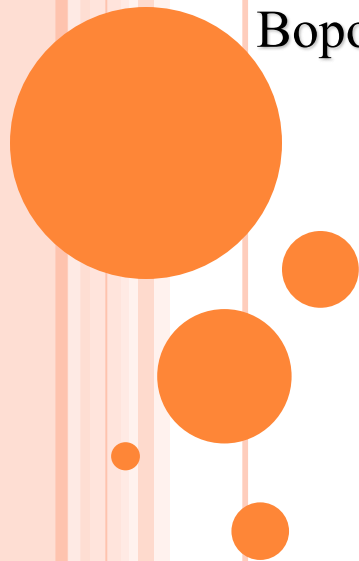


Дисциплина
«КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ,
КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ»

Лектор:

К.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Воронина Наталья Алексеевна



Распределение учебного времени

Лекций – 16 часов;

Лабораторных работ – 24 часа;

Практических занятий – 8 часов;

Всего аудиторных занятий – 48 часов;

Самостоятельная работа – 60 часов;

Всего по дисциплине – 108 часов;

Итоговая аттестация – зачёт.

Перечень работ

1. Лекций – 8;

2. Лабораторных работ – 5 (по тематике), но 12 аудиторных занятий;

3. Конференц-недели – 2;

на первой конференц-неделе – контрольная работа, доклад или реферат (9 неделя);

на второй конференц-неделе – защита Лаб. работ, подготовка к зачёту!

Рейтинг

- 1.Выполнение лабораторной работы на занятии – 2 балл;
 - 2.Представление отчета оформленного по требованиям ОСТ ТПУ – 5 балла, при любом отступлении от ОСТ ТПУ – 0 баллов;
 - 3.Защита отчета на «отлично» – 5 балла;
на «хорошо» – 3 балла;
на «удовлетворительно» – 2 балл.
- Итого максимум за работу (по теме) –12 баллов.

4. Контрольная работа – 5 баллов;

5. Доклад или реферат – 5 баллов;

6. Дополнительные от 1–10 баллов студент может заработать при выполнении конкурсной работы или отдельного специального задания.

Итого за выполнение лабораторных работ при посещении всех занятий студент должен получить для допуска к экзамену:
максимум – 80 баллов.

Требования к студенту

Студенты должны иметь навыки и знания по предметам:

- Философские и методологические проблемы науки и техники;
- Современные технологии проектирования электротехнических устройств и изделий;
- Современные проблемы электротехники;
- Компьютерные, сетевые и информационные технологии.

Цели и задачи дисциплины

- Применение информационных и информационно-коммуникационных технологий, владение инструментальными средствами для решения профессиональных задач
- Выполнение различных заданий индивидуально и в качестве члена команды, участие в выполнении групповых проектов
- Применение базовых, математических, естественнонаучных и профессиональных знаний в профессиональной деятельности
- Проводить эксперименты по заданным методикам с последующей обработкой и анализом результатов

Темы лекционных занятий

- **Раздел 1. Динамические системы**
- Основные понятия и определения математического моделирования. Классификация математических моделей.
- Дробно-рациональные функции. Импульсные функции. Преобразование Лапласа. Понятие линейного динамического звена. Передаточная функция. Структурная схема.
- Понятие многомерной динамической системы. Математические модели в пространстве состояний. Взаимосвязь видов математических моделей многомерных систем.
- Необходимое условие устойчивости. Критерий Рауса. Критерий Гурвица. Частотные критерии устойчивости.
- **Лабораторные работы:**
- 1. Моделирование и исследование процессов в RLC -цепи.
- 2. Моделирование переходных процессов в трансформаторе
- 3. Моделирование переходных процессов в асинхронном двигателе в трех осях.

Темы лекционных занятий

- **Раздел 2. Моделирование электротехнических систем**
- Введение. Основы построения матричных систем. Использование преобразования Лапласа. Вычислительные алгоритмы формирования векторно-матричных моделей в дискретном времени.
- Обобщенный функционал качества управления. Синтез оптимального управления.
- Оценка качества переходного процесса при воздействии ступенчатой функции. Оценка качества при гармонических воздействиях.
- Синусоидально изменяющиеся величины и их характеристики. Тригонометрический ряд. Формулы Эйлера-Фурье. Тригонометрический ряд с произвольным периодом.
- **Лабораторные работы:**
- 1. Моделирование переходных процессов в асинхронном двигателе в двух осях.
- 2. Система регулирования напряжения генератора постоянного

Учебно-методическое обеспечение

Основная литература:

- Сулейманов Р. Р. Компьютерное моделирование математических задач: учебное пособие / Р. Р. Сулейманов. — Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 382с.: ил.
- Стародубцев В А. Компьютерное моделирование процессов движения: учебное пособие для вузов / В. А. Стародубцев, Н. Н. Заусаева; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — 80 с.: ил.
- Ревинская Ольга Геннадьевна. Основы программирования в MatLab : учебное пособие / О. Г. Ревинская. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2016. — 207 с.: ил.

Учебно-методическое обеспечение

Дополнительная литература:

- Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами в системе MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.
- Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7 в подлиннике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
- Герман-Галкин С. Г. Спектральный анализ процессов силовых полупроводниковых преобразователей в пакете MATLAB (R 13) // Научно-практический журнал "Exponenta Pro. Математика в приложениях", – № 2, 2003. С. 80-82.
- Дьяконов В.П. Simulink 4: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
- Кетков Ю., Кетков А., Шульц М. MATLAB 7 – программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 737 с.
- Поршнева С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB: . - Москва: Лань, 2011. - 736 с.
- Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007 – 288 с.

Учебно-методическое обеспечение

Информационное обеспечение

Internet-ресурсы:

- <https://stud.lms.tpu.ru/course/view.php?id=2182> – Электронный курс
- <http://model.exponenta.ru> – Математический Интернет-портал.
- <http://www.mathworks.com> – MathWorks Inc.

- Используемое лицензионное программное обеспечение:
- MathCAD
- Matlab

КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Математические модели технических устройств могут быть классифицированы по ряду признаков:

1. По характеру отображаемых процессов выделяют:

- статические
- динамические модели.

2. По способу представления модели различают:

- аналитические
- графические
- табличные

3. По характеру зависимостей модели делятся на:

- линейные
- нелинейные

4. По диапазону рабочих сигналов модели классифицируются на:

- модели большого сигнала
- малосигнальные

5. По диапазону рабочих частот выделяют:

- низкочастотные
- высокочастотные
- сверхвысокочастотные

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Объектом моделирования является электромеханическая система, включающая в себя совокупность электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, и являющаяся с точки зрения теории моделирования динамической системой.

Под системой обычно понимают совокупность предметов как реальных, так и идеальных, которая каким-то образом организована. Такую совокупность называют полем системы, а данные, которые описывают организацию системы, - *характеристиками*.

Когда ни поле системы, ни ее характеристики не зависят от времени, говорят о **статической системе**.

Системы, характеристики которых или их поле изменяются во времени, называются **динамическими**.

Динамические системы являются главным объектом изучения имитационного моделирования. Статические системы применяются в исследовании, главным образом, **как** идеализированные и рассматриваются как состояния динамической системы.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Имитационная модель - это динамическая модель, временная часть которой отображает время неубывающим.

Модель - определенное соотношение между двумя системами, одну из которых называем моделируемой системой (оригиналом), а другую - моделирующей системой (моделью).

Имитационное моделирование - метод исследования, основанный на том, что изучаемая динамическая система заменяется ее имитатором, и с ним проводятся эксперименты в целях получения информации об изучаемой системе.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Структурная модель - некоторая схема из взаимосвязанных элементов, выделяемых по физическому назначению или выполняемой математической функции.

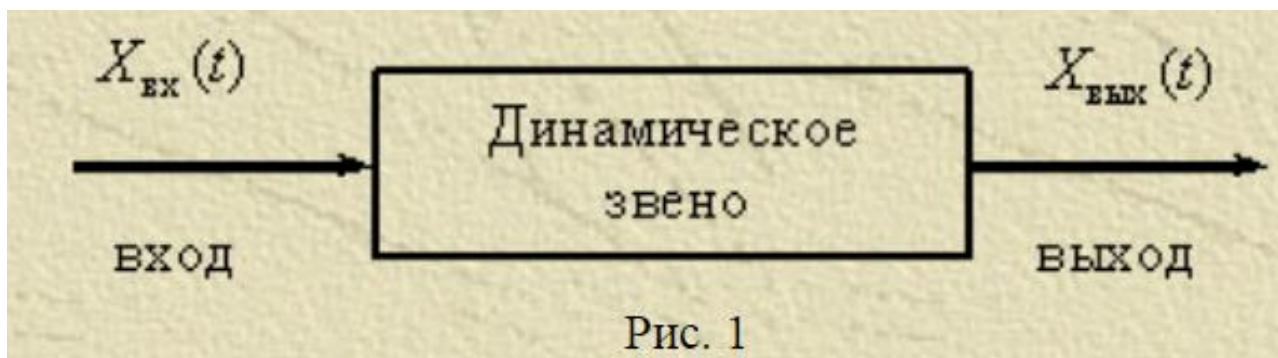
Можно выделить четыре уровня представления структурных моделей: алгоритмический, математический, функциональный и описательный.

- *Алгоритмический уровень* описания структурной модели - описание модели в виде некоторой схемы, элементы которой используются ЭВМ непосредственно для планирования вычислительного процесса.
- *Математический уровень* описания структурной модели - описание модели в виде совокупности блоков уравнений.
- *Функциональный уровень* описания структурной модели - описание модели в виде схемы соединения физических элементов ЭМС или их отдельных частей (электродвигатель, преобразователь и т.п.).
- *Описательный уровень* структурной модели - представление модели в виде одного блока, параметры которого указывают структурные и параметрические свойства исследуемой системы.

ПОНЯТИЕ ЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ЗВЕНА

САУ удобно представлять для анализа и при синтезе в виде взаимосвязанной совокупности отдельных элементов – динамических звеньев.

Под динамическим звеном понимают в общем случае абстрактное устройство, имеющее вход и выход, и для которого задано уравнение, связывающее сигналы на входе и выходе, как это показано на рис. 1.



Изучение свойств реальных объектов управления и САУ приводит к описанию динамических звеньев в виде нелинейных дифференциальных уравнений (ДУ).

Во многих случаях нелинейные ДУ можно линеаризовать, заменить нелинейные уравнения линейными, приближенно описывающими процессы в системах.

Осуществляется декомпозиция задач анализа и синтеза систем, то есть *первоначально используют линейное представление*, а затем *осуществляют учет вносимых нелинейностями особенностей*.

Поэтому нормально функционирующая система работает в режиме малых отклонений, при которых нелинейности не проявляются.

Если уравнение, связывающее сигналы

$$X_{\text{ЕК}}(t) \text{ и } X_{\text{ЕВЕК}}(t)$$

линейно, то говорят о линейном динамическом звене.

Уравнение линейного динамического звена имеет следующий общий вид (1):

$$a_0 \frac{d^n X_{\text{ЕВЕК}}(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} X_{\text{ЕВЕК}}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dX_{\text{ЕВЕК}}(t)}{dt} + a_n X_{\text{ЕВЕК}}(t) =$$
$$b_0 \frac{d^m X_{\text{ЕК}}(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} X_{\text{ЕК}}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dX_{\text{ЕК}}(t)}{dt} + b_m X_{\text{ЕК}}(t),$$

где $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ - постоянные коэффициенты, $m \leq n$.

Использовать такое описание динамического звена в задачах анализа и синтеза систем и объектов управления не рационально, поэтому существуют и иные формы описания и представления динамических звеньев и систем в целом.

Передаточная функция

Подвергнем уравнение (1) преобразованию Лапласа, считая начальные условия нулевыми и заменяя оригиналы сигналов их изображениями по Лапласу

$$X_{\text{вх}}(s) = L\{X_{\text{вх}}(t)\}, X_{\text{вых}}(s) = L\{X_{\text{вых}}(t)\}.$$

Используя теоремы преобразования Лапласа линейности и дифференцирования, получим операторное уравнение, связывающие изображения входного и выходного сигналов $X_{\text{вх}}(t)$ (2)

Преобразуем уравнение (2) к следующему виду

$$(a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n)X_{\text{вых}}(s) = (b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m)X_{\text{вх}}(s) \quad (3)$$

Получим из (3) отношение изображений выходного и входного сигналов

$$\frac{X_{\text{вых}}(s)}{X_{\text{вх}}(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n} = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (4)$$

Передаточная функция

Отношение (4) не зависит от изображений сигналов, определяется только параметрами самого динамического звена (a_i, b_i) , имеет вид дробно-рациональной функции.

Отношение изображений выходного и входного сигналов называют передаточной функцией динамического звена

$$W(s) = \frac{X_{\text{вых}}(s)}{X_{\text{вх}}(s)}$$

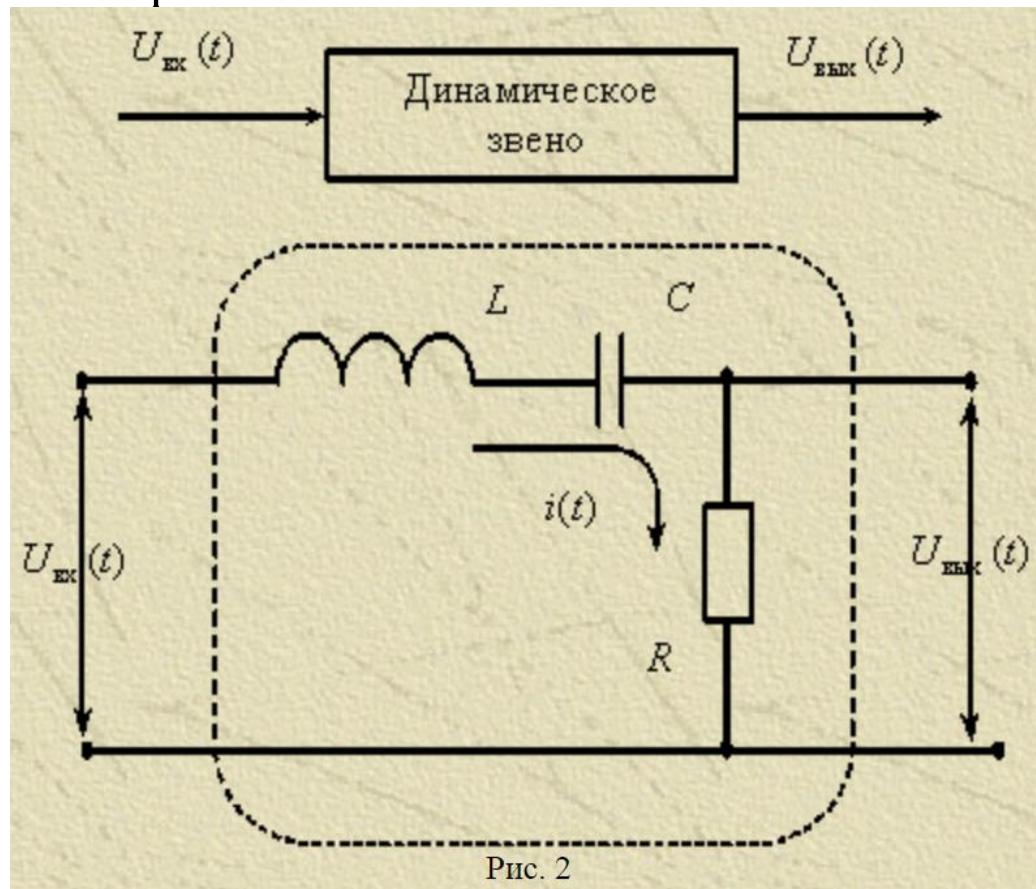
Уравнение вида

$$A(s) = 0, \quad a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n = 0,$$

называют характеристическим уравнением динамического звена, так как знаменатель передаточной функции – это характеристический полином дифференциального уравнения, описывающего динамическое звено.

Передаточная функция. Пример.

Определим передаточную функцию динамического звена по его принципиальной электрической схеме



Решение:

По второму закону Кирхгофа запишем уравнения описывающие схему

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(t) = U_L(t) + U_C(t) + U_R(t), \\ U_{\text{вых}}(t) = U_R(t). \end{cases}$$

Передаточная функция. Пример.

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(t) = U_L(t) + U_C(t) + U_R(t), \\ U_{\text{вых}}(t) = U_R(t). \end{cases}$$

С учетом того, что

$$U_R(t) = i(t)R, \quad U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}, \quad i(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt} \rightarrow U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt,$$

получаем

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_{\text{вых}}(t), \\ U_{\text{вых}}(t) = i(t)R. \end{cases}$$

Получим операторные уравнения

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(s) = LsI(s) + \frac{1}{Cs}I(s) + U_{\text{вых}}(s), \\ U_{\text{вых}}(s) = I(s)R. \end{cases}$$

Из второго уравнения выразим значение изображения тока

$$I(s) = \frac{1}{R} U_{\text{вых}}(s).$$

Передаточная функция. Пример.

$$\begin{cases} U_{\text{EX}}(s) = LsI(s) + \frac{1}{Cs}I(s) + U_{\text{ЭБЭК}}(s), \\ U_{\text{ЭБЭК}}(s) = I(s)R. \end{cases}$$

$$I(s) = \frac{1}{R}U_{\text{ЭБЭК}}(s).$$

Подставим полученное выражение в первое уравнение системы

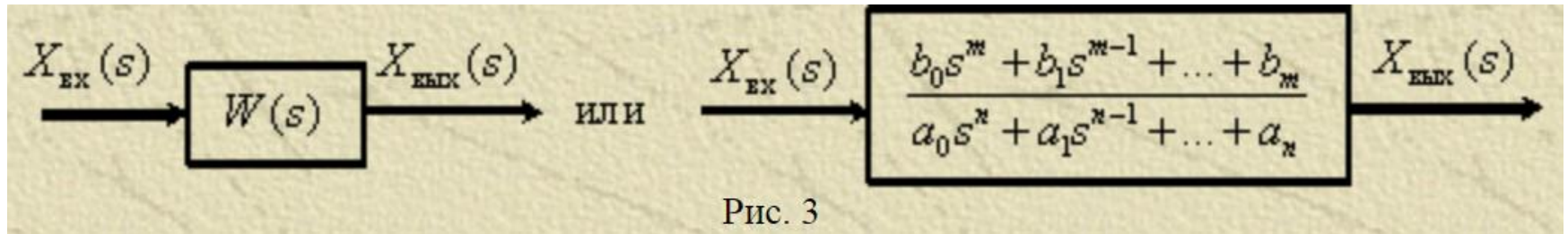
$$U_{\text{EX}}(s) = \frac{L}{R}sU_{\text{ЭБЭК}}(s) + \frac{1}{RCs}U_{\text{ЭБЭК}}(s) + U_{\text{ЭБЭК}}(s) = \frac{LCs^2 + CRs + 1}{CRs}U_{\text{ЭБЭК}}(s).$$

В итоге получаем искомую передаточную функцию

$$W(s) = \frac{U_{\text{ЭБЭК}}(s)}{U_{\text{EX}}(s)} = \frac{CRs}{LCs^2 + CRs + 1}.$$

Структурная схема

Графически передаточные функции динамического звена представляют в следующем виде:



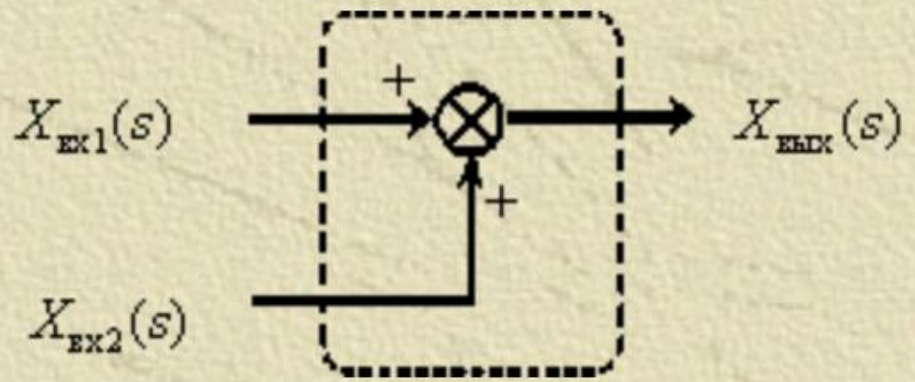
Если известно изображение входного сигнала и передаточная функция динамического звена, всегда можно найти изображение выходного сигнала при нулевых начальных условиях

$$X_{\text{вых}}(s) = X_{\text{вх}}(s)W(s)$$

Структурная схема

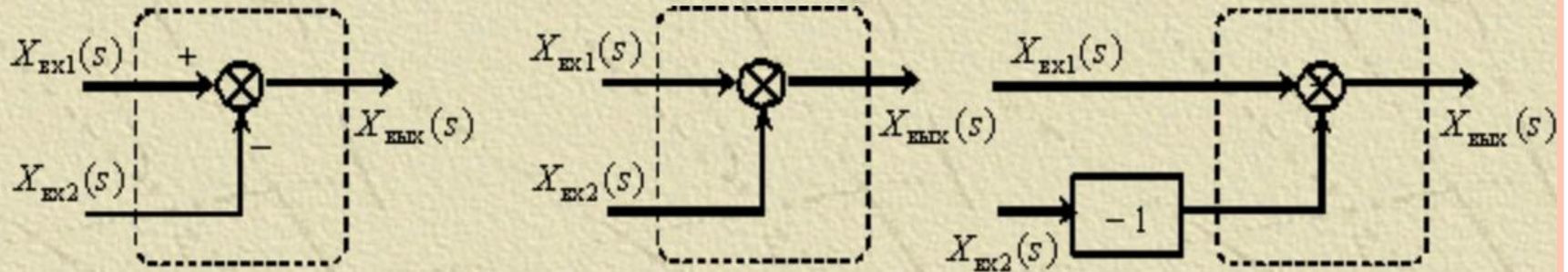
В общем случае САУ состоит из множества динамических звеньев, сигналы с выходов звеньев могут суммироваться или вычитаться, суммироваться с внешними для САУ сигналами. Суммирование и вычитание изображений сигналов могут быть представлено графически с помощью суммирующих звеньев:

1.
$$X_{\text{вых}}(s) = X_{\text{вх1}}(s) + X_{\text{вх2}}(s)$$



Структурная схема

2. $X_{\text{вых}}(s) = X_{\text{вх1}}(s) - X_{\text{вх2}}(s)$

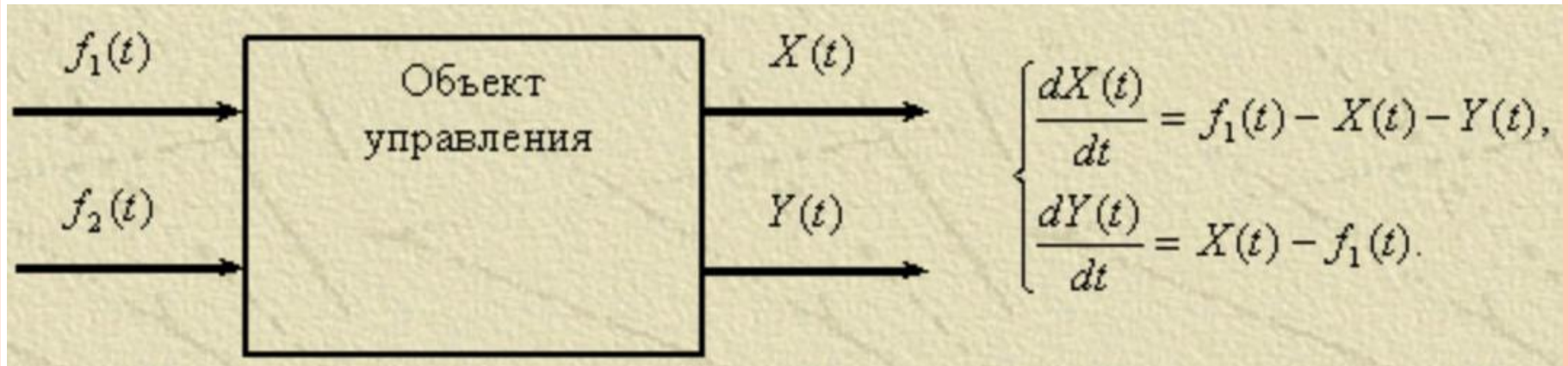


Показанная неоднозначность графического представления вычитания изображений на суммирующем элементе связана с различием в стандартах разных стран.

Используя графическое представление передаточных функций звеньев и суммирующие звенья, можно в графической форме представить операторные уравнения, описывающие САУ. Такое графическое представление операторных уравнений в ТАУ называют **структурной схемой**.

Структурная схема. Пример.

По математической модели объекта управления в форме системы дифференциальных уравнений определить структурную схему объекта.



Получим систему операторных уравнений, подвергнув исходную систему дифференциальных уравнений преобразованию Лапласа и заменив оригиналы изображениями,

$$\begin{cases} sX(s) = F_1(s) - X(s) - Y(s), \\ sY(s) = X(s) - F_1(s). \end{cases}$$

Из первого уравнения системы операторных уравнений, которое описывает динамическое звено объекта управления, после преобразований получим

$$(s+1)X(s) = F_1(s) - Y(s) = Z_1(s).$$

Структурная схема. Пример.

Тогда передаточная функция этого звена имеет вид

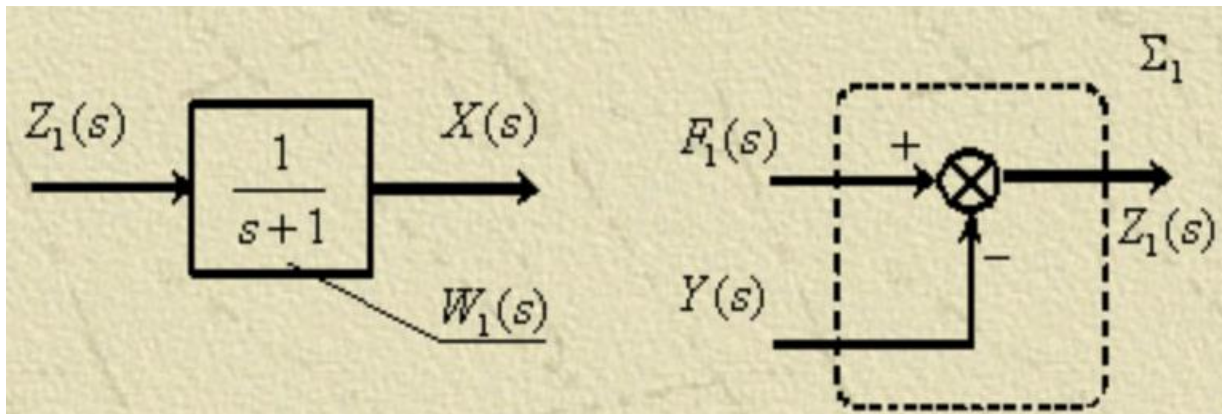
$$W_1(s) = \frac{X(s)}{Z_1(s)} = \frac{1}{s+1},$$

а выражение

$$F_1(s) - Y(s) = Z_1(s)$$

описывает суммирующее звено Σ_1 .

Таким образом, получены два фрагмента структурной схемы



Структурная схема. Пример.

Из второго уравнения системы операторных уравнений, которое описывает динамическое звено объекта управления, после преобразований получим, вводя обозначение,

$$sY(s) = X(s) - F_2(s) = Z_2(s).$$

Тогда передаточная функция этого звена имеет вид

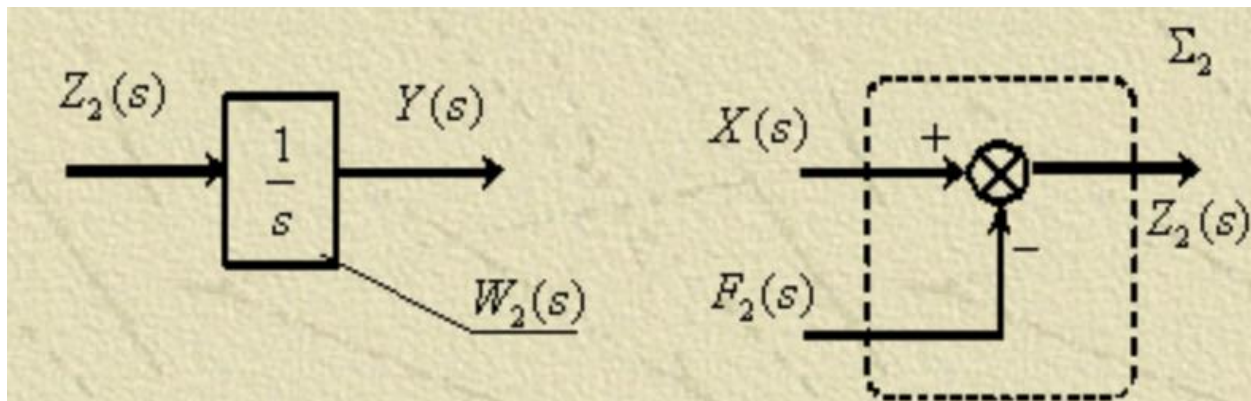
$$W_2(s) = \frac{Y(s)}{Z_2(s)} = \frac{1}{s},$$

а выражение

$$X(s) - F_1(s) = Z_2(s)$$

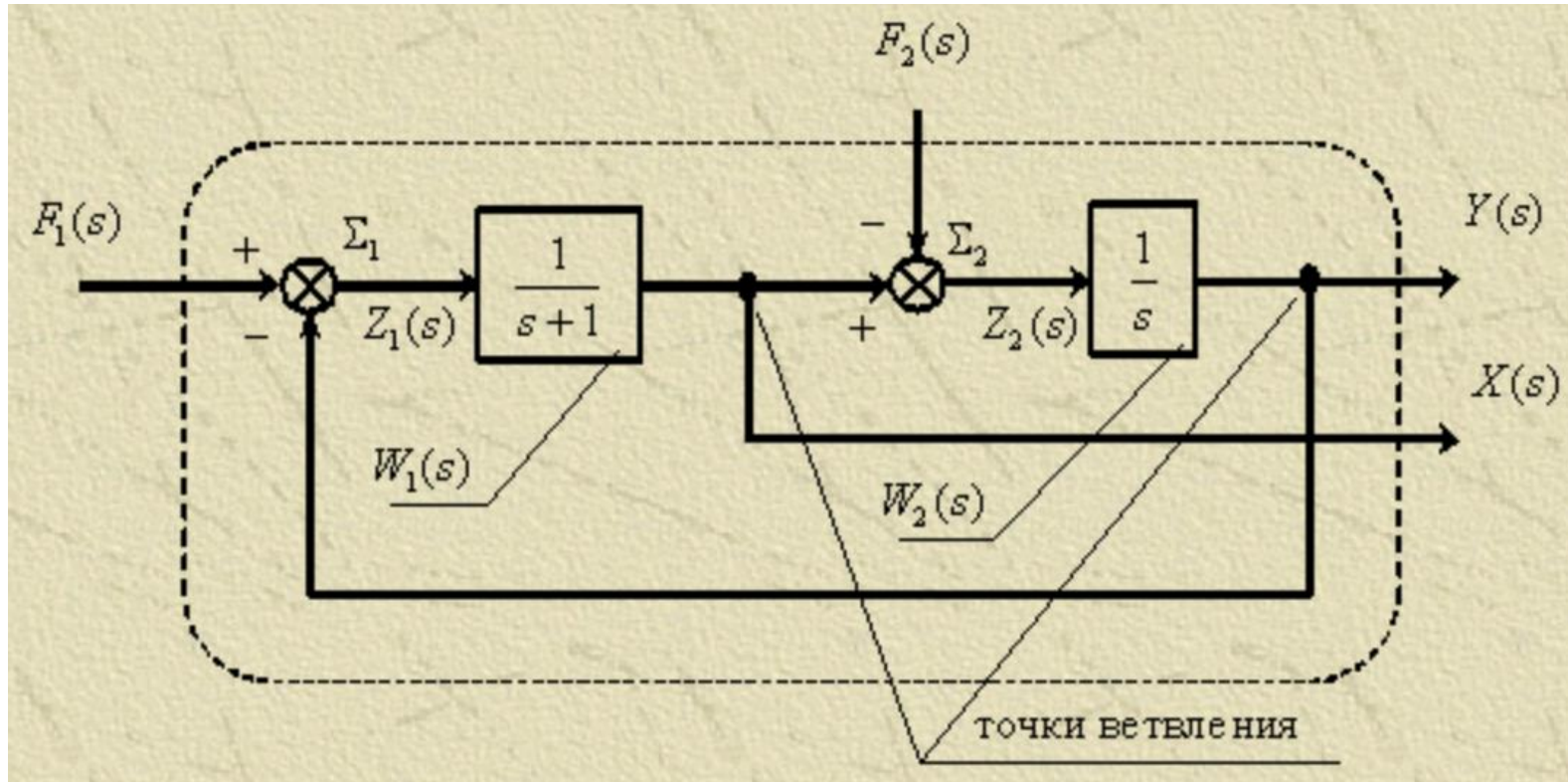
описывает суммирующее звено Σ_2 .

Таким образом, получены еще два фрагмента структурной схемы



Структурная схема. Пример.

Соединим все фрагменты структурной схемы объекта управления, объединяя одноименные сигналы, либо разветвляя их с помощью точек ветвления, показанных на схеме. В результате получим



Временные характеристики динамического звена

Временной или импульсной характеристикой динамического звена называют реакцию звена на $\delta(t)$, обозначая ее как $w(t)$.

При этом схема эксперимента имеет вид –

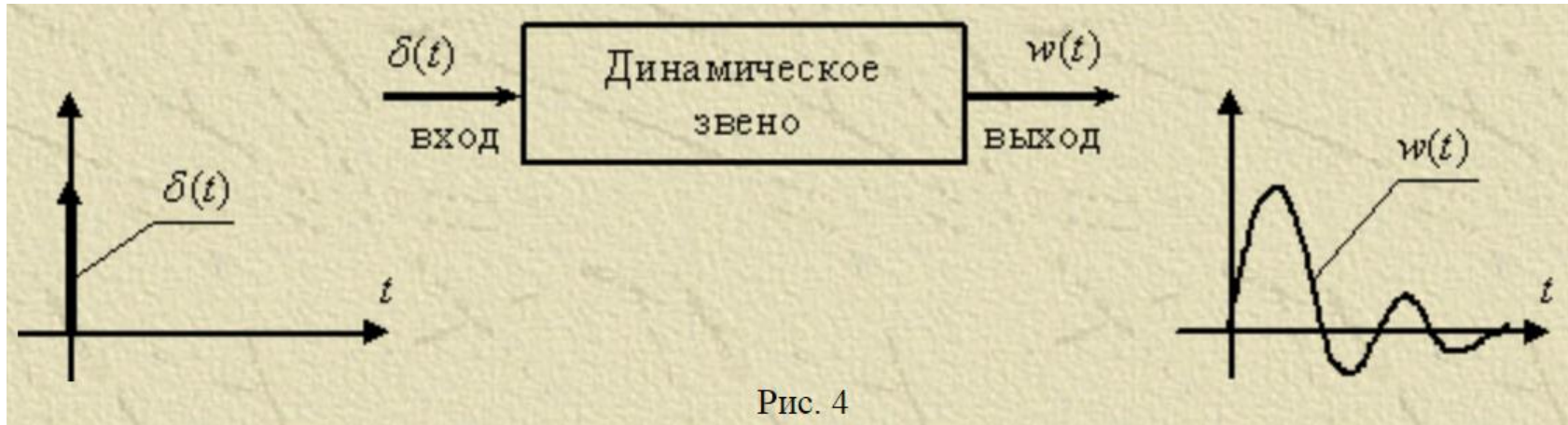


Рис. 4

Временные характеристики динамического звена

Выясним, что представляет собой временная характеристика, то есть почему ее называют характеристикой динамического звена?

Для этого рассмотрим динамическое звено с передаточной функцией $W(s)$

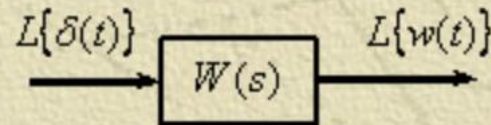


Рис. 5

В этом случае, в соответствии с (5), имеем

$$L\{w(t)\} = W(s)L\{\delta(t)\} = W(s) \cdot 1 = W(s).$$

Таким образом

$$W(s) = L\{w(t)\}$$

Получаем, что передаточная функция звена – это изображение по Лапласу импульсной характеристики динамического звена. В свою очередь, импульсная характеристика может быть определена по передаточной функции

$$w(t) = L^{-1}\{W(s)\},$$

при использовании разложения в форму Хэвисайта и обратное преобразование Лапласа.

Временные характеристики динамического звена

Знание импульсной характеристики позволяет определить реакцию динамического звена на сигнал любой формы.

Для динамического звена с передаточной функцией $W(s)$ преобразуем (5), используя теорему об умножении изображений преобразования Лапласа,

$$X_{\text{вых}}(t) = L^{-1}\{X_{\text{вх}}(s)W(s)\} = \int_0^t X_{\text{вх}}(\tau)w(t-\tau)d\tau.$$

а если легко получить $X_{\text{вх}}(s) = L\{X_{\text{вх}}(t)\}$, тогда

$$X_{\text{вых}}(t) = L^{-1}\{L\{X_{\text{вх}}(t)\}W(s)\}.$$

Переходной характеристикой или переходной функцией динамического звена называют реакцию динамического звена на $1(t)$, обозначая ее как $h(t)$. При этом схема эксперимента имеет вид –

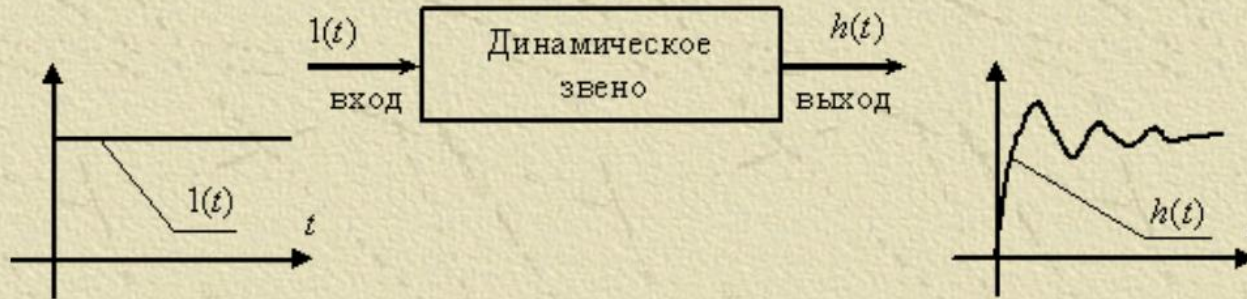


Рис. 6

Временные характеристики динамического звена

Для анализа переходной характеристики рассмотрим динамическое звено с передаточной функцией $W(s)$

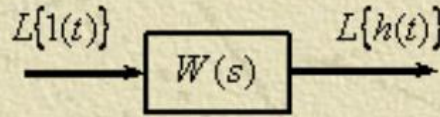


Рис. 7

В этом случае, в соответствии с (5), имеем

$$L\{h(t)\} = W(s)L\{1(t)\} = W(s) \cdot \frac{1}{s}.$$

По теореме об интегрировании оригинала имеем

$$h(t) = \int_0^t L^{-1}\{W(s)\}dt = \int_0^t w(t)dt$$

Переходная функция является интегралом по времени от импульсной характеристике и наоборот

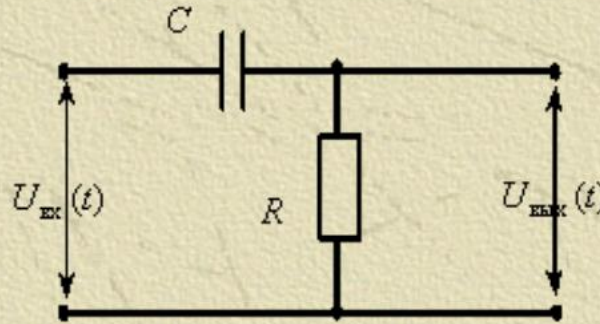
$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt}.$$

Переходная характеристика динамического звена может быть определена по передаточной функции

$$h(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{s}W(s)\right\}.$$

Контрольные вопросы и задачи

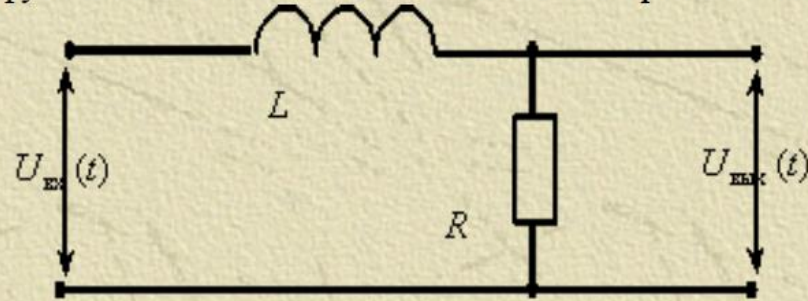
1. Что такое линейное динамическое звено?
2. Как определить передаточную функцию линейного динамического звена?
3. Перечислите основные элементы структурных схем систем управления.
4. Как определить по передаточной функции динамического звена его временные характеристики: импульсную и переходную?
5. Как по переходной характеристике определить импульсную характеристику динамического звена?
6. Определите передаточную функцию динамического звена по его принципиальной электрической схеме



Ответ:

$$W(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{CRs}{CRs + 1}$$

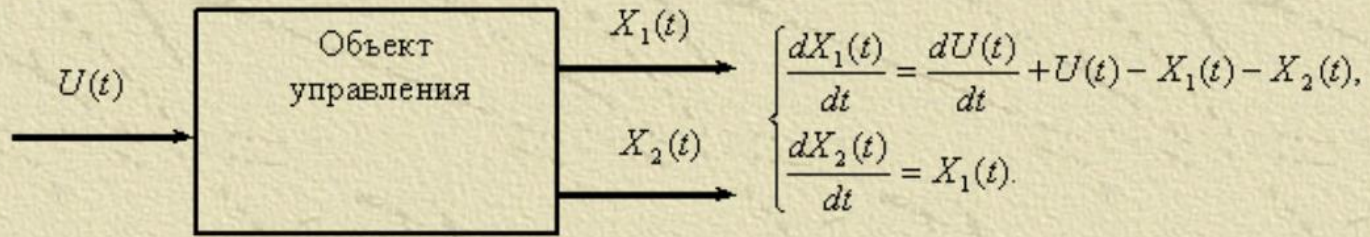
7. Определите передаточную функцию динамического звена по его принципиальной электрической схеме



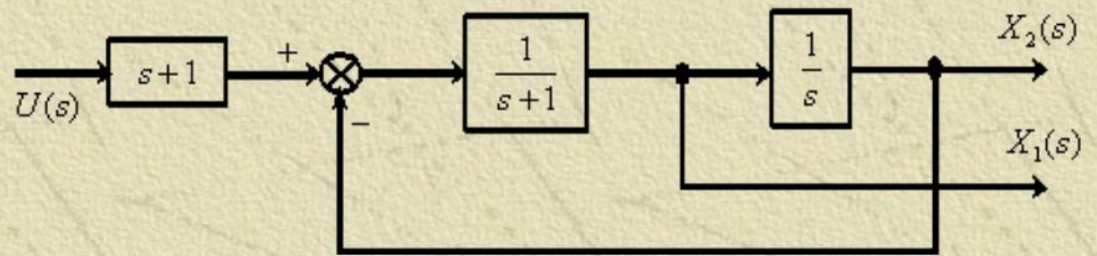
Ответ:

$$W(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{Ls}{Ls + R}$$

8. По математической модели объекта управления в форме системы дифференциальных уравнений определить структурную схему объекта.



Ответ:



Требования ТПУ

- <http://standard.tpu.ru/standart.html>
- <http://portal.tpu.ru:7777/ido-tpu/students/documents/trebovania>

Спасибо за внимание!