1, t_2) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i(t_1) - \hat{m}_{\xi}(t_1))(x_i(t_2) - \hat{m}_{\xi}(t_2)). \quad (15)$$

Здесь используется множитель $\frac{1}{n-1}$, а не $\frac{1}{n}$, чтобы обеспечить несмещенность оценки (15). Ее состоятельность, как и состоятельность оценки математического ожидания, можно легко проверить.

Для оценки дисперсии из последней формулы получим:

$$\hat{D}_\xi(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - \hat{m}_\xi(t))^2. \quad (16)$$

При исследовании статистических характеристик стационарных случайных процессов часто применяют эргодическую гипотезу, позволяющую существенно упростить их вычисление. В этом случае вместо усреднения значений множества реализаций в одни и те же моменты времени, как в формулах (14) – (16), усредняют значения одной реализации, взятые в различные моменты времени.

Стационарный процесс называется эргодическим по отношению к математическому ожиданию, если является несмещенной и состоятельной следующая статистическая оценка математического ожидания, определяемая по одной его реализации $x(t)$, измеряемой на интервале времени $[0; T]$:

$$\hat{m}_\xi = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt. \quad (17)$$

Эта оценка является несмещенной и состоятельной, если выполняются условия $M\{\hat{m}_\xi\} = m_\xi$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} D\{\hat{m}_\xi\} = 0$. Нетрудно непосредственно убедиться в несмещенности оценки (17). Для ее состоятельности нужно дополнительно потребовать, чтобы выполнялось условие

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} K_\xi(\tau) = 0. \quad (18)$$

Смысл последнего условия состоит в том, что значения случайных величин $\xi(t_i)$ и $\xi(t_j)$ становятся слабо коррелированными при увеличении временного интервала $(t_j - t_i)$. Для практических расчетов по формуле (17) используют приближенное соотношение

$$\hat{m}_\xi = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N x(t_i). \quad (19)$$

В частности, если интервал $[0; T]$ разбит на N элементарных интервалов длиной $\Delta t = T/N$, то $t_i = i\Delta t$, $i = 0, 1, \dots, N$. Можно также записать, что $N = T/\Delta t = T f_d$, где $f_d = 1/\Delta t$ — частота дискретизации, Гц.

Рассмотрим теперь оценку корреляционной функции стационарного случайного процесса:

$$K_\xi(\tau) = M\{(\xi(t) - \hat{m}_\xi)(\xi(t+\tau) - \hat{m}_\xi)\}. \quad (20)$$

Обозначив $x(t)$ отдельную реализацию случайного процесса и принимая во внимание, что интервал, на котором происходит вычисление оценки корреляционной функции, равен $[0; T - \tau]$, получим следующую формулу для оценки корреляционной функции:

$$\hat{K}_\xi(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} (x(t) - \hat{m}_\xi)(x(t+\tau) - \hat{m}_\xi) dt, \quad (21)$$

или

$$\hat{K}_\xi(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t)x(t+\tau) dt - \hat{m}_\xi^2. \quad (22)$$

Эти оценки являются несмещенными, а для их состоятельности достаточно выполнения условия (18). В этом случае стационарный случайный процесс $\xi(t)$ называется эргодическим по отношению к корреляционной функции. Вычисление корреляционной функции как среднего по множеству в формуле (20) можно приближенно заменить вычислением среднего по времени согласно формуле (21) или (22). В частности, при $\tau = 0$ отсюда можно получить оценку для дисперсии эргодического процесса:

$$\hat{D}_\xi = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \hat{m}_\xi)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt - \hat{m}_\xi^2. \quad (23)$$

На практике оценку корреляционной функции обычно вычисляют по дискретным значениям реализации случайного процесса $\xi(t_i)$. В этом случае вместо (21) используют следующую формулу:

$$\hat{K}_\xi(m) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=0}^{N-m} (x(t_i) - \hat{m}_\xi)(x(t_{i+m}) - \hat{m}_\xi), \quad (24)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots, N$, $N = T/\Delta t = T f_d$.

Из последней формулы при $m = 0$ получим оценку дисперсии и стандартного (среднего квадратического) отклонения:

$$\hat{D}_\xi = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N (x(t_i) - \hat{m}_\xi)^2, \quad \hat{\sigma}_\xi = \sqrt{\hat{D}_\xi}. \quad (25)$$

Определив оценку корреляционной функции, можно вычислить и оценку спектральной плотности (11). С учетом четности корреляционной функции формулу (11) можно переписать в виде

$$S_\xi(\omega) = 2 \int_0^\infty K_\xi(\tau) \cos \omega \tau d\tau.$$

Учитывая, что оценка корреляционной функции (24) получена на интервале $[0; T]$, получим следующую формулу для вычисления оценки спектральной плотности эргодического случайного процесса:

$$\hat{S}_\xi(\omega) = \Delta \tau \hat{K}_\xi(0) + 2 \Delta \tau \sum_{m=1}^N \hat{K}_\xi(m \Delta \tau) \cos \omega m \Delta \tau, \quad (26)$$

где $\Delta \tau = T/N$.

В данном цикле лабораторных работ предполагается, что рассматриваемые случайные процессы являются стационарными и эргодическими. Поэтому их статистические характеристики могут быть определены как по формулам (14) – (16), т. е. путем усреднения по множеству реализаций, так и по формулам (19), (24), (25), предполагающим усреднение по времени, вычисляемое для одной реализации при достаточно большом времени наблюдения.

С учетом условия (18) время наблюдения T выбирают из условия $|\hat{K}_\xi(\tau)| < \varepsilon$ при $\tau > T$, где ε — достаточно малое положительное число по сравнению с $\hat{K}_\xi(\tau)$. Поскольку максимальное значение $\hat{K}_\xi(\tau)$ обычно достигается при $\tau = 0$, то можно выбрать, например, $\varepsilon < 0,05 \hat{K}_\xi(0) = 0,05 \hat{D}_\xi$.

1.2. Определение характеристик стационарного случайного процесса на выходе линейной системы

Рассмотрим линейную систему с постоянными параметрами, на вход которой поступает стационарный случайный процесс $\xi(t)$. Система описывается своей передаточной функцией $W(s)$ (рис. 1).

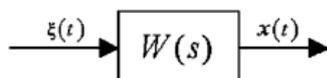


Рис. 1. Линейная система, на вход которой поступает случайный процесс

Ниже приведены формулы, позволяющие определить основные характеристики случайного процесса на выходе системы $x(t)$, если известна ее передаточная функция и соответствующие характеристики входного случайного процесса $\xi(t)$, в том числе математическое ожидание, спектральную плотность, автокорреляционную функцию и дисперсию случайного процесса $x(t)$:

$$m_x = W(0)m_\xi; \quad (27)$$

$$S_x(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_\xi(\omega); \quad (28)$$

$$K_x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(j\omega)|^2 S_\xi(\omega) e^{j\omega t} d\omega; \quad (29)$$

$$D_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(j\omega)|^2 S_\xi(\omega) d\omega. \quad (30)$$

Приведенные формулы можно использовать и для формирования случайного процесса с заданными характеристиками из белого шума с помощью формирующего фильтра. Если случайный процесс $\xi(t)$ на входе фильтра с передаточной функцией $W_\Phi(s)$ — белый шум, для которого $m_\xi = 0, S_\xi(\omega) = c^2$, то в соответствии с приведенными формулами характеристики случайного процесса $x(t)$ на выходе формирующего фильтра составят соответственно

$$m_x = 0;$$

$$S_x(\omega) = |W_\Phi(j\omega)|^2 c^2; \quad (31)$$

$$D_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_\Phi(j\omega)|^2 c^2 d\omega. \quad (32)$$

Если задана спектральная плотность случайного процесса $S_x(\omega)$, то, используя формулу (31), можно подобрать частотную характеристику формирующего фильтра.

Пусть теперь на вход системы подается аддитивная смесь полезного случайного сигнала $\xi(t)$ и случайного сигнала $\eta(t)$, являющегося помехой (рис. 2), тогда дисперсия ошибки $\varepsilon(t) = \xi(t) - x(t)$ определяется следующим образом:

$$D_\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\xi(\omega) |\Phi_\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\eta(\omega) |W(j\omega)|^2 d\omega, \quad (33)$$

где

$$\Phi_\varepsilon(j\omega) = \frac{1}{1+W(j\omega)}. \quad (34)$$

Для замкнутой системы автоматического регулирования, на вход которой подается аддитивная смесь полезного случайного сигнала $\xi(t)$ и помехи $\eta(t)$ (рис. 3), дисперсия ошибки является показателем точности обработки случайного полезного сигнала и вычисляется по формуле

$$D_\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\xi(\omega) |\Phi_\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\eta(\omega) |\Phi(j\omega)|^2 d\omega, \quad (35)$$

где $\Phi_\varepsilon(j\omega)$ — частотная (амплитудно-фазовая) характеристика замкнутой системы по ошибке, определяемая по формуле (34), $\Phi(j\omega)$ — частотная характеристика замкнутой системы по входному воздействию:

$$\Phi(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1+W(j\omega)}. \quad (36)$$

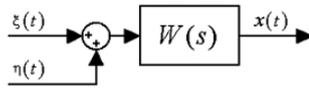


Рис. 2. Аддитивная смесь полезного сигнала и помехи на входе линейной системы

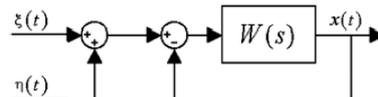


Рис. 3. Замкнутая система автоматического регулирования

Выражения (33), (35), определяющие дисперсию ошибки, представляют собой стандартные интегралы вида

$$J_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h_n(j\omega)d\omega}{g_n(j\omega)g_n(-j\omega)} = \frac{(-1)^{n-1}N_n}{2a_0M_n}, \quad (37)$$

где $h_n(j\omega) = b_1(j\omega)^{2n-2} + b_2(j\omega)^{2n-4} + \dots + b_n$;
 $g_n(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n$.

Определители N_n и M_n составляют по определенным правилам из коэффициентов этих полиномов, например, для $n = 3$:

$$N_3 = \begin{vmatrix} b_1 & a_0 & 0 \\ b_2 & a_2 & a_1 \\ b_3 & 0 & a_3 \end{vmatrix}, \quad M_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix}. \quad (38)$$

Аналогично для $n = 4$:

$$N_4 = \begin{vmatrix} b_1 & a_0 & 0 & 0 \\ b_2 & a_2 & a_1 & a_0 \\ b_3 & a_4 & a_3 & a_2 \\ b_4 & 0 & 0 & a_4 \end{vmatrix}, \quad M_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & a_4 & a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 \end{vmatrix}. \quad (39)$$

Формулу (37) рекомендуется использовать для расчета дисперсии ошибки системы автоматического регулирования и в данной лабораторной работе.

1.3. Вычисление дисперсии сигнала на выходе линейной системы

Приведем пример расчета для разомкнутой системы, схема которой приведена на рис. 4.

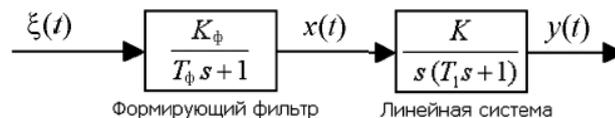


Рис. 4. Линейная система с формирующим фильтром

На вход системы подается случайный процесс — белый шум $\xi(t)$ со спектральной плотностью $m_\xi = 0, S_\xi(\omega) = c^2$. Сигнал на выходе формирующего фильтра с

передаточной функцией $W_\phi(s) = \frac{K_\phi}{T_\phi s + 1}$, т. е. входной сигнал линейной системы $x(t)$,

будет иметь дисперсию

$$D_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} c^2 \frac{K_\phi^2}{|T_\phi j\omega + 1|^2} d\omega. \quad (40)$$

Дисперсия выходного сигнала $y(t)$ будет равна

$$D_y = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} c^2 \frac{K_\Phi^2}{|T_\Phi j\omega + 1|^2} |\Phi(j\omega)|^2 d\omega, \quad (41)$$

где

$$|\Phi(j\omega)|^2 = \frac{K^2}{|T_1(j\omega)^2 + j\omega + K|^2}.$$

Подынтегральные выражения в (40) и (41) представляют собой спектральные плотности соответствующих сигналов:

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \frac{c^2 K_\Phi^2}{|T_\Phi j\omega + 1|^2}; \\ S_y(\omega) &= \frac{c^2 K_\Phi^2 K^2}{|T_1 T_\Phi (j\omega)^3 + (T_1 + T_\Phi)(j\omega)^2 + (1 + K T_\Phi)j\omega + K|^2}. \end{aligned} \quad (42)$$

Поскольку спектральные плотности (42) представляют собой дробно-рациональные функции, то вычисление интегралов (40), (41) сводится к вычислению стандартного интеграла (37).

Для дисперсии входного сигнала (40) получим:

$$h_1(j\omega) = c^2 K_\Phi^2, \quad g_1(j\omega) = T_\Phi j\omega + 1.$$

Следовательно, коэффициенты многочленов

$$\begin{aligned} b_1 &= c^2 K_\Phi^2; \quad a_0 = T_\Phi; \quad a_1 = 1; \\ N_1 &= b_1 = c^2 K_\Phi^2; \quad M_1 = a_1 = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, по формуле (37) при $n = 1$ находим:

$$D_x = \frac{(-1)^{1-1} N_1}{2a_0 M_1} = \frac{c^2 K_\Phi^2}{2T_\Phi}.$$

Проведем аналогичные расчеты для дисперсии выходного сигнала. В этом случае $n = 3$,

$$h_3(j\omega) = 0 \cdot (j\omega)^4 + 0 \cdot (j\omega)^2 + c^2 K_\Phi^2;$$

$$g_3(j\omega) = T_1 T_\Phi (j\omega)^3 + (T_1 + T_\Phi)(j\omega)^2 + (1 + K T_\Phi)j\omega + K.$$

Выпишем коэффициенты многочленов:

$$\begin{aligned} b_1 &= 0; \quad b_2 = 0; \quad b_3 = c^2 K_\Phi^2; \\ a_0 &= T_1 T_\Phi; \quad a_1 = T_1 + T_\Phi; \quad a_2 = 1 + K T_\Phi; \quad a_3 = K. \end{aligned}$$

Теперь воспользуемся формулами (38):

$$N_3 = \begin{vmatrix} 0 & T_1 T_\Phi & 0 \\ 0 & 1 + KT_\Phi & T_1 + T_\Phi \\ c^2 K_\Phi^2 & 0 & K \end{vmatrix} = c^2 K_\Phi^2 T_1 T_\Phi (T_1 + T_\Phi);$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} T_1 + T_\Phi & T_1 T_\Phi & 0 \\ K & 1 + KT_\Phi & T_1 + T_\Phi \\ 0 & 0 & K \end{vmatrix} = K(T_1 + T_\Phi)(1 + KT_\Phi) - KT_1 T_\Phi.$$

Окончательно получим:

$$D_y = \frac{(-1)^{3-1} N_3}{2a_0 M_3} = \frac{c^2 K_\Phi^2 T_1 T_\Phi (T_1 + T_\Phi)}{2T_1 T_\Phi (K(T_1 + T_\Phi)(1 + KT_\Phi) - KT_1 T_\Phi)} =$$

$$= \frac{c^2 K_\Phi^2 (T_1 + T_\Phi)}{2K((T_1 + T_\Phi)(1 + KT_\Phi) - T_1 T_\Phi)}.$$

Выше приведены основные математические формулы, используемые при выполнении лабораторных работ по статистическому анализу автоматических систем. Далее мы кратко остановимся на возможностях пакета MATLAB 7 при решении этих задач.

Применение пакета MATLAB для статистического анализа автоматических систем. MATLAB – это программный пакет для технических вычислений, объединяющий средства вычисления, визуализации и программирования. Этому пакету посвящено достаточно много пособий, с которыми читатель может ознакомиться самостоятельно (см., например, [3, 4]).

Определение характеристик эргодического случайного процесса с помощью пакета MATLAB. Ниже дано описание основных операций, выполняемых пакетом MATLAB при определении характеристик случайного процесса с использованием формул, приведенных в разд. 1.

Для определения среднего значения (19) по элементам вектора *values* используется функция *mean(values)*. Она определяет среднее значение по каждому столбцу матрицы *values*.

Для расчета стандартного отклонения по формуле (25) применяется функция

$$s = \text{std}(\text{values}, 1)$$

Стандартное отклонение рассчитывается по каждому столбцу матрицы *values*. Второй параметр (в нашем случае 1) указывает, что вычисление стандартного отклонения необходимо проводить именно в виде (25).

Для определения дисперсии случайного процесса (25) необходимо применить дополнительные преобразования:

$$\text{disp} = (\text{std}(\text{values}, 1))^2 / \text{time_scale}$$

где *time_scale* — период дискретизации значений *values*.

Для нахождения оценки корреляционной функции случайного процесса используется функция *xcov*:

$$[\text{covv}, \text{lags}] = \text{xcov}(\text{values}, 'coeff')$$

Параметр *'coeff'* указывает MATLAB, что расчет выполняется по приведенной ниже формуле (43), следующей из формулы (24).

Здесь $x_i = \xi(t_i)$ — измеренные значения реализации $\xi(t)$. Функция

$$c(m) = \frac{1}{N-m+1} c_{xx}(m-N), \quad m = 1, \dots, 2N-1, \quad (43)$$

$$\text{где } c_{xx}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-|m|-1} \left(x(n+m) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \right) \left(x(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \right) & \text{при } m \geq 0, \\ c_{xx}(-m) & \text{при } m < 0, \end{cases}$$

определяет значения корреляционной функции $covv$ для значений m , заданных вектором $lags$.

Для определения спектральной плотности случайного процесса по его корреляционной функции используется алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье — дискретный аналог формулы (11):

$$S_{\xi}(\omega) = \Delta t \sum_{i=1}^{N/2} K_{\xi}((i-1)\Delta t) \exp\left(\frac{-2\pi j}{N}(i-1)\omega\right). \quad (44)$$

Этот алгоритм реализован функцией $Spr = \text{abs}(\text{fft}(\text{covv}))$. Здесь $covv$ — вектор значений корреляционной функции, $\text{fft}(\text{covv})$ — функция вызова алгоритма быстрого преобразования Фурье. Функция $\text{abs}()$ используется для нахождения модуля комплексной величины.

2.2. Формирование случайного сигнала

Формирование случайного сигнала выполняется методом формирующего фильтра (см. подразд. 1.2). В связи с этим нам понадобятся функции, выполняемые пакетом MATLAB по формированию белого шума, стандартных сигналов, а также по формированию заданной передаточной функции формирующего фильтра.

Функция randn создает нормально распределенные случайные числа и массивы со средним значением 0, дисперсией $\sigma^2 = 1$. Эта функция имеет вид

$$Y = \text{randn}(m,n) \text{ или } Y = \text{randn}([m \ n])$$

Она вычисляет матрицу случайных элементов размером $m \times n$.

Для изменения дисперсии случайного сигнала можно использовать следующую конструкцию:

```
for i = 1:size(Y)
    Y(i) = sqrt(disp_val)*Y(i);
end
```

смысл которой состоит в том, что значение случайного сигнала в каждый момент времени умножается на корень квадратный из желаемой дисперсии.

Для создания сигналов стандартного вида (синусоида, прямо- угольные импульсы и т. д.) применяют функцию gensig :

$$[u,t] = \text{gensig}(\text{type}, \text{tau}, T_f, T_s)$$

Параметр tau задает период сигнала, T_f — длительность сигнала, T_s — дискретность задания сигнала в секундах. Параметр type определяет вид сигнала и может принимать следующие значения: 'sin' — синусоида с периодом tau ; 'square' — периодический сигнал, равный нулю в течение первых $\text{tau}/2$ секунд периода и единице в

оставшееся время периода; 'pulse' — периодический сигнал, равный нулю в течение первых T_s секунд периода и единице в оставшееся время периода.

Функция `gensig` определяет два вектора u и t . Компоненты вектора t :

$$t_i = T_s(i - 1), \quad i = 1, 2, \dots, (T_f/T_s + 1).$$

Компоненты вектора u — это значения сигнала в моменты времени t_i : $u_i = u(t_i)$. Например команда `[u,t] = gensig('square',5,30,0.1)` создает периодические прямоугольные импульсы с периодом 5 с, длительностью 30 с, периодом дискретизации 0,1 с.

Моделирование линейной системы. Будем считать, что задана передаточная функция линейной системы. Требуется определить сигнал на выходе этой системы.

Для этого сначала необходимо записать передаточную функцию системы в виде, принятом в пакете MATLAB. Для этого используется функция `tf`. Поясним ее применение с помощью примера.

Пусть передаточная функция разомкнутой системы задана в виде

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{10000(5s + 4)}{s^3 + 60s^2 + 500s + 10000}.$$

Требуется записать в коде программы эту передаточную функцию, а также передаточную функцию замкнутой системы. Запись имеет следующий вид:

```
s= tf('s')
% Передаточная функция разомкнутой системы
W_razomk = 10000*(5*s+4)/(s^3+...
60*s^2+500*s+10000)
% Передаточная Функция замкнутой системы
W= W_razomk/(1+W_razomk)
```

В случае, если необходимо записать передаточную функцию линейного усилителя (например, $W(s) = 2$), необходимо использовать вырожденную форму записи:

```
s= tf('s')
% Передаточная функция
W= 2*s/s
```

В тексте программы знак `%` означает начало комментария — строка, начинающаяся с такого знака, исполняться не будет.

Для определения реакции системы на заданное воздействие $u(t)$ используется функция `lsim:lsim(sys,u,t)`

Векторы t и u задаются аналогично функции `gensig` (см. выше). Матрица u должна иметь столько же столбцов, сколько входов в системе. Каждая строка $u(i,:)$ определяет значения сигналов на входах системы в моменты времени $t(i)$.

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Работа № 1. Формирование случайного сигнала с заданной спектральной плотностью

Цель работы — сформировать на ПЭВМ случайный процесс с заданной спектральной плотностью и провести исследование его характеристик.

Порядок выполнения работы

1. Для спектральной плотности случайного процесса, заданной преподавателем, сформировать передаточную функцию формирующего фильтра.

2. С помощью пакета MATLAB выполнить моделирование формирующего фильтра и убедиться в правильности составленной программы.

3. Сформировать случайный сигнал типа белого шума с заданной интенсивностью. Получить графическое отображение сигнала на экране монитора.

4. Определить статистические характеристики случайного сигнала на выходе формирующего фильтра (математического ожидания, спектральной функции, дисперсии, автокорреляционной функции) для десяти реализаций. Получить на экране вид реализаций случайного процесса на выходе формирующего фильтра.

5. Выполнить статистический анализ для ста реализаций. Сравнить полученные результаты с результатами обработки десяти реализаций. Распечатать графики корреляционной функции и спектральной плотности. Сравнить их с выражениями, которые были заданы. Сделать вывод о качестве выполненного эксперимента, т. е. о соответствии сформированного случайного сигнала заданному.

Для определения характеристик формирующего фильтра по заданной спектральной плотности случайного сигнала необходимо представить выражение для числителя и знаменателя спектральной плотности в следующем виде:

$$S(\omega) = \frac{P(j\omega)P(-j\omega)}{Q(j\omega)Q(-j\omega)},$$

где $P(j\omega)$ и $Q(j\omega)$ — многочлены от переменной $j\omega$.

Тогда с учетом (31) амплитудно-фазовая частотная характеристика формирующего фильтра будет иметь вид

$$W(j\omega) = \frac{P(j\omega)}{Q(j\omega)}.$$

Пример выполнения работы № 1

Спектральная плотность случайного сигнала задана в виде

$$S(\omega) = \frac{1}{0,25\omega^2 + 1} = \frac{1}{(-0,5j\omega + 1)(0,5j\omega + 1)}.$$

1. Определим частотную характеристику формирующего фильтра:

$$W(j\omega) = \frac{1}{0,5j\omega + 1}.$$

2. Сформируем с помощью пакета MATLAB требуемый случайный сигнал. Для этого вначале необходимо очистить пространство переменных от данных, которые могли остаться от предыдущих запусков программы:

```
clear;  
s= tf('s')
```

3. Запишем передаточную функцию формирующего фильтра:
 $W_{form} = 1/(0.5*s+1)$

4. Положим дисперсию белого шума равной единице:
`disp_val=1`

5. Будем обрабатывать одновременно 10 реализаций случайного процесса:

```
num_ser= 10
```

6. Зададим период дискретизации: `time_scale= 0.001`

7. Зададим размеры массива и заполним массив времени. Длительность периода обработки установим равной 2 с. Если время переходного процесса в системе превышает 1 с (это станет понятно при выполнении лабораторной работы), то длительность периода обработки необходимо увеличить.

```

t_obrabotki= 2;
[u,t] = gensig('square', 1, t_obrabotki, ...time_scale);
sizeu= size(u,1)
8. Создадим 10 реализаций белого шума с длиной size_u и дисперсией disp_val:
r=randn(num_ser,size(u,1));
noise_=zeros(num_ser,size(u,1));
forseries = 1:numser
    fori= 1:size(u,1)
        noise_(series,i) = sqrt(disp_val)* ...r (series,i);
    end; end;
9. Пропустим семейство реализаций белого шума через формирующий фильтр
при помощи функции lsim:
ai_noise= zeros(1,size(u,1));
modell_inp= zeros(num_ser,size(u,1));
forseries = 1:num_ser
    fori= 1:size(u,1)
        ai_noise(i)=noise_(series, i) ;
    end;
    model_i_noise=lsim(W_form,ai_noise,t);
for i= 1:size(u,1)
    modell_inp(series,i) = ...model_i_noise(i);
end; end;
10. Выполним оценку результатов. Исследуем для этого семейство реализаций
выходного сигнала формирующего фильтра modell_inp. Для этого значения массива
modell_inp запишем в массив values:
values= zeros(num_ser,size(u,1));
forj = 1:num_ser
    fori= 1:size(u,1)
        values(j, i) = modell_inp(j,i);
    end; end;
11. Проведем расчет среднего по множеству реализаций случайного процесса
по формуле (14):
mean_ = mean(values,1);
12. Определим дисперсию случайного процесса по формуле (16) с коррекцией на
шаг дискретизации:
std_ = std(values, 0,1) ;
disp_ = zeros(1,size_u);
for i= 1:size u
    disp_(i) = std_(i)^2/time_scale;
end;
13. Рассчитаем оценку корреляционной функции и спектральной плотности по
формулам (15), (26). (43). (44):
value_r= zeros (1,size(u,1));
cow = zeros (num_ser, 2*size_u-1);
NFFT = 2^nextpow2(size_u);
spec = zeros(num_ser, NFFT);
for series = 1:num_ser
    for i= 1:size_u
        value_r(i) = values(series,i);
    end;
[cowb,lags_] = xcov(value_r, 1'coeff^1 ) ;
for i= 1: (2*size_u-1)

```

```

covv(series,i) = cowb(i);
    end;
temp_sp= 2*abs (fft (value_r, NFFT) )/size_u;
for i= 1: NFFT
spec(series, i) = temp_sp(i);
    end;
end;
cov_ = mean (cov, 1);
    f = 1/time_scale*0.5*linspace(-0.125, ...0.125, NFFT/8);
spect_ = mean(spec,1);
lags_ = lags_*time_scale;
    14. Отобразим результаты на экран в виде графиков.
    14.1. Белый шум (рис. 5):
        plot(t, noise_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
    14.2. Белый шум.пропущенный через фильтр (рис. 6):
        plot(t,values); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);

```

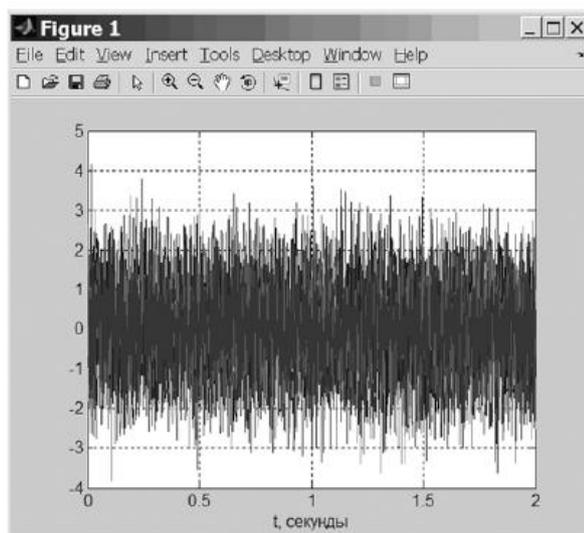


Рис. 5. Белый шум

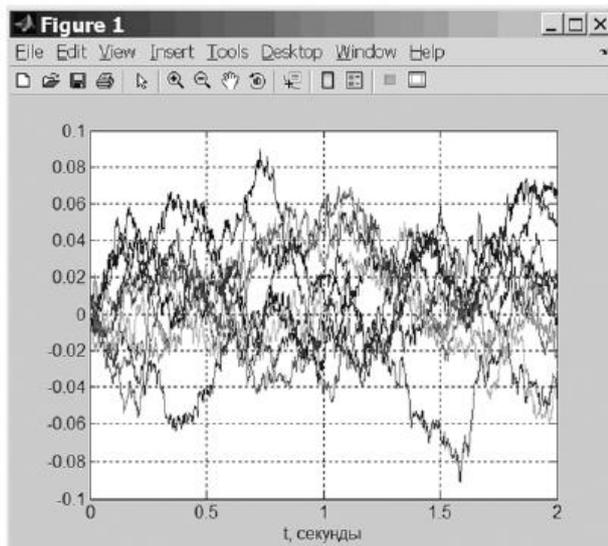


Рис. 6. Белый шум, пропущенный через фильтр

14.3. Среднее по множеству реализаций выходного сигнала — оценка математического ожидания (рис. 7):

```
plot (t, mean_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

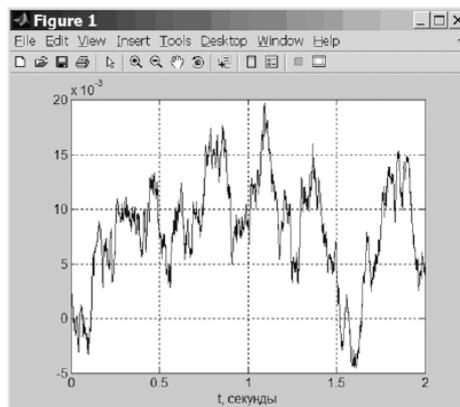


Рис. 7. Среднее по множеству реализаций выходного сигнала

14.4. Дисперсия (рис. 8):

```
plot (t, disp_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

14.5. Корреляционная функция (рис. 9):

```
plot (lags_, cov_); grid on;
xlabel('\tau, секунды', 'FontSize', 12);
ylabel('K(\tau)', 'FontSize', 12);
title('Корреляционная функция', ...'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

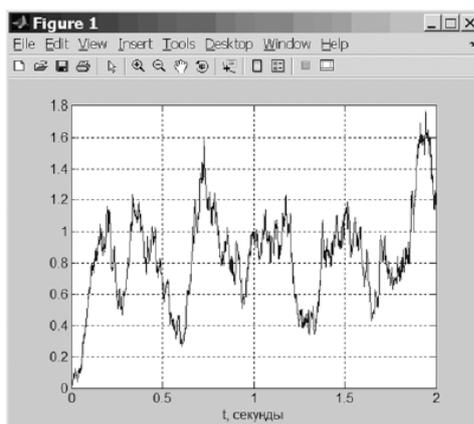


Рис. 8. Дисперсия выходного сигнала системы

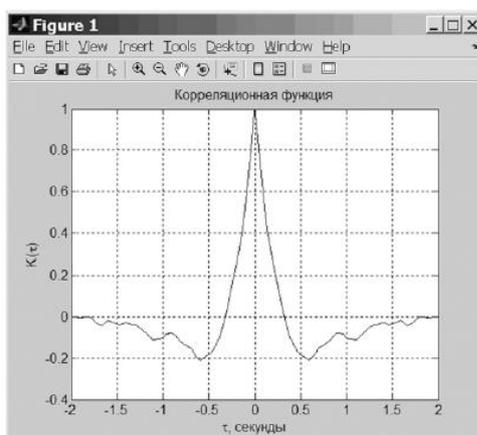


Рис. 9. Корреляционная функция выходного сигнала системы

14.6. Спектральная плотность (рис. 10):

```
plot(f/[spect_(NFFT/16:-1:1) ...spect_(1:NFFT/16)]); grid on;
xlabel('\omega, Гц', 'FontSize', 12);
ylabel('S(\omega)', 'FontSize', 12);
title('Спектральная плотность', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

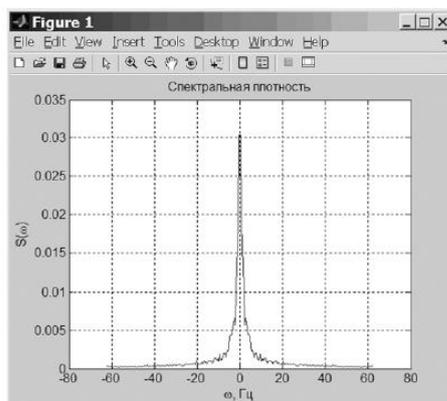


Рис. 10. Спектральная плотность выходного сигнала системы

Наблюдаемый провал графика в районе малых частот вызван тем, что частота обратно пропорциональна периоду колебаний, и для малых частот не хватает длительности периода наблюдения для построения достоверной оценки спектральной плотности.

Требования к отчету

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- текст команд, выполненных в среде MATLAB.
- распечатки графиков, отображающих основные статистические характеристики процессов на выходе формирующего фильтра (математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию и спектральную плотность);
- сопоставление характеристик заданного и полученного в результате эксперимента случайных процессов.

Работа № 2. Анализ линейной системы при воздействии случайного возмущения и детерминированного полезного сигнала

Цель работы — исследование характеристик случайного сигнала на выходе линейной системы, на вход которой подается сумма полезного ступенчатого сигнала и случайного процесса с заданными характеристиками.

Порядок выполнения работы

1. Для спектральной плотности случайного процесса, заданной преподавателем, сформировать передаточную функцию формирующего фильтра.
2. С помощью пакета MATLAB выполнить моделирование формирующего фильтра и убедиться в правильности составленной программы.
3. Сформировать случайный сигнал типа белого шума с заданной интенсивностью. Получить графическое отображение сигнала на экране монитора.
4. Определить статистические характеристики случайного сигнала на выходе линейной системы (математическое ожидание, спектральную функцию, дисперсию, автокорреляционную функцию) для десяти реализаций. Получить на экране вид реализаций случайного процесса на выходе линейной системы.
5. Выполнить статистический анализ для ста реализаций. Сравнить полученные результаты с результатами обработки десяти реализаций. Распечатать графики корреляционной функции и спектральной плотности.
6. Провести аналитическое исследование случайного сигнала на выходе системы и сравнить полученные результаты с экспериментальными результатами.

В этой лабораторной работе на вход линейной системы (рис. 11) подается полезный сигнал $x(t)$ в виде единичного ступенчатого воздействия и случайный процесс с заданной спектральной плотностью, рассматриваемый в качестве помехи. Ошибкой системы является разность между полезным сигналом и выходом системы:

$$e(t) = y(t) - x(t).$$

Целью работы является проведение моделирования и определение статистических характеристик сигнала $e(t)$.

Пример выполнения работы № 2

Выполнение лабораторной работы рассмотрим на примере системы, представленной на рис. 11.

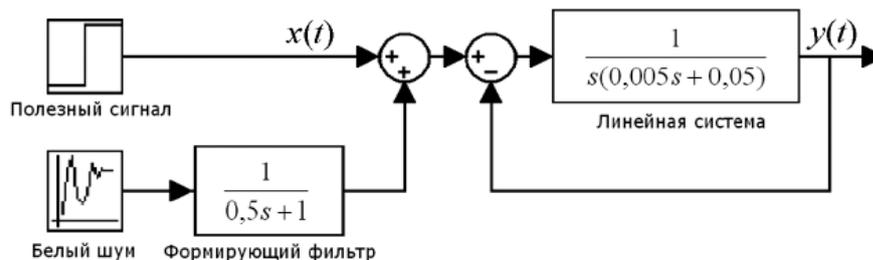


Рис. 11. Структурная схема системы. На входе сумма полезного детерминированного сигнала и случайной помехи

1. По методике, описанной в работе № 1, рассчитаем параметры формирующего фильтра. Создадим семейство реализаций помехи с заданной спектральной плотностью.

Число реализаций

```
num_ser= 100.
```

2. Сформируем полезный сигнал в виде единичного ступенчатого сигнала на интервале $t \in [0; 2]$. Предположим, что при

$t \in [0; 0,2]$ его значение равно нулю, при $t \in (0,2; 2]$ — единице:

```
step_ = zeros(1,size_u);
```

```
for i= 1:size(u,1)
```

```
step_(i) = 0+(i>(.2/time_scale));
```

```
end;
```

3. Получим семейство реализаций входа системы:

```
input = zeros(num_ser, size(u,1));
```

```
for series = 1:num_ser
```

```
for i= 1:size(u,1)
```

```
input(series,i) = modell_inp(series, i) ...
```

```
+ step_(i);
```

```
end;
```

```
end;
```

4. Выведем на экран входной сигнал системы (рис. 12):

```
plot(t, input); grid on;
```

```
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
```

```
set(gca, 'FontSize', 12);
```

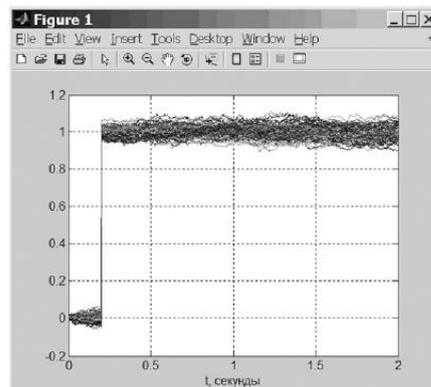


Рис. 12. Случайный сигнал на входе системы

5. Пропустим входной сигнал через линейную систему:

```
S= tf( 'S^1')
```

5.1. Введем передаточную функцию разомкнутой системы:

```
W_s_razomk= 1/(0.005*s^2+0.05*s)
```

5.2. Введем передаточную функцию замкнутой системы:

```
W_s = W_s_razomk/(1+ W_s_razomk)
```

5.3. Вычислим выходной сигнал системы:

```
model_out=zeros(num_ser, size(u,1));
```

```
input_cur=zeros(1, size(u,1));
```

```
for series = 1:num_ser
```

```
for i= 1:size(u,1)
```

```
input_cur(i)= input(series,i);
```

```
end;
```

```
model_output=lsim(W_s, input_cur, t);
```

```
for i= 1:size(u,1)
```

```
modell_out(series,i)= ...
```

```
model_output(i);
```

```

end;
end;
6. Выведем на экран выходной сигнал системы (рис. 13):
plot(t, modell_out); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
7. Вычислим сигнал ошибки системы:
err_ = zeros(num_ser, size(u,1));
for series = 1:num_ser
for i= 1:size(u,1)
err_(series,i) = modell_out(series,i)...
- step_(i);
end; end;

```

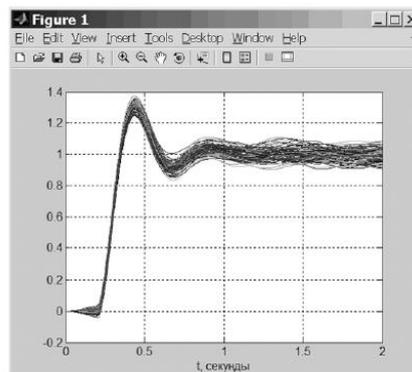


Рис. 13. Случайный сигнал на выходе системы

```

8. Выведем на печать сигнал ошибки системы (рис. 14):
plot (t, err_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);

```

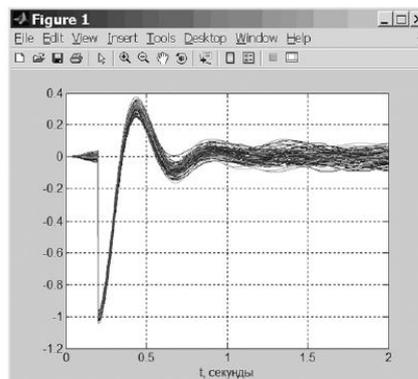


Рис. 14. Случайный сигнал ошибки системы

9. Видно, что случайный процесс для ошибки системы на интервале от 0 до 2 с нельзя считать стационарным. Тем не менее по алгоритмам, изложенным в описании работы № 1, определим среднее, дисперсию, корреляцию и спектральную плотность сигнала ошибки системы для нестационарного процесса.

9.1. Для анализа семейства реализаций сигнала ошибки системы значения массива err_ запишем в массив values:

```

start_time= 0;
% Начало периода анализа наблюдений
values= zeros(num_ser, size(u,1)- ...
start_time/time_scale);
for j = 1:num_ser

```

```

for i= (start_time/time_scale+1):size(u,1)
values(j,i-start_time/time_scale) = ...
err_(j,i) ;
end;
end;
9.2. Проведем расчет среднего по реализациям случайного процесса по формуле (14):
mean_ = mean(values,1);
9.3. Выполним расчет дисперсии случайного процесса по формуле (16). с коррекцией
на шаг дискретизации
std_ = std(values, 0,1);
disp_ = zeros(1,size(values,2));
fori= 1:size(values, 2);
disp_(i) = std_(i) ^4/2/time_scale;
end;
9.4. Рассчитаем оценку корреляционной функции и спектральной плотности по
формулам (15), (26), (43), (44):
value_r= zeros(1, size(values,2));
cow= zeros (num_ser, 2*size (values, 2 )-1) ;
NFFT = 2^nextpow2(size(values,2));
spec= zeros(num_ser, NFFT);
for series = 1:num_ser
fori= 1: size(values,2)
value_r(i) = values(series,i);
end;
[covvb,lags_] = xcov(value_r,1,coeff^1);
for i= 1:(2* size(values,2)-1)
cow(series, i) = covvb (i);
end;
temp_sp= 2*abs(fft(value_r,NFFT))/ ...
size(values,2) ;
for i= 1:NFFT
spec(series, i)=temp_sp(i);
end;
cov_ = mean (cow, 1) ;
f = 1/time_scale*0.5 *linspace(-0.125, ...
0.125,NFFT/8);
spect_ = mean(spec,1);
lags_ = lags_*time_scale;
10. Отообразим результаты расчета на экране.
10.1. Среднее по реализациям ошибки системы (рис. 15):
plot(t((start_time/time_scale+1) ...
:size(u,1)), mean_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
10.2. Дисперсия ошибки системы (рис. 16):
plot(t((start_time/time_scale+1) ...
:size(u,1)), disp_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
10.3. Корреляционная функция ошибки системы (рис. 17):
plot(lags_, cov_); grid on;
xlabel('\tau, секунды', 'FontSize', 12);

```

```
ylabel('K(\tau)', 'FontSize', 12);
title('Корреляционная функция', ... 'FontSize', 12); set(gca, 'FontSize', 12);
```

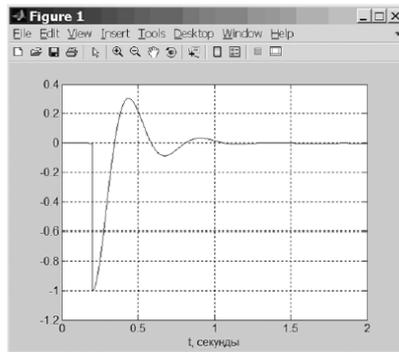


Рис. 15. Среднее по реализациям ошибки

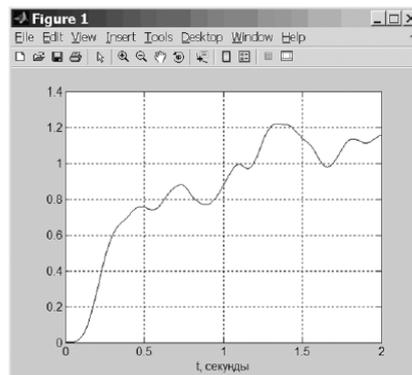


Рис. 16. Дисперсия ошибки системы

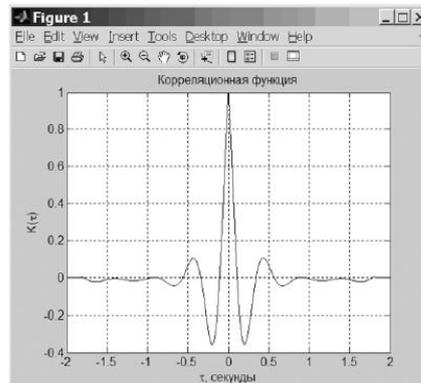


Рис. 17. Корреляционная функция ошибки системы

10.4. Спектральная плотность ость ошибки системы (рис. 18):

```
plot(f/ [spect_(NFFT/16:-1:1) ...
spect_(1:NFFT/16)]); grid on;
xlabel('\omega, Гц', 'FontSize', 12);
ylabel('S{\omega}', 'FontSize', 12);
title('Спектральная плотность', ...
'FontSize', 12); set(gca, 'FontSize', 12);
```

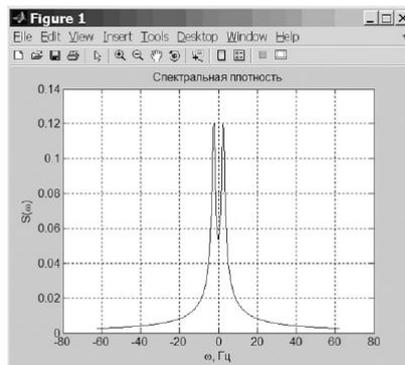


Рис. 18. Спектральная плотность ошибки системы

11. Теперь учтем, что определение параметров процесса необходимо проводить для стационарных процессов. По графику, показанному⁷ на рис. 14. определим длительность переходного процесса. Время моделирования ($t_{\text{обработки}}$) должно быть на порядок больше длительности переходного процесса. Анализ полученных результатов должен проводиться после затухания переходного процесса. Для нашего примера время затухания переходного процесса составляет примерно 0.8 с. Затухание переходного процесса происходит уже после первой секунды. Выберем $t_{\text{обработки}}=10$; $\text{start_time}=2$ (с запасом). Результаты повторного выполнения этой работы для нового временного интервала показаны на рис. 19-22.

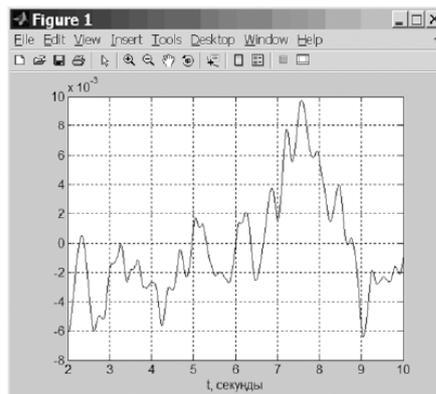


Рис. 19. Среднее по реализациям ошибки

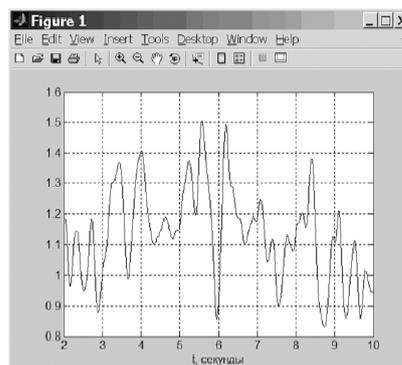


Рис. 20. Дисперсия ошибки системы

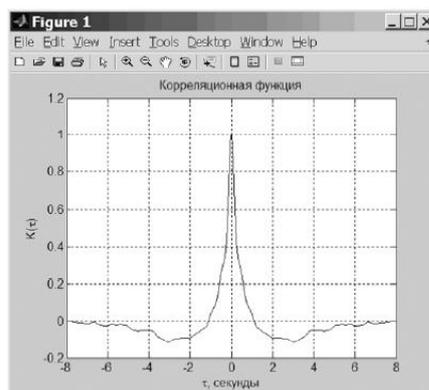


Рис. 21. Корреляционная функция ошибки системы

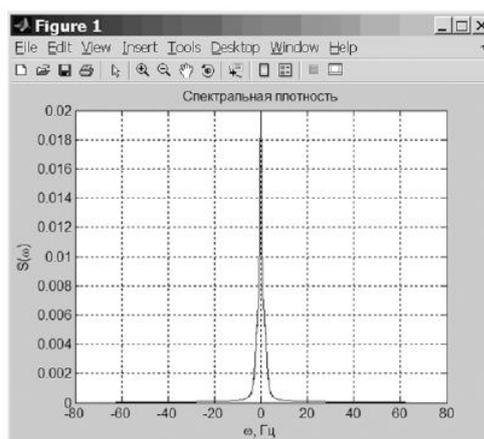


Рис. 22. Спектральная плотность ошибки системы

Требования к отчету

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- текст команд, выполненных в среде MATLAB.
- распечатки графиков, отображающих основные статистические характеристики процессов на выходе линейной системы (математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию и спектральную плотность);
- сопоставление корреляционной функции ошибки системы и спектральной плотности ошибки системы в случае выполнения расчетов по всему периоду наблюдений и по части наблюдений с завершившимся переходным процессом;
- сопоставление результатов эксперимента с результатами, полученными аналитическим путем.

Работа № 3. Анализ линейной системы при воздействии случайного полезного сигнала и случайного шума

Цель работы — исследовать линейную систему автоматического управления, на вход которой подается аддитивная смесь полезного случайного сигнала и случайной помехи (шума). Предварительное аналитическое исследование системы выполняется предварительно в форме домашнего задания. Результаты аналитического расчета проверяются экспериментально с помощью математического моделирования с использованием пакета MATLAB.

Порядок выполнения работы

1. Для случайных процессов, статистические характеристики которых указаны в домашнем задании, сформировать передаточные функции формирующих фильтров.

2. С помощью пакета MATLAB выполнить моделирование формирующих фильтров и убедиться в правильности составленной программы.

3. Сформировать случайные сигналы с заданными спектральными характеристиками. Получить графическое отображение сигналов на экране монитора.

4. Определить статистические характеристики случайного сигнала на выходе линейной системы (математическое ожидание, спектральную функцию, дисперсию, автокорреляционную функцию) для десяти реализаций. Вывести на экран вид реализаций случайного процесса на выходе линейной системы.

5. Провести статистический анализ для ста реализаций. Сравнить полученные результаты с результатами обработки десяти реализаций. Распечатать графики корреляционной функции и спектральной плотности.

6. Сравнить полученные экспериментально результаты с результатами аналитического расчета.

Пример выполнения работы № 3

Выполнение лабораторной работы рассмотрим на примере исследования системы, представленной на рис. 23.

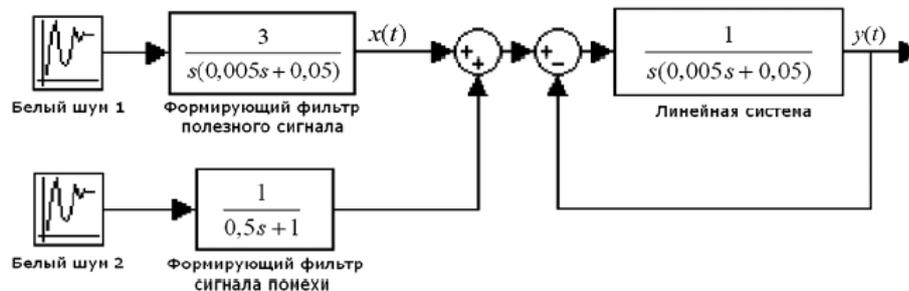


Рис. 23. Структурная схема системы. На вход системы поступает аддитивная смесь полезного случайного сигнала и помехи

Ошибкой системы в данном случае является разность между выходом системы и полезным сигналом: $s(t) = y(t) - x(t)$ (см. рис. 23). Мерой этой ошибки является ее дисперсия.

Работу будем выполнять в следующем порядке.

1. По методике, описанной в работе № 1, рассчитаем параметры формирующего фильтра для шума с заданной спектральной плотностью.

2. По той же методике сформируем полезный сигнал с заданной спектральной плотностью.

Ниже показано, как в коде программы в MATLAB можно одновременно создать помеху и полезный сигнал.

Очистим вначале пространство переменных:

```
clear;
s= tf('s')
```

2.1. Запишем передаточную функцию формирующего фильтра для помехи:

```
W_form= 1/(0.5*s+1)
```

2.2. Запишем передаточную функцию формирующего фильтра для полезного сигнала:

```
W_p= 3/{0.005*z^2+0.05*z+1}
```

2.3. Положим дисперсию белого шума на входе формирующего фильтра помехи равной единице:

```
disp_val= 1
```

2.4. Аналогично для входа формирующего фильтра полезного сигнала:

```
disp_val_p= 1
```

3. Будем обрабатывать одновременно 100 реализаций случайного процесса:

```
num_ser= 100
```

4. Выберем период дискретизации:

```
timescale= 0.001
```

5. Зададим размеры массива времени и заполним его. Длительность периода обработки сигнала была выбрана при выполнении работы № 2.

```
t_obrabotki= 10;
```

```
[u,t] = gensig('square', 1, ...
```

```
t_obrabotki,time_scale);
```

```
size_u= size(u,1)
```

6. Создадим массив numser реализаций белого шума с длиной size_u и дисперсией disp_val

```
disp_val= 1; % дисперсия  
r = randn(num_ser,size(u,1));
```

```
r_p= randn(num_ser,size(u,1));
```

```
noise_ = zeros(num_ser,size(u,1));
```

```
noise_p= zeros(num_ser,size(u,1));
```

```
forseries = 1:num_ser
```

```
fori= 1:size(u,1)
```

```
noise_(series,i) = sqrt(disp_val)*...
```

```
    r(series,i);
```

```
noise_p(series,i) = sqrt(disp_val_p)*...
```

```
    r_p(series,i);
```

```
end;
```

```
end;
```

7. Пропустим семейство реализаций белого шума через формирующий фильтр при помощи функции lsim:

```
ai_noise= zeros(1,size(u,1));
```

```
ai_noise_p= zeros(1,size(u,1));
```

```
modell_inp= zeros(num_ser,size(u,1));
```

```
modell_inp_p= zeros(num_ser,size(u,1));
```

```
forseries = 1:num_ser
```

```
fori= 1:size(u,1)
```

```
ai_noise(i) = noise_(series,i);
```

```
ai_noise_p(i) = noise_p(series,i);
```

```
end;
```

```
model_i_noise= lsim(W_form,ai_noise,t);
```

```
model_i_noise_p= lsim(W_p,ai_noise_p,t);
```

```
for i= 1:size(u,1)
```

```
modell_inp(series,i)= ...
```

```
    model_i_noise(i);
```

```
modell_inp_p(series,i)= ...
```

```
    model_i_noise_p(i);
```

```
end;
```

```
end;
```

8. Получим семейство реализаций случайного процесса на входе системы:

```
input = zeros(num_ser,size(u,1));
```

```
for series = 1:num_ser
```

```
for i= 1:size(u,1)
```

```
input(series,i) = modell_inp(series,i)+ ...
```

```
    modell_inp_p(series,i);
```

```
end;
```

```
end;
```

9. Выведем на печать графики входного сигнала системы (для удобства сравнения графиков будем рассматривать лишь первые две секунды — рис. 24):

```
t_to_plot= 2;
plot(t(1:(t_to_plot/time_scale+1)), ...
input(:,1:(t_to_plot/ time_scale+1)));
grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

10. Пропустим входной сигнал через систему, воспользовавшись алгоритмом, описанном в работе № 2.

10.1. Предварительно запишем передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы:

```
W_s_razomk= 1/(0.005*s^2+0.05*s)
W_s = W_s_razomk/(1+ W_s_razomk)
```

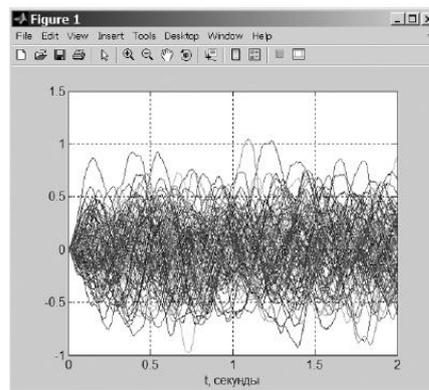


Рис. 24. Входной сигнал системы

10.2. Вычислим выходной сигнал:

```
input_cur= zeros(1,size(u,1));
modell_out= zeros(num_ser,size(u, 1));
for series = 1:num_ser
for i= 1:size(u,1)
input_cur(i) = input(series,i);
end;
model_output= lsim(W_s, input_cur,t);
for i= 1:size(u,1)
modell_out(series, i) = ...
model_output(i);
end;
end;
```

10.3. Выведем выходной сигнал на экран (рис. 25):

```
plot(t(1:(t_to_plot/time_scale+1)), ...
modell_out(:,1:(t_to_plot/time_scale+1)));
grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

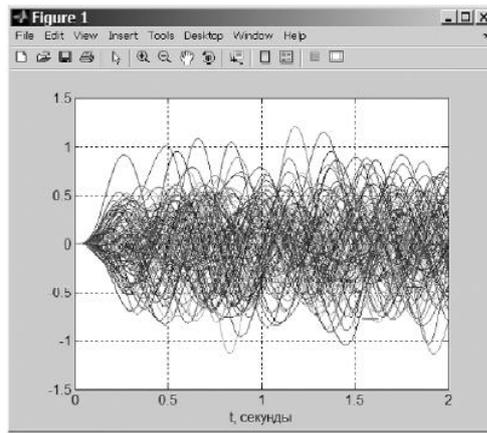


Рис. 25. Выходной сигнал системы

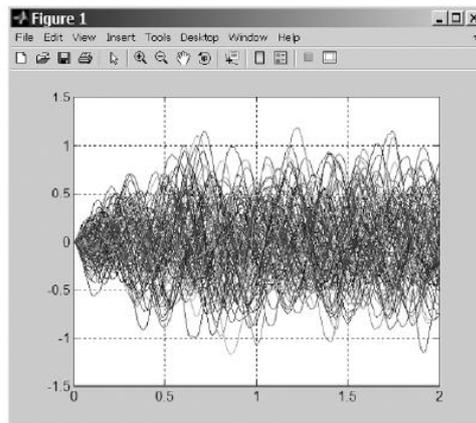


Рис. 26. Случайный сигнал ошибки системы

11. Определим ошибку системы и выведем ее на экран (рис. 26).

```
err_ = zeros(num_ser,size(u,1));
for series = 1:num_ser
for i= 1:size(u,1)
err_(series,i) = modell_out(series,i)...
-modell_inp_p(series,i);
end;
end;
plot (t (1: (t_to_plot/time_scale+1) ) , ...
err_(:,1:(t_to_plot/ time_scale+1)));
grid on; xlabel('t, секунды', 'FontSize',12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

12. Определим статистические характеристики выходного сигнала и ошибки системы (математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию, спектральную плотность) по алгоритму, описанному в работе № 2.

13. Выполним оценку результатов. Исследуем семейство реализаций ошибки системы $e_{гг}$ после затухания переходного процесса (время $start_time$ примем таким же, как в работе № 2).

Для этого значения массива $e_{гг}$ запишем в массив $values$:

```
start_time= 2; ^начало периода анализа
values= zeros(num_ser, size(u,1)- ...
start_time/time_scale);
for j = 1:num_ser
for i= (start_time/time_scale+1):size(u,1)
```

```

values(j, i- start_time/time_scale)...
= err_(j, i);
end;
end;

```

14. Рассчитаем среднее по множеству реализаций случайного процесса по формуле (14):

```
mean_ = mean(values, 1) ;
```

15. Вычислим дисперсию случайного процесса по формуле (16) с коррекцией на шаг дискретизации:

```

std_ = std(values, 0,1);
disp_ = zeros(1,size(values,2));
fori= 1:size(values,2);
    disp_(i) = std_(i)^2/time_scale;
end;

```

16. Определим оценку корреляционной функции и спектральной плотности по формулам (15). (26), (43), (44):

```

value_r= zeros (1, size(values,2));
cow =zeros (num_ser, 2*size (values, 2) -1) ;
NFFT = 2^nextpow2(size(values,2));
spec= zeros(num_ser, NFFT);
for series = 1:num_ser
    fori= 1: size(values,2)
        value_r(i) = values(series,i);
    end;
    [covvb,lags_] = xcov(value_r,'coeff');
    for i= 1:(2* size(values,2)-1)
        cow (series, i) =covvb (i) ;
    end;

```

```

end;
temp_sp= 2 *abs(fft(value_r,NFFT)) ...
/ size(values,2);

```

```

fori= 1:NFFT
    spec{series, i} = temp_sp(i);
end;
end;

```

```

cov_ = mean (cow, 1) ;
f = 1/time_scale*0.5*linspace(-0.125, ...
    0.125,NFFT/8);

```

```

spect_ = mean(spec,1);
lags_ = lags_ *time_scale;

```

17. Отообразим результаты на экране монитора.

17.1. Среднее по реализациям ошибки (рис. 27):

```

plot (t((start_time/time_scale+1) : ...
    size(u,1)), mean_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);

```

17.2. Дисперсия ошибки (рис. 28):

```

plot (t((start_time/time_scale+1) : ...
    size(u,1)), disp_); grid on;
xlabel('t, секунды', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);

```

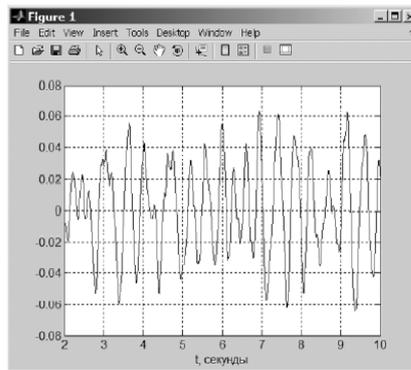


Рис. 27. Среднее по реализациям ошибки

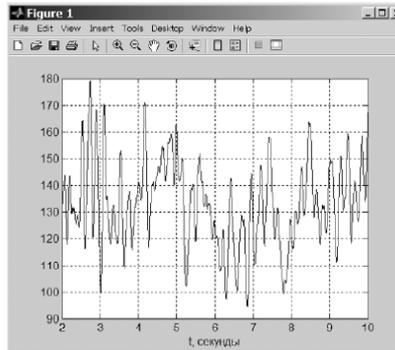


Рис. 28. Дисперсия ошибки системы

17.3. Корреляционная функция (рис. 29):

```
plot(lags_, cov_); gridon;
xlabel('\tau, секунды', 'FontSize', 12);
ylabel('K{\tau}', 'FontSize', 12);
title('Корреляционная функция', ...'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

17.4. Спектральная плотность (рис. 30):

```
plot {f, [spect_(NFFT/16:-1:1) ...
spect_{1:NFFT/16})]; gridon;
xlabel('\omega, Гц', 'FontSize', 12);
ylabel('S{\omega}', 'FontSize', 12);
title('Спектральная плотность', ...'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 12);
```

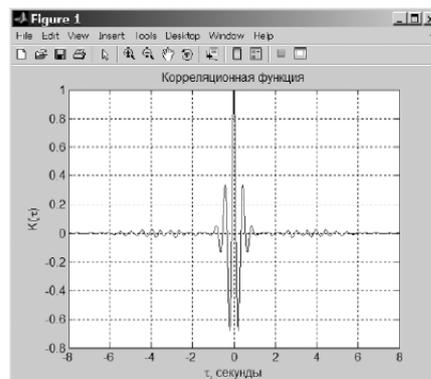


Рис. 29. Корреляционная функция ошибки системы

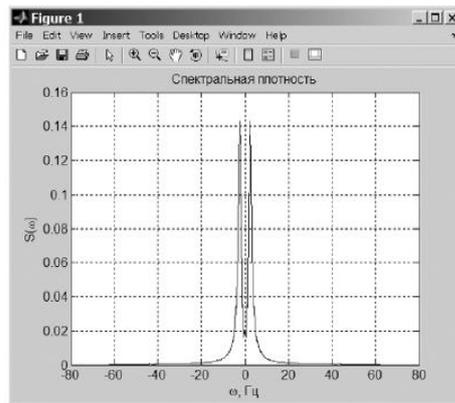


Рис. 30. Спектральная плотность ошибки системы

Требования к отчету

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- текст команд, выполненных в среде MATLAB;
- распечатки графиков, отображающих основные статистические характеристики процессов (выходной сигнал линейной системы, ее ошибку, математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию, спектральную плотность);
- сопоставление результатов, полученных в лабораторной работе, с результатами предварительно выполненных аналитических расчетов.

Литературы к § 4.3

1. Астапов Ю.М., Медведев В.С. Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1982. 304 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 т. Т. 1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.И. Баркин и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 748 с.
3. Дьяконов В.П. MATLAB6.5 SP1/7.0 + Simulink5/6 в математике и моделировании. М.: Солон-Пресс, 2005. 576 с
4. Потемкин В.Г. Вычисления в среде MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2004. 720 с.

5. Самостоятельная работа студента

5.1. СРС по данному курсу в объеме 54 часов реализуется:

непосредственно в процессе аудиторных занятий – на лекциях, практических (семинарских) занятиях и в виде семинаров «Инновационные технологии управления. Электромехатроника» с докладом (реферат и презентация);

в контакте с преподавателем вне рамок расписания – на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.;

в библиотеке, дома, в общежитии, на кафедре при выполнении студентом учебных и творческих задач.

Границы между этими видами работ достаточно размыты, а сами виды СРС пересекаются. Тем не менее, рассматривая вопросы самостоятельной работы студентов, обычно имеют в виду в основном внеаудиторную работу.

Под СРС в методических указаниях понимается внеаудиторная СРС при выполнении студентом домашних заданий учебного и творческого характера (подготовка к лекциям, практическим (семинарским) занятиям, зачетам, экзаменам и т.п.).

5.2. Активная СРС возможна только при наличии серьезной и устойчивой

мотивации. Самый сильный мотивирующий фактор – подготовка к дальнейшей эффективной профессиональной деятельности. Поэтому, в пределах настоящего курса предполагается показать полезность выполняемой СРС использованием преподавателем ОКЮ материалов СРС магистрантов в лекционном курсе, в методическом пособии, при подготовке публикации или иным образом.

Другой вариант использования фактора полезности, используемый преподавателем – участие студентов в творческой деятельности: в научно-исследовательской, опытно-конструкторской или методической работе, проводимой в ОКЮ.

5.3. Для выполнения СРС магистрант получает задание преподавателя изучить материал конспектов лекций или учебного пособия, включая темы практических (семинарских) занятий для:

усовершенствования его добавлением новых материалов и рекомендовать преподавателю доработать учебно-методические пособия по данному курсу. Доработка проходит при непосредственном участии магистрантов;

для чтения лекции по конкретной теме, чтобы получить опыт педагогической практики.

5.4 Темы для самостоятельной работы по курсу «Теория эксперимента в исследованиях систем»

№ п/п	Виды самостоятельной работы (детализация)
1	Методы исследований мехатронных систем
2	Классификация экспериментов
3	Основные этапы экспериментального исследования.
4	Статистическая модель «черный ящик»

5.5 Темы для самостоятельной работы по курсу «Статистическая динамика автоматических систем»

№ п/п	Виды самостоятельной работы (детализация)
1	Основные математические соотношения, используемые при статистическом анализе автоматических систем
2	Применение пакета MATLAB для статистического анализа автоматических систем

5.6. Темы для самостоятельной работы по курсу «Исследование динамики электромехатронных систем движения»

№ п/п	Виды самостоятельной работы (детализация)
1	Силомоментные характеристики электромехатронных модулей движения (ЭМД)
2	Точностные характеристики ЭМД
	Устойчивость ЭМД

6. Рейтинговая система для оценки успеваемости студентов

Таблица 1

Балльные оценки для элементов контроля

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	3	3	3	9
Опрос	13	13	13	39
Подготовка рефератов		5	5	10
Компонент своевременности	4	4	4	12
Итого максимум за период:	20	25	25	70
Сдача экзамена (максимум)				30
Нарастающим итогом	20	45	70	100

Таблица 2

Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

Таблица 3

Пересчет суммы баллов в традиционную и международную оценку

Оценка (ГОС)	Итоговая сумма баллов, учитывает успешно сданный экзамен	Оценка (ECTS)
5 (отлично) (зачтено)	90 - 100	A (отлично)
4 (хорошо) (зачтено)	85 – 89	B (очень хорошо)
	75 – 84	C (хорошо)
	70 - 74	D (удовлетворительно)
65 – 69		
3 (удовлетворительно) (зачтено)	60 - 64	E (посредственно)
2 (неудовлетворительно), (не зачтено)	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:

7.1 Основная литература:

1. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М., Щербинин С.В. Мультикоординатные электромехатронные системы движения. Томск: изд-во Томск.гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – 325 с.(15 экз. в библиотеке).

2. Лукинов А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. + CD. Изд-во «Лань». – 2012. – 608 с.

7.2 Дополнительная литература

1. Аполлонский С. М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Изд-во «Лань». – 2012. – 592 с.
2. Борисенко Л.А. Теория механизмов, машин и манипуляторов. Изд-во «Новое знание». – 2011. – 285 с.
3. Гайдук А. Р. Беляев В. Е. Пьявченко Т. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. Изд-во «Лань». – 2011. – 464 с.
4. Горитов А.Н., Кориков А.М. Моделирование адаптивных мехатронных систем. – Томск: В-Спектр, 2007. – 297 с. (5 экз. в библиотеке).
5. Осипов Ю.М., Васенин П.К. Электромехатроника. Ч.2. Микропроцессорные устройства и системы. Электронное учебное пособие. ФГУП НТЦ «Информресурс», рег. свид. №13727 от 24.06.2008 (1 экз. CD в библиотеке)
6. Осипов Ю.М., Негодяев С.В. Электромехатроника. Ч.1. Электротехника и электроника. Электронное учебное пособие. ФГУП НТЦ «Информресурс», рег. свид. №13728 от 24.06.2008 (1 экз. CD в библиотеке).
7. Осипов Ю.М., Медведев Д.А. Электромехатроника. Ч.3. Дуговые мехатронные модули. Электронное учебное пособие. ФГУП НТЦ «Информресурс», рег. свид. №13730 от 24.06.2008 (1 экз. CD в библиотеке).
8. Осипов Ю.М., Комзолов С.В., Щербинин С.В. Экспериментальное исследование функционирования системы управления устройством лазерной гравировки // Доклады ТУСУР, 2011, №2(24), ч.3. – С.85-87 (экз. в библиотеке).
9. Осипов Ю.М. К вопросу о развитии понятия «мехатроника» // Доклады ТУСУР, 2010, № 1 (21), часть 2. – С.193-198 (экз. в библиотеке).
10. Лабораторный практикум по лабораторным работам магистерской программы «Управление инновациями в мехатронике и робототехнике» / С.В. Комзолов, О.Ю. Осипов, Ю.М. Осипов, С.В. Щербинин, М.Г. Шепеленко. – Под общей ред. проф. Ю.М. Осипова. – Томск, 2012, 198 с. (на портале ТУСУР).
11. Медведев Д.А. Многокоординатный манипулятор на основе линейных и дуговых электромехатронных модулей движения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Томск: ТУСУР, 2009. – 23 с.