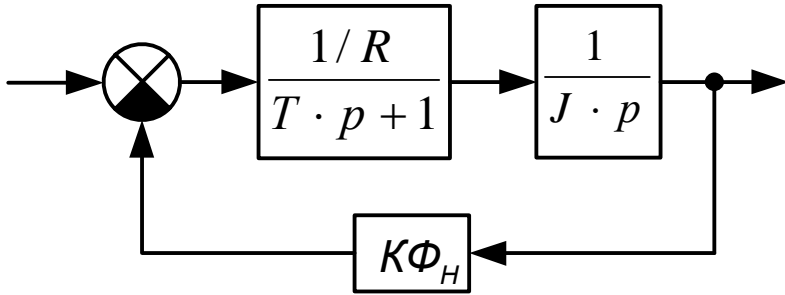
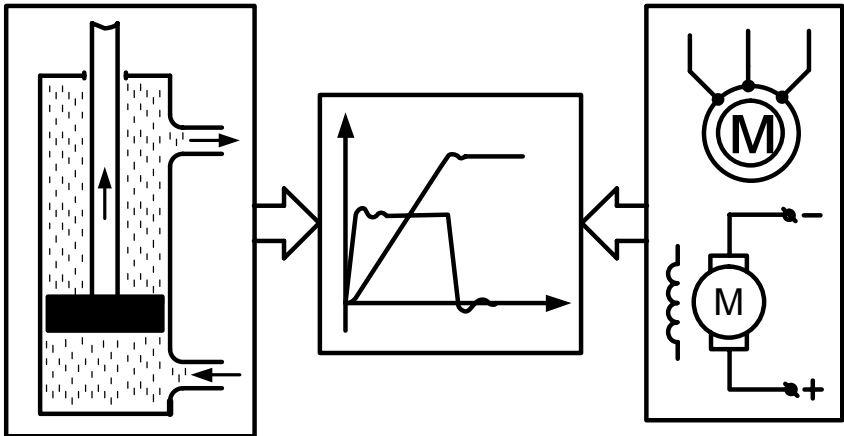


С. А. ЛИНЬКОВ
А.А. РАДИОНОВ



МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ





Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

С.А. Линьков
А.А. Радионов

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

*Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2013

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электромеханики и электромеханических систем,
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный
университет» (национальный исследовательский университет)

С. Г. Воронин

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой промышленной кибернетики и систем управления,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

С.М. Андреев

Линьков С.А., Радионов А.А.

Моделирование мехатронных систем [Электронный ресурс] : учебное пособие / Сергей Александрович Линьков, Андрей Александрович Радионов ; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,63 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены свойства идеального операционного усилителя, методика составления и преобразования структурных схем, математические модели мехатронных систем электроприводов, частотный анализ в электроприводе, описание среды визуального программирования MatLab SIMULINK для моделирования динамических звеньев и структурных схем САП. Представлен анализ свойств типовых элементов систем автоматизированного электропривода: исследование типовых линейных звеньев, свойств задатчика интенсивности, переходных процессов в цепях возбуждения, переходных процессов в двигателе постоянного тока при однозонном и двухзонном регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения, переходных процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Исследована математическая модель мехатронной системы гидронажимного устройства с сервоклапаном.

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ОБЪЕКТОВ.....	8
1.1. Назначение, методы и принципы аналогового моделирования.....	8
1.2. Идеальный операционный усилитель и его основные характеристики.....	10
1.2.1. Свойства операционного усилителя.....	10
1.2.2. Методика составления и преобразования структурных систем в процессе подготовки задач к решению на ЦВМ.....	14
1.2.3. Характеристика объектов моделирования.....	15
1.2.4. Требования, предъявляемые к математическим моделям....	22
1.3. Математические модели механических систем электроприводов.....	24
1.4. Математическая модель механической части электропривода в абсолютных единицах.....	24
1.5. Частотный анализ в электроприводе.....	28
1.6. Описание среды визуального программирования MatLab Simulink для моделирования динамических звеньев и структурных схем САП.....	35
1.6.1. Выборка и редактирование универсального блока Transfer Fcn.....	35
1.6.2. Блок построения сигналов Signal Builder.....	43
1.6.3. Выбор метода счета.....	49
1.6.4. Блок одномерной матрицы Look-Up Table.....	50
1.6.5. Снятие частотной характеристики звена или динамической системы в MatLab.....	53
1.6.6. Вопросы для самопроверки.....	58
2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK.....	59
2.1. Исследование типовых линейных звеньев.....	59

2.1.1. Интегрирующее звено	59
2.1.2. Инерционное звено (апериодическое 1-го порядка).....	62
2.1.3. Пропорционально-интегрирующее звено (ПИ-звено).....	64
2.1.4. Реально-дифференцирующее звено (реальное Д-звено).....	67
2.2. Исследование свойств задатчика интенсивности (ЗИ)	70
2.3. Переходные процессы в цепях возбуждения.....	74
2.3.1. Форсировка цепи возбуждения.....	74
2.3.2. Исследование переходных процессов в цепях возбуждения электрических машин с учетом насыщения	78
2.4. Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока при однозонном регулировании скорости.....	83
2.4.1. Разгон двигателя на холостом ходу до номинальной скорости и торможение до нуля.....	83
2.4.3. Разгон, работа $I_a = I_n$ и торможение двигателя с реактивной нагрузкой.....	89
	$\Delta U_{я} = 0,1 \cdot U_{яH}$
2.4.6. Скачкообразное приложение статической нагрузки при пониженном напряжении якоря.....	94
2.5. Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока при двухзонном регулировании скорости	96
2.6. Исследование переходных процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	100
2.6.1. Описание линейной математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	100
2.6.2. Вопросы для самопроверки.....	108
3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГИДРОНАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА С СЕРВОКЛАПАНОМ.....	109
3.1. Устройство и назначение сервоклапана	109
3.2. Математическая модель гидронажимного устройства и сервоклапана.....	110
3.3. Вопросы для самопроверки	120

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	121
--------------------------------	-----

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое вниманию читателей учебное пособие, разработанное в соответствии с Государственным образовательным стандартом Российской Федерации и рабочей программой по дисциплине "Моделирование мехатронных систем" для студентов ГОУ ВПО «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова по направлениям 221000 «Мехатронные системы в автоматизированном производстве», 140400 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и специальности 140604 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов".

Материал учебного пособия разбит на три главы. В первой главе рассмотрены свойства идеального операционного усилителя, методику составления и преобразования структурных схем, математические модели механических систем электроприводов, частотный анализ в электроприводе, описание среды визуального программирования MatLab SIMULINK для моделирования динамических звеньев и структурных схем САР.

Во второй главе рассматриваются исследование свойств типовых элементов систем автоматизированного электропривода, как составные части мехатронных модулей: исследование типовых линейных звеньев, свойств задатчика интенсивности (ЗИ), переходных процессов в цепях возбуждения, переходных процессов в двигателе постоянного тока при однозонном и двухзонном регулировании скорости.

В третьей главе исследуется мехатронная система гидронажимного устройства с сервоклапаном: устройство и работа сервоклапана и его математическая модель, математическая модель гидронажимного устройства с реверсивным поршнем, анализ переходных процессов математической модели мехатронной системы гидронажимного устройства с сервоклапаном.

Вопросы курса изложены с учетом наличия знаний у студентов дисциплин "Теоретические основы электротехники", "Физика", "Математика", "Электрический привод", "Электрические машины", "Теория автоматического управления", "Гидравлические системы" - в объеме, изучаемом в техническом вузе.

В конце книги приведены полезные ссылки на литературу, которую автор использовал при написании пособия. Поэтому при

возникновении каких-либо вопросов в процессе изучения курса студентам необходимо пользоваться указанной литературой.

Автор надеется, что настоящее учебное пособие окажет достойную помощь студентам при изучении соответствующего курса, а также будет полезно в их дальнейшей профессиональной деятельности.

Понимая, что материал пособия может быть изложен в более доступной и наглядной форме, автор с благодарностью примет все замечания по его содержанию, которые следует направлять по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ им. Г.И. Носова, редакционно-издательский отдел (или на кафедру "Автоматизированного электропривода и мехатроники").

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ОБЪЕКТОВ

1.1. Назначение, методы и принципы аналогового моделирования

Математическое компьютерное моделирование предполагает изучение процесса на основе анализа его математического описания с помощью ЭВМ дискретного и аналогового принципа действия.

При этом под вычислительной моделью понимают математическую модель, преобразованную к виду, удобному для работы на ЭВМ (например, принципиальная схема аналоговой модели следящей системы; программа для исследования следящего привода на ЦВМ). Вычислительные модели всегда реализуются средствами аналоговой, цифровой или гибридной техники.

Сущность моделирования заключается в замене реальной системы, машины или их элементов моделью, которая находится с ними в некотором соответствии и способна в той или иной мере воспроизводить свойства или характеристики реальной системы, то есть эффективно решать все основные задачи экспериментального исследования. Моделирование позволяет существенно уменьшить объём экспериментальных исследований, а также сократить сроки проектирования объектов.

В настоящее время различают два основных метода моделирования: физическое и математическое, [18]. Под физическим моделированием понимается метод, основанный на исследовании модели, имеющей одинаковую физическую природу с оригиналом. Физическое моделирование заменяет эксперимент, что особенно ценно для сложных систем и машин, и даёт возможность исследовать явления, которые происходят в машине-оригинале, при сохранении их физической природы. Единство материального мира приводит к поразительной идентичности уравнений, описывающих процессы в самых различных областях науки и техники. Это позволяет изучать явления, происходящие в оригинале, применив математическое моделирование, когда модель и оригинал различны по своей природе, но могут быть математически одинаково описаны. Таким образом, математическое моделирование использует модель иной физической природы по сравнению с оригиналом. Что же представляет собой математическая модель технического объекта?

Математическая модель технического объекта есть совокупность математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств и т.п.) и отношений между ними, которая адекватно отображает свойства технического объекта. С их помощью прогнозируются характеристики и оцениваются возможности предложенных вариантов схем и конструкций, проверяется их соответствие предъявляемым требованиям, проводится оптимизация параметров, разрабатывается техническая документация.

Различные виды моделирования - физическое, математическое и аналоговое - имеют один общий момент, который заключается в том, что моделировать можно только уже известные явления. Независимо от вида моделирования, в результате его осуществления неизбежно возникает некоторая побочная информация, не имеющая отношения к изучаемому явлению. Для эффективного исследования методом моделирования необходимо заранее знать, какого рода информация является основной с тем, чтобы на всю остальную, выходящую за ее рамки, просто не обращать внимания.

Отсюда следует вывод о том, что с помощью моделирования в принципе невозможно получение какой-то неожиданной информации, какого-то нового знания. Все неожиданное и новое будет неизбежно уничтожено при обработке результатов моделирования. То есть, получается, что с помощью моделирования нельзя сделать открытия какого-то неизвестного эффекта. Мы, может быть, даже увидим этот эффект, но отбросим его, потому что примем его за издержки моделирования. Таким образом, назначение моделирования - изучение и уточнение уже имеющейся информации о том или ином явлении, но не получение новой.

Аналоговое моделирование широко используется при изучении разного рода механизмов. Это осуществляется с помощью специально разработанных электромеханических аналогий. Данный тип моделирования является одним из важнейших видов моделирования, основанный на аналогии явлений, имеющих различную физическую природу, но описываемых одинаковыми математическими (дифференциальными, алгебраическими или какими-либо другими) уравнениями.

Простой пример - две системы, первая из которых имеющая механическую природу, состоит из оси, передающей вращение через пружину и маховик, погруженный частично в вязкую

тормозящую жидкость, валу, жестко связанному с маховиком. Вторая система - электрическая - состоит из источника электродвижущей силы, соединённого через катушку индуктивности, конденсатор и активное сопротивление со счётчиком электрической энергии. Если подобрать значения индуктивности, ёмкости и сопротивления так, чтобы они определённым образом соответствовали упругости пружины, инерции маховика и трению жидкости, то эти системы обнаружат структурное и функциональное сходство (даже тождество), выражаемое, в частности, в том, что они будут описываться одним и тем же дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами вида, [2]

$$a \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + cz = \omega .$$

Для визуального программирования в мощных математических пакетах, таких как MatLab Simulink такие дифференциальные уравнения можно представить в операторной

форме, заменив $\frac{d}{dt}$ на оператор дифференцирования p и на их

основе построить структурную схему объекта регулирования.

Это уравнение может служить «теоретической моделью» обеих систем, любая же из них - «экспериментальной моделью» этого уравнения и «аналоговой моделью» друг друга. Эта аналогия лежит в основе электрического моделирования механических систем: электрические модели гораздо более удобны для экспериментального исследования, нежели моделируемые механические.

1.2. Идеальный операционный усилитель и его основные характеристики

1.2.1. Свойства операционного усилителя

Применение ОУ в электронике чрезвычайно широко — операционный усилитель, вероятно, наиболее часто встречающийся элемент в аналоговой схемотехнике. Добавление лишь нескольких внешних компонент делает из ОУ конкретную схему аналоговой обработки сигналов.

Операционный усилитель изначально был спроектирован для выполнения математических операций (отсюда его название),

путём использования напряжения как аналоговой величины. Такой подход лежит в основе аналоговых компьютеров, в которых ОУ использовались для моделирования базовых математических операций (сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д.). Однако идеальный ОУ является многофункциональным схмотехническим решением, он имеет множество применений помимо математических операций.

Идеальный операционный усилитель

Для того, чтобы рассматривать функционирование ОУ в режиме с обратной связью, необходимо вначале ввести понятие *идеального операционного усилителя*. Идеальный ОУ является физической абстракцией, то есть не может реально существовать, однако позволяет существенно упростить рассмотрение работы схем на ОУ благодаря использованию простых математических моделей.

Идеальный ОУ обладает следующими характеристиками:

1. Бесконечно большой коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи G_{openloop} .

2. Бесконечно большое входное сопротивление входов V_- и V_+ . Другими словами, ток, протекающий через эти входы, равен нулю.

3. Нулевое выходное сопротивление выхода ОУ.

4. Способность выставить на выходе любое значение напряжения.

5. Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе ОУ.

6. Полоса пропускания: от постоянного тока до бесконечности.

Пункты 5 и 6 в действительности следуют из формулы (1.1), поскольку в неё не входят временные задержки и фазовые сдвиги. Из перечисленных условий следует важнейшее свойство идеального ОУ, упрощающее рассмотрение схем с его использованием:

Идеальный ОУ, охваченный отрицательной обратной связью, поддерживает одинаковое напряжение на своих входах.

Другими словами, при указанных условиях всегда выполняется равенство:

$$V_+ - V_- = 0 \quad (1.1)$$

Не следует думать, что ОУ выравнивает напряжения на своих входах, подавая напряжение на входы «изнутри». На самом деле ОУ выставляет на *выходе* такое напряжение, которое через

обратную связь подействует на входы таким образом, что разность входных напряжений уменьшится до нуля.

Легко убедиться в справедливости равенства (1.1). Допустим, (1.1) нарушено — имеет место небольшая разность напряжений. Тогда входное дифференциальное напряжение, усиленное в ОУ, вызвало бы (вследствие бесконечного коэффициента усиления) бесконечно большое выходное напряжение, которое, в соответствии с определением ООС, ещё уменьшило бы разность входных напряжений. Заметим, что выходное напряжение может быть любым — оно определяется видом обратной связи и входным напряжением.

Операционный усилитель почти всегда охвачен *глубокой отрицательной обратной связью*, свойства которой и определяют свойства схемы с ОУ.

Принцип введения отрицательной обратной связи иллюстрируется рис. 1.1.

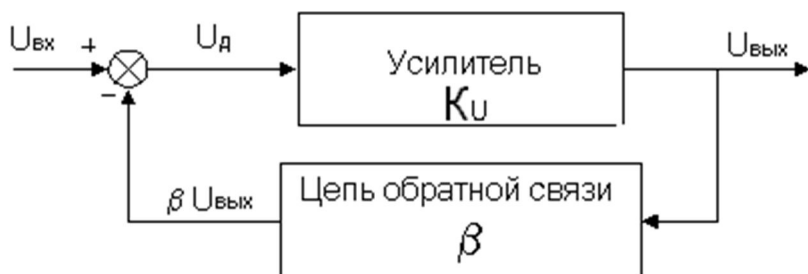


Рис. 1.1. Принцип отрицательной обратной связи

Часть выходного напряжения возвращается через цепь обратной связи ко входу усилителя. Если, как это показано на рис. 1, напряжение обратной связи вычитается из входного напряжения, обратная связь называется отрицательной.

Для физического анализа схемы, представленной на рис. 1, допустим, что входное напряжение изменилось от нуля до некоторого положительного значения $U_{вх}$. В первый момент выходное напряжение $U_{вых}$, а следовательно, и напряжение обратной связи $\beta U_{вых}$ также равны нулю. При этом напряжение, приложенное ко входу операционного усилителя, составит $U_д = U_{вх}$. Так как это напряжение усиливается усилителем с большим коэффициентом усиления K_u , то величина $U_{вых}$ быстро возрастет до некоторого положительного значения и вместе с ней возрастет

также величина $\beta U_{\text{вых}}$. Это приведет к уменьшению напряжения $U_{\text{д}}$, приложенного ко входу усилителя. Тот факт, что выходное напряжение воздействует на входное напряжение, причем так, что это влияние направлено в сторону, противоположную изменениям входной величины и есть проявление отрицательной обратной связи. После достижения устойчивого состояния выходное напряжение ОУ

$$U_{\text{вых}} = K_U U_{\text{д}} = K_U (U_{\text{вх}} - \beta U_{\text{вых}}).$$

Решив это уравнение относительно $U_{\text{вых}}$, получим:

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = K_U / (1 + K_U) \quad (1.2)$$

Таким образом, из соотношения (1.2) следует, что коэффициент усиления ОУ с обратной связью определяется почти исключительно только обратной связью и мало зависит от параметров самого усилителя, [18]. В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ работает как линейный усилитель, коэффициент усиления которого определяется только коэффициентом ослабления цепи обратной связи. Если в качестве цепи обратной связи применяется RC-цепь, то образуется активный фильтр. Наконец, включение в цепь обратной связи ОУ диодов и транзисторов позволяет реализовать нелинейные преобразования сигналов с высокой точностью.

Реальные ОУ, основанные на транзисторах, электронных лампах или других активных компонентах, выполненные в виде дискретных или интегральных схем, являются приближением к идеальному. На рис.1.2 показано схематичное изображение операционного усилителя.

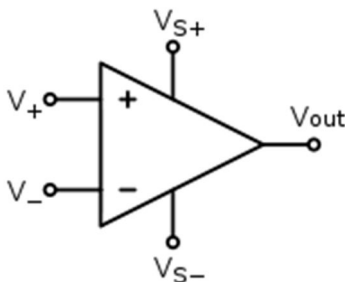


Рис. 1.2. Обозначение операционного усилителя на схемах

Выводы имеют следующее значение:

- V_+ : неинвертирующий вход;
- V_- : инвертирующий вход;
- V_{out} : выход;
- V_{S+} : плюс источника питания (также может обозначаться как V_{DD} , V_{CC} , или V_{CC+});
- V_{S-} : минус источника питания (также может обозначаться как V_{SS} , V_{EE} , или V_{CC-}).

Указанные пять выводов присутствуют в любом ОУ, они абсолютно необходимы для его функционирования. Помимо этого, некоторые ОУ могут иметь дополнительные выводы (предназначенные, например, для установки тока покоя, частотной коррекции, балансировки или других функций).

1.2.2. Методика составления и преобразования структурных систем в процессе подготовки задач к решению на ЦВМ

В общетеоретическом смысле моделирование означает осуществление каким-либо способом отображения или воспроизведения действительности для изучения имеющихся в ней объективных закономерностей.

Сущность моделирования заключается в замене реальной системы, машины или их элементов моделью, которая находится с ними в некотором соответствии и способна в той или иной мере воспроизводить свойства или характеристики реальной системы, то есть эффективно решать все основные задачи экспериментального исследования. Моделирование позволяет существенно уменьшить объем экспериментальных исследований, а также сократить сроки проектирования объектов.

В настоящее время различают два основных метода моделирования: физическое и математическое. Под физическим моделированием понимается метод, основанный на исследовании модели, имеющей одинаковую физическую природу с оригиналом. Физическое моделирование заменяет эксперимент, что особенно ценно для сложных систем и машин, и даёт возможность исследовать явления, которые происходят в машине-оригинале, при сохранении их физической природы. Единство материального мира приводит к поразительной идентичности уравнений, описывающих процессы в самых различных областях науки и техники. Это позволяет изучать явления, происходящие в оригинале, применив математическое моделирование, когда модель и оригинал различны по своей природе, но могут быть математически одинаково описаны. Таким образом,

математическое моделирование использует модель иной физической природы по сравнению с оригиналом. Что же представляет собой математическая модель технического объекта?

Математическая модель технического объекта есть совокупность математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств и т.п.) и отношений между ними, которая адекватно отображает свойства технического объекта. С их помощью прогнозируются характеристики и оцениваются возможности предложенных вариантов схем и конструкций, проверяется их соответствие предъявляемым требованиям, проводится оптимизация параметров, разрабатывается техническая документация.

Математическое моделирование развивается в двух основных направлениях:

- построение моделей прямой аналогии,
- построение моделей на базе вычислительных машин.

К моделям прямой аналогии относятся сеточные электрические модели для решения дифференциальных уравнений в частных производных, электролитические ванны, модели на бумаге с токопроводящим слоем.

Математическое компьютерное моделирование предполагает изучение процесса на основе анализа его математического описания с помощью ЭВМ дискретного и аналогового принципа действия, [2].

При этом под вычислительной моделью понимают математическую модель, преобразованную к виду, удобному для работы на ЭВМ (например, принципиальная схема аналоговой модели следящей системы; программа для исследования следящего привода на ЦВМ). Вычислительные модели всегда реализуются средствами аналоговой, цифровой или гибридной техники.

1.2.3. Характеристика объектов моделирования

Математические модели определяются предметной областью проектирования, соответствующей возможно более полному физическому и математическому описанию законов и условий функционирования проектируемого объекта, среды и способов взаимодействия объекта с нею, состава объекта, элементной базы, способов организации структуры объекта, измеряемых и настраиваемых параметров. Рассмотрим это подробнее.

Любой процесс в объекте моделирования зависит от групп параметров, определяющих его течение и характеризующих его состояние в любой момент времени, (рис.1.3). Под параметром понимается величина, характеризующая свойства или режим работы объекта, [18].

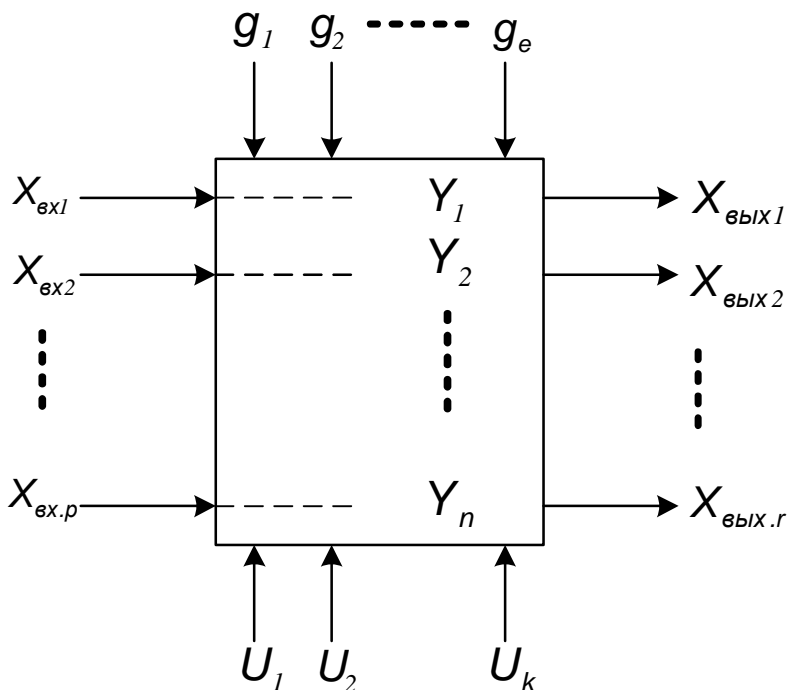


Рис.1.3. Схематическое изображение процесса в моделируемом объекте

Обычно выделяют следующие группы параметров:

1. Входные параметры $X_{вх.i}$ ($i=1,2,\dots,p$). Входными называют параметры, значение которых могут быть измерены, но возможность воздействия на них отсутствует. Предполагается также, что значения указанных параметров не зависят от режима процесса в объекте. Например, напряжение U_c и частота f_c питающей электропривод промышленной сети.

2. Управляющие параметры U_i ($i=1,2,\dots,k$). Под управляющими понимают параметры, на которые можно оказывать прямое воздействие в соответствии с теми или иными требованиями, управляя процессом. Сюда можно отнести задающий сигнал, сигналы обратных связей в системе автоматического управления.

3. Возмущающие параметры g_i ($i=1,2,\dots,e$). Возмущающими называют параметры, значения которых случайным образом изменяются с течением времени и которые недоступны для измерения, например высокочастотные помехи от тиристорного преобразователя.

5. Внутренние параметры Y_i ($i=1,2,\dots,n$). Внутренними называют параметры элементов, которые входят в состав объекта и обеспечивают тем самым его правильное функционирование, например угол регулирования на выходе системы импульсно-фазового управления, величина регулируемого напряжения полупроводникового преобразователя, питающего электродвигатель.

При составлении математического описания объекта перечисленные выше группы параметров подразделяют на внутренние и внешние. К внешним относятся входные параметры, возмущающие и управляющие параметры.

С учётом сделанных замечаний схематическое изображение процесса в моделируемом объекте можно представить в следующем виде (рис.1.4).

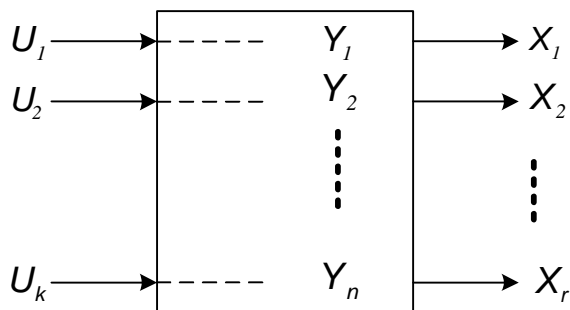


Рис.1.4. Обобщённое схематическое изображение объекта
 $X_1\dots X_r$ – выходные параметры; $Y_1\dots Y_n$ – внутренние параметры;
 $U_1\dots U_m$ – внешние параметры.

Тогда описать математическую модель объекта можно в векторной форме:

- через вектор выходных параметров $\mathbf{X}=(X_1...X_r)$;
- вектор внутренних параметров $\mathbf{Y}=(Y_1...Y_n)$;
- вектор внешних параметров $\mathbf{U}=(U_1...U_m)$.

И если выходные параметры однозначно определяются заданием внутренних (Y_n) и внешних (U_m) воздействий, что свойственно детерминированным процессам, то математическая модель может быть выражена в аналитической форме вида

$$\mathbf{X}=\mathbf{F}(\mathbf{Y},\mathbf{U}), \quad (1.3)$$

то есть модели в аналитической форме представляют собой явные выражения выходных параметров как функции внутренних и внешних параметров и поэтому называются аналитическими.

По отношению к электроприводу аналитическая форма моделей находит применение, поскольку функционирование элементов электропривода базируется на фундаментальных закономерностях электромеханического преобразования энергии. Любую сложную силовую структуру, состоящую из нескольких контуров, в которых происходит преобразование энергии из одного вида в другой, можно представить в виде отдельных элементов. Каждый из них осуществляет получение энергии, её накопление, передачу другому элементу, расходование на полезную работу или рассеивание некоторой части энергии в виде потерь. Знание природы элементов позволяет математически описать процессы преобразования энергии. Формализовав связи элементов между собой, можно получить уравнения, описывающие процессы в сколь угодно сложных и разнородных силовых структурах систем автоматизированного электропривода, [4].

В большинстве же случаев связь \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{U} известна в алгоритмической форме, например, через числовое решение системы уравнений. Вследствие этого для нахождения вида указанной зависимости необходимо иметь определённый алгоритм решения системы уравнений математического описания, применяя который для любой совокупности значений входных и управляющих параметров, можно рассчитать величины выходных параметров (параметров состояния).

При алгоритмической форме в уравнения математической модели помимо внутренних параметров и условий внешней среды входят физические величины, характеризующие состояние объекта моделирования и называемые фазовыми переменными. В электрических схемах такими величинами могут быть напряжения, токи, заряды. В механических системах – это скорости, силы, упругие деформации. Вектор фазовых переменных задаёт точку в пространстве, которое называется фазовым. Например, процесс

движения исполнительного привода, представленный в виде функций времени показано на рис.1.5.

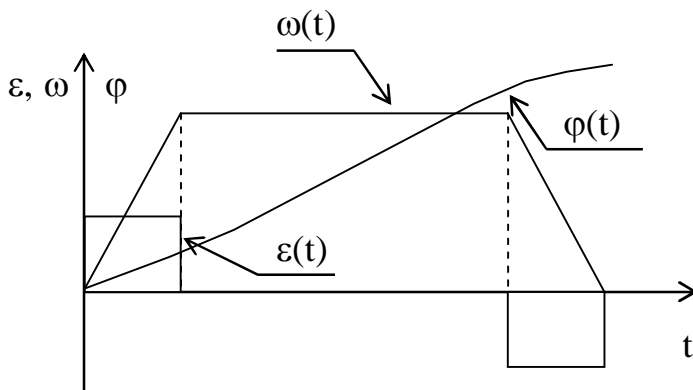


Рис.1.5. Представление переменных, характеризующих процесс движения исполнительного привода в виде функций времени

Таким образом, математическая модель в общем случае представляет собой систему уравнений математического описания, отражающую сущность явлений, протекающих в объекте моделирования, которая с помощью определённого алгоритма позволяет прогнозировать поведение объекта при изменении входных и управляющих параметров. Практически любой исследуемый процесс может быть отнесён к классу объектов с сосредоточенными или распределёнными параметрами. Определяющим признаком объекта с сосредоточенными параметрами является изменение параметров, описывающих его состояние только во времени. Параметры состояния для объектов с распределёнными параметрами могут изменяться как во времени, так и в пространстве, то есть могут являться функциями пространственных координат объекта.

Продолжим рассмотрение математической модели технического объекта, к которому относится и современный электропривод.

Содержание и форма модели определяются постановкой задачи и уровнем знаний о процессах в системе.

Математические модели, отражающие только структурные свойства объекта, например его геометрическую форму, взаимное

расположение элементов в пространстве и тому подобное, называют структурным. Структурной моделью (схемой) в теории автоматического управления называют графическое изображение математической модели автоматической системы управления в виде соединений звеньев (рис.1.6).

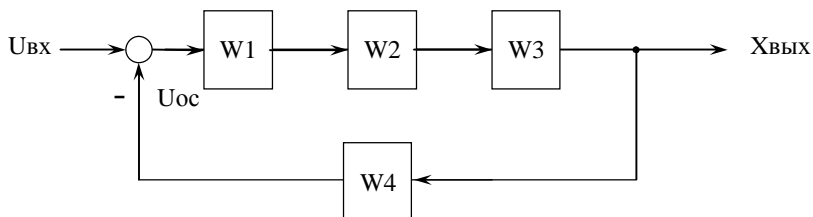


Рис.1.6. Структурная схема автоматической системы управления: W1...W4 – передаточные функции звеньев

Математические модели, отражающие закономерности процессов функционирования объектов, называются функциональными. К их числу можно отнести систему уравнений, описывающих электрические, тепловые или механические процессы. Функциональные модели, как правило, более сложные, так как в них отражаются также сведения о структуре объектов.

Блочно-иерархическое представление объектов проектирования на каждом уровне использует свои математические модели. Наиболее крупными, имеющими место при проектировании технических изделий иерархическими уровнями, являются три, которым соответствуют функциональные модели микро-, макро- и метауровня.

На микроуровне используют математические модели, описывающие физическое состояние и процессы в сплошных средах. В качестве математического аппарата обычно выступают дифференциальные уравнения в частных производных. Эти уравнения описывают, например поля электрического потенциала, напряжённно-деформированное состояние деталей механических конструкций и тому подобное, [5]. К типичным фазовым переменным на микроуровне относятся электрические потенциалы, плотности токов, механические напряжения и деформации, температуры, давления и т.п. Независимыми переменными являются время и пространственные координаты, причём пространство и время рассматриваются как непрерывные,

а выходными параметрами (переменными) – сопротивление резистора, характеристики механических элементов и так далее.

На макроуровне производится дискретизация пространств с выделением в качестве элементов отдельных деталей. При этом из числа независимых переменных исключают пространственные координаты, сохранив в качестве независимой переменной время. Функциональные модели на макроуровне представляют собой системы алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений. В качестве фазовых переменных в них фигурируют электрические напряжения, токи, силы, скорости, расходы, температуры и т.п. Выходными параметрами могут быть, например коэффициент усиления усилителя, передаточное число редуктора и т.д. Математические модели объектов на макроуровне состоят из компонентных уравнений элементов и топологических уравнений связи элементов. Уравнения, входящие в математическую модель элементов, называют компонентными. Для них характерно то, что они связывают разнотипные фазовые переменные, относящиеся к одному элементу. Основными фазовыми переменными электрических систем являются токи и напряжения в элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности, трансформаторах и др.).

Компонентные уравнения простых элементов имеют вид:

$$U = R \cdot I, U = L \cdot \frac{di}{dt}, i = C \cdot \frac{du}{dt},$$

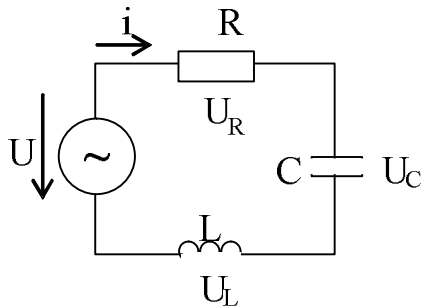
где i – ток, U – напряжение, R – сопротивление резистора, C – ёмкость конденсатора, L – индуктивность катушки.

Из математических моделей элементов формируются математические модели систем, в которые, наряду с компонентными уравнениями, обязательно входят уравнения, отражающие способ связи элементов между собой в составе системы, называемые топологическими. Их особенностью является то, что каждое из них связывает однотипные фазовые переменные, относящиеся к разным элементам системы, [6].

Примером могут служить уравнения законов Кирхгофа. Ниже приведен пример компонентных и топологических уравнений для второго закона, записываемого для контуров $\sum U_i = 0$, уравнение этого вида называют еще уравнением совместимости.

С ростом числа элементов растет порядок системы уравнений, соответственно растут затраты машинного времени на ее решение. Возможности моделей макроуровня оказываются

исчерпанными и возникает необходимость перехода к модели третьего уровня.



Компонентные уравнения:

1. $U_r = R \cdot i$;
2. $U_L = L \cdot di/dt$;
3. $U_c = 1/c \int i dt$

Топологические уравнения:

1. $\sum U_i = 0$
2. $U - U_r - U_c - U_L = 0$

На информационном уровне в качестве объектов рассматриваются, например, сложные устройства и комплексы вычислительной техники, системы управления, электрические системы. Дискретность представления пространства и времени обуславливается дискретностью фазовых переменных, которыми являются величины, характеризующие состояние элементов. Роль элементов и внутренних параметров выполняют системы и выходные параметры предыдущего иерархического уровня.

1.2.4. Требования, предъявляемые к математическим моделям

Основными требованиями, предъявляемыми к математическим моделям, являются требования точности (адекватности), универсальности (массовости) и экономичности, [18].

Адекватность. Модель считается адекватной, если отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Точность математической модели определяется степенью совпадения предсказанных или рассчитанных с ее помощью значений

параметров объекта с реальными значениями. Пусть ε_j – относительная погрешность модели по j -му выходному параметру

$$\varepsilon_j = (Y_{Mj} - Y_j) / Y_j,$$

где Y_{Mj} – j -й выходной параметр, рассчитанный с помощью модели; Y_j – тот же выходной параметр, имеющий место в моделируемом объекте. Погрешность модели E_M по совокупности учитываемых выходных параметров оценивается одной из норм вектора $E_M = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_j)$, например:

$$E_M = \sqrt{\sum_{j=1}^m \varepsilon_j^2}.$$

Определение областей адекватности – сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат, которые быстро возрастают с увеличением размерности пространства внешних параметров.

Требование универсальности математической модели предполагает возможность ее применения для описания объектов достаточно широкого класса и для анализа всех или многих режимов их функционирования.

Экономичность математической модели может оцениваться прежде всего затратами машинного времени $T_{\text{маш}}$, которое для обеспечения независимости от типа ЭВМ выражают числом элементарных операций, выполняемых при однократном решении уравнений модели. Показанием экономичности математической модели может служить также число внутренних параметров, используемых в ней. Чем больше таких параметров, тем больше затраты машинной памяти, тем больше усилий требуется для получения сведений о числовых значениях параметров и их разбросе. Требование высокой точности, большой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности – с другой, противоречивы. Чем детальнее в модели отражаются различные закономерности процессов, тем точнее и универсальнее модель, но тем больше требуемый объем вычислений и тем больше число используемых параметров, что приводит к снижению экономичности. Попытки сделать модель более экономичной обычно сопровождаются снижением точности, а иногда и универсальности. Поэтому необходим удачный компромисс.

1.3. Математические модели механических систем электроприводов

Одним из основных универсальных уравнений, позволяющих получить математическую модель, определяющую динамические характеристики механических систем, является уравнение Лагранжа.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i, \quad (i=1,2,3...n), \quad (1.5)$$

где q_i , \dot{q}_i – обобщенные координаты и обобщенные скорости;

W_k – кинетическая энергия системы;

Q_i – обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ δA_i всех внешних сил на возможном перемещении δg_i , $Q_i = \delta A_i / \delta g_i$.

Напомним, что к обобщенным координатам относятся физические величины, линейные или угловые перемещения, которые однозначно определяют состояние механической системы. Число обобщенных координат соответствует числу степеней свободы механической системы.

1.4. Математическая модель механической части электропривода в абсолютных единицах

В качестве примера рассмотрим двухмассовую механическую часть электропривода (рис.1.8), для которой составим математическую модель.

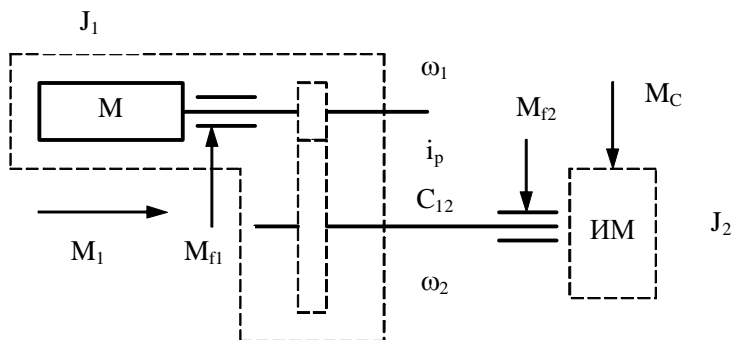


Рис.1.8. Кинематическая схема с упругим звеном первого рода

На рис. 1.8 отдельные массы с моментами инерции J_1 , J_2 соединены упругими кинематическими связями C_{12} . Для

вращающейся (ротационной) системы в качестве обобщенных координат выбираем угловые перемещения φ_i , а в качестве обобщенных скоростей ω_i число степеней свободы равно числу обобщенных координат $L=2$.

Все параметры расчетной схемы приведены к валу двигателя рис.1.9.

В расчетной схеме обобщенные координаты представляют угловые перемещения φ_1, φ_2 , а обобщенные скорости – угловые скорости ω_1, ω_2 , соответственно первой и второй масс с моментами инерции J_1 и J_2 .

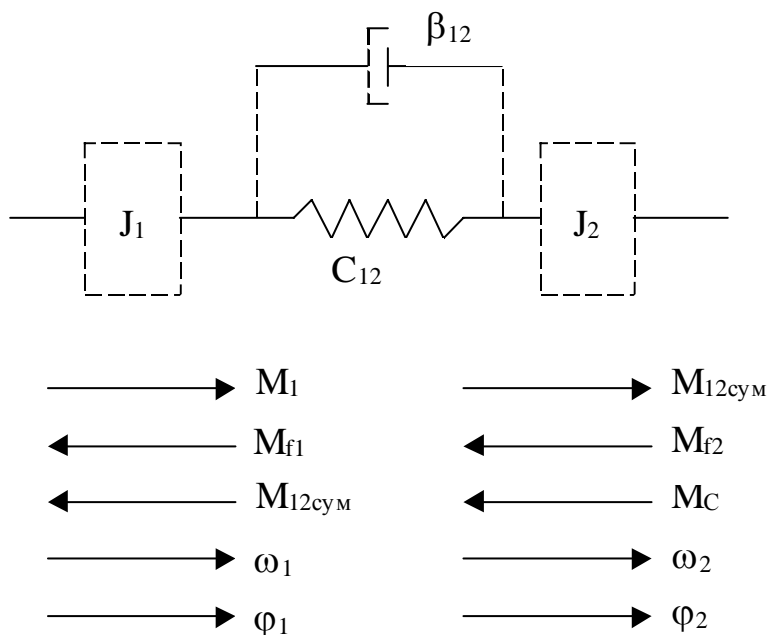


Рис.1.9. Расчетная схема двухмассовой последовательной упругой механической части электропривода

M_1 – внешний момент, создаваемый электродвигателем; M_{12} – момент, возникающий в упругих передачах; M_c – момент сопротивления; M_{f1}, M_{f2} – моменты от сил внешнего вязкого трения на первой и второй массах

Кинетическая энергия механической системы

$$W_k = J_1 \omega_1^2 / 2 + J_2 \omega_2^2 / 2. \quad (1.6)$$

Для определения обобщенной силы Q_1 , вычислим элементарную работу всех приложенных к первой массе J_1 моментов на возможном перемещении $\delta\varphi_1$:

$$\delta A_1 = (M - M_{f1} - M_{12 \text{ сым}}) \delta\varphi_1.$$

Тогда обобщенная сила, приложенная к первой массе, составит

$$Q_1 = \delta A_1 / \delta\varphi_1 = M_1 - M_{12 \text{ сым}} - M_{f1}. \quad (1.7)$$

Аналогично для второй массы обобщенная сила

$$Q_2 = M_{12 \text{ сым}} - M_c - M_{f2}. \quad (1.8)$$

Моменты от сил внешнего вязкого трения на первой и второй массах в первом приближении могут быть приняты пропорционально скоростям соответствующих масс

$$M_{f1} = a_1 \omega_1; \quad M_{f2} = a_2 \omega_2,$$

где a_1, a_2 – коэффициенты внешнего вязкого трения.

Момент M_{jk} , возникающий в упругих элементах (передачах), определяется упругим сопротивлением:

$$M_{jk} = C_{jk} (\varphi_j - \varphi_k) = C_{jk} \int_0^t (\omega_j - \omega_k) dt, \quad (1.9)$$

для нашего случая момент упругой деформации равен

$$M_{12} = C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Демпфирование колебаний осуществляется в материале упругой связи за счет сил внутреннего трения, пропорциональных разности скоростей первой и второй масс ω_1 и ω_2 . В общем виде можно записать, что момент вязкого трения $M_{jk \text{ вт}}$ равен

$$M_{jk \text{ вт}} = \beta_{jk} (\omega_1 - \omega_2), \quad (1.10)$$

где β_{jk} – коэффициент внутреннего вязкого трения.

Для нашего случая получаем уравнение

$$M_{12 \text{ вт}} = \beta_{12} (\omega_1 - \omega_2) = \beta_{\text{вт}} (\omega_1 - \omega_2).$$

С учетом сделанных замечаний получим систему дифференциальных уравнений (1.11), подставив в уравнение Лагранжа (1.5) кинетическую энергию (1.6) и составляющие вектора обобщенных сил (1.7) и (1.8):

$$\begin{cases} J_1(d\omega_1/dt) = M_1 - M_{12} - M_{f1} - M_{12, \text{BT}} = M_1 - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - \\ - a_1\omega_1 - \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ J_2(d\omega_2/dt) = M_{12} + M_{12, \text{BT}} - M_{f2} - M_c = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - a_2\omega_2 - M_c. \end{cases} \quad (1.11)$$

Применив преобразование Лапласа к системе (1.11), мы сможем записать в операторной форме при нулевых начальных условиях систему уравнений (1.12).

$$\begin{cases} \omega_1(p) = [(M_1(p) - C_{12}/p(\omega_1(p) - \omega_2(p)) - \beta_{12}(\omega_1(p) - \omega_2(p)) - \\ - a_1\omega_1(p))]/(J_1 p), \\ \omega_2(p) = [(C_{12}/p(\omega_1(p) - \omega_2(p)) + \beta_{12}(\omega_1(p) - \omega_2(p)) - \\ - a_2\omega_2(p) - M_c(p)]/(J_2 p), \\ M_{12} = C_{12}/p(\omega_1(p) - \omega_2(p)), \\ M_{12 \text{ вт}} = \beta_{12}(\omega_1(p) - \omega_2(p)), \\ M_{12, \text{сум}} = M_{12} + M_{12 \text{ вт}}. \end{cases} \quad (1.12)$$

Данная система уравнений позволяет построить структурную схему двухмассовой механической части электропривода с упругим звеном первого рода, которая приведена на рис.1.10.

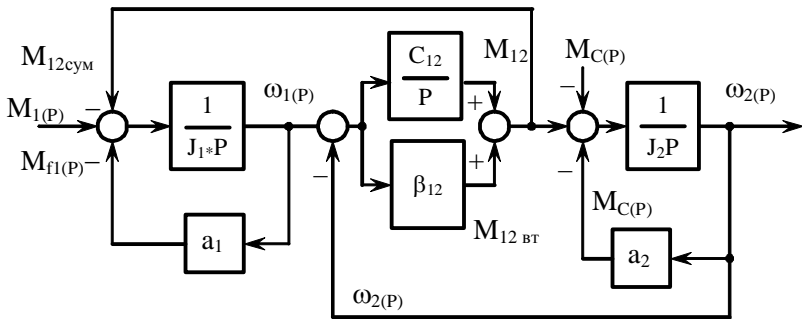


Рис.1.10. Структурная схема с упругим звеном первого рода

1.5. Частотный анализ в электроприводе

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) – это логарифм отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного, в зависимости от изменения частоты входного сигнала и неизменной его амплитуде.

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg \left(\frac{A_{\text{ВЫХ}}(p)}{A_{\text{ВХ}}(p)} \right),$$

где ω - угловая частота входного сигнала,

$A_{\text{ВЫХ}}(p) = \text{var}$ - амплитуда выходного сигнала,

$A_{\text{ВХ}}(p) = \text{const}$ - амплитуда входного сигнала.

Логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФЧХ) – показывает фазовый сдвиг (в электрических градусах) между входным и выходным сигналами, в зависимости от частоты изменения входного сигнала.

По ЛАЧХ и ЛФЧХ удобно определять частоты среза, сопряжения, наклон характеристики и фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами. Наклон частотной характеристики показывает интенсивность роста (либо уменьшения) выходной амплитуды сигнала с увеличением частоты изменения входного. Отрицательный наклон амплитудной характеристики говорит об уменьшении амплитуды выходного сигнала с увеличением частоты входного. Положительный наклон, наоборот, об увеличении амплитуды выходного сигнала, с увеличением частоты входного.

Для апериодического звена первого порядка с передаточной функцией $W(p) = \frac{k}{T_1 \cdot p + 1} = \frac{5}{0,1 \cdot p + 1}$ логарифмическая амплитудную и фазовая частотная характеристика приведены на рис.1.11.

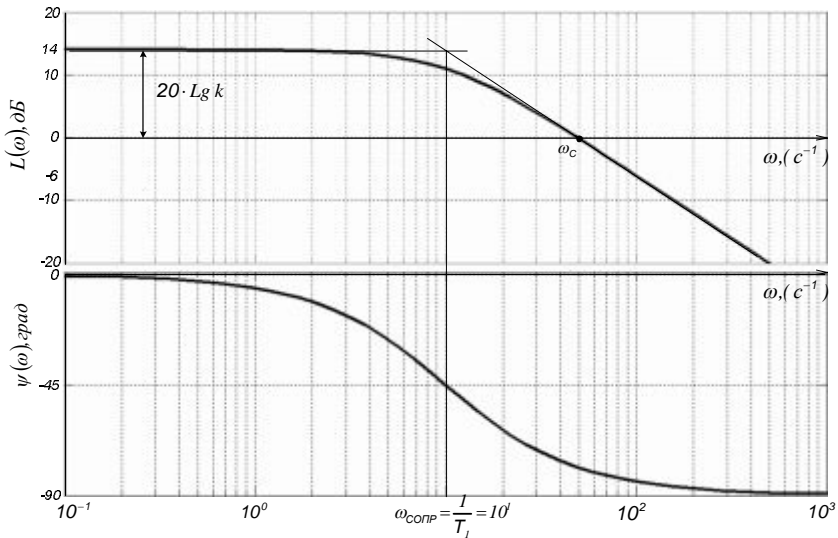


Рис. 1.11. ЛАЧХ и ЛФЧХ аperiodического звена 1-го порядка

Частота среза ω_c – это частота входного сигнала, при которой амплитуда выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ равна амплитуде входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$, т.е. $L(\omega) = Lg\left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}\right) = 0$.

Частота сопряжения $\omega_{\text{сопр}}$ – это частота входного сигнала, при которой меняется наклон ЛАЧХ.

На практике инерционным звеном можно представить, например, активно-емкостный R-C фильтр высоких частот. На практике такого типа фильтры используются практически во всех электронных устройствах. Расчет и коррекцию таких фильтров удобно производить по частотной характеристике. На функциональной схеме (рис.1.12) показан принцип снятия ЛАЧХ и ЛФЧХ R-C фильтра.

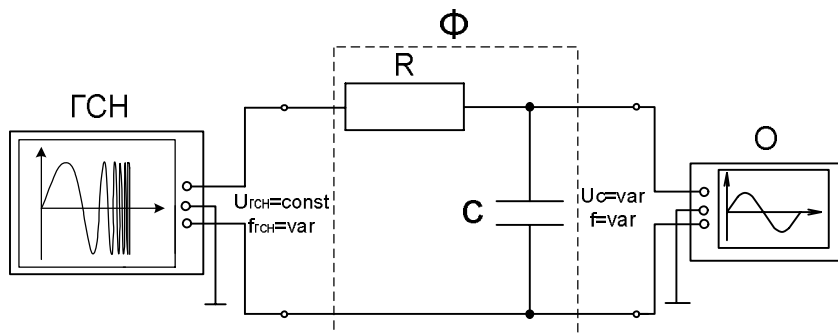


Рис.1.12. R-C фильтр

ГСН – генератор синусоидального напряжения ($f_{ГСН} = var$, $U_{ГСН} = const$);

C – конденсатор; R – резистор; О – осциллограф; Φ – фильтр.

На (рис.1.13) представлены осциллограммы входного и выходного напряжения R-C фильтра.

На вход исследуемого фильтра высоких частот подается синусоидальное напряжение с изменяющейся частотой $f_{ГСН} = var$ и постоянной амплитудой напряжения $U_{ГСН} = const$.

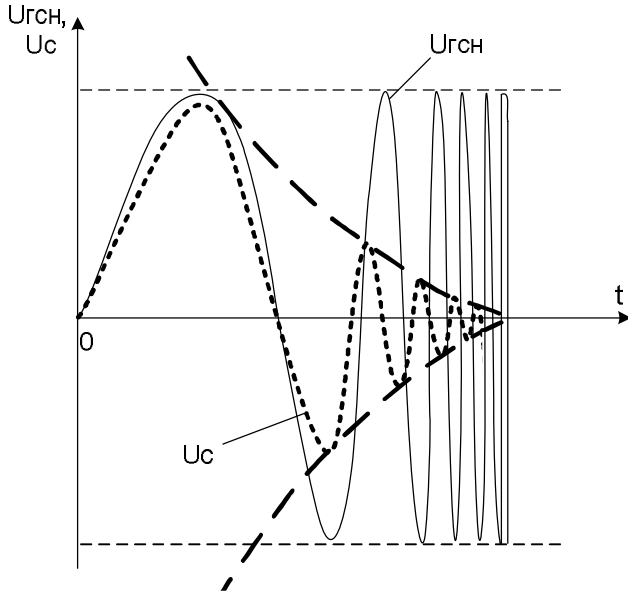


Рис.1.13. Осциллограммы входного и выходного напряжения R-C фильтра

В начале на вход фильтра поступают низкочастотные колебания, затем генератор плавно увеличивает частоту колебаний входного напряжения. Необходимый диапазон частот заранее устанавливается в ГСН. Как видно из (рис.1.13) в области низких частот входной сигнал повторяет выходной без искажений и отставания по фазе (первый полупериод), т.к. частота входного напряжения не выходит за пределы полосы пропускания R-C фильтра. С увеличением частоты $U_{ВХ}$ наблюдается стабильное уменьшение амплитуды $U_{ВЫХ}$ и отставание по фазе.

По частотным характеристикам R-C фильтра можно очень точно определить частотную полосу пропускания входного сигнала без искажений, что часто требуется на практике при расчете электрических схем.

На (рис.1.14) показана функциональная схема экспериментальной установки для определения частотной

характеристики двигателя постоянного тока по управляющему воздействию $U_{\text{я}}$. Фиксируемая координата – скорость электродвигателя $\omega_{\text{ДВ}}$.

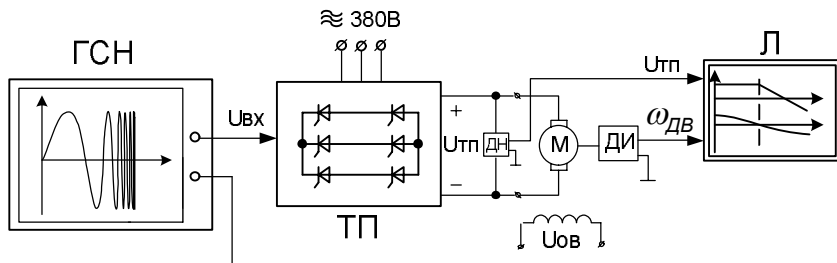


Рис. 1.14. Функциональная схема

Функциональная схема состоит из генератора синусоидального напряжения (ГСН), тиристорного преобразователя (ТП), двигателя постоянного тока независимого возбуждения (М) на вход которого подаются сигналы входного напряжения якоря и скорости. В качестве датчика скорости может служить либо малоинерционный тахогенератор, либо импульсный датчик ДИ. Для начала на вход ТП генерируется синусоидальное напряжение управления низкой частоты с постоянной амплитудой. При этом двигатель попеременно вращается по часовой и против часовой стрелки, разгоняясь и останавливаясь. Максимальная амплитуда напряжения якоря двигателя при малых частотах должна соответствовать скорости холостого хода, для соответствующего напряжения. Амплитуда напряжения якоря не обязательно должна быть равна номинальному напряжению двигателя. Затем частота напряжения плавно увеличивается.

На рис. 1.15 представлены ЛАЧХ и ЛФЧХ двигателя, а на рис. 1.16-1.18 переходные процессы сигналов напряжения и скорости двигателя при трёх различных частотах питающего напряжения.

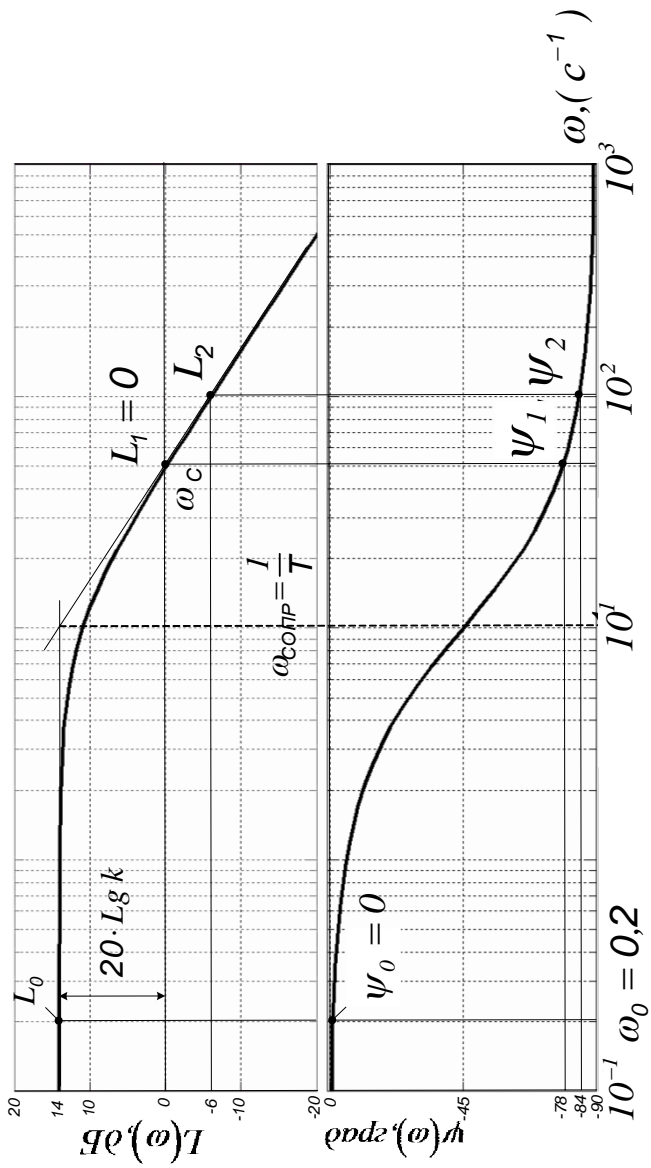


Рис. 1.15. ЛАЧХ и ЛФЧХ двигателя

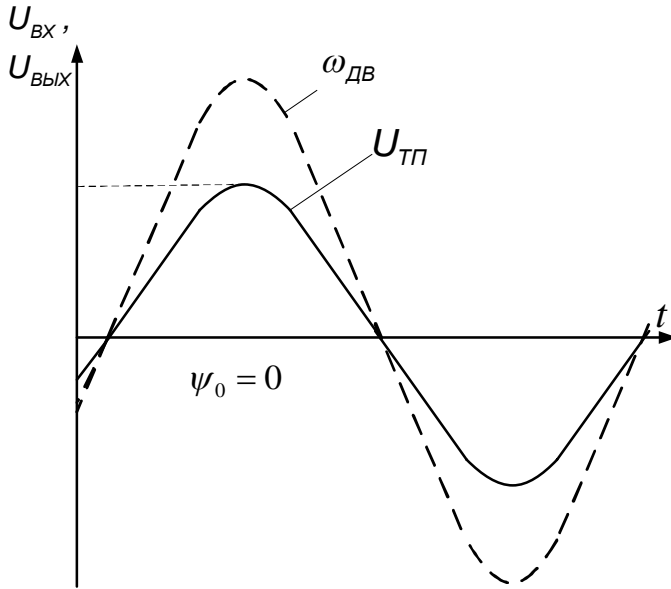


Рис. 1.16. Переходные процессы $\omega_{ДВ}$ и $U_{ТП}$ при частоте ω_0

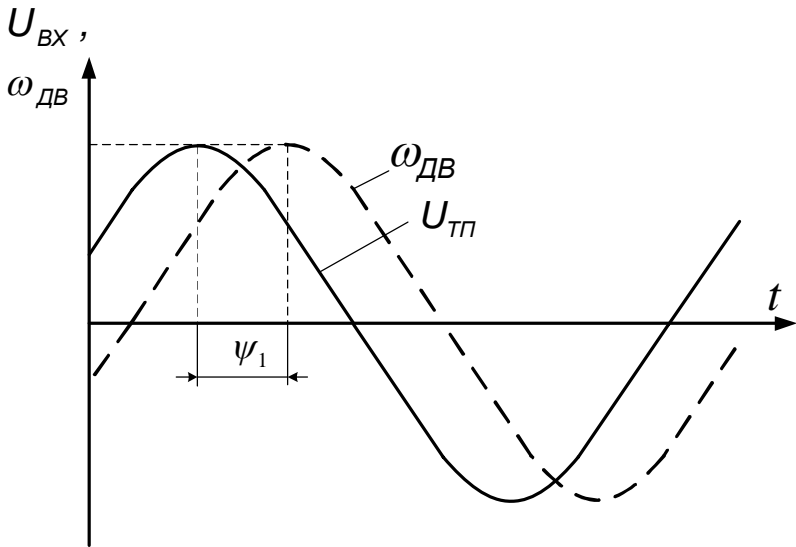


Рис. 1.17. Переходные процессы $\omega_{ДВ}$ и $U_{ТП}$ при частоте ω_c

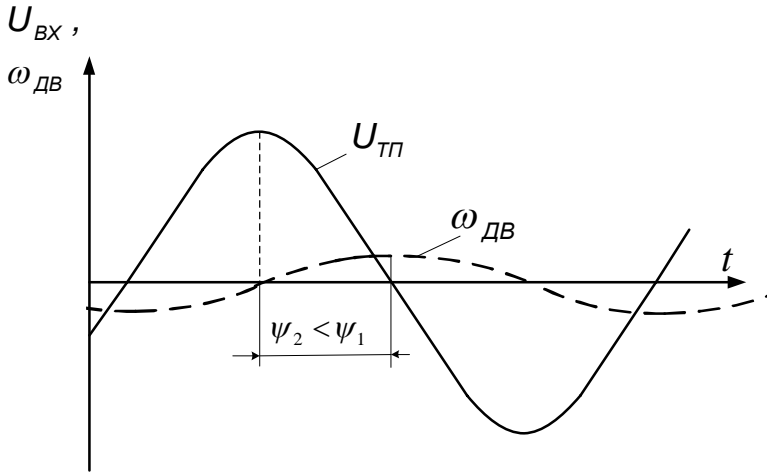


Рис. 1.18. Переходные процессы $\omega_{ДВ}$ и $U_{ТП}$ при частоте $\omega_{СОПР}$

До частоты сопряжения $\omega_{СОПР}$ амплитуда сигнала скорости соответствует тому напряжению, которое подается на якорь, фазовый сдвиг по арктангенсальной зависимости увеличивается до $\psi = -45^\circ$, рис. 1.15. Дальнейшее увеличение частоты $U_{ТП}$ приводит к уменьшению амплитуды скорости двигателя и увеличению фазового сдвига между сигналами, рис. 1.15.

Достигнув частоты среза, амплитуды обоих сигналов равны по значению $L_1(\omega) = 0$.

1.6. Описание среды визуального программирования MatLab Simulink для моделирования динамических звеньев и структурных схем САП

1.6.1. Выборка и редактирование универсального блока Transfer Fcn

Программа **Simulink** является приложением к пакету **MATLAB**. При моделировании с использованием **Simulink** реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет

расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом **MATLAB** и при работе с ним совсем не требуется знать сам **MATLAB** и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям **MATLAB** и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в **Simulink**. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в **Simulink** (например, **LTI-Viewer** приложения **Control System Toolbox** – пакета для разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, **Power System Blockset** – моделирование электротехнических устройств, **Digital Signal Processing Blockset** – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д).

При работе с **Simulink** пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки **Simulink**. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет **MATLAB**. Основное окно пакета **MATLAB** показано на рис. 1.19. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык **Simulink** в панели инструментов.

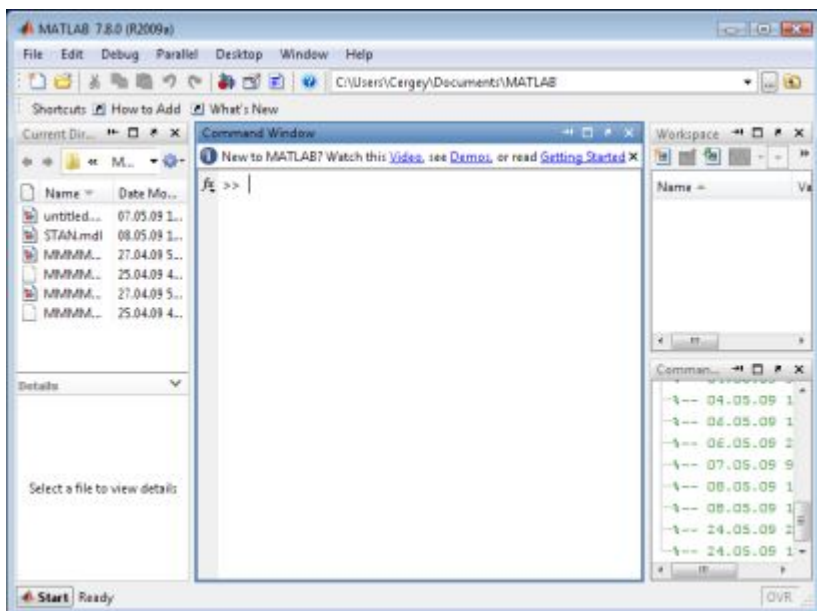



Рис 1.19. Основное окно программы **MATLAB**

После открытия основного окна программы **MATLAB** нужно запустить программу **Simulink**. Это можно сделать одним из трех способов (рис. 1.20):

- Нажать кнопку  (**Simulink**) на панели инструментов командного окна **MATLAB**.
- В командной строке главного окна **MATLAB** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter** на клавиатуре.
- В меню **File** открыть вкладку **New - Model**.

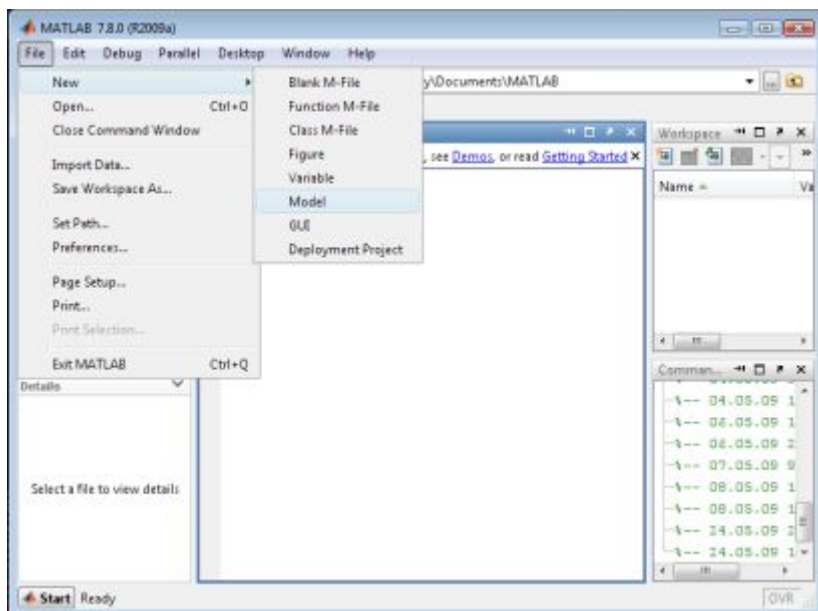


Рис. 1.20. Основное окно программы MATLAB

Появившееся окно – окно рабочей области, в которой можно собирать структурные схемы динамических систем (рис. 1.21).

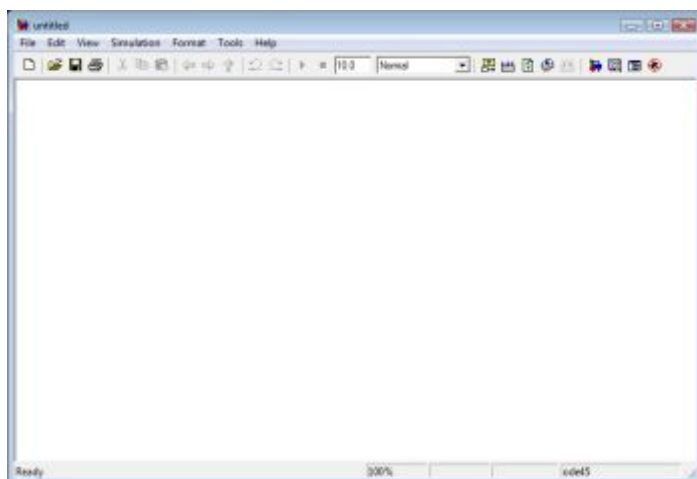



Рис. 1.21. Окно рабочей области

Все динамические блоки находятся в библиотеке, которая открывается нажатием клавиши  на панели окна рабочей области (рис. 1.22).

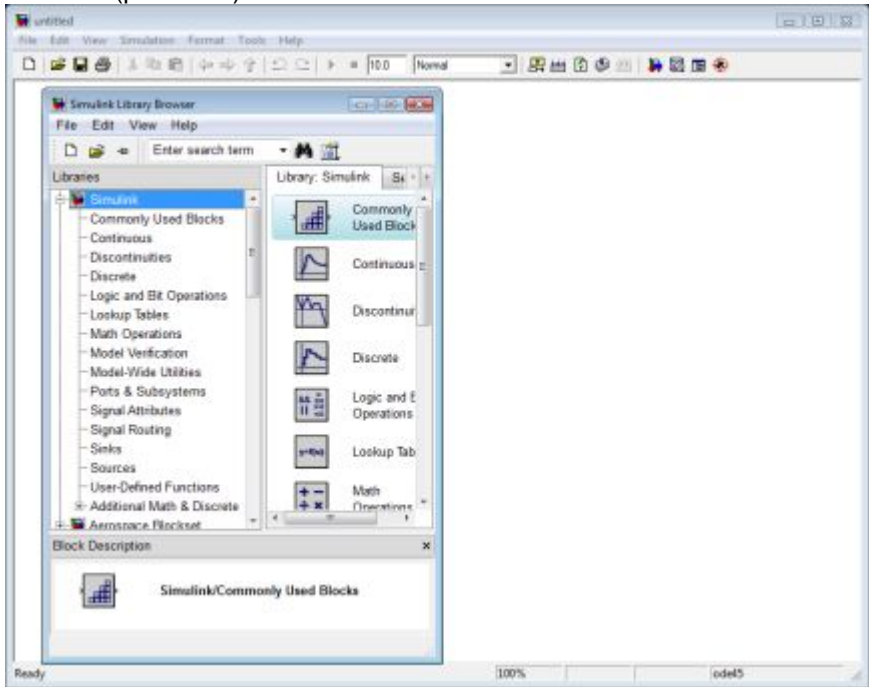


Рис. 1.22. Библиотека MATLAB

Выбрать и расположить в окне необходимые для модели блоки можно указав курсором на требуемый блок в выбранном разделе (например **Continuous – Transfer Fcn**) и нажав на левую клавишу “мыши” - “перетащить” блок в созданное окно (рис. 1.23). *Клавишу мыши нужно держать нажатой.*

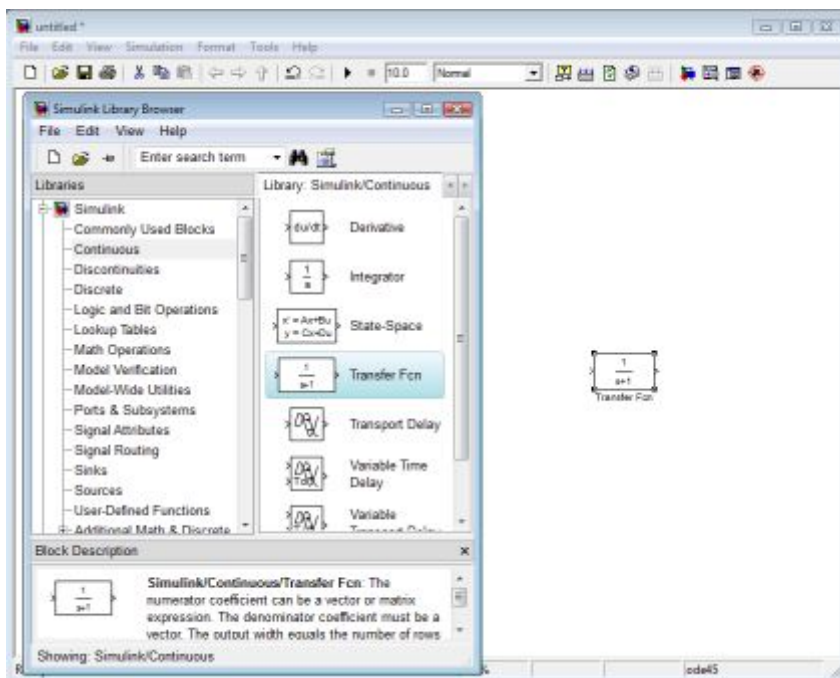


Рис. 1.23. Выборка блоков библиотеки MATLAB

Выбранный блок является универсальным и в него можно записать передаточную функцию любого известного и ТАУ динамического звена, любого порядка. Например, необходимо реализовать апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{5}{2 \cdot p + 1}.$$

Для этого нужно дважды щелкнуть мышью блок **Transfer Fcn** в рабочем окне (рис. 1.24).

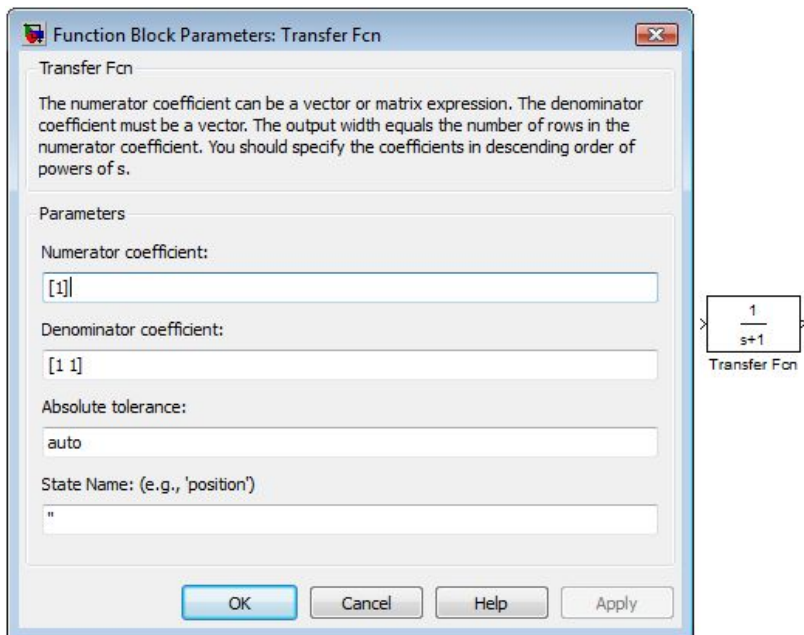


Рис. 1.24. Функциональное окно блока **Transfer Fcn**

В появившемся функциональном окне в строке **Numerator coefficient** в квадратных скобках через пробел указываются коэффициенты полинома числителя передаточной функции, а в строке **Denominator coefficient** коэффициенты полинома знаменателя. В данном случае для выбранного апериодического звена заполненный функциональный блок представлен на рис. 1.25.

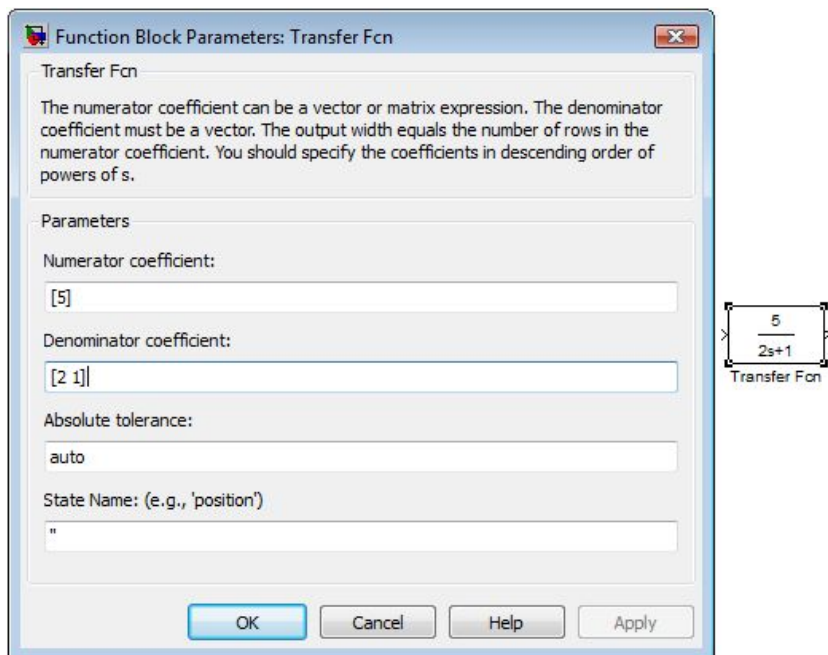


Рис. 1.25. Функциональное окно блока **Transfer Fcn**

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу “мыши”), а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

Любая динамическая система предполагает исследования её с помощью управляющих и возмущающих воздействий. Изменяющийся во времени сигнал любой формы можно получить с помощью универсального блока построения сигналов **Signal Builder**, который находится в списке библиотеки **Simulink – Sources**. Для снятия переходных процессов в среде MatLab можно воспользоваться многофункциональным осциллографом (список **Sinks - Scope**). В осциллограф можно завести несколько сигналов с помощью блока **Mux** в списке **Commonly Used Blocks** (рис. 1.26). Соединение двух блоков (вход - выход) осуществляется удерживанием и соединением входа с выходом левой кнопкой мыши. При подведении мыши ко входу курсор меняет форму на крест.

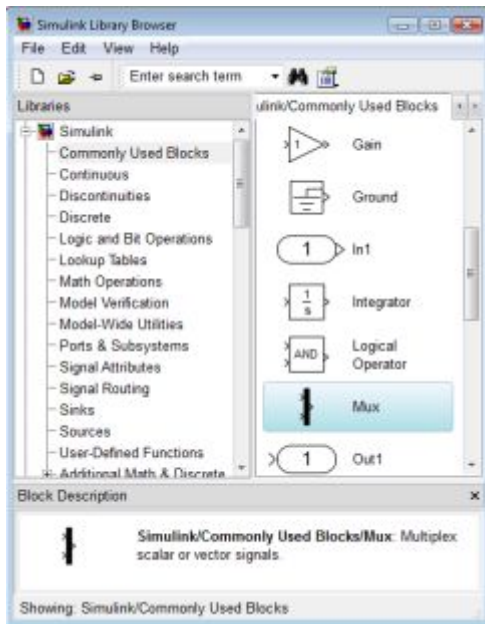


Рис. 1.26. Выборка блока Mux

1.6.2. Блок построения сигналов *Signal Builder*

Построение сигнала любой формы осуществляется в специальной области. Область построения сигнала появляется при двойном щелчке по блоку **Signal Builder** в рабочем окне (рис. 1.27).

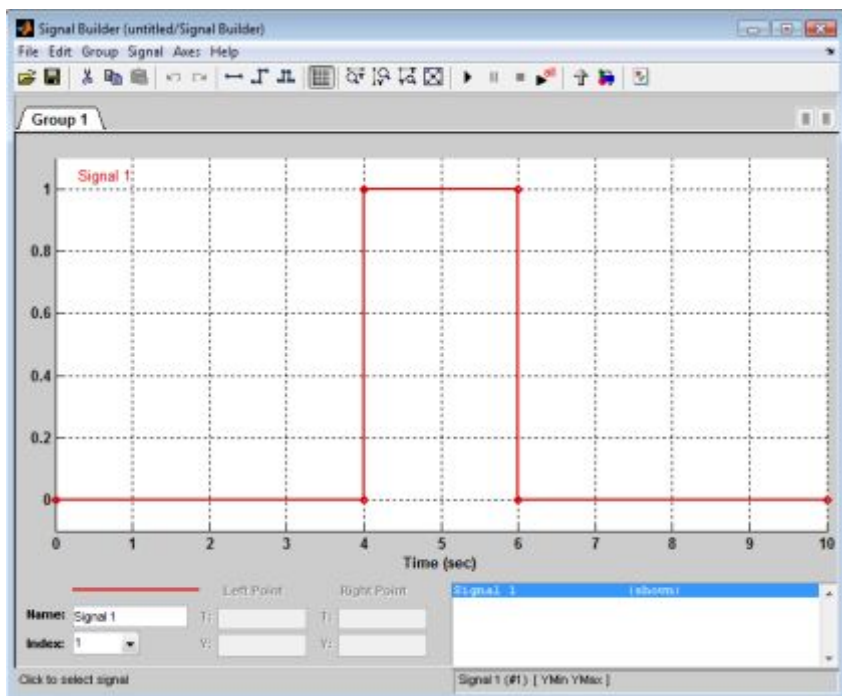


Рис.1.27. Окно построения сигнала

В окне построения сигналов красным цветом показан ломаный сигнал в масштабе времени. За угол излома можно ухватиться мышью и изменить его форму. Также есть возможность изменять уровень сигнала по амплитуде. Для этого необходимо щелкнуть мышью на угол сигнала, точка угла выделится красным кругом. Внизу окна (**Left Point, Right Point**) можно вручную изменить координаты этой точки. Если не хватает точек для построения нужного сигнала, то можно добавить необходимое количество точек, щелкнув в нужное место правой кнопкой мыши, удерживая клавишу Shift (рис. 1.28).

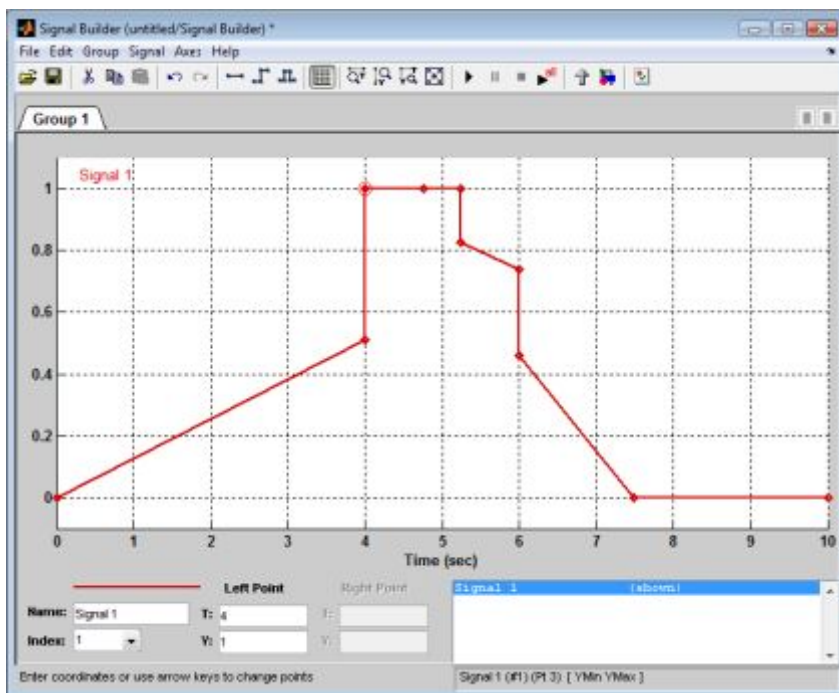


Рис.1.28. Окно построения сигнала

Для того, чтобы открыть окно просмотра сигналов необходимо выполнить двойной щелчок левой клавишей “мыши” на изображении блока **Scope**, появится окно осциллографа (рис. 1.29). Это можно сделать на любом этапе расчета (как до начала расчета, так и после него, а также во время расчета). В том случае, если на вход блока поступает векторный сигнал, то кривая для каждого элемента вектора строится отдельным цветом.

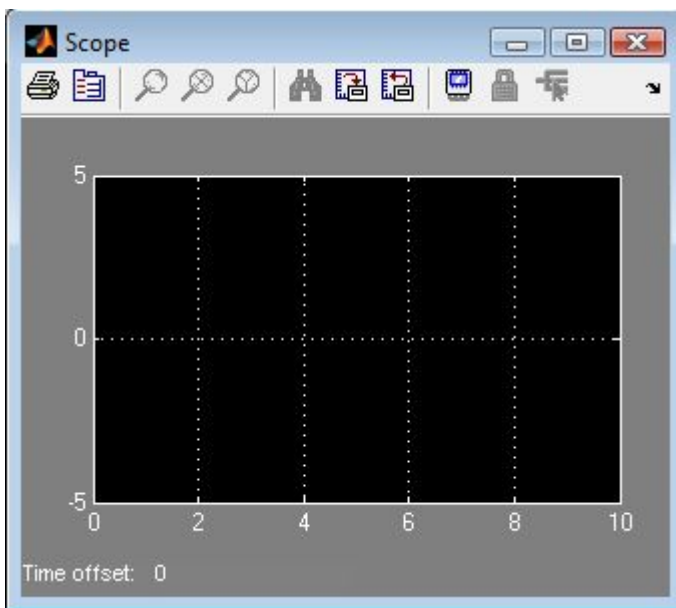


Рис. 1.29. Окно осциллографа

Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов (рис. 1.30).

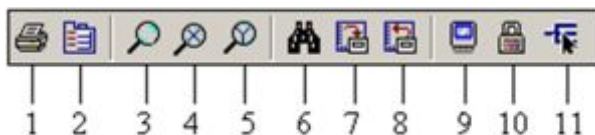


Рис. 1.30. Панель инструментов блока **Scope**

Панель инструментов содержит 11 кнопок:

1. **Print** – печать содержимого окна осциллографа.
2. **Parameters** – доступ к окну настройки параметров.
3. **Zoom** – увеличение масштаба по обеим осям.
4. **Zoom X-axis** – увеличение масштаба по горизонтальной оси.
5. **Zoom Y-axis** – увеличение масштаба по вертикальной оси.
6. **Autoscale** – автоматическая установка масштабов по обеим осям.

7. Save current axes settings – сохранение текущих настроек окна.




8. Restore saved axes settings – установка ранее сохраненных настроек окна.




9. Floating scope – перевод осциллографа в “свободный” режим.

10. Lock/Unlock axes selection – закрепить/разорвать связь между текущей координатной системой окна и отображаемым сигналом. Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.

11. Signal selection – выбор сигналов для отображения. Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.

Изменение масштабов отображаемых графиков можно выполнять несколькими способами:

1. Нажать соответствующую кнопку (,  или ) и щелкнуть один раз левой клавишей “мыши” в нужном месте графика. Произойдет 2,5 кратное увеличение масштаба.

2. Нажать соответствующую кнопку (,  или ) и, нажав левую клавишу “мыши”, с помощью динамической рамки или отрезка указать область графика для увеличенного изображения. На рис. 1.31 изображено окно просмотра сигналов осциллографа.

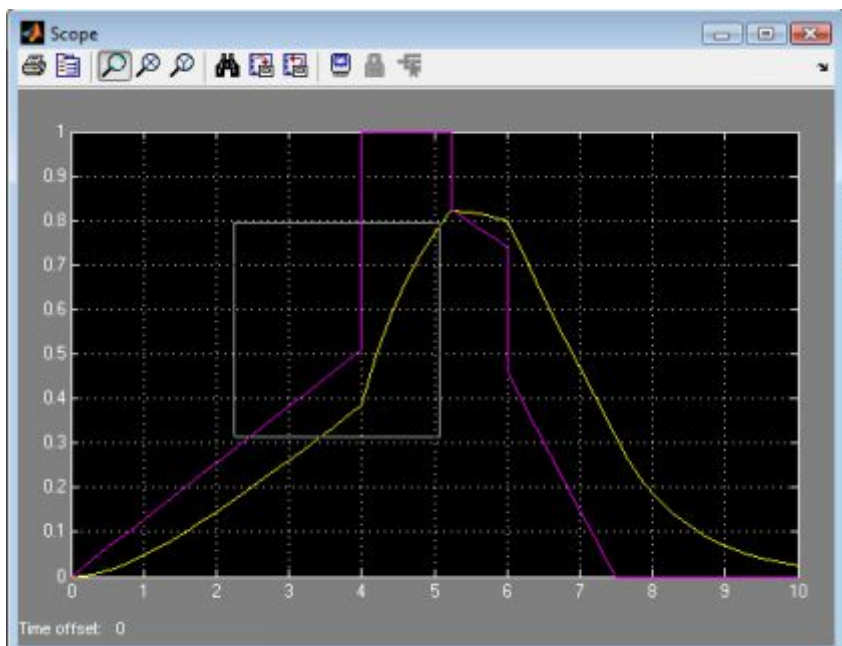


Рис. 1.31. Окно просмотра сигналов осциллографа

3. Щелкнуть правой клавишей “мыши” в окне графиков и, выбрать команду **Axes properties...** в контекстном меню. Откроется окно свойств графика, в котором с помощью параметров **Y-min** и **Y-max** можно указать предельные значения вертикальной оси. В этом же окне можно указать заголовок графика (**Title**), заменив выражение **%<SignalLabel>** в строке ввода. Окно свойств показано на рис. 1.32.

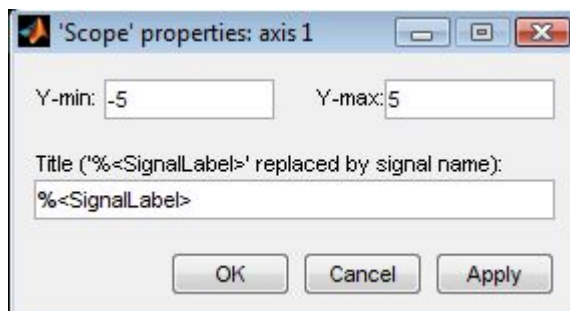


Рис. 1.32. Окно свойств графика

Параметры:

Параметры блока устанавливаются в окне **'Scope' parameters**, которое открывается с помощью инструмента **(Parameters)** панели инструментов. Окно параметров имеет две вкладки:

General – общие параметры.

Data history – параметры сохранения сигналов в рабочей области **MATLAB** (рис. 1.33).

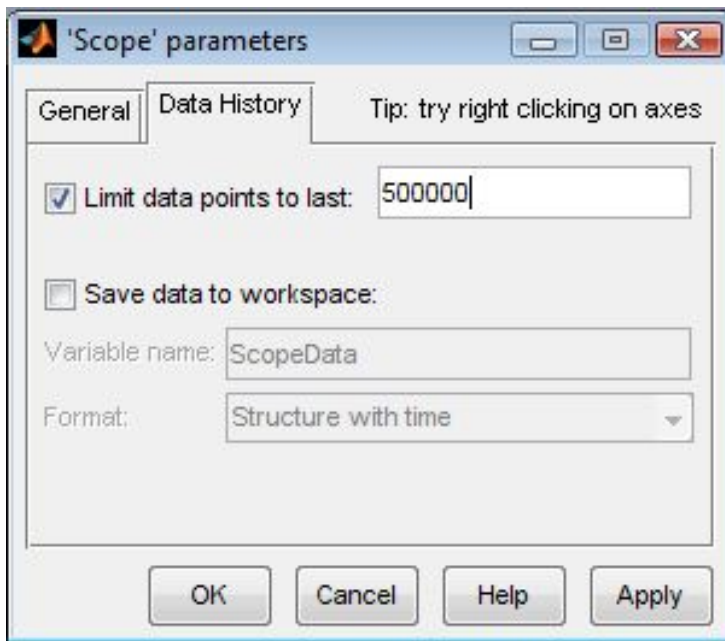


Рис. 1.33. Окно свойств осциллографа

Во вкладке **Limit data points to last** можно указать нужное количество точек осциллографа. Если точек не будет хватать для построения всех переходных процессов, то графики будут «урезаны» во временном диапазоне.

1.6.3. Выбор метода счета

Для различных структурных схем применяются различные методы счета. Если структурная схема состоит из динамических

звеньев, то удобен метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом счета.

Для его установки в окне рабочей области нужно щелкнуть меню **Simulation / Configuration**.

В строке Simulation time выставляются время начала и время конца счета. В разделе **Solver options** выставляется метод счета Solver: ode4 (Runge-Kutta), тип счета Type: Fixed-step. В строке Fixed-step size (fundamental sample time) выставляется шаг счета. Окно настроек метода счета представлен на рис. 1.34.

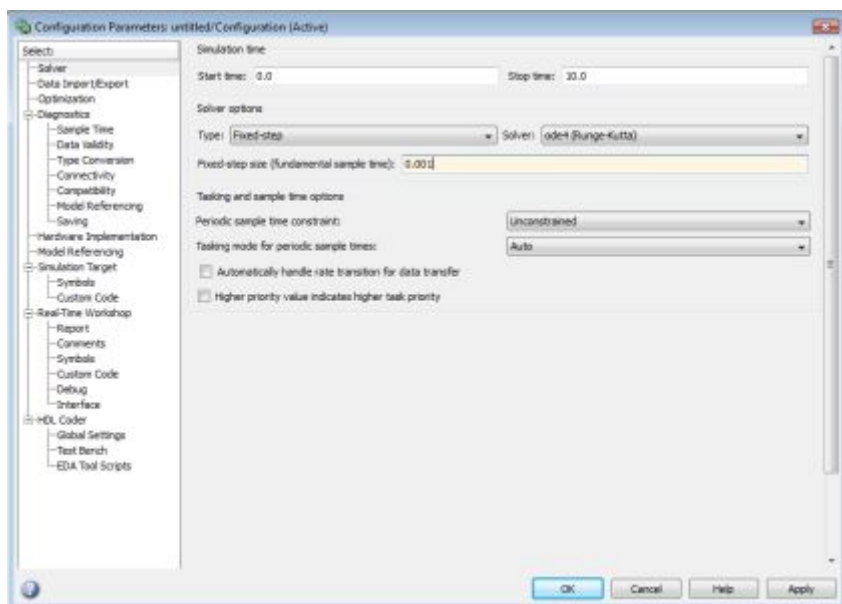


Рис. 1.34. Окно конфигурации

1.6.4. Блок одномерной матрицы Look-Up Table

С помощью блока одномерной матрицы **Look-Up Table** можно задать график любой математической функции, либо нелинейную характеристику (блоки ограничения, блок зоны нечувствительности и др.). Данный блок находится в библиотеке **Simulink / Look-Up Table / Look-Up Table**. Окно и блок одномерной матрицы приведены на рис. 1.35.

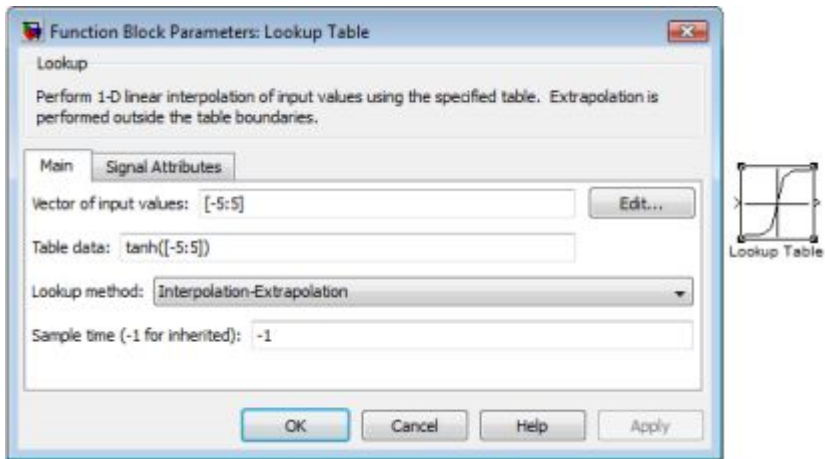


Рис. 1.35. Окно свойств блока **Look-Up Table**

В строке **Vector of input values** в квадратных скобках через пробел задаются координаты необходимого графика функции по оси абсцисс. В строке **Table data** в квадратных скобках задаются координаты графика функции по оси ординат. Заданный график отразится на пиктограмме блока.

Например, необходимо реализовать блок ограничения с зоной нечувствительности и линейным участком (рис. 1.36).

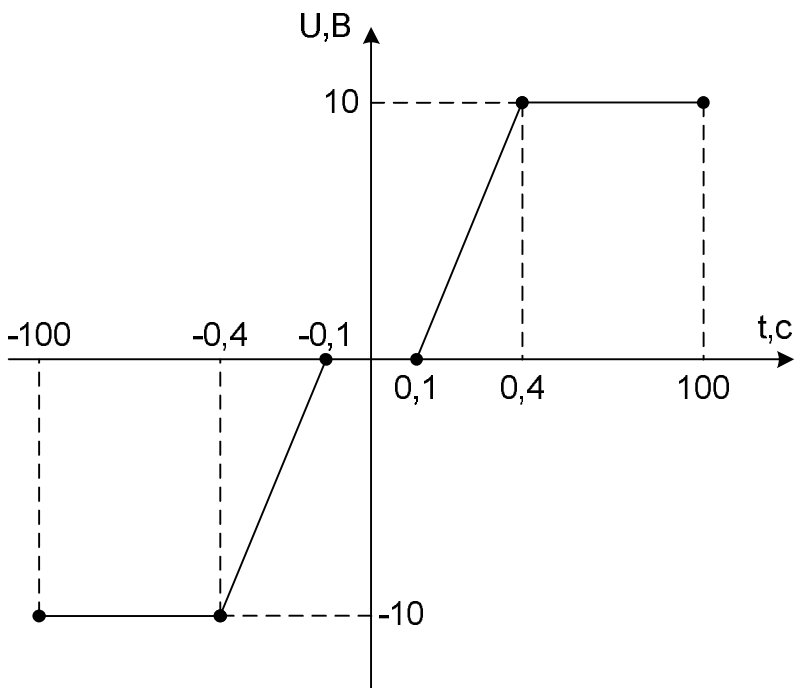


Рис. 1.36. Характеристика блока ограничения

Окно и блок одномерной матрицы с введенными координатами блока ограничения приведены на рис. 1.37.

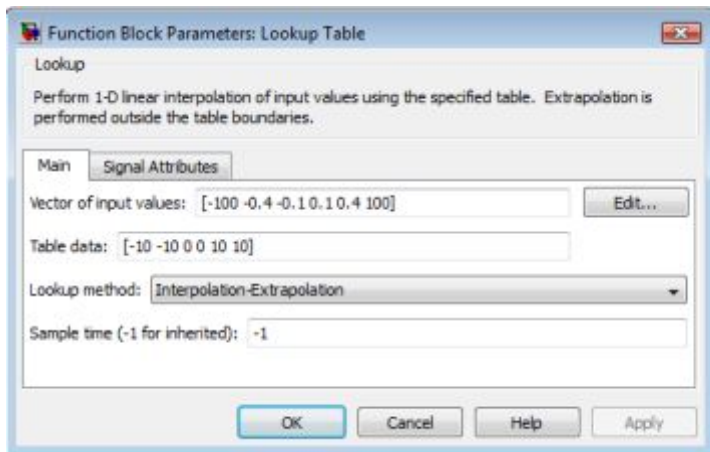


Рис. 1.37. Окно свойств блока **Look-Up Table**

1.6.5. Снятие частотной характеристики звена или динамической системы в *MatLab*

Пусть необходимо снять логарифмическую амплитудную и фазовую частотную характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) инерционного

звена с передаточной функцией $W(p) = \frac{5}{2 \cdot p + 1}$, (рис. 1.38).

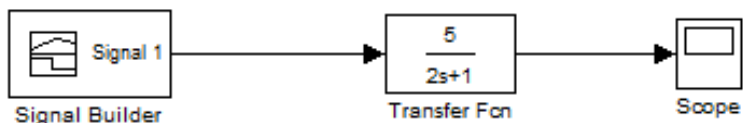


Рис. 1.38. Инерционное звено

Сначала нужно установить точки входа (**Input point**) и выхода (**Output point**) для снятия частотной характеристики. Для этого необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на линию входа в блок и выбрать **Linearization Points / Input Point**, (рис. 1.39).

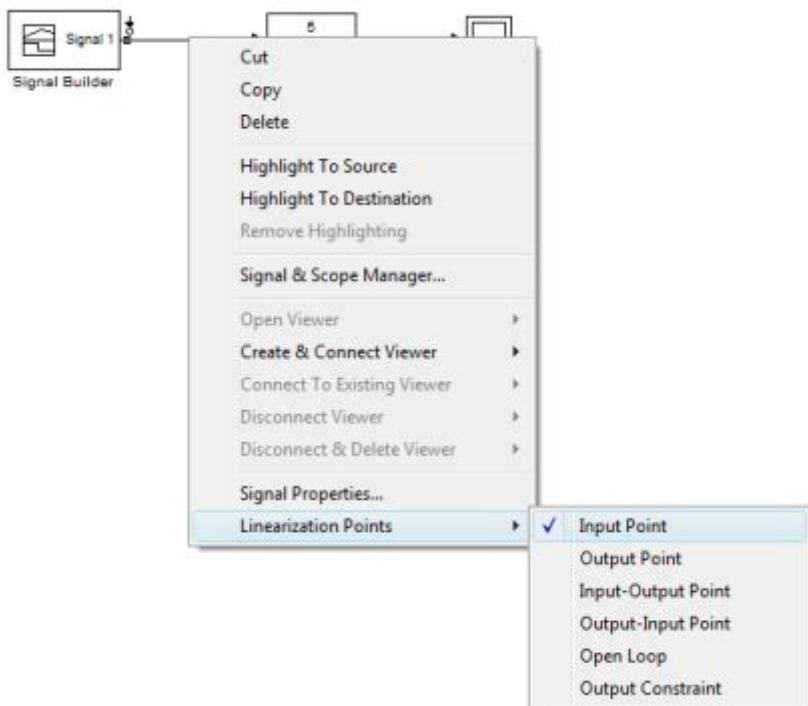


Рис. 1.39. Установка точки входа

Затем необходимо установить точку выхода частотной характеристики, щелкнув правой кнопкой на соединительную линию выхода инерционного звена и выбрав **Linearization Points / Output Point**, (рис.1.40).

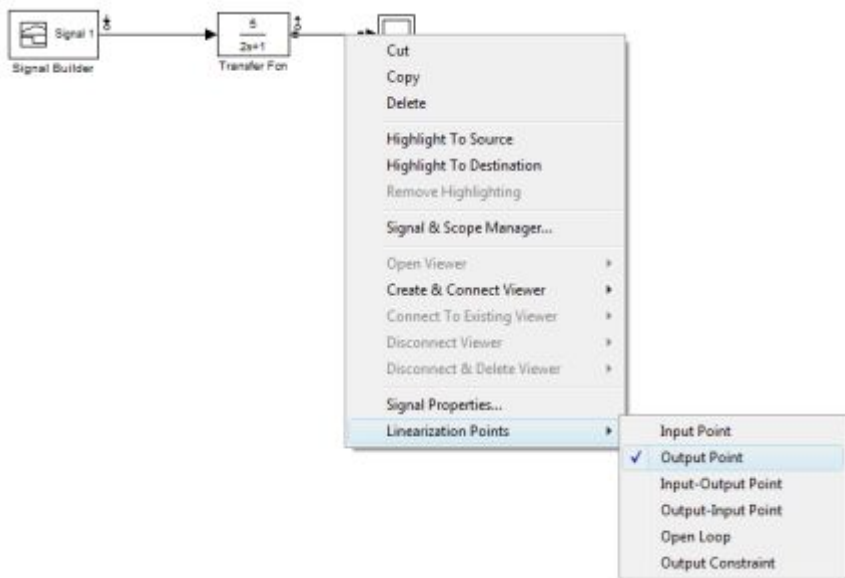


Рис. 1.40. Установка точки выхода

На пиктограмме структурной схемы должны появиться стрелки точек входа и выхода (рис. 1.40).

Далее в меню рабочего окна **Tools** нужно выбрать вкладку **Control Design / Linear Analysis**, рис. 1.41.

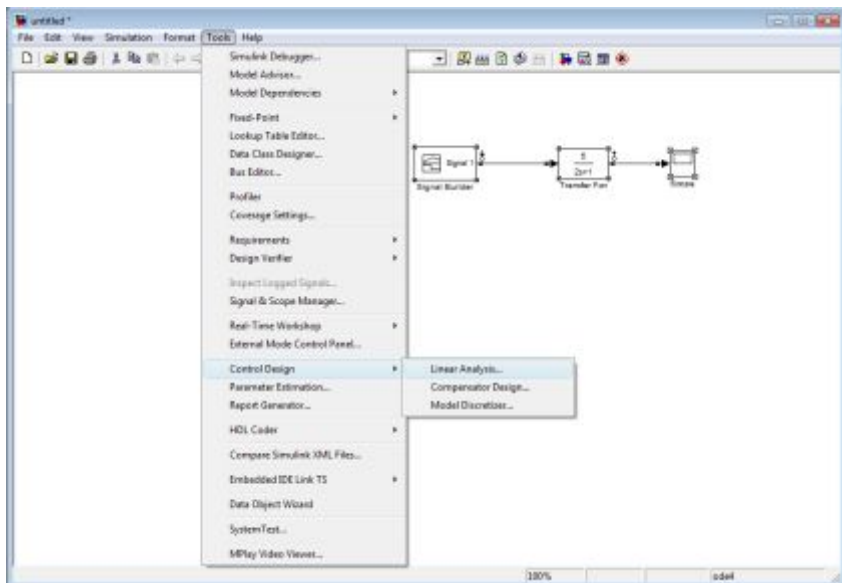


Рис. 1.41. Открытие окна частотного анализа

В появившемся окне **Control and Estimation Tools Manager** необходимо установить тип осциллографа **Bode response plot**. Данного типа осциллограф является логарифмическим и показывает амплитудную и фазовую характеристики, рис. 1.42.

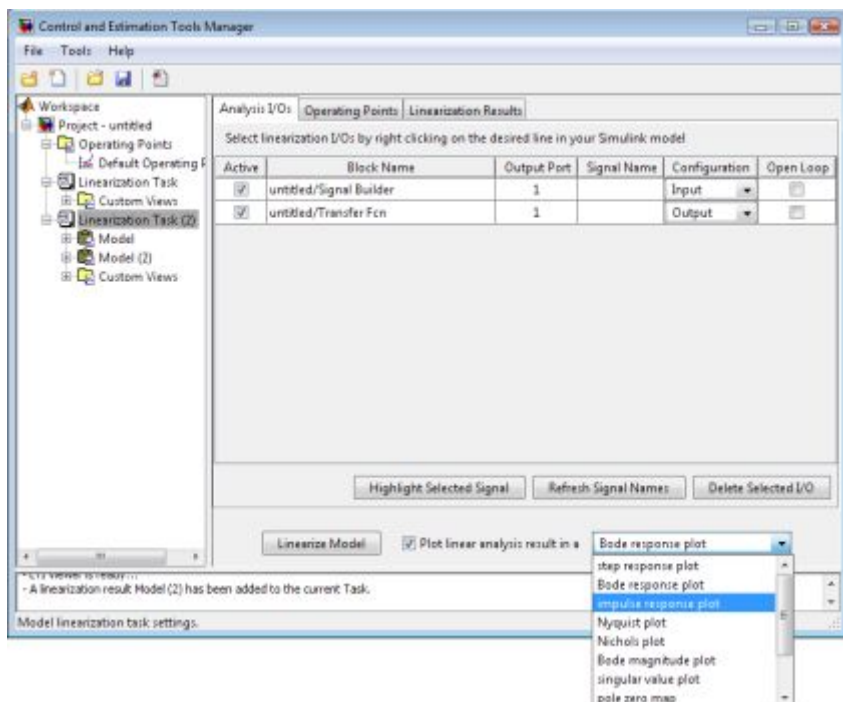


Рис. 1.42. Окно свойств частотного анализа

Далее в окне **Control and Estimation Tools Manager** нужно нажать кнопку **Linearize Model**. Появится окно с ЛАЧХ и ЛФЧХ инерционного звена, (рис. 1.43).

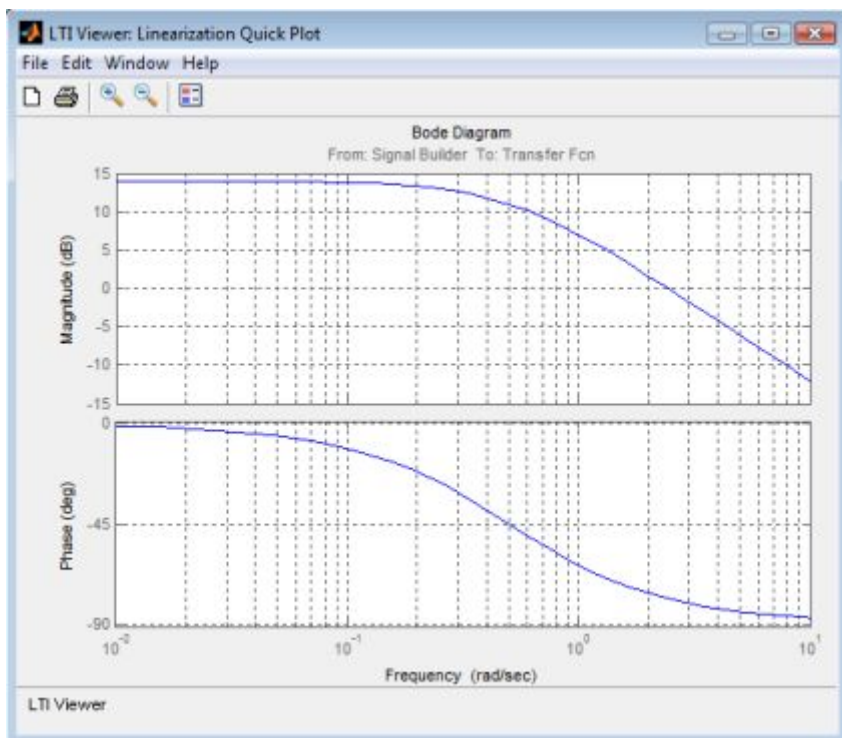


Рис. 1.43. Окно просмотра частотных характеристик

1.6.6. Вопросы для самопроверки

1. Что такое операционный усилитель?
2. Какими свойствами обладает идеальный операционный усилитель?
3. Поясните методику составления и преобразования структурных схем.
4. Перечислите и обоснуйте требования, предъявляемые к математическим моделям.
5. Поясните математическую модель механической части электропривода постоянного тока. Нарисуйте структурную схему.
6. По каким принципам выбирается метод счета для моделирования линейных структурных схем в среде MatLab Simulink?
7. Как снимаются логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики в среде MatLab Simulink?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

2.1. Исследование типовых линейных звеньев

2.1.1. Интегрирующее звено

В данном разделе исследуются основные типовые динамические звенья, известные из курса «Теории автоматического регулирования».

- 1) интегрирующее звено;
- 2) апериодическое звено;
- 3) пропорционально-интегрирующее звено;
- 4) реально-дифференцирующее звено.

Реакцию этих звеньев нужно будет исследовать на два основных входных воздействия:

- скачкообразное изменение напряжения (рис. 2.1),

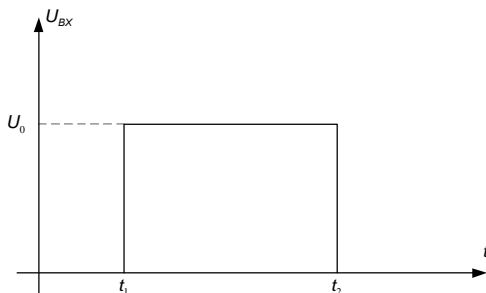


Рис. 2.1.

- линейный закон изменения входного напряжения (рис. 2.2),

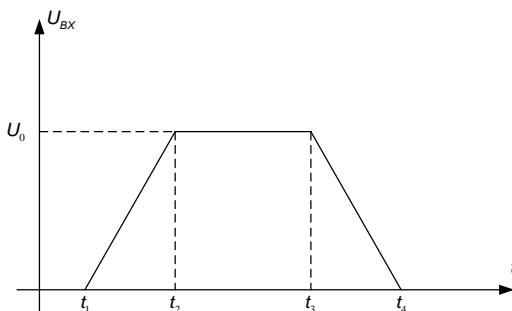


Рис. 2.2.

Передаточная функция интегрирующего звена (И-звена)

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p},$$

где T_1 - постоянная времени интегрирующего звена.
 На рис. 2.3 изображено обозначение И-звена

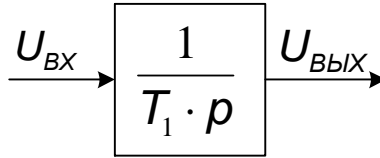


Рис. 2.3. Изображение И-звена

Кривые переходных процессов с выхода интегрирующего звена при скачкообразном воздействии приведены на рис. 2.4.

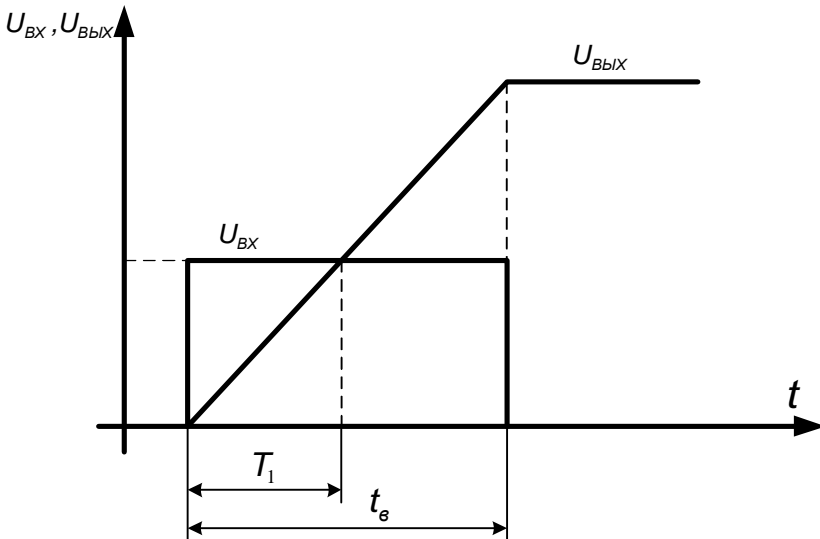


Рис. 2.4. Кривые переходных процессов с выхода интегрирующего звена при скачкообразном воздействии

t_e - время воздействия входного сигнала, T_1 - постоянная интегрирования, $U_{ВХ}$ - входное напряжение интегрирующего звена, $U_{ВЫХ}$ - выходное напряжение интегрирующего звена.

При постоянном значении входного напряжения, выходное изменяется по линейному закону (операция интегрирования).

Как известно из курса ТАУ

$$U_{ВЫХ}(t) = \frac{1}{T_1} \cdot \int U_{ВХ}(t) dt = \frac{1}{T_1} \cdot U_{ВХ} \cdot t + c - \text{линейный закон}$$

изменения.

При снятии входного напряжения, выходное остается на том же уровне (свойство интегратора).

Построим кривые переходных процессов с выхода интегрирующего звена при линейном воздействии входного сигнала (рис. 2.5).

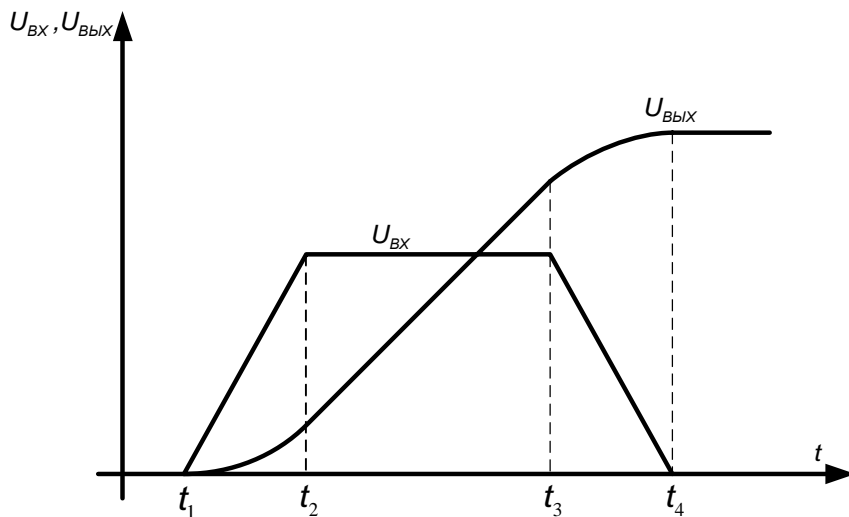


Рис. 2.5. Кривые переходных процессов с выхода интегрирующего звена при линейном воздействии входного сигнала

В промежуток времени $t_1 - t_2$ входной сигнал изменяется по линейной зависимости, т.е. $U_{BX} = k \cdot t$, где k – коэффициент усиления линейно изменяющегося входного сигнала. Если проинтегрировать это уравнение, то выходное напряжение И-звена на участке $t_1 - t_2$

$$U_{ВЫХ}(t) = \frac{1}{T_1} \cdot \int (k \cdot t) dt = \frac{1}{T_1} \cdot \frac{k \cdot t^2}{2} + c.$$

В промежуток времени $t_2 - t_3$ входной сигнал не изменяется, выходное напряжение имеет линейный характер. В промежуток времени $t_3 - t_4$ выходное напряжение линейно уменьшается $U_{ВЫХ} = -k \cdot t$. Если проинтегрировать это выражение, получим квадратичную зависимость, т.е. параболу, ветви которой направлены вправо.

$$U_{ВЫХ}(t) = \frac{1}{T_1} \cdot \int (-k \cdot t) dt = -\frac{1}{T_1} \cdot \frac{k \cdot t^2}{2} + c.$$

В момент времени t_4 входной сигнал равен нулю, интегратор перестает интегрировать входное напряжение.

2.1.2. Инерционное звено (апериодическое 1-го порядка)

Передаточная функция инерционного звена

$$W_2(p) = \frac{k}{T_2 \cdot p + 1},$$

где T_2 - постоянная времени апериодического звена; k - коэффициент усиления звена. На рис. 2.6 показано обозначение инерционного звена.

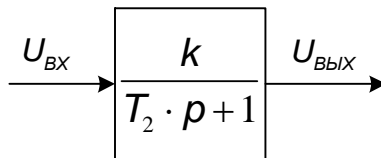


Рис. 2.6. Инерционное звено

Получим кривые переходных процессов с выхода аperiodического звена при скачкообразном входном воздействии (рис. 2.7).

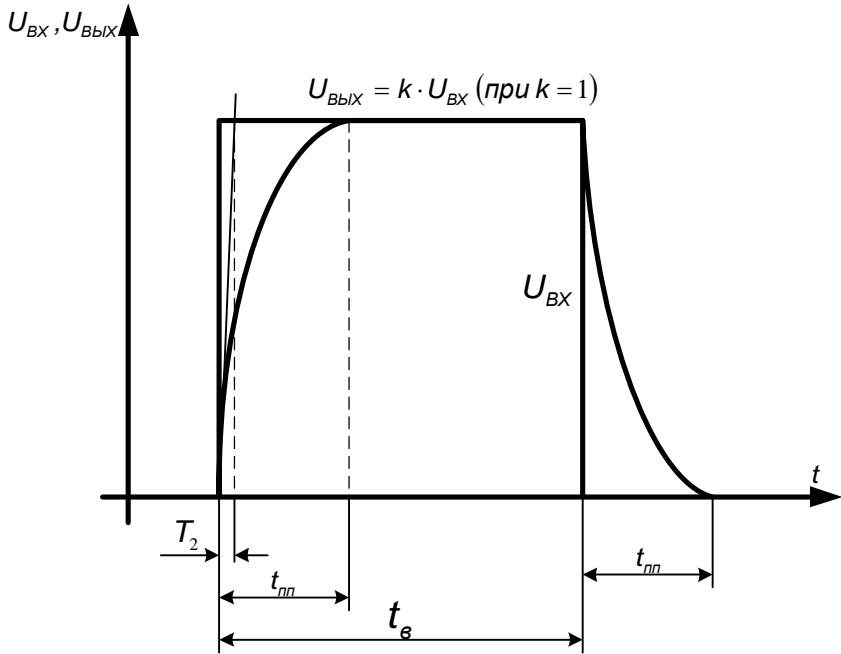


Рис. 2.7. Кривые переходных процессов с выхода инерционного звена при скачкообразном входном воздействии

t_{ϵ} - время воздействия входного сигнала; T_2 - постоянная времени аperiodического звена; $t_{\text{пп}}$ - время переходного процесса; k - коэффициент пропорциональности.

Как известно из ТАУ, переходная функция аperiodического звена имеет вид

$$h(t) = k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right).$$

Во время переходного процесса $t_{пп}$ выходной сигнал имеет экспоненциальный характер.

Построим кривые переходных процессов с выхода инерционного звена при линейном воздействии входного сигнала, (рис.2.8).

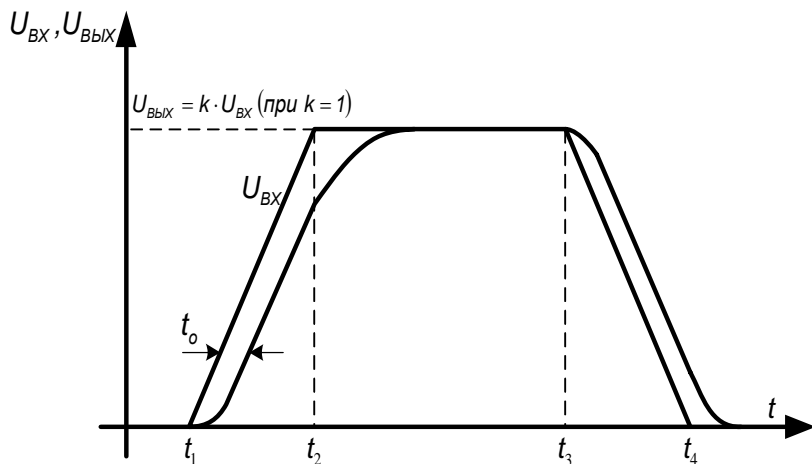


Рис. 2.8. Кривые переходных процессов с выхода инерционного звена при линейном воздействии входного сигнала

В промежутки времени $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$ выходной сигнал отстает от входного по времени на t_0 за счет инерции звена. С момента времени t_2 выходной сигнал по экспоненциальной зависимости стремится к входному.

2.1.3. Пропорционально-интегрирующее звено (ПИ-звено)

Передаточная функция пропорционально-интегрирующего звена

$$W_3(p) = \frac{T_3 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p} = \frac{T_3}{T_2} + \frac{1}{T_2 \cdot p},$$

где T_2 - постоянная времени интегрирующей составляющей ПИ-звена; T_3/T_2 - пропорциональная составляющая ПИ-звена.

На рис. 2.9 показано обозначение ПИ-звена

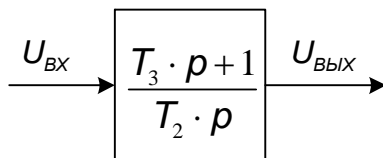


Рис. 2.9 Обозначение ПИ-звена

Построим кривые переходных процессов с выхода ПИ-звена при скачкообразном воздействии (рис. 2.10).

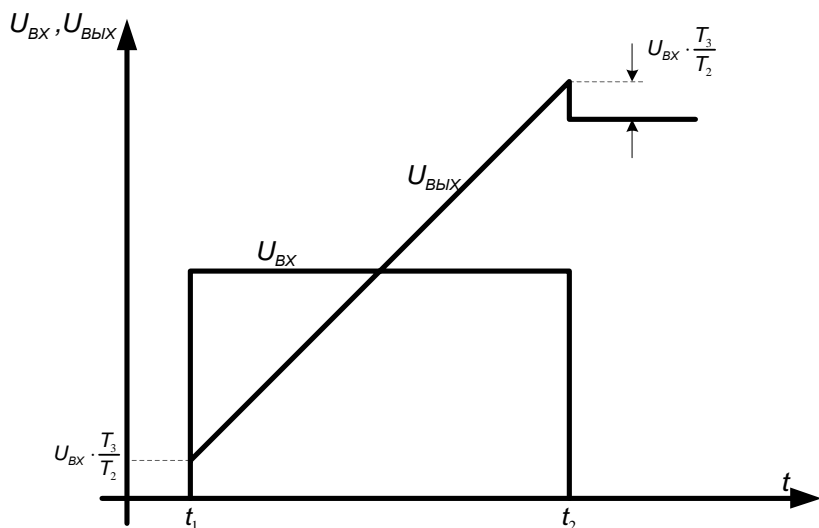


Рис. 2.10. Кривые переходных процессов с выхода ПИ-звена при скачкообразном воздействии

С момента времени t_1 выходной сигнал скачком увеличивается пропорционально величине $U_{ВХ} \cdot \frac{T_3}{T_2}$, с последующим интегрированием входного напряжения. В момент времени t_2 входной сигнал скачком уменьшается до нуля, выходной сигнал, в свою очередь, также пропорционально уменьшается на величину $U_{ВХ} \cdot \frac{T_3}{T_2}$. С момента времени t_2 , за счет свойств интегратора, выходное напряжение не изменяется.

Рассмотрим пример построения кривых переходных процессов с выхода ПИ-звена при линейном воздействии входного сигнала, (рис. 2.11).

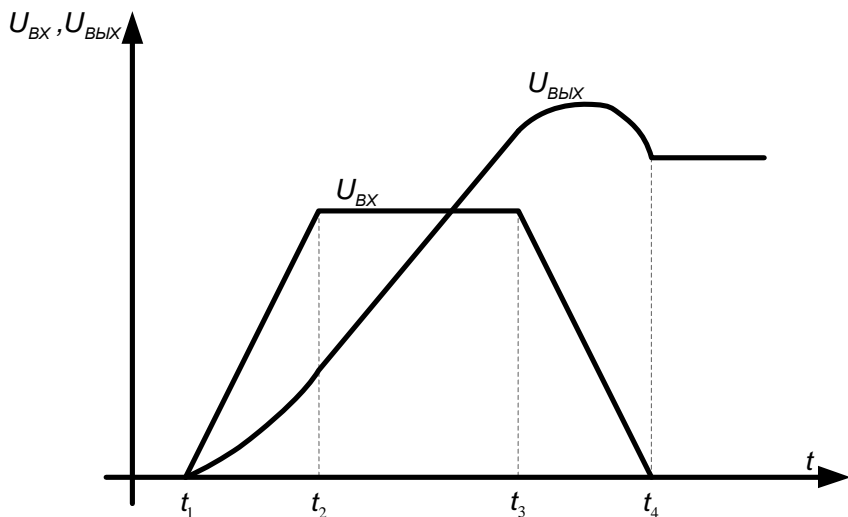


Рис. 2.11. Кривые переходных процессов с выхода ПИ-звена при линейном воздействии входного сигнала

В промежутки времени $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$ выходной сигнал представляет собой квадратичную зависимость (параболу), сложенную с пропорциональной составляющей ПИ-звена $\frac{T_3}{T_2}$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{T_3}{T_2} \cdot U_{\text{ВХ}}(t) + \frac{1}{T_2} \cdot \int U_{\text{ВХ}}(t) dt.$$

2.1.4. Реально-дифференцирующее звено (реальное Д-звено)

Передаточная функция реального Д-звена

$$W_4(p) = \frac{T_1 \cdot p}{T_2 \cdot p + 1} = T_1 \cdot p \cdot \frac{1}{T_2 \cdot p + 1},$$

где T_1 - постоянная времени дифференцирующего звена,

T_2 - постоянная времени апериодического звена.

На рис. 2.12 показано обозначение реального Д-звена

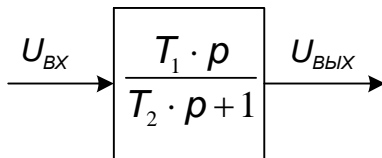


Рис. 2.12. Реальное Д-звено

Реальное Д-звено отличается от простого дифференцирующего звена апериодической составляющей. На практике применяется только реальное Д-звено, так как идеальное реализовать невозможно.

Получим кривые переходных процессов с выхода реального Д-звена при скачкообразном воздействии, (рис. 2.13).

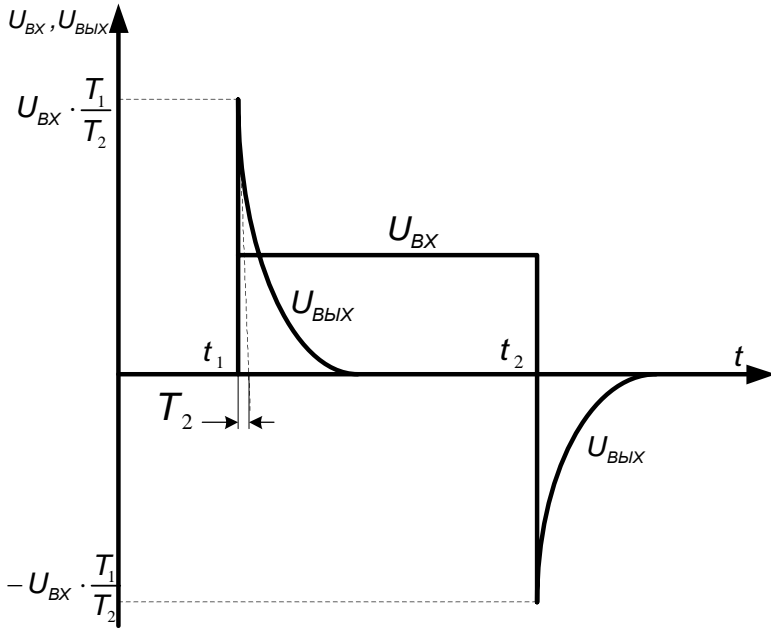


Рис. 2.13. Кривые переходных процессов с выхода реального Д-звена при скачкообразном воздействии

В момент времени t_1 происходит дифференцирование скачкообразно изменяющегося входного напряжения, а затем экспоненциальный спад выходного напряжения до нуля, вызванный постоянным (неизменным) напряжением U_{BX} , $(U_{BX})' = 0$. Затем, с момента времени t_2 входное напряжение скачком снимается, производная входного сигнала имеет отрицательный знак.

Пример построения кривых переходных процессов с выхода реального Д-звена при линейно изменяющемся входном сигнале, рис. 2.14.

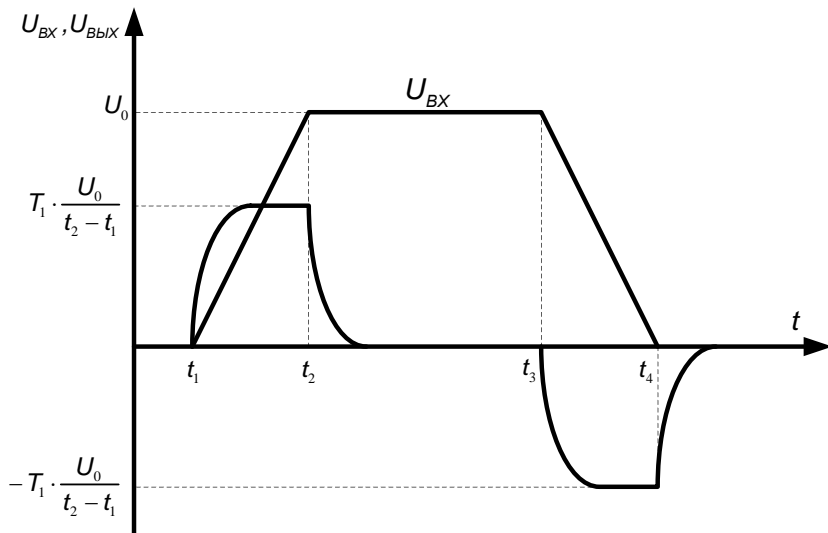


Рис. 2.14. Кривые переходных процессов с выхода реального Д-звена при линейно изменяющемся входном сигнале

Входное напряжение на промежутке времени $t_1 - t_2$ линейно нарастает, т.е. его можно представить, как $U_{ВХ} = k \cdot t$, где

$$k = \frac{U_0}{t_2 - t_1}.$$

Продифференцировав эту зависимость, получим

$$T_1 \cdot (U_{ВХ})' = \left(\frac{U_0}{t_2 - t_1} \cdot t \right)' = T_1 \cdot \frac{U_0}{t_2 - t_1}.$$

$U_{ВХ}$ на промежутке $t_2 - t_3$ постоянно, поэтому его производная равна нулю. На промежутке $t_3 - t_4$ производная входного сигнала отрицательная

$$T_1 \cdot (U_{ВХ})' = \left(-\frac{U_0}{t_2 - t_1} \cdot t \right)' = -T_1 \cdot \frac{U_0}{t_2 - t_1}.$$

2.2. Исследование свойств задатчика интенсивности (ЗИ)

Структурная схема задатчика интенсивности состоит из двух последовательно соединенных блоков – релейного элемента РЭ и интегрирующего звена И, охваченных единичной отрицательной обратной связью, рис. 2.15.

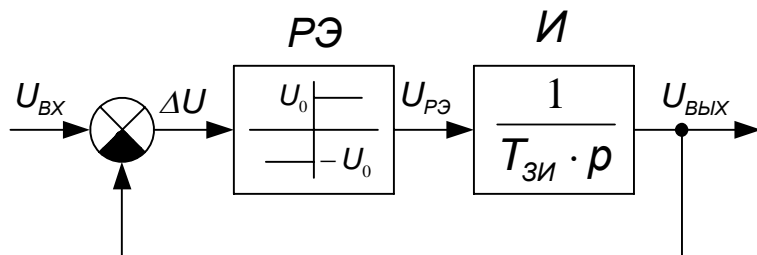


Рис. 2.15. Структурная схема задатчика интенсивности

$U_{ВХ}$ - входной сигнал ЗИ; $U_{ВЫХ}$ - выходное напряжение ЗИ; ΔU - разность между $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$; $U_{РЭ}$ - напряжение с выхода релейного элемента.

ЗИ служит для ограничения темпа нарастания (спадания) входного напряжения. Если темп входного сигнала выше заданного задатчиком интенсивности, то задатчик ограничит темп. И, наоборот, если темп изменения входного сигнала ниже граничного темпа ЗИ, выходной сигнал будет повторять входной (режим слежения ЗИ).

Рассмотрим реакцию ЗИ на скачкообразное входное воздействие. Скачкообразный входной сигнал – это сигнал с крутым фронтом (момент времени t_1), ЗИ отработает его с граничной интенсивностью, (рис. 2.16).

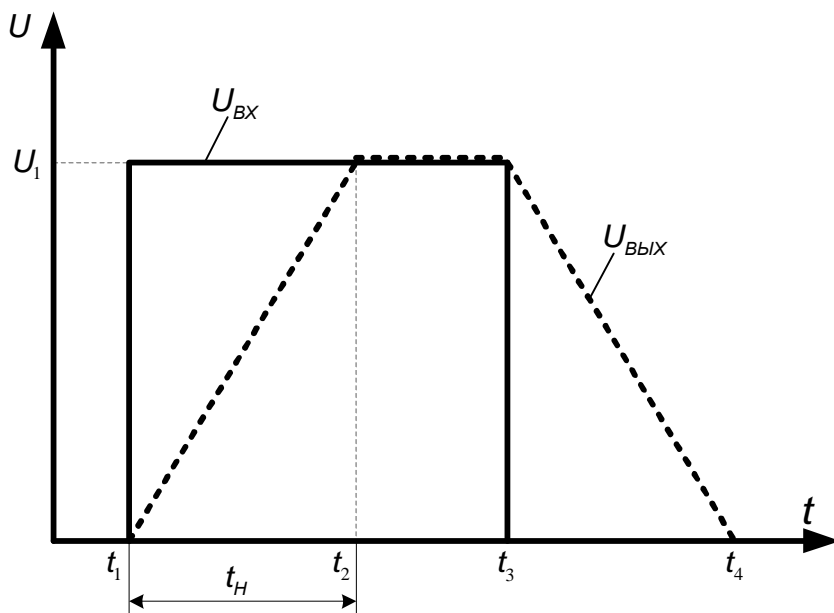


Рис. 2.16. Переходные процессы ЗИ при скачкообразном входном сигнале

Время нарастания выходного напряжения до уровня входного можно определить по формуле

$$t_H = \frac{U_{ВХ}}{U_0} \cdot T_{ЗИ},$$

где U_0 - напряжение ограничения релейного элемента;

$T_{ЗИ}$ - постоянная времени ЗИ.

Граничный темп – это темп самого задатчика, работающего в режиме ограничения. Граничный темп ЗИ устанавливается двумя параметрами: U_0 и $T_{ЗИ}$.

На рис. 2.17 приведены переходные процессы реакции ЗИ на двойное ступенчатое воздействие.

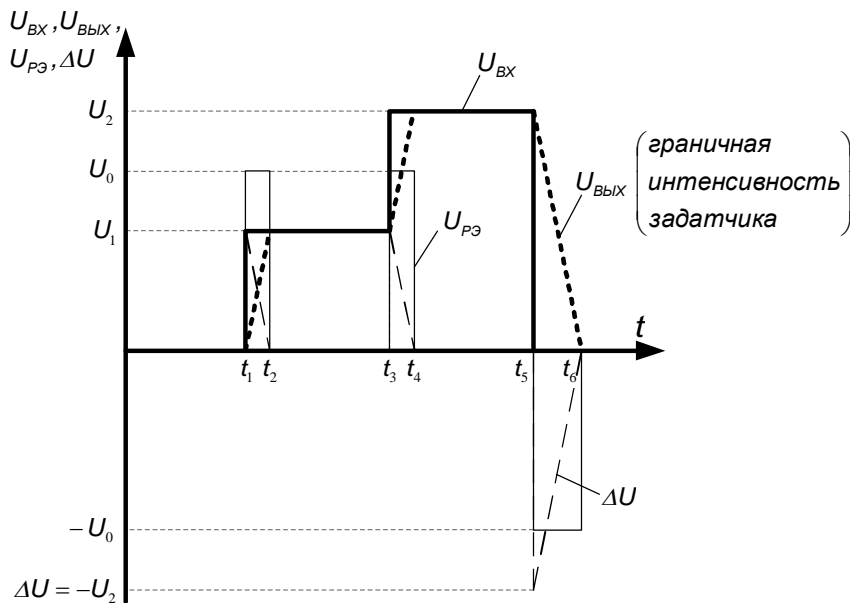


Рис. 2.17. Переходные процессы ЗИ при скачкообразном входном сигнале

В момент времени t_1 на вход задатчика подается скачок напряжения U_1 , при этом $\Delta U = U_1$, релейный элемент РЭ заходит в положительное ограничение, его выходное напряжение равно $+U_0$, это напряжение подается на вход интегратора И, интегратор начинает интегрировать постоянное напряжение U_0 , выходное напряжение ЗИ линейно увеличивается (участок времени $t_1 - t_2$), при этом уменьшается разность между входным и выходным сигналами ЗИ ΔU . Как только уровень выходного сигнала достигнет уровня входного (момент времени t_2), разность ΔU станет равной 0, при этом выходное напряжение РЭ станет равным нулю, а интегратор перестанет интегрировать напряжение на его входе до момента времени t_3 . То же самое происходит в промежуток времени $t_3 - t_4$. В момент времени t_5 входное

напряжение скачком уменьшается до нуля, при этом разница напряжений ΔU становится отрицательной, РЭ заходит в отрицательное ограничение, на его выходе напряжение $-U_0$, которое подается на вход интегратора И, интегратор начинает интегрировать отрицательное напряжение (участок времени $t_5 - t_6$), выходное напряжение ЗИ линейно уменьшается до нуля с интенсивностью, заданной самим задатчиком, при этом разность ΔU также линейно уменьшается до нуля.

На рис.2.18 приведены переходные процессы реакции ЗИ на линейное входное воздействие.

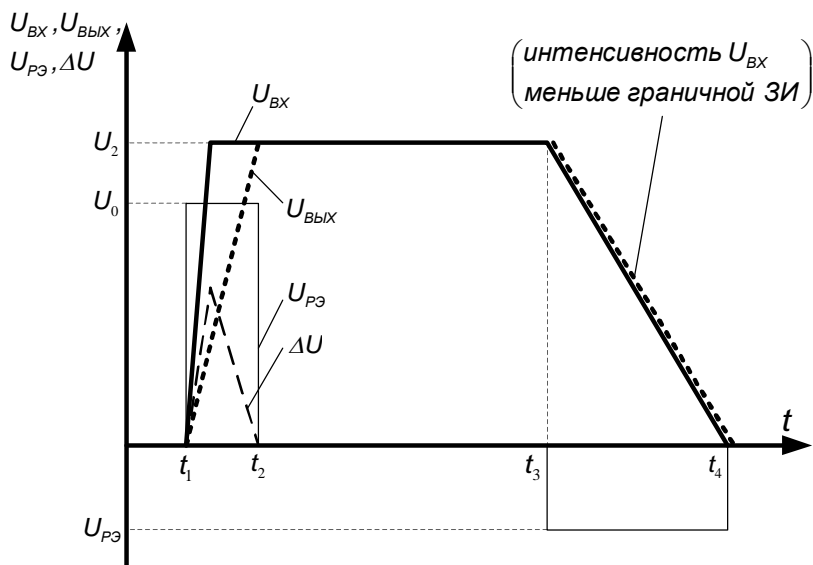


Рис. 2.18. Переходные процессы ЗИ при линейном входном сигнале

На участке $t_1 - t_2$ интенсивность нарастания входного напряжения выше граничной интенсивности ЗИ. На участке $t_3 - t_4$ интенсивность входного напряжения совпадает с интенсивностью выходного (режим слежения ЗИ).

На практике ЗИ реализуют программно, либо на базе аналоговых операционных усилителей. ЗИ широко используются в САР различного типа электроприводов, например:

- для ограничения темпа нарастания якорного тока, чтобы исключить вероятность межвиткового к/з и улучшить коммутационную способность щеточно-коллекторного аппарата (ЗИ тока якоря);

- для ограничения темпа нарастания скорости привода (ЗИ скорости), чтобы исключить динамические перегрузки механических связей установки и электрические перегрузки самого электропривода, и др.

2.3. Переходные процессы в цепях возбуждения

2.3.1. Форсировка цепи возбуждения

Цепь возбуждения представляет собой катушку индуктивности, намотанную на стальной сердечник (статор). В электродвигателях высокой мощности индуктивность обмотки возбуждения составляет десятки генри. При приложении скачка напряжения к обмотке возбуждения, ток обмотки будет нарастать по экспоненциальному закону во времени, т.е. если пренебречь нелинейностью кривой намагничивания, потоками рассеяния и вихревых токов цепь возбуждения в самом простом случае может быть представлена апериодическим звеном первого порядка

$$W(p) = \frac{I_B(p)}{U_B(p)} = \frac{I/R}{T_B \cdot p + 1}$$

и описываться дифференциальным уравнением.

$$U_B = I_B \cdot R_B + L_B \frac{dI_B}{dt_B}.$$

В двигателях большой мощности постоянная времени ОВ достигает (1-5)с, а длительность нарастания тока возбуждения до номинального значения соответственно от 3 до 20 секунд. Для некоторых технологических объектов, у которых реверс привода осуществляется по цепи возбуждения, таких как БЛЮМИНГ 20 секунд – это очень низкое быстродействие. Реверс валков блюминга осуществляется реверсом тока возбуждения приводного двигателя, соответственно, каждый раз ждать, пока ток нарастет до

номинального 20 секунд никто не собирается, осуществляют форсировку возбуждения. Т.е. форсировка возбуждения необходима для уменьшения длительности нарастания тока возбуждения (потока) до номинального значения посредством кратковременного увеличения напряжения возбуждения.

Слабое место любого электрического двигателя – это изоляция. До бесконечности увеличивать напряжение на клеммах обмотки возбуждения нельзя, т.к. может возникнуть пробой изоляции и машина сгорит. Держать двигатель под повышенным напряжением долго тоже нельзя, т.к. свойства изоляционного материала, защищающего обмотку электрической машины, ухудшаются от повышенных температур, и также может возникнуть пробой изоляции. Для двигателей краново-металлургической серии кратковременно повышать напряжение на ОВ можно до 5-ти раз выше номинального значения, т.е. $\alpha_{\max} = 5$. На рис. 2.19 представлена простейшая релейно-контакторная электрическая схема для осуществления форсировки возбуждения.

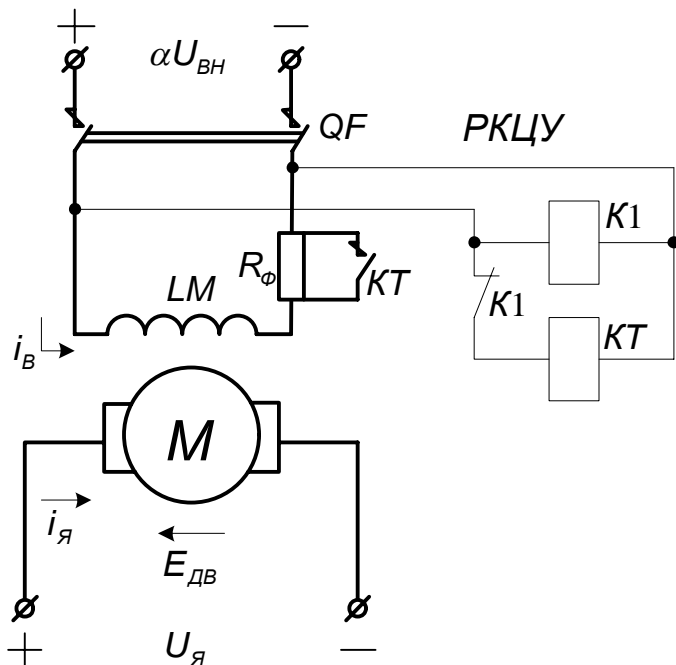


Рис. 2.19. Релейно-контакторная электрическая схема для осуществления форсировки возбуждения

Работа схемы

При срабатывании автомата QF напряжение подается на РКЦУ (релейно-контакторная цепь управления), срабатывают оба реле $K1$ и KT (реле напряжения и реле времени), сопротивление форсировки R_ϕ шунтируется контактом KT и к обмотке LM прикладывается напряжение αU_{BH} в течение времени, установленного реле времени KT . По истечении этого времени контакт KT размыкается и в цепь обмотки возбуждения вводится сопротивление форсировки, тем самым к LM приложено номинальное напряжение.

На рис. 2.20 показаны переходные процессы в цепи LM при форсировке напряжения возбуждения.

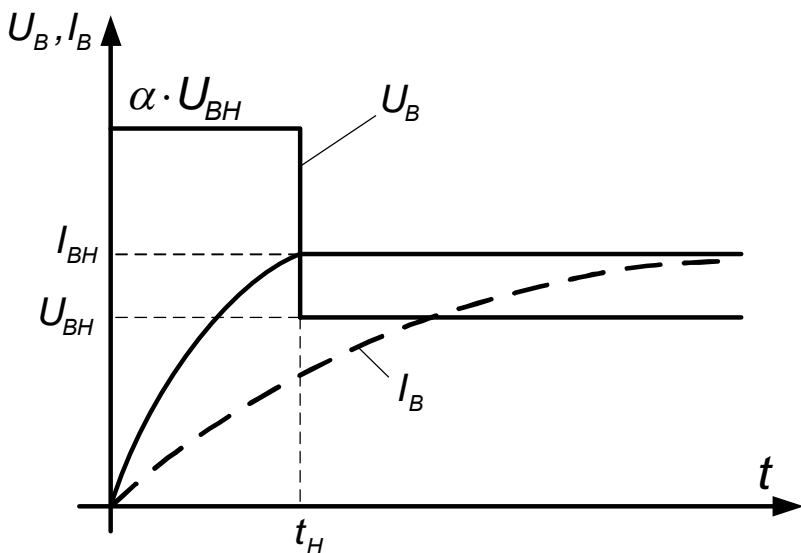


Рис. 2.20. Переходные процессы в цепи LM при форсировке напряжения возбуждения

На рис. 2.21 представлена структурная схема модели для исследования переходных процессов в обмотках возбуждения.

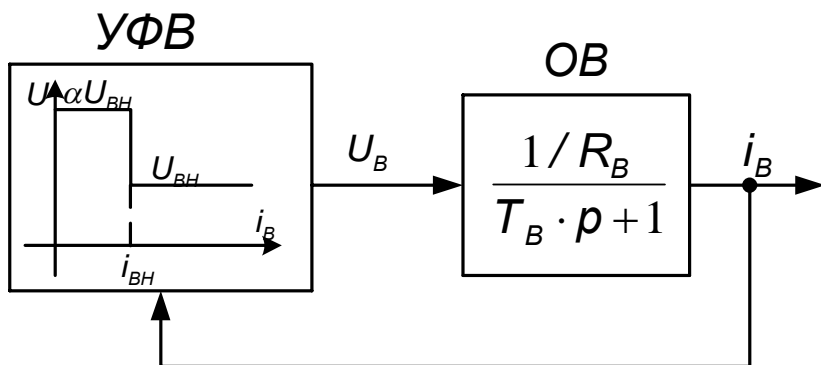


Рис. 2.21. Структурная схема модели для исследования переходных процессов в обмотках возбуждения

УФВ – устройство для форсировки возбуждения, в этом блоке реализуется зависимость $U_B = f(I_B)$.

ОВ – апериодическое звено, моделирующее обмотку возбуждения.

Для осуществления линейного закона нарастания тока возбуждения I_B на практике реализуется линейный закон изменения напряжения возбуждения U_B вида, представленного на рис. 2.22.

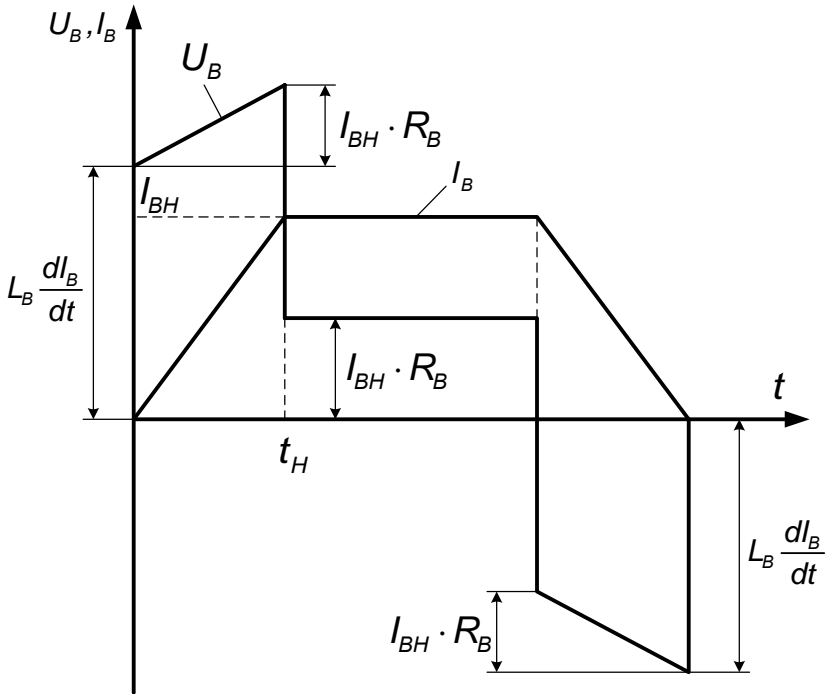


Рис. 2.22. Линейный закон изменения тока и напряжения цепи обмотки возбуждения

2.3.2. Исследование переходных процессов в цепях возбуждения электрических машин с учетом насыщения

В предыдущем разделе цепь возбуждения двигателя постоянного тока рассматривалась без учета насыщения магнитной системы и моделировалась инерционным звеном. Реальная магнитная система двигателя всегда насыщающаяся, причем процесс насыщения имеет нелинейный характер. В паспортных данных любого ДПТ имеется собственная «кривая намагничивания» цепи возбуждения. Это зависимость потока двигателя от величины тока возбуждения $\Phi_B = f(I_B)$, (рис. 2.23).

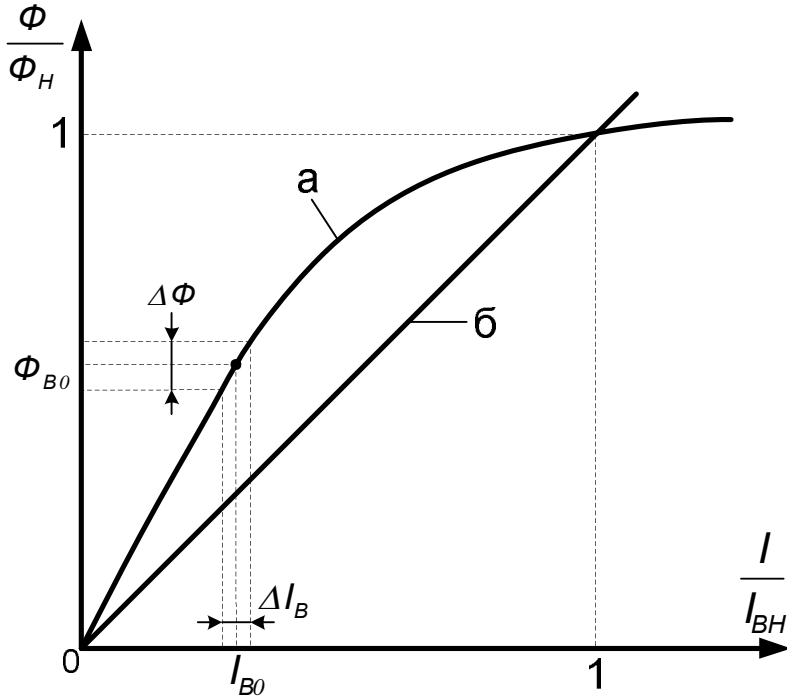


Рис. 2.23. Кривая намагничивания цепи возбуждения ДПТ с НВ

а – кривая намагничивания; б – линейная аппроксимация кривой намагничивания; $\Delta\Phi$ - приращение потока; ΔI_B - приращение тока возбуждения

Кривая намагничивания имеет 3 участка:

- 1 – линейный участок;
- 2 – нелинейный участок;
- 3 – область насыщения.

Магнитная система находится в области насыщения, когда величина магнитного потока остается постоянной вне зависимости от величины тока возбуждения.

Дифференциальное уравнение, описывающее поток возбуждения

$$\Phi_B = \frac{R_B}{W_B \cdot p} \left(\frac{U_B}{R_B} - I_B \right), \quad (2.1)$$

где R_B - омическое сопротивление ОБ;

W_B - число витков ОБ;

U_B - напряжение ОБ;

I_B - ток ОБ.

На основе уравнения (2.1) нелинейная цепь возбуждения может быть представлена структурной схемой вида, рис

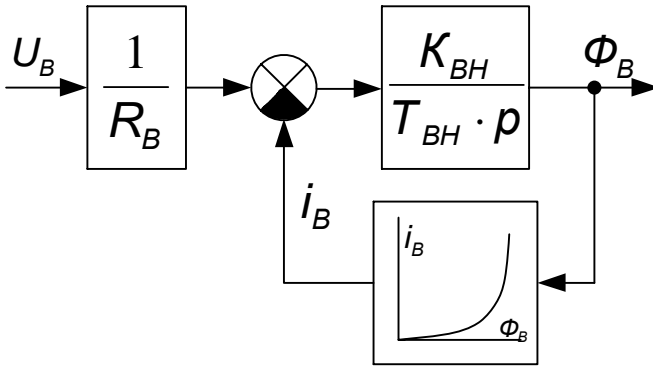


Рис. 2.24. Нелинейная цепь возбуждения

Если провести линейную аппроксимацию кривой намагничивания для какого-нибудь конкретного значения потока Φ_{B0} , то структурная схема (рис. 2.24) преобразуется к виду, рис. 2.25.

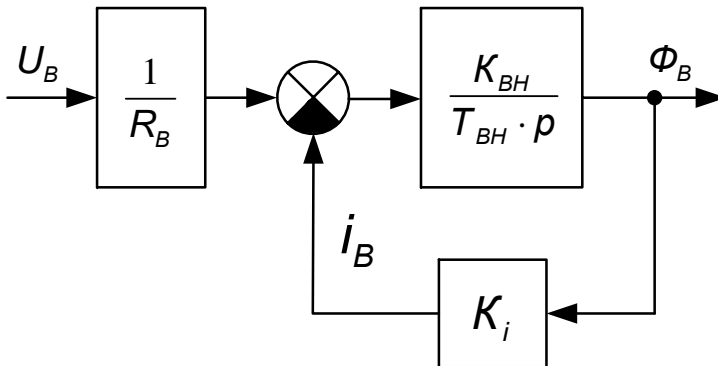


Рис. 2.25. Цепь возбуждения с линейно аппроксимированной кривой намагничивания

Здесь $K_i = \frac{\Delta I_B}{\Delta \Phi_B}$, ΔI_B и $\Delta \Phi_B$ - относительно небольшие

приращения, полученные по кривой намагничивания.

Если свернуть часть структурной схемы (рис. 2.25) и вывести передаточную функцию замкнутого контура, то получим структурную схему вида, (рис. 2.26).

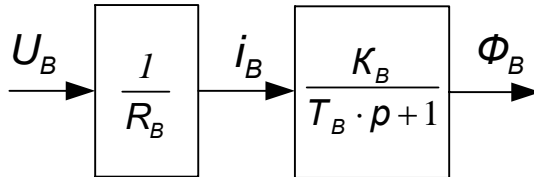


Рис. 2.26. Структурная схема цепи ОБ

В упрощенном виде цепь ОБ моделируется инерционным звеном, где K_B, T_B - коэффициент и постоянная времени обмотки возбуждения. Постоянную времени и коэффициент ОБ можно рассчитать по формулам

$$T_B = \frac{L_B}{R_B},$$

где L_B - индуктивность цепи возбуждения.

$$K_B = \frac{I}{K_i}.$$

На рис. 2.27-2.28 приведены переходные процессы потока и напряжения обмотки возбуждения ДПТ для разных участков кривой намагничивания. На вход структурной схемы (рис. 2.24) подается скачок напряжения 10%.

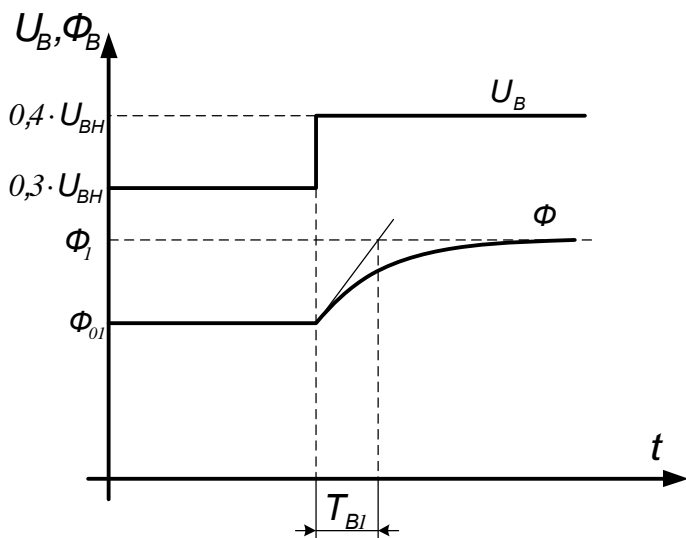


Рис. 2.27. Переходные процессы U_B и Φ для ненасыщенного участка

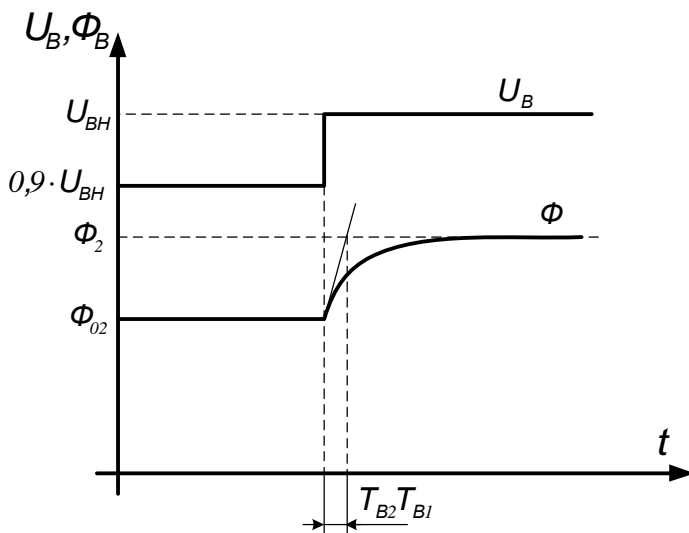


Рис. 2.28. Переходные процессы U_B и Φ для участка насыщения

По полученным переходным процессам можно сделать вывод о том, что чем насыщеннее магнитная система, тем меньше постоянная времени цепи ОБ. Если проанализировать соотношение (2), то постоянная времени T_B зависит только от L_B , т.к. омическое сопротивление R_B меняться не может.

2.4. Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока при однозонном регулировании скорости

2.4.1. Разгон двигателя на холостом ходу до номинальной скорости и торможение до нуля

В данном разделе с помощью известной динамической математической модели ДПТ с НВ [2] исследуются основные режимы работы двигателя при однозонном регулировании скорости:

- пуск двигателя на холостом ходу;
- пуск, работа и торможение двигателя под нагрузкой;
- наброс нагрузки во время разгона двигателя и сброс во время торможения;
- приложение скачка напряжения якоря;
- приложение номинальной нагрузки скачком при пониженном напряжении якоря.

Модель двигателя исследуется с помощью пакета визуального программирования MatLab Simulink.

В таблице 2.1 приведена расшифровка основных координат электропривода.

На рис. 2.29 приведена структурная схема ДПТ с НВ ($\Phi_H = \text{const}$).

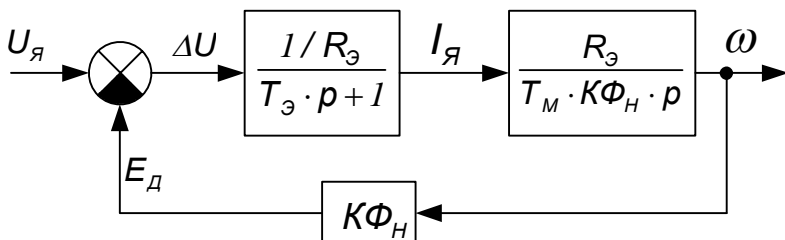


Рис. 2.29. Структурная схема двигателя для работы на холостом ходу

Таблица 2.1

Основные координаты электропривода

Название	Обозначение
Напряжение якоря двигателя	$U_{я}$
ЭДС двигателя	E_d
Скорость двигателя	ω
Поток номинальный	$K\Phi_H$
Эквивалентное сопротивление якорной цепи	R_{Σ}
Эквивалентная постоянная времени якорной цепи	T_{Σ}
Электромеханическая постоянная времени двигателя	T_M
Ток якоря	$I_{я}$
Разность между напряжением и ЭДС якоря	ΔU
Динамический ток	$I_{дин}$
Статический ток	I_C
Номинальный ток	I_H
Статическая просадка по скорости	$\Delta\omega_C$
Динамическая просадка по скорости	$\Delta\omega_{дин}$
Момент динамический	$M_{дин}$
Электромагнитный момент двигателя	M
Статический момент	M_C
Момент инерции двигателя	J_{Σ}

На рис. 2.30 показаны переходные процессы основных координат U_{BX} , $\omega_{\partial в}$, $i_{\partial в}$ при пуске двигателя на холостом ходу ($I_{\partial ил} = I_H$).

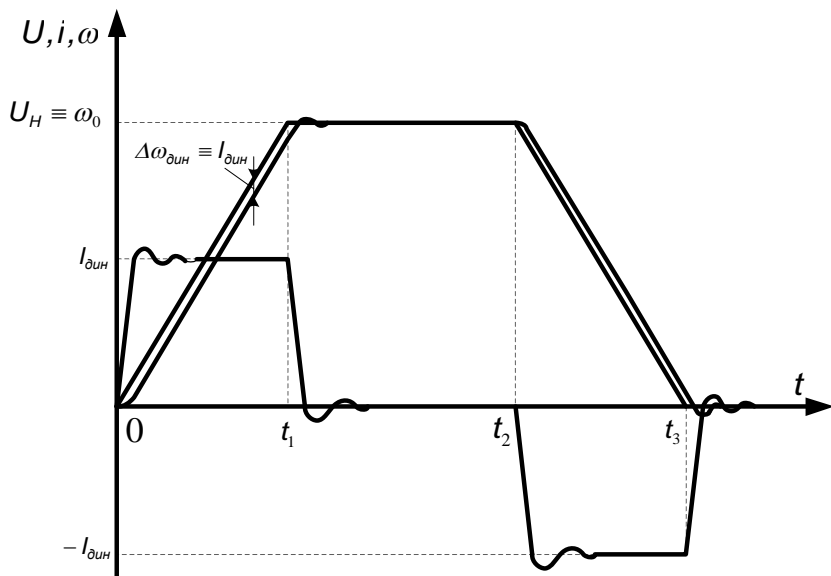


Рис. 2.30. Разгон, работа, торможение двигателя на холостом ходу

Полный ток якоря двигателя в общем виде определяется как $I = I_C \pm I_{\partial ил}$.

На участках времени $0 - t_1$ и $t_2 - t_3$ полный ток двигателя $I = I_{\partial ил}$. Участок времени $t_1 - t_2$, полный ток якоря $I = 0$ (холостой ход).

Рассмотрим статические характеристики двигателя при пуске и торможении на холостом ходу, (рис. 2.31).

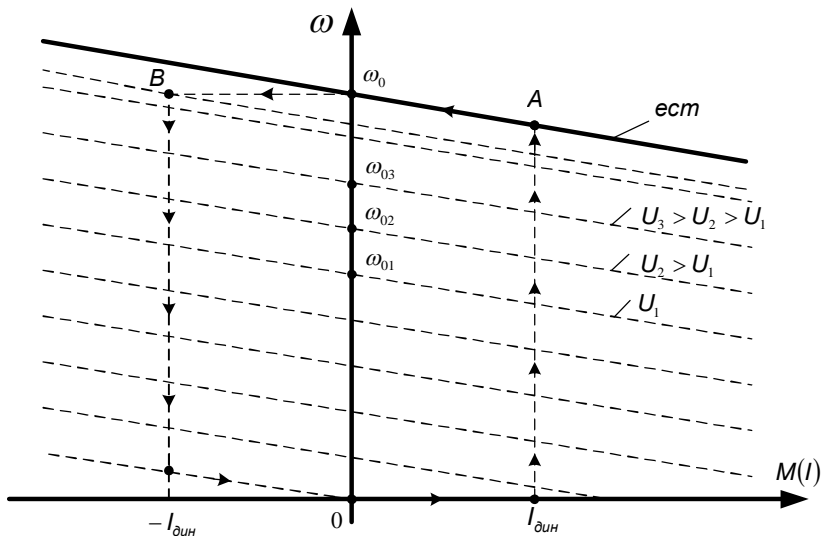


Рис. 2.31. Электромеханические характеристики двигателя

В промежуток времени $0 - t_1$ происходит пуск двигателя без нагрузки (участок $0 - I_{дин} - A - \omega_0$). Во время $t_1 - t_2$ двигатель работает на х/х (точка ω_0). Промежуток $t_2 - t_3$ - торможение двигателя под действием отрицательного динамического тока (участок $\omega_0 - B - (-I_{дин}) - 0$).

2.4.2. Разгон, работа и торможение двигателя с активной статической нагрузкой $I_C = I_H$

Структурная схема двигателя для работы со статической нагрузкой представлена на рис. 2.32.

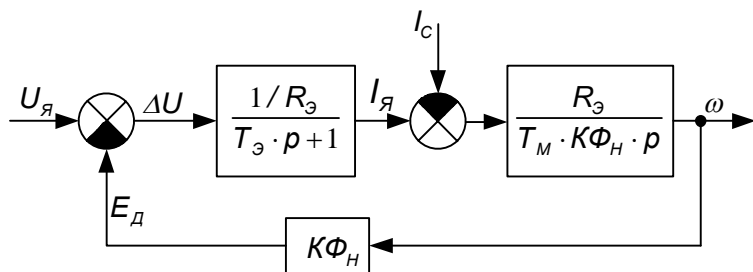


Рис. 2.32. Структурная схема двигателя для работы со статической нагрузкой

Переходные процессы основных координат U_{BX} , $\omega_{\partial\partial\epsilon}$, $i_{\partial\partial\epsilon}$ при пуске двигателя под нагрузкой ($I_C = I_{\partial\partial\text{н}} = I_H$), (рис. 2.33).

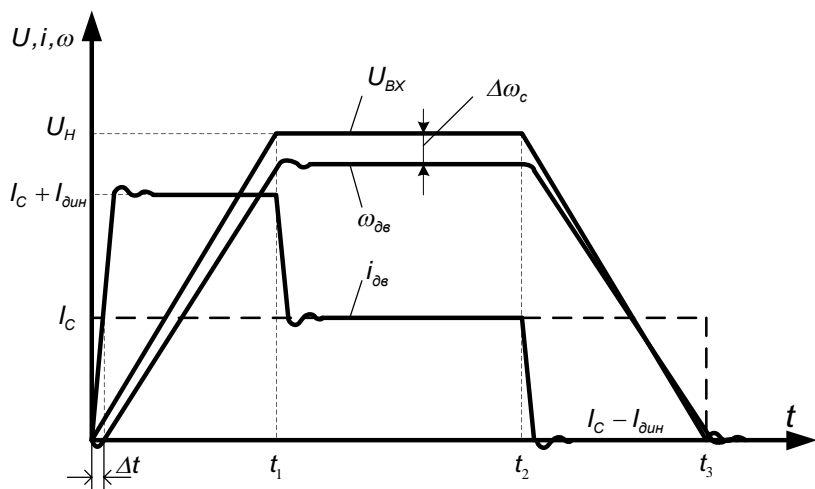


Рис. 2.33. Пуск, работа, торможение двигателя под нагрузкой

Участок $(0 - t_1)$ - разгон двигателя до номинальной скорости под нагрузкой, полный ток двигателя $I = I_C + I_{\partial\partial\text{н}}$. В начальный момент времени Δt скорость двигателя отрицательная, двигатель

2.4.3. Разгон, работа и торможение двигателя с реактивной нагрузкой

Примером реактивной нагрузки может служить сила трения в подшипниках, препятствующая движущему моменту двигателя (подшипники долго не смазывали). Вектор силы реактивной нагрузки направлен против вектора скорости двигателя.

Структурная схема двигателя для работы с реактивной статической нагрузкой представлена на рис. 2.35.

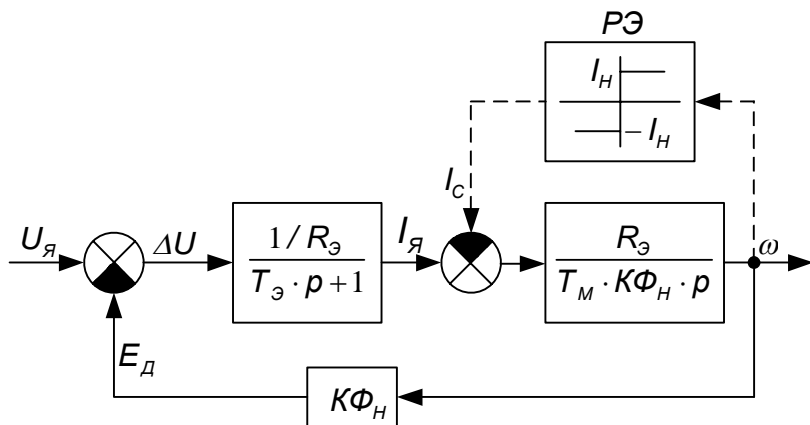


Рис. 2.35. Структурная схема двигателя для работы с реактивной нагрузкой

РЭ – релейный элемент, моделирующий реактивную нагрузку.

На рис. 2.36 показаны переходные процессы основных координат двигателя $U_{ВХ}$, $\omega_{\partial в}$, $i_{\partial в}$ при работе с реактивной нагрузкой.

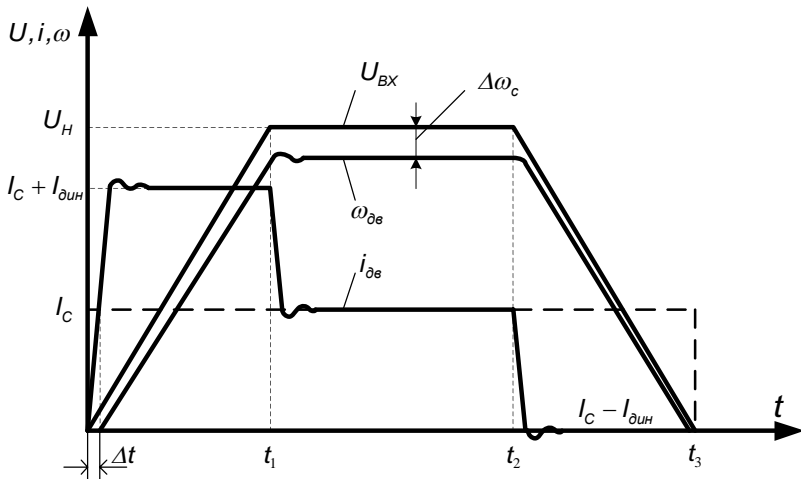


Рис. 2.36. Пуск, работа, торможение двигателя с реактивной нагрузкой

Переходные процессы с реактивно нагрузкой будут такими же, как и с активной нагрузкой, за исключением того, что во время Δt скорость равна нулю до тех пор, пока ток якоря не достигнет уровня статической нагрузки.

2.5.4. Приложение статической нагрузки во время разгона и снятие её во время торможения

На рис. 2.37 приведены переходные процессы основных координат двигателя U_{BX} , $\omega_{де}$, $i_{де}$ при $(I_C = I_{дин} = I_H)$.

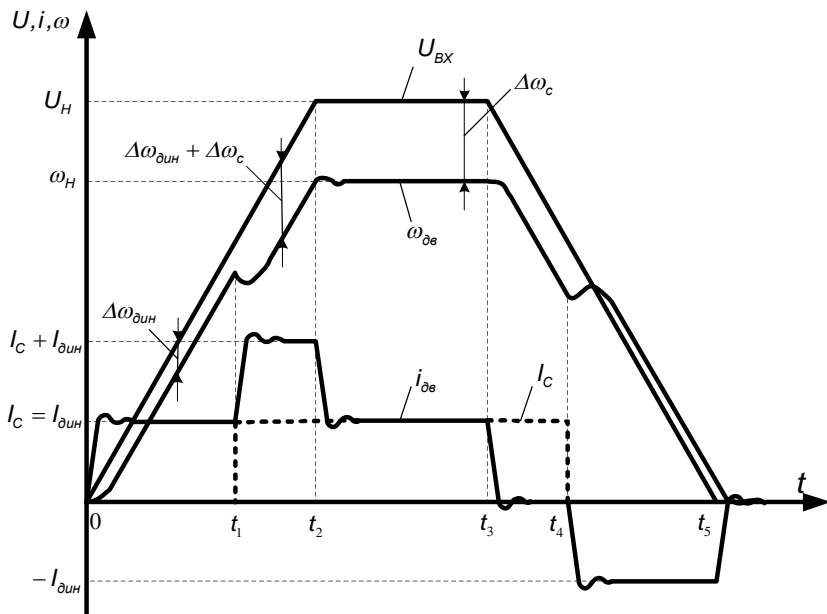


Рис. 2.37. Приложение скачка статической нагрузки при разгоне и снятие его при торможении двигателя

Участок времени $(0 - t_1)$ – пуск двигателя на х/х. Имеет место динамическая просадка по скорости $\Delta\omega_{дин}$, пропорциональная динамическому току. Ток якоря $I = I_{дин}$.

Участок $(t_1 - t_2)$. В момент t_1 происходит бросок статической нагрузки, скорость двигателя уменьшается, а затем снова увеличивается до номинальной, т.к. напряжение якоря продолжает расти. Ток якоря $I = I_C + I_{дин}$. Участок $(t_2 - t_3)$ – двигатель работает в номинальном режиме с номинальной статической нагрузкой. Ток якоря $I = I_C$. Участок $(t_3 - t_4)$ – торможение двигателя с номинальной нагрузкой. Ток якоря $I = I_C - I_{дин}$. Участок $(t_4 - t_5)$ – торможение двигателя без статической нагрузки, под действием отрицательного динамического тока. В

2.4.5. Приложение скачка напряжения якоря $\Delta U_{\text{я}} = 0,1 \cdot U_{\text{яН}}$

На рис. 2.39 изображены переходные процессы $U_{\text{ВХ}}$, $\omega_{\text{дв}}$, $i_{\text{дв}}$ при приложении скачка напряжения якоря в 10%, двигатель работает без нагрузки.

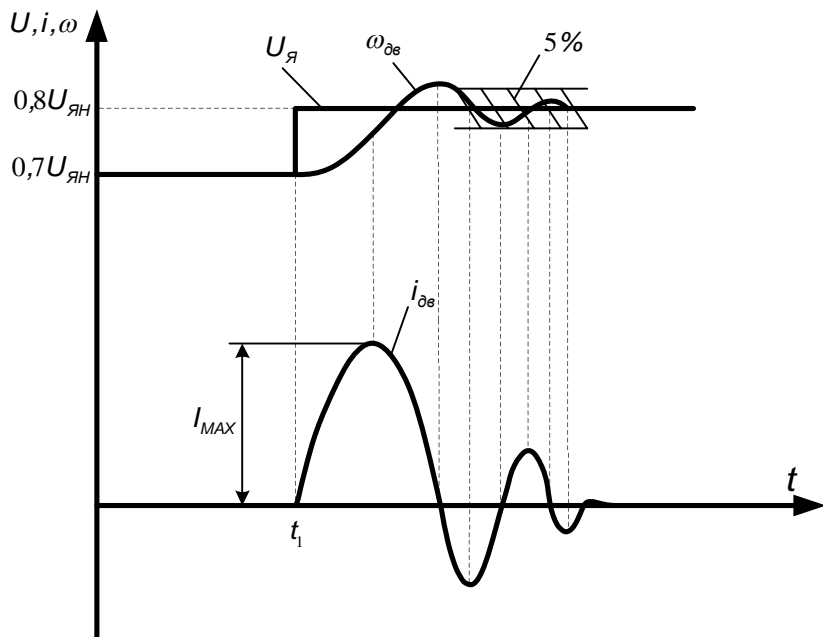


Рис. 2.39. Приложение скачка напряжения якоря при работе двигателя без нагрузки

До момента времени t_1 двигатель работает без нагрузки с напряжением $U_{\text{я}} = 0,7 \cdot U_{\text{яН}}$. С момента t_1 происходит скачек напряжения до $U_{\text{я}} = 0,8 \cdot U_{\text{яН}}$. Характер формирования тока и напряжения явно выраженный колебательный.

На рис. 2.40 приведены электромеханические характеристики и траектория колебаний скорости относительно тока (момента).

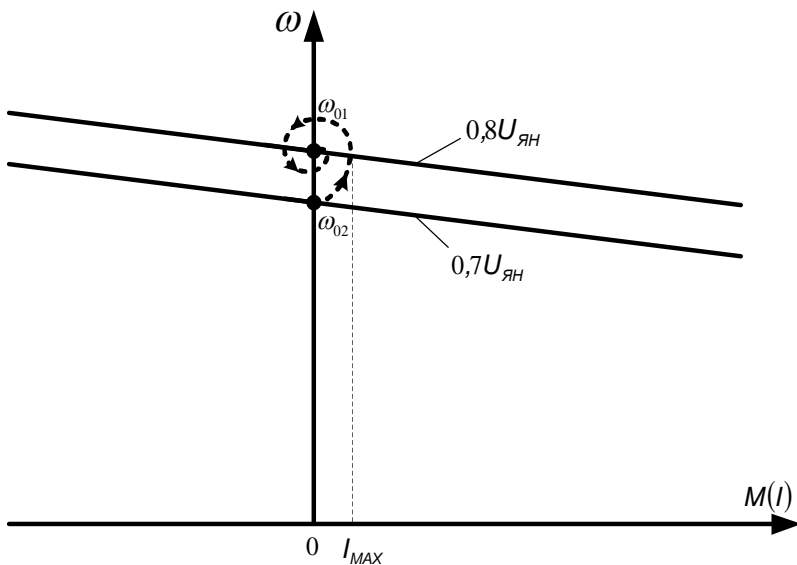


Рис. 2.40. Электромеханические характеристики и траектория колебания скорости

2.4.6. Скачкообразное приложение статической нагрузки при пониженном напряжении якоря

На рис. 2.41 изображены переходные процессы U_{BX} , $\omega_{\partial\epsilon}$, $i_{\partial\epsilon}$ при приложении скачка номинальной нагрузки при пониженном напряжении якоря.

В момент t_1 нагрузка возрастает скачком до номинального значения, при этом скорость двигателя дает статическую просадку $\Delta\omega_c$, характер формирования тока и скорости колебательный, возникает перерегулирование по току якоря σ_1 .

На рис. 2.42 показана траектория колебания скорости относительно момента (тока) при приложении статической нагрузки скачком.

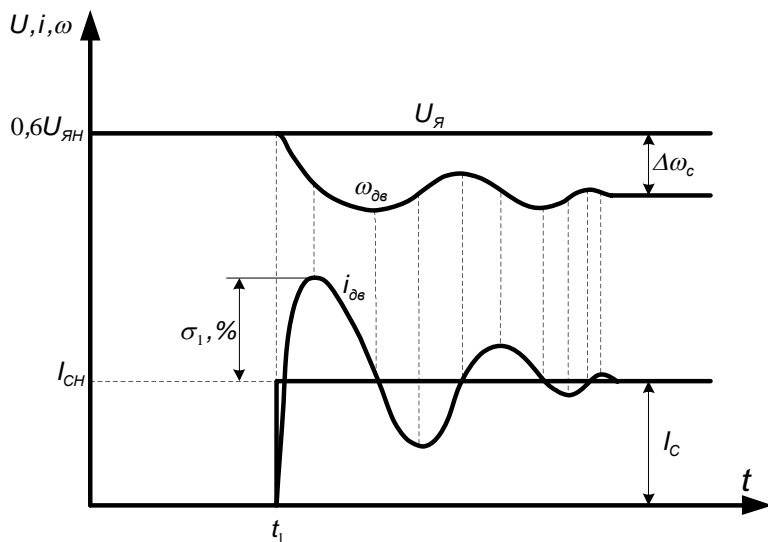


Рис. 2.41. Приложение скачка статической нагрузки при пониженном напряжении якоря

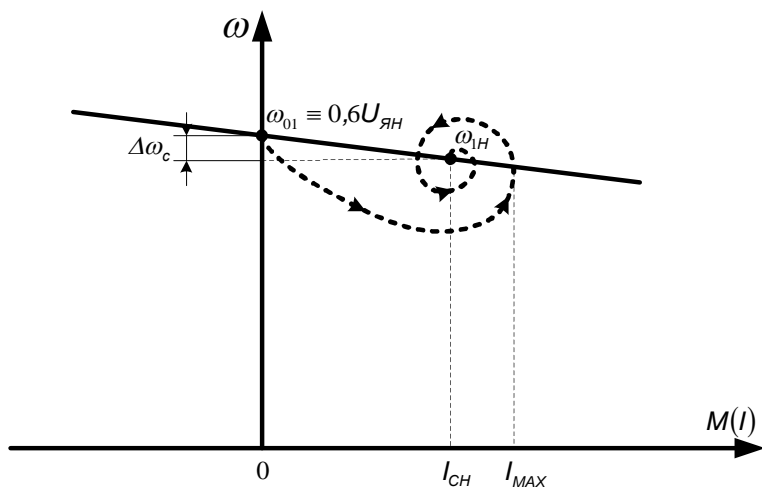


Рис. 2.42. Электромеханическая характеристика двигателя и траектория колебаний скорости относительно тока (момента) якоря

2.5. Исследование переходных процессов в двигателе постоянного тока при двухзонном регулировании скорости

В данном разделе с помощью известной динамической математической модели ДПТ с НВ [2] исследуются основные режимы работы двигателя при двухзонном регулировании скорости:

- пуск двигателя на холостом ходу;
- наброс нагрузки во время разгона двигателя и сброс во время торможения.

На рис. 2.43 представлена структурная схема математической модели ДПТ с НВ при двухзонном регулировании скорости.

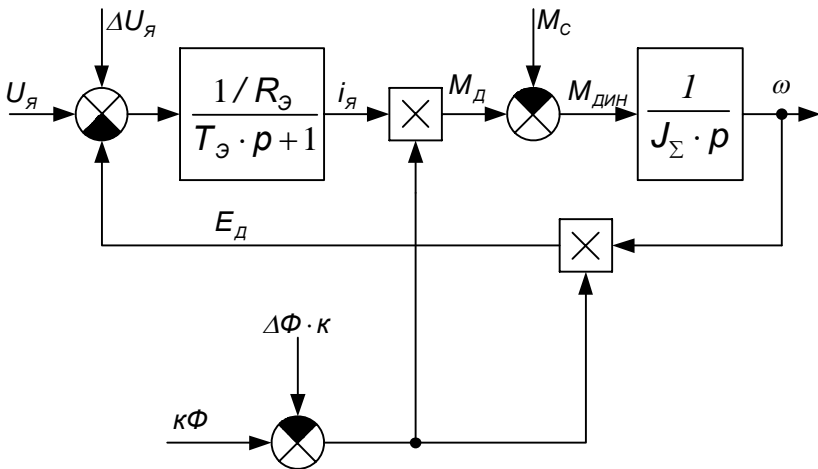


Рис. 2.43. Структурная схема математической модели ДПТ с НВ при двухзонном регулировании скорости

На рис. 2.44 представлены переходные процессы $U_{ВХ}$, $\omega_{об}$, $i_{об}$, $\kappa\Phi$ при пуске двигателя до максимальной скорости, работе и торможению на х/х.

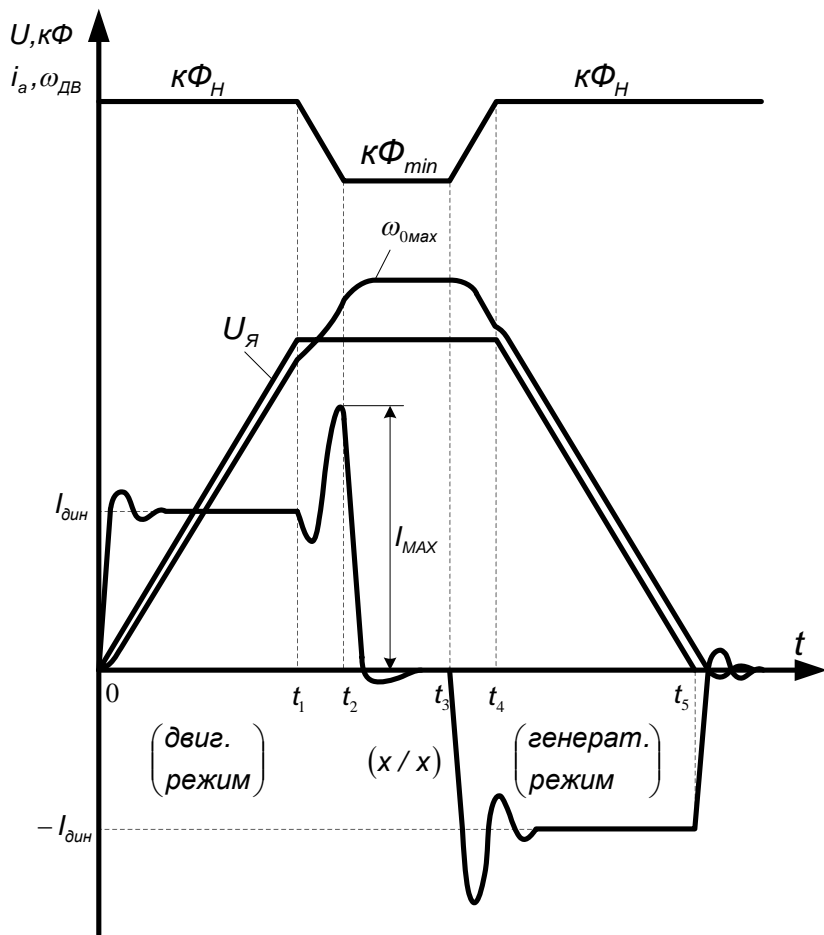


Рис. 2.44. Переходные процессы U_{BX} , $\omega_{де}$, $i_{де}$, $k\Phi$ при двухзонном регулировании скорости ДПТ с НВ

Участок времени от 0 до t_1 :

- разгон двигателя до скорости x/x динамическим током, поток двигателя номинальный;

- снижение потока до значения $K\Phi_{min}$ по линейному закону приводит к увеличению тока якоря до значения I_{MAX} , перегрузочная способность двигателя с уменьшением потока уменьшается;

- падение тока (t_1) обусловлено тем, что в момент времени t_1 напряжение якоря достигло номинального значения и установилось (перестало изменяться).

В статических электромеханических характеристиках пуск двигателя до максимальной скорости на ω/α представлен на рис. 2.45.

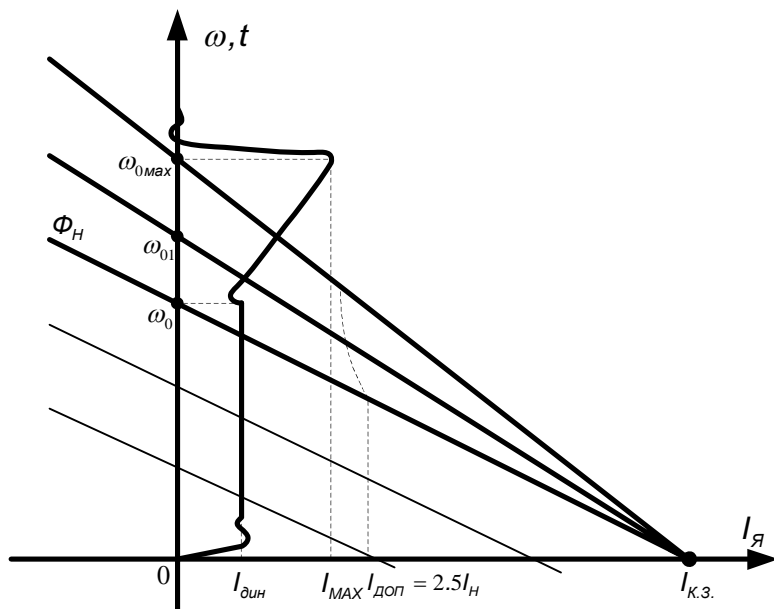


Рис. 2.45. Электромеханические характеристики пуска двигателя до максимальной скорости на ω/α

При работе двигателя во второй зоне регулирования допустимый ток якоря $I_{ДОП}$, а соответственно и его перегрузочная

способность должны снижаться, т.к. обмотка якоря находится под повышенным током.

На рис. 2.46 приведены переходные процессы U_{BX} , $\omega_{\text{дв}}$, $i_{\text{дв}}$, $K\Phi$ при приложении нагрузки скачком в момент разгона двигателя до максимальной скорости и снятие её во время торможения.

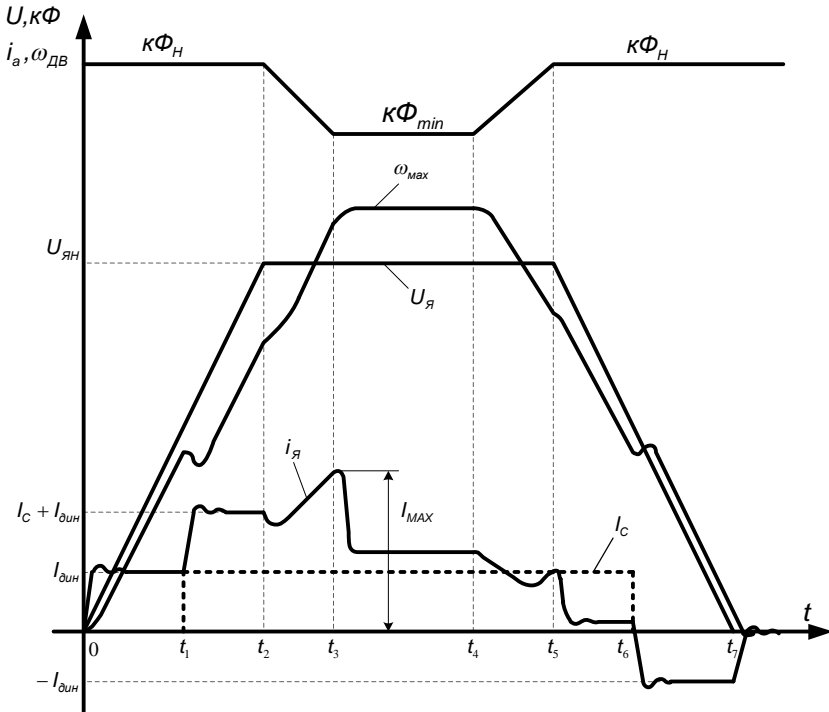


Рис. 2.46. Переходные процессы U_{BX} , $\omega_{\text{дв}}$, $i_{\text{дв}}$, $K\Phi$

$0 - t_1$: разгон двигателя под действием динамического тока. В момент времени t_1 - прикладывается статическая нагрузка.

$t_1 - t_2$: разгон под нагрузкой $I_{\Gamma} = I_{\text{дин}} + I_{\text{с}}$, из-за приложения нагрузки скорость «просаживается», но т.к. напряжение якоря продолжает расти, под действием динамического момента двигатель продолжает разгоняться.

$t_2 - t_3$: напряжение якоря становится номинальным, поток снижается до минимального значения, ток растет до максимального значения, скорость продолжает расти от номинального значения до ω_{MAX} .

$t_3 - t_4$: установившийся режим. Поток минимальный, скорость максимальная, ток выше статического.

$t_4 - t_5$: поток увеличивается до номинального значения, ток якоря уменьшается до статического, скорость уменьшается до номинального значения.

$t_5 - t_6$: напряжение якоря уменьшается по линейному закону, поток номинальный, двигатель тормозится статической нагрузкой (двигательный режим), скорость продолжает уменьшаться.

$t_6 - t_7$: сброс нагрузки в момент времени t_6 , из-за чего скорость незначительно увеличивается, а затем уменьшается до нуля под действием отрицательного динамического момента (генераторный режим).

2.6. Исследование переходных процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

2.6.1. Описание линейной математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Структурная схема математической модели АД, полученная на базе обобщенной машины имеет два управляющих воздействия – напряжение статора и синхронную угловую частоту, формируемые преобразователем частоты.

В связи с этим ниже рассматривается построение варианта структурной схемы АД, когда в качестве опорного используется вектор напряжения статора U_s , который совмещается с осью x . В этом случае скорость осей $x - y$ равна синхронной $\omega_k = \omega_s$ и

$$\begin{aligned} U_{sx} &= U_s, \\ U_{sy} &= 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

и дифференциальные уравнения приобретают вид

$$\left. \begin{aligned}
 U_s = U_{sx} &= p\Psi_{sx} - \omega_s\Psi_{sy} + r_s i_{sx}, \\
 0 = U_{sy} &= p\Psi_{sy} + \omega_s\Psi_{sx} + r_s i_{sy}, \\
 0 = U_{rx} &= p\Psi_{rx} - (\omega_s - \omega)\Psi_{ry} + r_r i_{rx}, \\
 0 = U_{ry} &= p\Psi_{ry} + (\omega_s - \omega)\Psi_{rx} + r_r i_{ry}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

В рассматриваемой структурной схеме АД для детального анализа при математическом моделировании предлагается выделить все переменные системы (2.2) в явном виде.

Из уравнений (2.2) можно записать операторные соотношения для потокосцеплений статора следующим образом

$$\left. \begin{aligned}
 \Psi_{sx} &= \frac{1}{p}(U_s + \omega_s\Psi_{sy} - r_s i_{sx}), \\
 \Psi_{sy} &= \frac{1}{p}(-\omega_s - r_s i_{sy}), \\
 \Psi_{rx} &= \frac{1}{p}[(\omega_s - \omega)\Psi_{ry} - r_r i_{rx}], \\
 \Psi_{ry} &= \frac{1}{p}[-(\omega_s - \omega)\Psi_{rx} - r_r i_{ry}].
 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Из уравнений записываются выражения для токов как функции потокосцеплений в виде

$$\left. \begin{aligned}
 i_{sx} &= \frac{\Psi_{sx}}{L'_s} - \frac{\Psi_{rx}}{M'_{sr}}, \\
 i_{sy} &= \frac{\Psi_{sy}}{L'_s} - \frac{\Psi_{ry}}{M'_{sr}}, \\
 i_{rx} &= \frac{\Psi_{rx}}{L'_r} - \frac{\Psi_{sx}}{M'_{sr}}, \\
 i_{ry} &= \frac{\Psi_{ry}}{L'_r} - \frac{\Psi_{sy}}{M'_{sr}},
 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$L'_{sx} = \frac{L_s L_r - M_{sr}^2}{L_r};$$

где

$$L'_r = \frac{L_r L_s - M_{sr}^2}{L_s};$$

$$M'_{sr} = \frac{L_s L_r - M_{sr}^2}{M_{sr}}.$$

Электромагнитный момент АД определяется уравнением

$$m_{\Psi} = \frac{3}{2} p_n (\Psi_{sx} i_{sy} - \Psi_{sy} i_{sx}),$$

а уравнение движения определяется соотношением

$$\omega = \frac{p_n}{Jp} (m_{\Psi} - m_c).$$

Операторным и алгебраическим уравнениям (2.2-2.4), соответствует структурная схема АД, приведенная на рис. 2.47. Отметим, что данная структурная схема приведена в абсолютных единицах, синхронная скорость и скорость ротора – в эл. рад/с.

Как было указано, рассмотренная структурная схема имеет два управляющих воздействия – напряжение статора и синхронную угловую скорость (частоту), определяемые преобразователем частоты. Поэтому она может быть использована при анализе различных частотно – управляемых асинхронных электроприводов на ЦВМ, когда система регулирования построена без использования теории обобщенной двухфазной электрической машины.

В качестве примера моделирования асинхронного двигателя по структурной схеме, приведённой на рисунке 2.47, берётся электродвигатель серии АИР 132М-2, номинальной мощностью 11кВт, номинальная скорость вращения 3000 об/мин, номинальное напряжение 380 В.

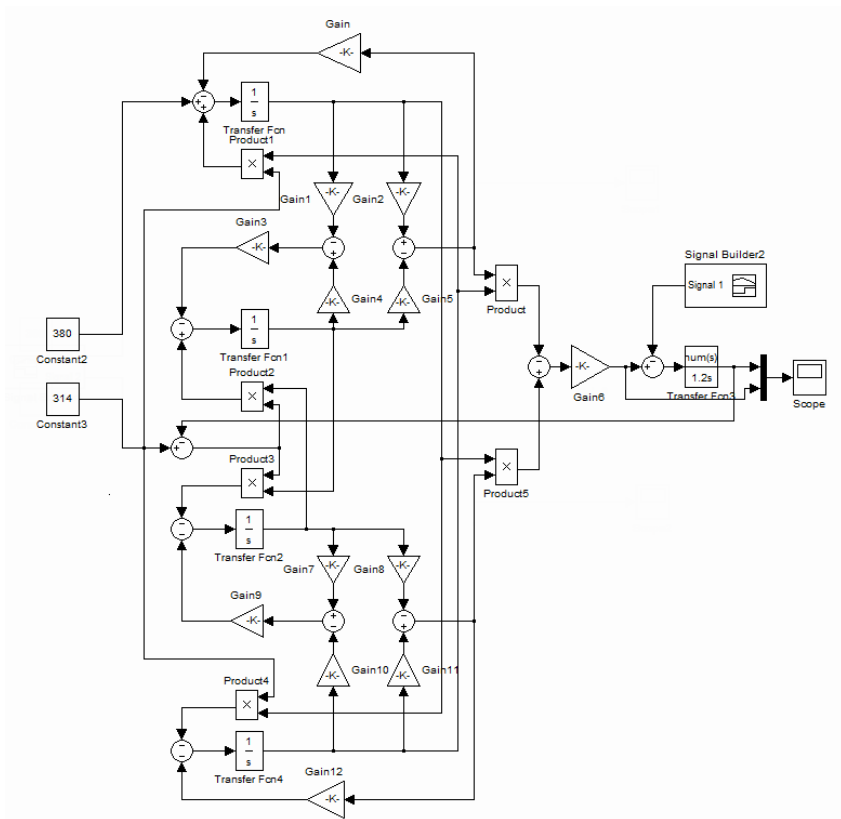


Рис. 2.48. Математическая модель АД с КЗР в среде Matlab Simulink (прямой пуск)

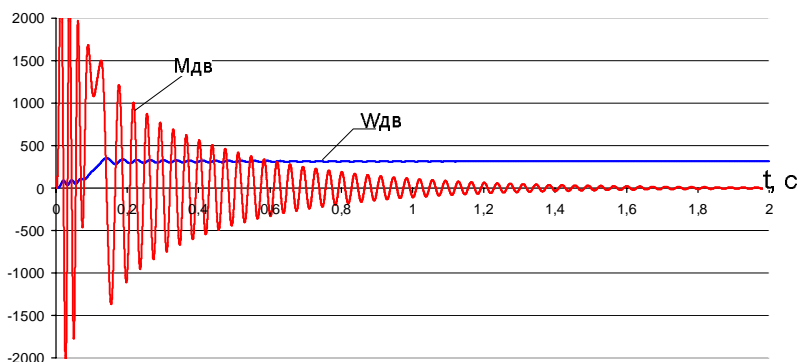


Рис. 2.49. Переходные процессы момента и скорости АД с КЗР (прямой пуск двигателя)

Из рис. 2.49 видно, что при прямом пуске АД имеет место скачок пускового момента. Электромагнитный момент двигателя колеблется в широких пределах и имеет как положительный, так и отрицательный знак. В связи с этим, скорость двигателя нарастает неравномерно и также содержит колебательную составляющую.

Переходные процессы прямого пуска АД (рис. 2.49) не являются оптимальными с точки зрения плавности пуска двигателя в работу. Токи двигателя в этом режиме имеют 7-10 кратные значения, что неблагоприятно сказывается на питающую сеть, особенно если АД средней или большой мощности. Исходя из перечисленных недостатков, можно сделать вывод о том, что прямой пуск АД нецелесообразен для мехатронных систем, где необходим плавный способ регулирования скорости объекта регулирования.

На рис. 2.51 представлены сигналы задания напряжения двигателя и частоты питающей сети от задатчика интенсивности при частотном пуске АД, а на рисунке 2.52 переходные процессы момента и скорости АД с КЗР при частотном пуске двигателя по линейному заданию скорости.

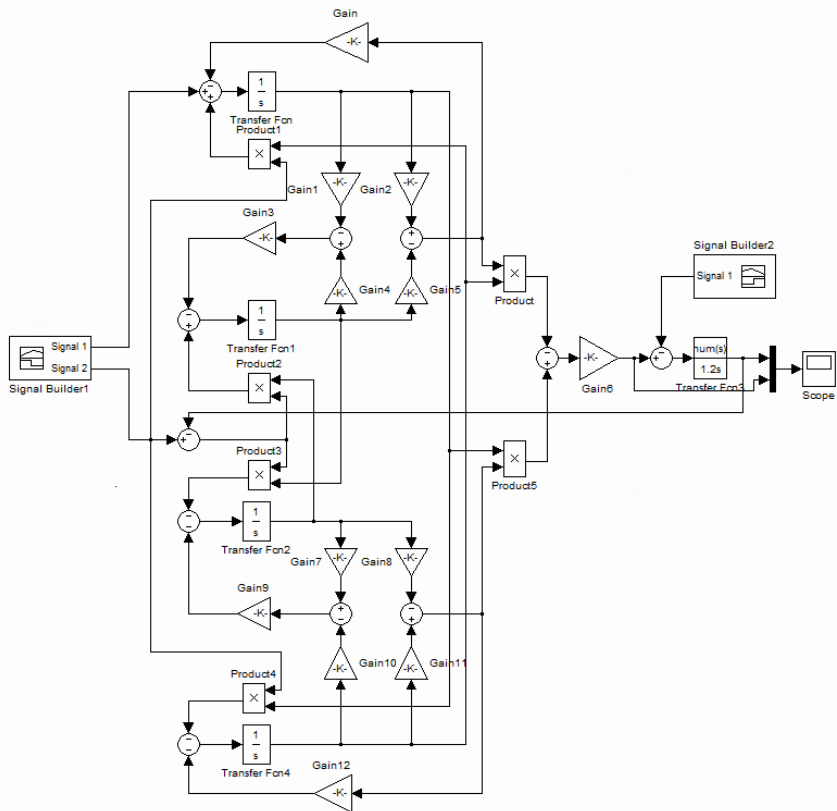


Рис. 2.50. Математическая модель АД с КЗР в среде Matlab Simulink (частотный пуск двигателя от датчика интенсивности)

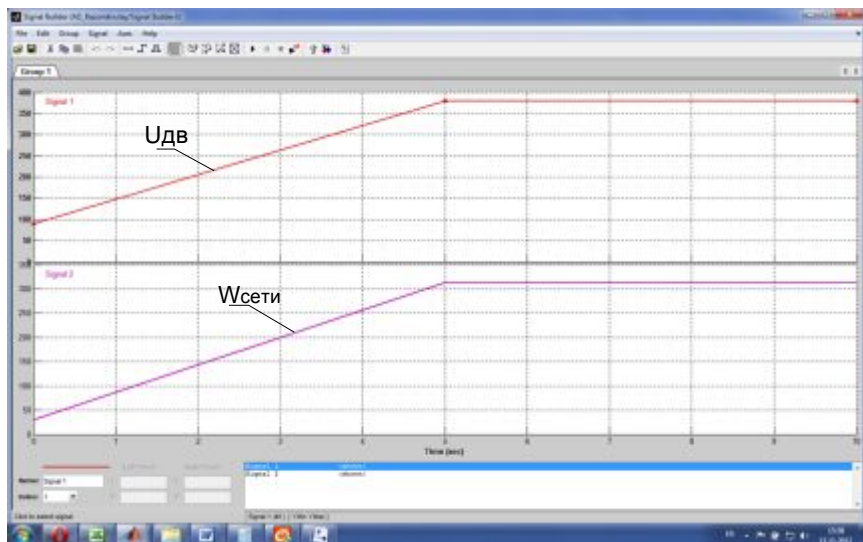


Рис. 2.51. Сигналы задания напряжения двигателя и частоты питающей сети от задатчика интенсивности

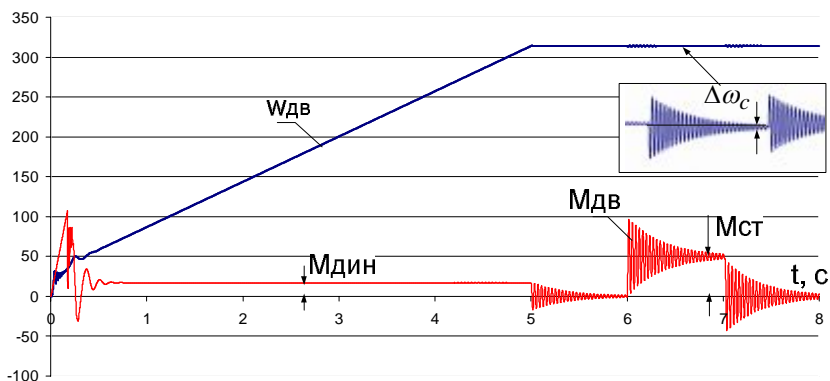


Рис. 2.52. Переходные процессы момента и скорости АД с КЗР (частотный пуск двигателя по линейному заданию скорости)

Моделирование частотного пуска АД осуществляется в течение 5ти секунд до номинальной скорости на холостом ходу, при этом динамический момент двигателя стабильный и постоянный, за исключением первой секунды, где мат. модель

работает не стабильно. На бой секунде к двигателю прикладывается скачкообразный момент статической нагрузки. У двигателя наблюдается статическая просадка по скорости $\Delta\omega_c$. Характер переходных процессов момента и скорости – колебательный затухающий.

2.6.2. Вопросы для самопроверки

1. Поясните свойства звеньев: интегрирующего, апериодического 1го и 2го порядка, дифференцирующего и реально-дифференцирующего, ПИ - звена. Нарисуйте реакцию звеньев на скачкообразное и трапециевидное воздействие входного напряжения.

2. Что такое задатчик интенсивности?

3. Назначение и принцип работы задатчика интенсивности.

4. Поясните понятие форсировки цепи возбуждения.

5. Что такое коэффициент форсировки и как он выбирается?

6. Что означает понятие однозонного регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

7. Нарисуйте структурную схему двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

8. Поясните переходные процессы при разгоне его на холостом ходу.

9. За моделируйте в матлабе разгон и торможение двигателя с активной статической нагрузкой $I_C = I_H$.

10. За моделируйте в матлабе разгон и торможение двигателя с реактивной статической нагрузкой $I_C = I_H$.

11. За моделируйте в матлабе приложение статической нагрузки во время разгона и снятие её во время торможения.

12. Поясните принцип двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

13. До каких пор можно ослаблять поток при регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

14. Нарисуйте структурную схему двигателя постоянного тока независимого возбуждения при двухзонном регулировании скорости.

15. Поясните принцип работы математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

16. За моделируйте в матлабе структурную схему асинхронного двигателя, мощностью 10 кВт. Проанализируйте переходные процессы АД в пуско-тормозных режимах.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГИДРОНАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА С СЕРВОКЛАПАНОМ

3.1. Устройство и назначение сервоклапана

Сервоклапан - это электрогидравлическое механическое устройство, позволяющее управлять мощным гидравлическим потоком рабочей жидкости слабыми электрическими сигналами. Сервоклапаны применяются в различных системах автоматического управления. Они используются в ракетах, самолётах, станках и многих других технических объектах.

На рис. 3.1 в упрощённом виде изображен сервоклапан вместе с исполнительным механизмом.

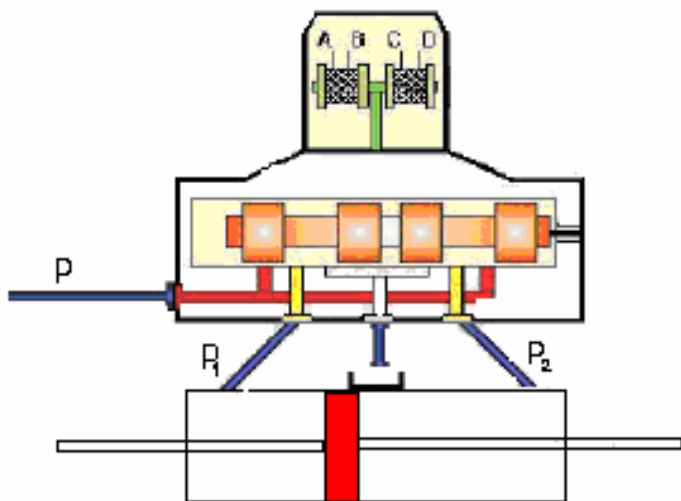


Рис. 3.1. Принцип работы сервоклапана с реверсивным поршнем

В состав сервоклапана входят электромагнит и золотник. В канал Р под большим давлением поступает рабочая жидкость. В зависимости от положения золотника рабочая жидкость протекает по каналу Р1 или по каналу Р2. Управляющее электрическое напряжение $u(t)$ подается на электромагнит. Поле электромагнита заставляет передвигаться в ту или иную сторону от нейтрального

положения золотник, который в свою очередь, открывает или закрывает соответствующие отверстия, через которые протекает рабочая жидкость. В нейтральном положении золотника оба канала закрыты. Если золотник передвигается в положительную сторону от нейтрального положения, то открывается канал P1 и поток рабочей жидкости протекает по каналу P1 со скоростью $x(t)$, зависящей прямо пропорционально от позиции золотника. Канал P2 в это время переключается на слив. Если золотник передвигается в отрицательную сторону от нейтрального положения, то в этом случае канал P1 переключается на слив, а поток рабочей жидкости протекает по каналу P2 со скоростью $x(t)$, прямо пропорциональной позиции золотника. (Скорость в этом случае целесообразно считать отрицательной, совпадающей по знаку со знаком позиции золотника). Каналы P1 и P2 соединены с исполнительным механизмом, и протекающая рабочая жидкость заставляет перемещаться поршень исполнительного механизма в нужное положение.

3.2. Математическая модель гидронажимного устройства и сервоклапана

Сервоклапан можно представить неким динамическим звеном - математической моделью простейшего узла, функционирование которого описывается дифференциальными уравнениями. На вход динамического звена подается напряжение управления электромагнита U_y . Сигналом выхода звена является рабочий поток гидравлического масла Q .

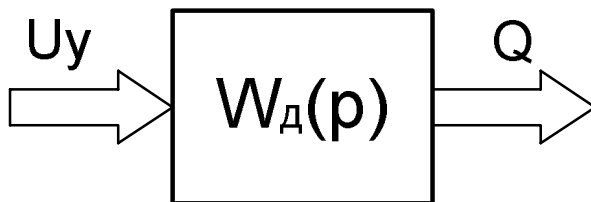


Рис. 3.2. Сервоклапан как динамическое звено

Передаточную функцию, описывающую сервоклапан, можно описать аperiodическим звеном второго порядка:

$$W_{\partial}(p) = \frac{\kappa_y}{1 + T_y \cdot p + T_1 \cdot p^2},$$

а если пренебречь постоянной времени T_1 , т.к. она очень мала, то динамическую модель сервоклапана можно представить обычным инерционным звеном

$$W_{\partial}(p) = \frac{\kappa_y}{1 + T_y \cdot p},$$

где κ_y - расходный коэффициент сервоклапана,

T_y - постоянная времени сервоклапана.

Современные мехатронные гидравлические системы оснащаются быстродействующими сервоклапанами, выполняющими функции усилителей мощности. Сервоклапаны преобразуют маломощные электрические сигналы, поступающие из системы управления, в пропорциональные этим сигналам величины расхода рабочей жидкости, проходящей через сервоклапан. При сведении валков сервоклапан подключает полости гидроцилиндров к питающей магистрали высокого давления, а при разведении подает рабочую жидкость из полостей гидроцилиндров на слив. Наиболее распространены сервоклапаны с системой "сопло-заслонка" в первой ступени, осевым золотником во второй ступени и с внутренней гидромеханической обратной связью по положению золотника. В частности, такие сервоклапаны применяет фирма DavyMckee. К недостаткам подобных сервоклапанов следует отнести периодическое изменение нейтральной точки вследствие механического износа, кроме того, гидравлические нажимные устройства, оснащенные подобными сервоклапанами, предъявляют очень высокие требования к качеству очистки рабочей жидкости.

Математическая модель мехатронной гидронажимной системы как объекта управления описывается тремя линеаризованными дифференциальными уравнениями [20, 21]. Уравнение расходов жидкости в гидравлическом НУ для малых приращений координат:

$$Q = S_{\Gamma} \cdot \frac{dS_{Hy}}{dt} + \frac{V}{E} \cdot \frac{dP_{\Gamma}}{dt} + r \cdot P_{\Gamma}, \quad (3.1)$$

где Q - расход жидкости, поступающей в поршневую полость гидроцилиндра;

S_{Hy} - положение поршня гидроцилиндра;

S_{Γ} - площадь поршня;

V - объем поршневой полости при положении поршня, принятом за начальное;

E - объемный модуль упругости рабочей жидкости;

P_{Γ} - давление в поршневой полости;

r - коэффициент утечек при условии, что расход вследствие утечек, пропорционален давлению в поршневой полости.

Уравнение, описывающее соотношение усилий в прокатной клети:

$$P_{\Gamma} \cdot S_{\Gamma} = P + m \cdot \frac{d^2 S_{Hy}}{dt^2} + b \cdot \frac{dS_{Hy}}{dt}, \quad (3.2)$$

где P - полное давление металла на валки;

m - масса механических частей клети, перемещающихся вместе с гидроцилиндром, а также масса жидкости в трубопроводе от аккумулятора до гидроцилиндра, приведенная к площади поршня;

b - коэффициент вязкого трения, определяющий величину силы трения, пропорциональной скорости перемещения гидравлического НУ и возникающей в местах соприкосновения подушек прокатных валков с направляющими станины клети, а также между стенками гидроцилиндра и поршнем.

Линеаризованное уравнение сервоклапана для малых приращений координат:

$$T_y \cdot \frac{dQ}{dt} + Q = k_y \cdot u_y - k_{II} \cdot P, \quad (3.3)$$

где T_y - постоянная времени сервоклапана;

u_y - напряжение управления (напряжение на входе усилителя, задающего управляющий ток в электромагнитную катушку сервоклапана);

$k_Y = \frac{dQ}{du}$ - расходный коэффициент сервоклапана,

постоянный практически во всем диапазоне изменения напряжения;

$k_{II} = \left(\frac{dQ}{dP} \right)_0$ - коэффициент жесткости перепадно-расходных

характеристик сервоклапана при давлении в поршневой полости (P_0), принятом за начальное.

- Уравнения, описывающие гидравлическое НУ, не учитывают
- волновые процессы в трубопроводе между аккумулятором, сервоклапаном и гидроцилиндром;
 - падение давления в трубопроводе;
 - сухое трение.

С учетом принятых допущений на рис. 3.3 приведена структурная схема гидравлического НУ, построенная по приведенным выше уравнениям. С помощью структурных преобразований можно упростить схему и привести ее к виду, показанному на рис. 3.4.

Нажимное устройство фирмы DavyMckee оснащено двумя сервоклапанами на каждый гидравлический цилиндр, которые включаются в работу последовательно по мере увеличения сигнала задания. Особенностью конструкции является расположение блока сервоклапанов непосредственно на цилиндрах, что уменьшает длину гидравлических путей и повышает скорость реакции системы.

На рис. 3.5 показана структурная схема объекта регулирования гидравлического НУ, рассчитанная на основе исходных данных, приведенных в табл. 3.1, [20, 21].

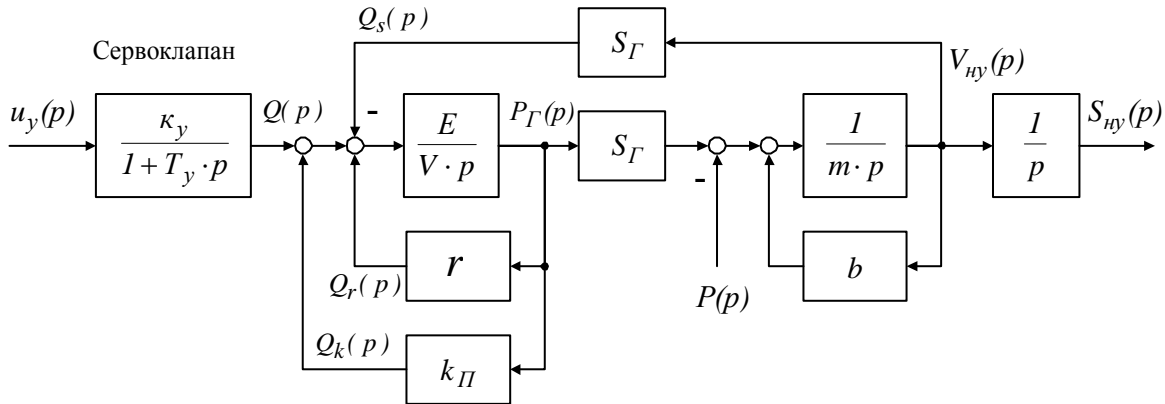


Рис. 3.3. Структурная схема мехатронной системы гидравлического нажимного устройства с сервоклапаном

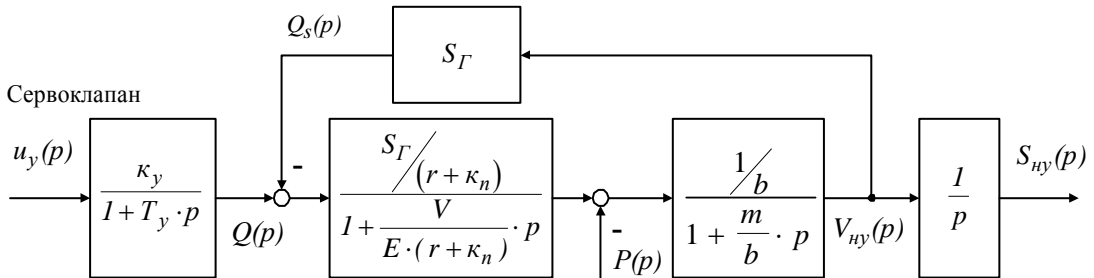


Рис. 3.4. Преобразованная структурная схема гидравлического нажимного устройства

Таблица 3.1

Параметры модели гидронажимных устройств

Название параметра	Обозначение	Величина
Номинальное давление в напорной магистрали сервоклапана	$P_{ГН}$	$2.5 \cdot 10^7$ н/м
Площадь поршня гидравлического НУ	$S_{Г}$	0.73 м ²
Приведенная масса жидкости в трубопроводе и механических частей	m	$8 \cdot 10^5$ кг
Объем поршневой полости при полном ходе поршня	V	$1.83 \cdot 10^{-2}$ м ³
Объемный модуль упругости рабочей жидкости	E	$1.4 \cdot 10^9$ н/м ²
Коэффициент утечек	r	$5.1 \cdot 10^{-14}$ м ⁵ /н·с
Номинальный расход сервоклапана	$Q_{ном}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$ м ³ /с
Расходный коэффициент	$k_{У}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с·В
Коэффициент жесткости перепадно-расходных характеристик	$k_{П}$	$2.4 \cdot 10^{-12}$ м ⁵ /н·с
Постоянная времени сервоклапана	T_y	3.6 мс
Коэффициент вязкого трения	b	$1.6 \cdot 10^8$ кг/с

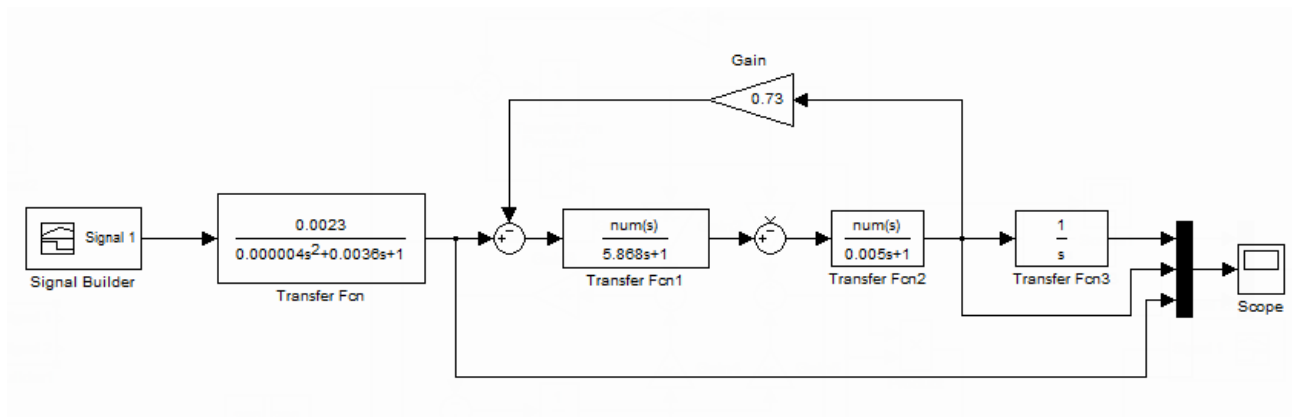


Рис. 3.5. Структурная схема объекта управления мехатронной системой гидронажимного устройства с среде Matlab Simulink

Гидравлическое НУ является объектом регулирования с параметрами, изменяющимися в широком диапазоне (объем поршневой полости, перепад давления на сервоклапане), что необходимо учитывать при настройке системы регулирования. На рис. 3.6 – 3.10 показаны результаты расчетов переходных процессов пуска и реверса мехатронной системы гидронажимного устройства с сервоклапаном.

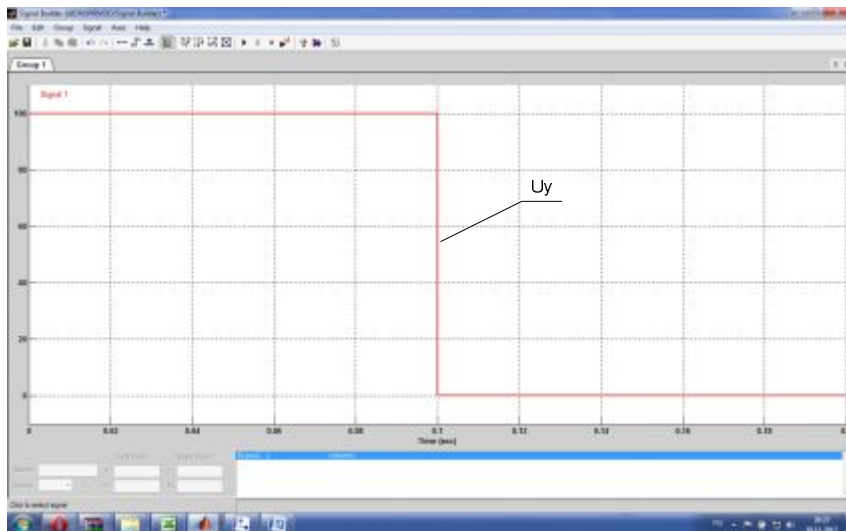


Рис. 3.6. Скачкообразный сигнал задания U_y сервоклапана

Переходные процессы в гидравлической системе при подаче управляющего напряжения скачком (рис. 3.10), отражают высокое быстродействие сервоклапана. Величина потока Q достигает своего максимального значения примерно за 0,011 секунд. Качество переходных процессов потока Q гидравлической жидкости в мехатронной системе в динамике явно выраженное колебательное затухающее. Сигнал перемещения так же колебательный и имеет перерегулирование $\Delta S = 3\%$.

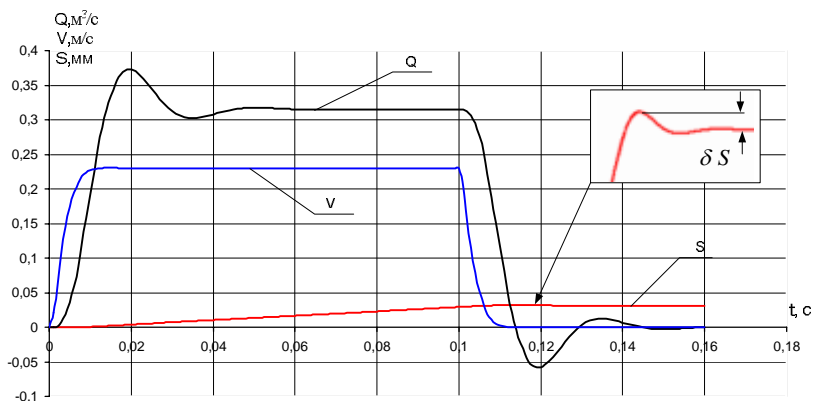


Рис. 3.7. Переходные процессы потока гидрожидкости Q , линейной скорости V и перемещения поршня S

Динамическая модель гидронажимного устройства позволяет моделировать процесс реверса, задавая отрицательный сигнал напряжения управления U_y , рис. 3.8.

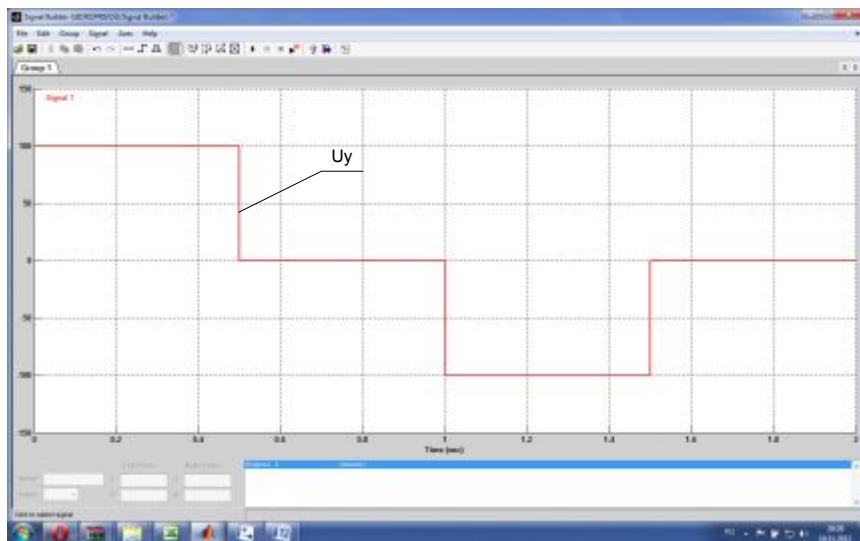


Рис. 3.8. Сигнал задания U_y сервоклапана (перемещение поршня с реверсом)

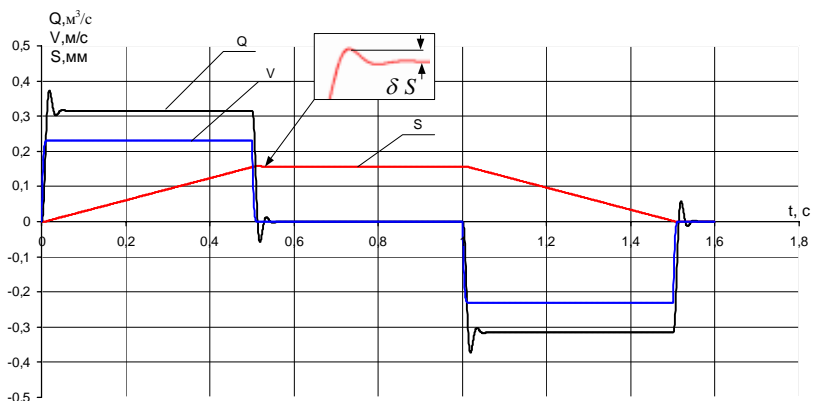


Рис. 3.9. Переходные процессы потока гидрожидкости Q , линейной скорости V и перемещения поршня S (перемещение поршня на 0,16 мм с реверсом)

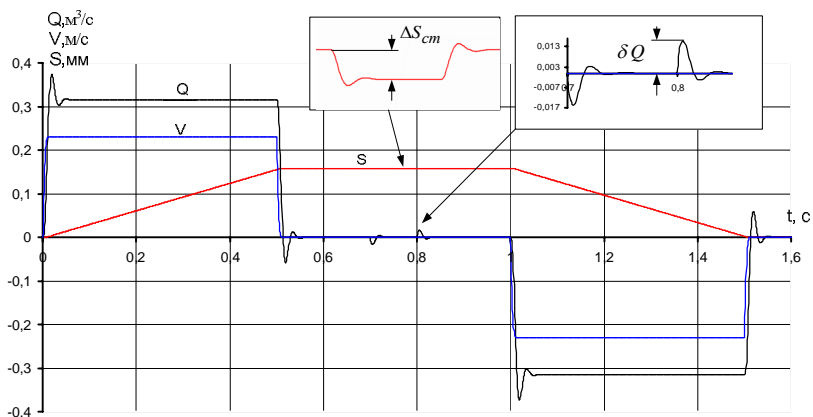


Рис. 3.10. Переходные процессы потока гидрожидкости Q , линейной скорости V и перемещения поршня S (при применении скачкообразного статического давления к поршню)

На рис. 3.10 приведены переходные процессы потока гидрожидкости Q , линейной скорости V и перемещения поршня S при применении скачкообразного статического давления к поршню в период времени (0,7-0,8 секунды). В реальных условиях таким скачком давления на поршень может послужить препятствие на

пути перемещения рабочего органа поршня (нажимного устройства). Из анализа переходных процессов видно, что модель гидронажимного устройства статична по перемещению S и при приложении скачкообразной нагрузки к поршню, образуется статическая ошибка $\Delta S_{ст}$. Для уменьшения этой ошибки требуется система регулирования перемещения.

3.3. Вопросы для самопроверки

1. Что такое сервоклапан?
2. Поясните принцип работы сервоклапана.
3. Поясните принцип работы сервоклапана, совместно с реверсивным поршнем.
4. Напишите и поясните математическую модель сервоклапана.
5. Напишите передаточную функцию, описывающую математическую модель сервоклапана.
6. На сколько быстрее действуют сервоклапаны, по сравнению с электрическими приводами золотника?
7. Нарисуйте структурную схему математической модели мехатронной системы нажимного устройства.
8. Поясните математическую модель мехатронной системы нажимного устройства с сервоклапаном.
9. В каких мехатронных системах применяются гидроприводы?
10. Каково быстродействие гидроприводов?
11. Перечислите преимущества гидроприводов по сравнению с электроприводами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления /Я.Я. Алексанкин, А.Э. Бржозовский, В.А. Жданов и др.; Под ред. В.В. Солодовникова. - М.: Машиностроение, 1990 - 332 с.
2. Моделирование и основы автоматизированного проектирования приводов: Учеб. пособие для студентов высших технических учеб. заведений /В.Г. Стеблецов, А.В. Сергеев, В.Д. Новиков и др. - М.: Машиностроение, 1989. - 224 с.
3. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов /В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. - М.: Энергоиздат, 1987. - 400 с.
4. Михайлов О.П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1989. - 224 с.
5. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. - М.: Машиностроение, 1988. - 752 с.
6. Теория автоматического управления: Учебник для вузов по спец. "Автоматика и телемеханика" в 2-х ч. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления./ Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.; Под ред. А.А. Воронова. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высш.шк., 1986. - 367 с.
7. Фролов Ю.М. Автоматизированное проектирование электроприводов постоянного тока: Учеб. Пособие. – Воронеж: ВПИ, 1992. - 140 с.
8. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. - Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1979, - 160 с.
9. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. - М.: Энергия, 1964.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. - М.: Энергоиздат, 1985. - 560 с.
11. Копылов И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (Электрические машины): Учебник. - М.: Высш. школа, 1980. - 256 с.
12. Егоров В.Н., Корженевский-Яковлев О.В. Цифровое моделирование систем электропривода. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. - 168 с.
13. Структурное представление асинхронной машины как системы с параметрической обратной связью./ В.А. Трубецкой, Ю.М. Фролов, Н.И. Щерблыкина, Д.В. Дремачев //Анализ и

проектирование средств роботизации и автоматизации. Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 1999. С. 116-123.

14. Зимин Б.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.А. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 192 с.

15. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе /А.Я. Бернштейн, Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кудрявцев, Р.С. Сарбатов; Под ред. Р.С. Сарбатова. - М.: Энергия, 1980 - 328 с.

16. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 224 с.

17. Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины: Учеб. пособие. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1985. - 213 с.

18. Фролов Ю.М. Моделирование электроприводов: Конспект лекций; Воронеж.гос.техн.ун-т, Воронеж, 2000. - 58 с.

19. Чупраков Ю.Н. Гидропривод и средства автоматики. - М.: Машиностроение, 1979. - 378 с.

20. Басков С.Н. Исследование динамических режимов нажимных устройств черновой клетки стана 2800 // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. А.С. Карандаева. - Магнитогорск: МГТУ. 1998. Вып. 4. - с. 8 - 13.

21. Кузицин В.А., Гедымин Ю.Ю. Моделирование гидравлических нажимных устройств прокатных станов // Конструирование и исследование современных прокатных станов : Сб. науч. трудов. - М.: ВНИИметмаш, 1985. - С.113-118.

Учебное текстовое электронное издание

Линьков Сергей Александрович
Радионов Андрей Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Издается полностью в авторской редакции
1,63 Мб
1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2013 год
ФГБОУ ВПО «МГТУ»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru