

Методические указания к выполнению лабораторной работы №3 на тему:

**Исследование типовых звеньев линейных систем.
Построение и изучение переходных характеристик**

1. Цели и задачи работы

Методическая цель работы: изучение типовых звеньев линейных систем автоматического управления (САУ), приобретение и закрепление навыков моделирования элементов систем в программах Vissim и Маткад, постановки и решения элементарных исследовательских задач и грамотного, эстетичного оформления отчетов.

Техническая цель работы: построение моделей типовых звеньев линейных САУ и исследование временных характеристик этих моделей

В результате выполнения работы следует сделать выводы о том, как влияют параметры типовых звеньев на их переходные характеристики. Польза от исследования переходных характеристик типовых звеньев состоит в следующем. Если экспериментально снять переходную функцию (т.н. разгонную характеристику) некоторого объекта, для которого не существует еще математической модели, то по этой функции можно определить тип и параметры звена, приближенно соответствующего объекту, т.е. построить его модель. Этот процесс называется идентификацией объекта. В сложных случаях для моделирования потребуется использовать несколько звеньев. Имея модель объекта управления можно спроектировать, оптимизировать и реализовать САУ для управления им.

Задачи работы:

Ознакомиться:

- с понятием «переходная функция» линейного звена;
- с блоком **transferFunctions** (Передаточная функция) программы Vissim;

Выполнить:

- построить модели виртуальных лабораторных стендов для снятия переходных характеристик интегратора, апериодического и колебательного звеньев, звена запаздывания;
- снять переходные характеристики звеньев;
- исследовать влияние параметров звеньев на вид их переходных характеристик. Установить, используя, например, программу Маткад, можно ли идентифицировать линейные звенья Vissim'a как типовые звенья ТАУ;
- идентифицировать несколько объектов, состав которых неизвестен.

Приобрести навыки:

- постановки эксперимента по исследованию влияния параметров звеньев на их характеристики;
- определения по заданной переходной характеристике типа звена и его параметров.
- защиты лабораторной работы, в том числе:
 - внятной постановки цели и задач работы;
 - обоснования методов решения поставленных задач и представления полученных результатов;
 - проведения анализа и обоснования выводов;
 - ответов на вопросы преподавателя.

2. Краткие сведения о типовых звеньях

2.1. Передаточная функция. Блок transferFunction программы Vissim

2.2. Переходная функция

2.3. Об идентификации виртуальных линейных блоков программы Vissim

В ТАУ при моделировании линейных систем применяют так называемые типовые звенья, которые приближенно соответствуют элементам реальных систем и точно и просто описываются математически.

Типовое звено это структурно-математическая модель динамического элемента САУ (системы автоматического регулирования) или САУ в целом, обладающая определенным

ограниченным набором физических свойств, например способностью к накоплению воздействия или к усилению воздействия и инерционностью.

Типовые звенья позволяют провести структурное моделирование системы управления путем замены функциональных элементов системы их моделями при сохранении связей между элементами. Свойства структурной модели системы исследуются математическими методами, а результаты исследований проецируются на исходную САУ, что позволяет судить о ее физических свойствах.

Типовые звенья по мере увеличения совокупности свойств, которыми они обладают, и порядка дифференциального уравнения, которым они описываются, разделяют на

- простейшие (пропорциональное, интегрирующее и дифференцирующее);
- звенья первого порядка (апериодическое, форсирующее, инерционно-дифференцирующее и др.);
- звенья второго порядка (колебательное и апериодическое второго порядка);
- звено третьего порядка (Вышнеградского. Это простейшее звено, способное потерять устойчивость);
- звено запаздывания.

Перечисленные линейные звенья содержат один вход и один выход. Существует еще одно линейное звено, которое может иметь несколько, больше одного, входов и один выход: сумматор. Сумматор - необходимое звено для построения модели достаточно сложной системы, состоящей из нескольких звеньев.

Типовых звеньев всего около полутора десятков, но из них, как из кубиков (или, если угодно, как любое сложное вещество из отдельных химических элементов), можно построить модель линейной системы управления любой сложности.

Минимальный набор звеньев, который позволяет построить модель линейной системы любой сложности, в том числе и самих типовых звеньев, состоит всего из трех звеньев: пропорционального, интегратора и сумматора. Однако модель, построенную из этих трех звеньев, бывает труднее анализировать, чаще удобнее применять кроме них еще несколько типов звеньев.

Примечание. В более общем классе систем – нелинейных выделяют еще и нелинейные звенья, как безинерционные, так и инерционные.

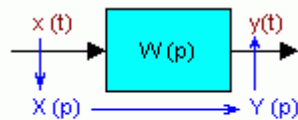
2.1. Передаточная функция. Блок transferFunction программы Vissim

Типовые звенья линейных систем можно определять различными эквивалентными способами, в частности с помощью, так называемой передаточной функции, имеющей, как правило, дробно-рациональный вид, т.е. представляющей собой отношение двух полиномов:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (2.1)$$

где b_i и a_j – коэффициенты полиномов. Это т.н. параметры передаточной функции или звена.

Передаточная функция связывает изображение $Y(p)$ выходного сигнала $y(t)$ звена с изображением $X(p)$ его входного сигнала $x(t)$:



$$Y(p) = W(p) X(p) \quad (2.2)$$

т.е. позволяет по любому известному входному сигналу $x(t)$ найти выходной $y(t)$. Это значит что с точки зрения ТАУ передаточная функция полностью характеризует систему управления или ее звено. Это же самое можно сказать и в отношении совокупности коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции.

Примеры передаточных функций некоторых важных типовых звеньев:

- Пропорциональное звено

Пропорциональное звено это звено, выходной сигнал которого пропорционален входному:

$$y(t) = k x(t) \quad (2.3)$$

Передаточная функция пропорционального звена равна его коэффициенту усиления:

$$W(p) = k \quad (2.4)$$

здесь k – коэффициент усиления. Он может быть размерным.

- Интегратор:

Интегратор это звено, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от входного:

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_0^t x(t) \quad (2.5)$$

Передаточная функция интегратора равна:

$$W(p) = \frac{1}{pT} = \frac{k_1}{p} \quad (2.6)$$

здесь T [сек] – постоянная времени интегратора, $k_1 = 1/T$ [1/сек] - коэффициент усиления интегратора.

Как видно, эти звенья и пропорциональное, и интегратор полностью определяются заданием только одного параметра.

- Аperiodическое (инерционное) звено:

Аperiodическое звено это звено, выходной сигнал $y(t)$ которого связан с входным $x(t)$ дифференциальным уравнением:

$$T \frac{d}{dt} y + y = k x \quad (2.7)$$

Передаточная функция аperiodического звена равна:

$$W(p) = \frac{k}{pT + 1}$$

здесь два параметра: k – коэффициент усиления (размерный или безразмерный) и T – постоянная времени, сек.

- Колебательное звено:

Колебательное звено это звено, выходной сигнал $y(t)$ которого связан со входным сигналом $x(t)$ дифференциальным уравнением:

$$T^2 \frac{d^2}{dt^2} y + 2\delta T \frac{d}{dt} y + y = k x \quad (2.9)$$

Его передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\delta T p + 1} \quad (2.10)$$

здесь три параметра - k – коэффициент усиления, T – постоянная времени и декремент затухания δ (безразмерный, может меняться от 0 до бесконечности).

Блок transferFunction

В программе Vissim линейные апериодическое, колебательное и более сложные типовые звенья выносятся на рабочее поле с помощью блока **transferFunction** (Blocks – Linear System - transferFunction):

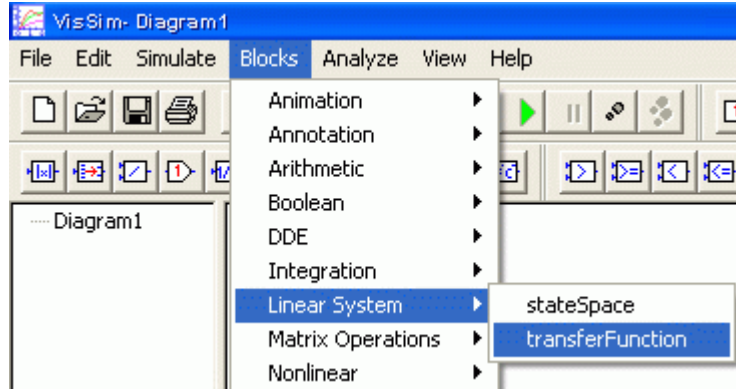


Рис. 2.1. Пункт меню Vissim’а для вынесения на рабочее поле блока transferFunction (Передаточная функция) с последующим заданием параметров звена в окне диалога, вызываемого двойным щелчком (или однократным правой кнопкой) по блоку. Блок до и после задания параметров имеет вид:

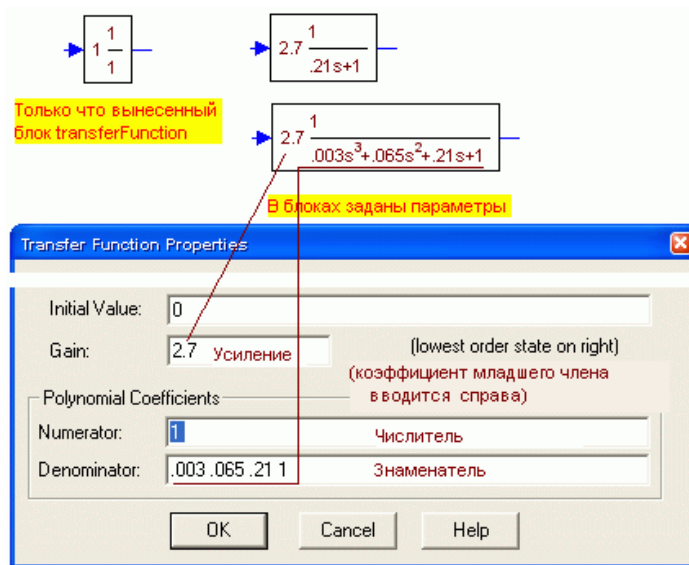


Рис. 2.2. Вид блоков transferFunction на рабочем поле Vissim’а. Внизу показана часть окна диалога для задания параметров линейного звена в блоке transferFunction

Примечание. Как видно на рис. 2.2, блок transferFunction на рабочем поле Vissim’а формально задается (обозначается) передаточной функцией. Однако работает он не в соответствии с формулой (2.2), определяющей с помощью передаточной функции изображение выходного сигнала по изображению входного, а непосредственно решая соответствующее дифференциальное уравнение. Это дифференциальное уравнение определяется теми же самыми параметрами, что и передаточная функция (см., например, формулы (2.9) и (2.10)). Формула передаточной функции в блоке на рабочем поле отображается вместо дифференциального уравнения просто из соображений экономии места на рабочем поле.

- Пропорциональное звено выносится на рабочее поле из пункта меню (Blocks – Arithmetic – gain),
- интегратор выносится из пункта меню (Blocks – Integration - Integrator),
- звено запаздывания выносится из меню (Blocks - Time Delay – timeDelay).

2.2. Переходная функция

Переходная функция $h(t)$ это реакция, отклик линейной системы или звена на ступенчатое единичное воздействие $1_0(t)$. Ступенчатое единичное воздействие $1_0(t)$ это функция времени t , равная нулю, пока t меньше нуля и равная единице при t больше нуля. Пример:

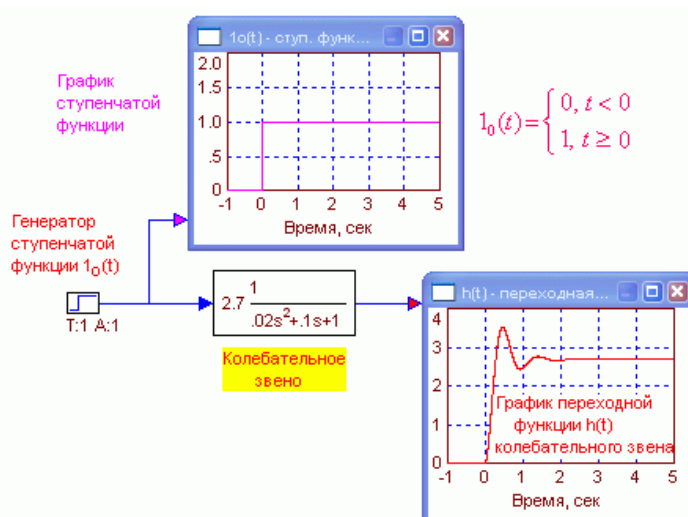


Рис. 2.3. Пример виртуального лабораторного стенда, построенного в программе Vissim, для определения переходных характеристик звеньев, и осциллограмма переходной функции колебательного звена. Его переходная функция колебательно стремится к значению 2.7

Переходная функция это своеобразный «отпечаток пальца» звена – каждое звено имеет свою особенную, отличающуюся от переходных функций других звеньев, переходную функцию, по которой можно определить тип и параметры звена. Почему именно переходную функцию выбрали в качестве характеристики звена? Потому что ступенчатый сигнал легко генерировать: не было сигнала, появился постоянный.

Переходная функция модели САР позволяет характеризовать ее качество (быстродействие и точность) в переходном режиме работы. Кроме того, зная переходную функцию линейной системы можно определить реакцию системы на произвольное воздействие.

Важное для практики приложение переходной функции – идентификация объектов и систем: определение по экспериментально снятой переходной функции вида типового звена, которым можно промоделировать отдельные элементы и системы в целом, а также возможность определения параметров моделирующих звеньев.

Примеры переходных функций некоторых основных типовых звеньев:

- Пропорциональное звено

Его переходная функция равна

$$h(t) = k \cdot 1_0(t) \quad (2.11)$$

здесь k – коэффициент усиления звена. Коэффициенты усиления типовых звеньев могут быть размерными и безразмерными.

Примечание. Часто в литературе в формулах переходных функций звеньев (2.11 и далее) ступенчатая функция в правой части не указывается, но подразумевается, что $h(t)$ равна нулю при $t \leq 0$. Это условие физической реализуемости звена, которое означает, что отклик звена появляется вследствие и, поэтому, после воздействия, а не до него. Условие физической реализуемости отражает причинно-следственную связь между входным и выходным сигналами.

Как видно из определений (2.3) и (2.11), пропорциональное звено это безинерционное звено, усиливающее сигнал в k раз в любой момент времени, как бы быстро он не изменялся. Пропорциональным звеном моделируются системы управления и их элементы в статике, в таком режиме, когда воздействия, поступающие на систему управления, не изменяются во времени уже в течение достаточно длительного времени.

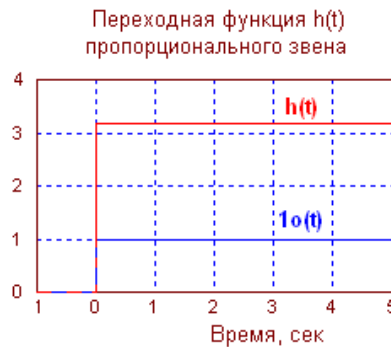


Рис. 2.4 (анимация, 2 кадра). Переходная функция пропорционального звена и порядок определения его коэффициента усиления по заданной переходной функции

- Интегратор:

Его переходная функция в соответствии с определением (2.5) равна

$$h(t) = \frac{1}{T} t \cdot 1_0(t) \quad (2.12)$$

здесь T – постоянная времени интегратора. $k_1 = 1/T$ – коэффициент усиления интегратора.

Интегратор способен накапливать поступающий на него сигнал с течением времени. В частности, (2.12) показывает, что при подаче ступенчатого воздействия на интегратор, его выходной сигнал изменяется линейно с течением времени, т.е. накопление действительно происходит.

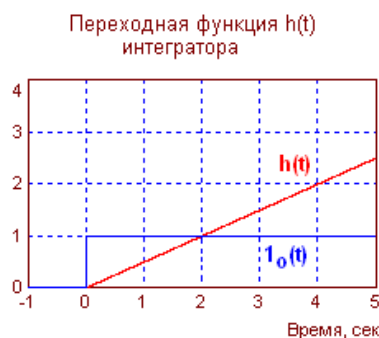


Рис. 2.5 (анимация, 3 кадра). Переходная функция интегратора, порядок определения его постоянной времени T и проверка того, действительно ли звено является интегратором. Переходная функция линейно растет с увеличением времени.

Постоянная времени интегратора определяется временем пересечения переходной функцией уровня входной ступеньки. Звено действительно является интегратором, поскольку увеличение, например, вдвое величины входной ступеньки приводит к такому же удвоению крутизны переходной характеристики и сохранению значения постоянной времени

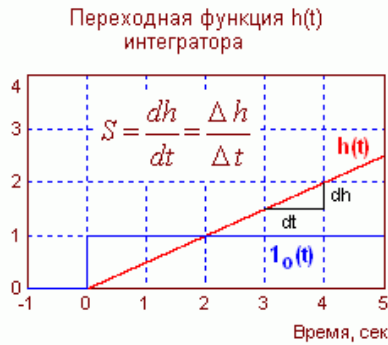


Рис.2.6. Определение крутизны переходной характеристики интегратора

Примеры реальных устройств, которые могут быть промоделированы интегратором: электрические и гидравлические емкости, двигатели и вообще, устройства, имеющие вращающиеся валы.

- Аperiodическое (инерционное) звено:

Его переходная функция равна

$$\begin{aligned}
 h(t) &= k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \cdot 1_0(t) = \\
 &= k \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right] \cdot 1_0(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

здесь – коэффициент усиления и T – постоянная времени аperiodического звена.

Аperiodическое звено – простейшее из тех звеньев, которые обладают инерцией. Действительно, (2.13) показывает, что это звено не сразу, вначале быстро, а затем все более постепенно реагирует на ступенчатое воздействие. Это происходит потому, что в физическом оригинале аperiodического звена имеется один накапливающий элемент (а также один или несколько потребляющих энергию элементов), энергия, запасенная в котором, не может изменяться скачком во времени – для этого потребовалась бы бесконечная мощность.

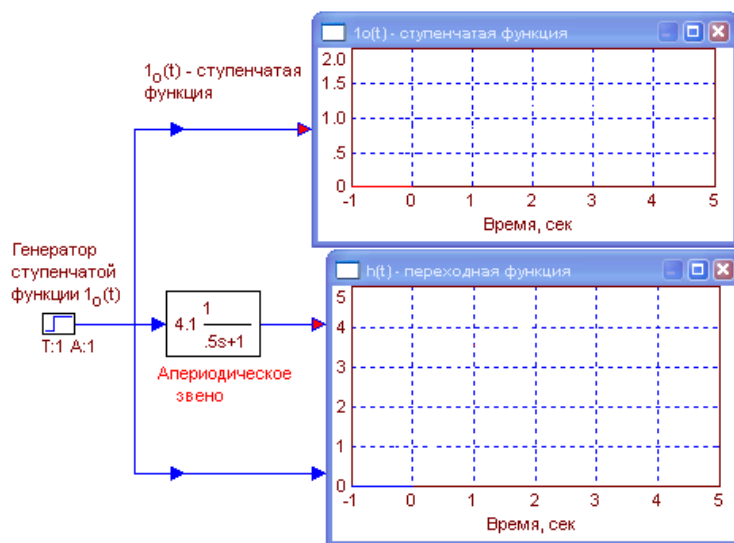


Рис. 2.7 (анимация, 9 кадров). Переходная функция аperiodического звена. Звено не сразу, а постепенно реагирует на скачкообразное изменение входного сигнала

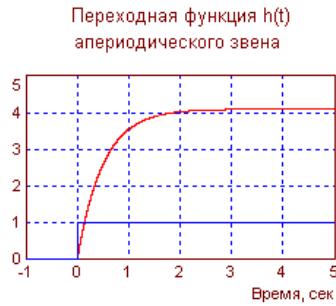


Рис. 2.8 (анимация, 3 кадра). Переходная функция аperiodического звена. Порядок определения параметров аperiodического звена: коэффициента усиления k и постоянной времени T . Постоянная времени T определяется временем пересечения касательной, проведенной к переходной функции в нулевой момент времени, уровня коэффициента усиления звена. Этот уровень равен асимптотическому значению переходной функции. За время $3T$ переходная функция достигает уровня в 95% от ее конечного значения, поэтому считается, что за время $3T$ переходный процесс в аperiodическом звене практически заканчивается

Т.о. длительность переходного процесса в аperiodическом звене является мерой его инерционности.

Простой пример аperiodического звена это интегрирующая RC-цепь, в предположении, что внутреннее сопротивление источника подаваемого на цепь напряжения пренебрежимо мало, а сопротивление нагрузки цепи очень велико.

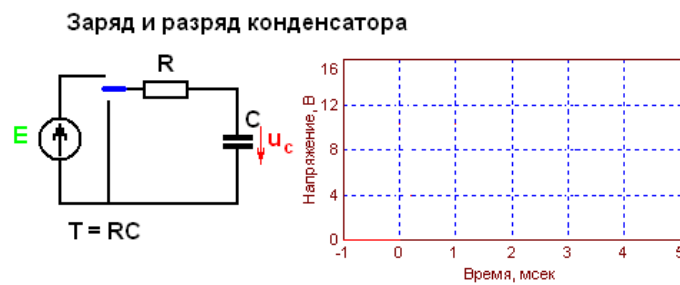


Рис. 2.9 (анимация, 10 кадров). Подключение цепи к источнику постоянного напряжения подает на нее ступеньку напряжения, величиной 12 В. Напряжение на конденсаторе растет по тому же закону, что и выходной сигнал аperiodического звена, на которое подается ступенчатый сигнал

Модель аperiodического звена может быть задана передаточной функцией (блоком transferFunction), а может быть составлена из интегратора, сумматора и усилителя. В частности

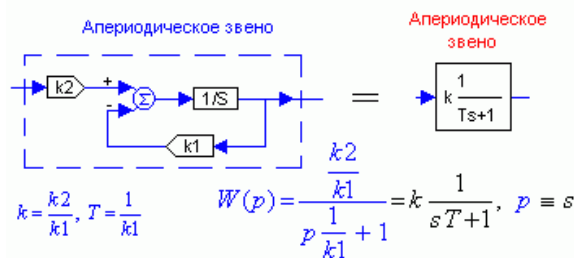


Рис. 2.10. Эквивалентная схема аperiodического звена, составленная из интегратора, охваченного жесткой отрицательной обратной связью с коэффициентом усиления k_1 , сумматора и входного усилителя с коэффициентом усиления k_2 . Изменяя значения коэффициентов усиления k_1 и k_2 можно получить любые требуемые значения параметров k и T аperiodического звена

Схема, составленная из интегратора, сумматора и усилителей занимает на рабочем поле Vissim'a больше места, но работает (просчитывается Vissim'ом) быстрее (см. [6] примечание редактора и ответ автора).

- Колебательное звено:

Его переходная функция равна

$$h(t) = k \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \delta^2}} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot \sin(\omega_3 t + \varphi) \right], \quad \delta < 1, \quad (2.14)$$

$$\omega_3 = \frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{T}; \quad \varphi = \arccos(\delta);$$

здесь три параметра - k – коэффициент усиления, T – постоянная времени и δ - декремент затухания.

Колебательное звено наряду со свойствами, присущими уже перечисленным звеньям (способности к усилению, накоплению и инерционности), обладает и еще одним свойством, которого нет у более простых звеньев, колебательностью. Это его способность при определенном сочетании параметров T и δ переходить к новому стационарному значению, определяемому воздействием, или возвращаться в исходное состояние после снятия воздействия, колебательно. Такое поведение обусловлено наличием в колебательном звене двух накапливающих элементов, способных обмениваться друг с другом энергией разного рода (потенциальной и кинетической, электрической и магнитной и т.п.), и элемента(ов), потребляющего, рассеивающего энергию.

Если затухание достаточно велико или накапливающие элементы содержат энергию одного вида, например это два электрических конденсатора, то колебаний в звене не происходит, и его называют еще и аperiodическим.

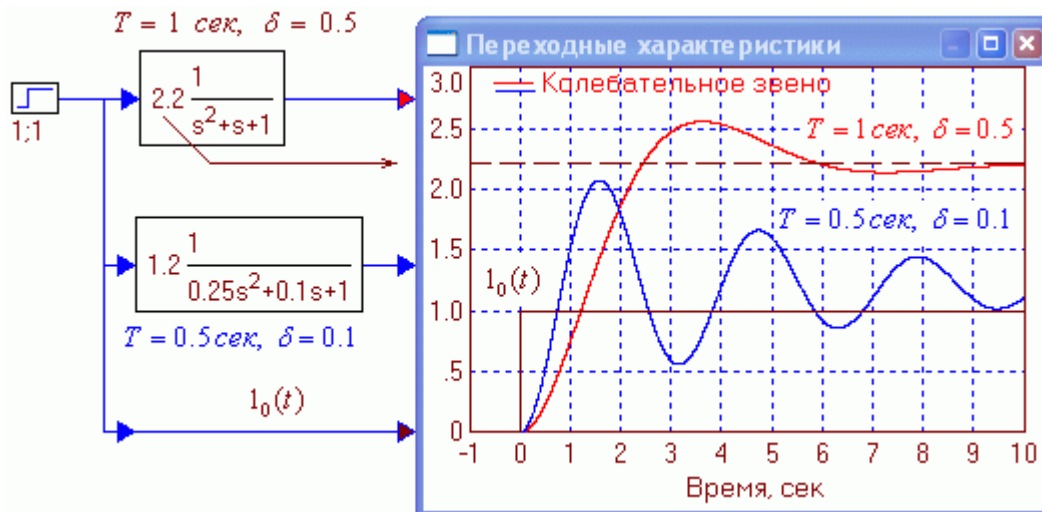


Рис. 2.11. Переходные функции колебательных звеньев. С течением времени значения функций стремятся к величине коэффициентов усиления звеньев

При $\delta > 1$ трение в системе, рассеивание энергии, относительно велико и колебательность переходной функции исчезает, функция становится монотонной.

Постоянная времени T колебательного звена не равна периоду колебаний Tкол, она

$$T_{кол} = \frac{2\pi T}{\sqrt{1 - \delta^2}}$$

связана с периодом, но существенно меньше его: при $\delta < 0.5$ период затухающих колебаний примерно равен $T_{кол} \approx 2\pi T$.

По колебательной ($\delta < 0.5$) переходной характеристике колебательного звена можно приближенно оценить его параметры:

- уровень успокоения колебаний равен коэффициенту усиления k звена;
- постоянная времени приближенно равна $T \approx T_{\text{кол}} / 2\pi$
- декремент затухания приближенно равен $\delta \approx 3T / T_{\text{пер}}$,

где $T_{\text{пер}}$ - длительность переходного процесса, определяемая промежутком времени, за которое переходная функция попадает в пятипроцентный коридор.

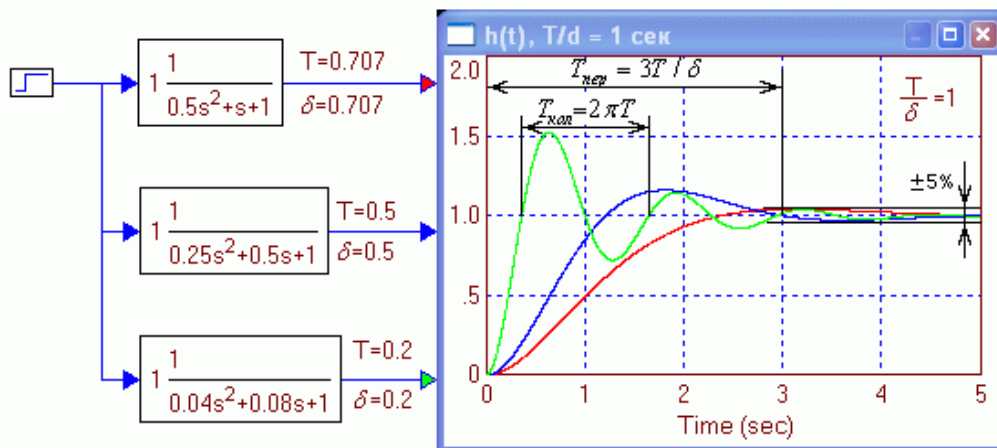


Рис. 2.12. Переходная функция колебательного звена позволяет оценить его параметры. Продолжительность переходного процесса $T_{\text{пер}}$ в колебательном звене при $\delta < 0.5$ равно отношению утроенной постоянной времени T к декременту затухания δ

Модель колебательного звена может быть задана передаточной функцией (блоком transferFunction), а может быть составлена из интеграторов, сумматоров и усилителей. Например

$$T^2 \frac{d^2}{dt^2} y + 2 \delta T \frac{d}{dt} y + y = k x \Leftrightarrow W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2 \delta T p + 1}$$

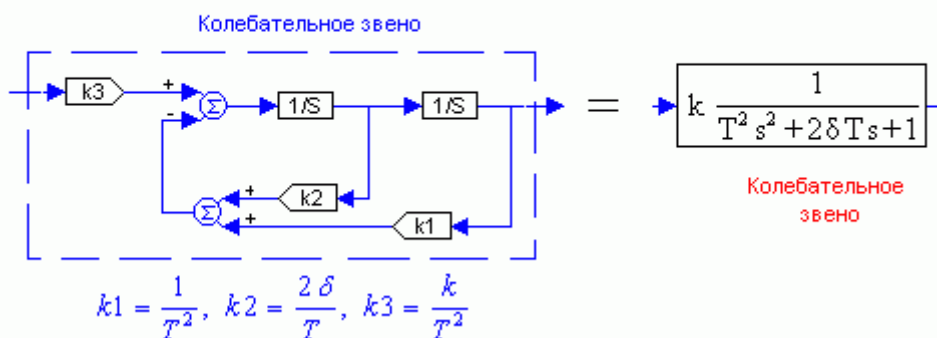


Рис. 2.13. Эквивалентная схема колебательного звена, составленная из двух последовательно включенных интеграторов, охваченных отрицательными обратными связями, сумматоров и усилителей. Изменяя значения коэффициентов усиления k_1 , k_2 и k_3 можно получить любые требуемые значения параметров колебательного звена

- Звено запаздывания:

Его переходная функция равна
$$h(t) = \mathbf{1}_0(t - \tau_s) \tag{2.15}$$

где τ_3 – единственный параметр звена запаздывания: это время, на которое задерживается сигнал, проходя зveno запаздывания.

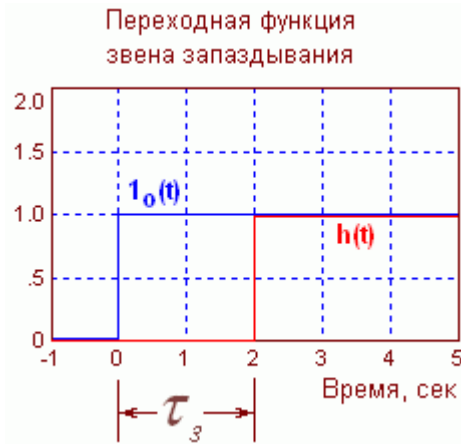


Рис. 2.14. Звенo запаздывания не изменяет форму сигнала, но задерживает его по времени на величину τ_3

Этим звеном моделируются системы и устройства, сигналы в которых задерживаются на ощутимую величину по сравнению с временными параметрами, характеризующими инерционность этих систем. Это, как правило, протяженные в пространстве устройства: линии связи, трубопроводы, транспортеры и т.п.

Звенo запаздывания выносится на рабочее поле Vissim'a из меню (Blocks - Time Delay – timeDelay).

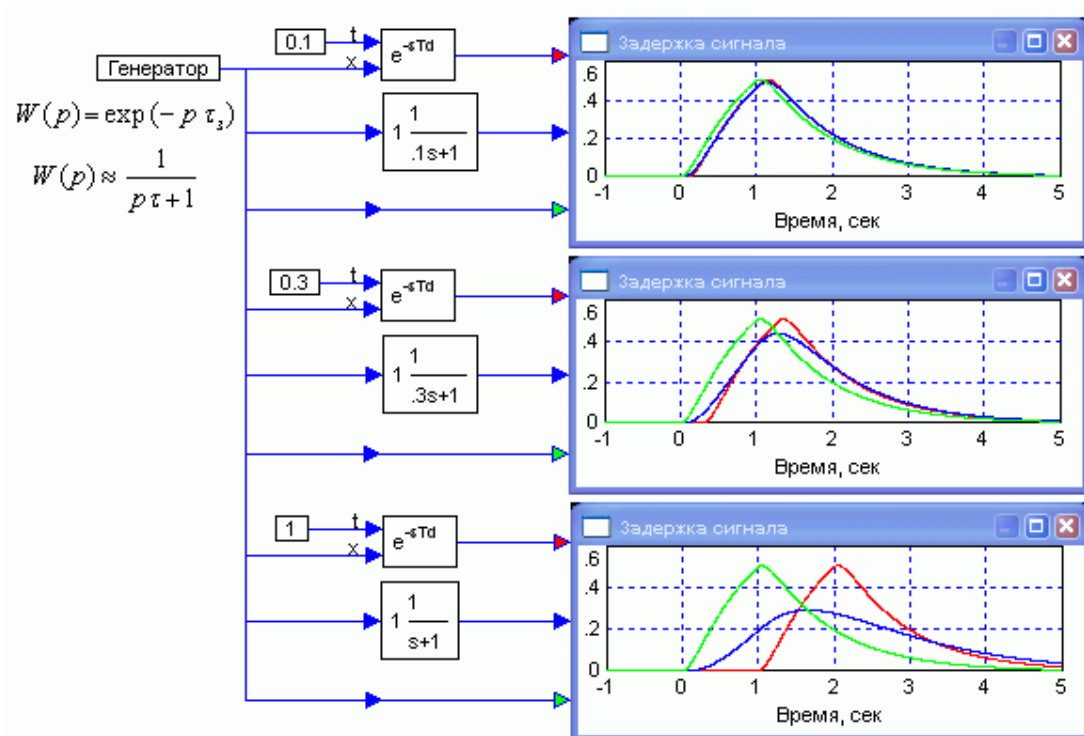


Рис.2.15. Звенo запаздывания может быть приближенно заменено аperiodическим звеном при относительно небольших задержках сравнительно медленно изменяющихся сигналов (верхняя осциллограмма). Постоянная времени аппроксимирующего аperiodического звена равна времени задержки сигнала в звене запаздывания

2.3. Об идентификации виртуальных линейных блоков программы Vissim

Линейные виртуальные блоки Vissim'a существуют объективно. Действительно, они воспринимаются зрением, на них можно подавать внешние виртуальные сигналы и виртуальными индикаторами измерять их реакции (выходные сигналы). Здесь не будет лишним вопрос об идентификации линейных блоков Vissim'a: можно ли отождествлять их с типовыми звеньями и если да, то с какой точностью?

Для ответа на этот вопрос нужно проверить, совпадают ли характеристики, в частности переходные функции блоков Vissim'a, с аналогичными характеристиками типовых звеньев ТАУ. Поскольку типовые звенья, как видно из уравнений, их описывающих и приведенных выше, являются линейными, то следует проверить и линейность блоков.

Свойство линейности элемента, системы, объекта, звена состоит в том, что их реакция на сумму воздействий равна сумме их реакций на каждое из воздействий в отдельности. Кроме того, масштабному по величине (амплитуде) изменению воздействия в линейных системах соответствует пропорциональное изменение реакции, отклика.

Т.о. для идентификации блоков Vissim'a следует установить, что они линейны и их характеристики, в частности переходные функции, количественно соответствуют аналогичным типовым звеньям ТАУ.

3. Задания к работе. Основные задания

[3.1. Исследование интегратора](#)

[3.2. Исследование апериодического звена](#)

[3.3. Исследование колебательного звена](#)

[3.4. Исследование звена запаздывания](#)

[3.5. Исследование сумматора](#)

Примечание. По ходу выполнения работы следует кратко протоколировать свои действия. Например, записать:

Выполнение

3.1.1. Построен виртуальный стенд для исследования интегратора. И приложить снимок модели.

3.1. Исследование интегратора

3.1.1. **Построить** в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели интегратора.

Вынести на рабочее поле Vissim'a генератор **step** ступенчатого сигнала (Blocks – Signal Producer - step), интегратор (Blocks – Integration - Integrator), осциллограф (Blocks – Signal Consumer – Plot), сделать надписи (Blocks – Annotation - label)



Рис. 3.1. Примерный вид виртуального лабораторного стенда по исследованию интегратора, собранный на рабочем поле программы Vissim. Является ли зеленая линия на осциллограмме переходной функцией интегратора? А красная?

Пояснения по настройке виртуального лабораторного стенда (заданию параметров моделирования).

- Чтобы вид модели был аккуратнее, следует выбрать в меню View (Вид) пункт Presentation Mode (Режим представления);

- Для отображения под блоками, в частности под блоком генератора ступенчатой функции (step), их параметров следует выбрать в меню View пункт Block Labels (Подписи Блоков).

- В нижней части рис. 3.1 показана панель Vissim'a, на которой отображаются основные параметры моделирования:

- количество блоков (Blks) – 11;

- модельное время Rng выбрано (Simulate – Simulation Properties – вкладка Range: Start и End) изменяющимся от -0.5 сек до 2 сек. Это сделано для повышения наглядности осциллограммы, чтобы показать часть оси времени левее нуля и поведение там исследуемых функций;

- шаг моделирования Step (там же Step Size) выбран равным 0.001 сек;

- T – текущее время, параметр, полезный при моделировании в реальном времени (Simulate – Simulation Properties - вкладка Range: отметить при необходимости Run In Real Time);

- RK2 – интегрирование проводится по методу Рунге-Кутты 2 порядка.

Верхний генератор ступенчатой функции на рис. 3.1, как видно из подписи под блоком, создает ступеньку с амплитудой, равной 1, задержанную на 0.5 сек относительно времени (-0.5 сек) начала моделирования с тем, чтобы на осциллографе она появлялась в нулевой момент времени (синяя линия). Выполняя лабораторную работу, стенд можно строить прямо по рис 3.1.

Сохранить лабораторный стенд, дав файлу содержательное название, в личной папке.

3.1.2. **Проверить**, действительно ли интегратор Vissim'a (Blocks – Integration - Integrator) является таковым. Для этого вычислить по формуле (2.12) значения переходной функции интегратора в различные моменты времени, отделяя их некоторым шагом, и проставить точки на снимке осциллограммы в программе Paint. Кроме того, задать величину ступеньки, отличающуюся от единицы и убедиться, что крутизна выходного сигнала интегратора изменилась пропорционально изменению величины ступеньки. Если точки, вычисленные по формуле переходной функции ложатся на экспериментальную линию, то исследуемое устройство – интегратор.

Дополнительное задание. *Придумайте, как проверить работоспособность интегратора, используя другие сигналы, например синусоидальный (Blocks – Signal Producer - sinusoid) или линейно растущий (Blocks – Signal Producer - ramp) и проведите эксперименты.*

А как проверить линейность интегратора, т.е. то, что реакция на сумму воздействий блока интегратора равна сумме его реакций на каждое из них?

Сделать снимок экрана, обрезать и сохранить его с содержательным названием в формате gif в подпапке Lab_2 лабораторной работы № 2 личной папки по ТАУ.

3.1.3. **Убедиться**, что постоянную времени интегратора можно изменять, включая последовательно с ним (Blocks – Arithmetic - gain) усилитель (см. формулу 2.6) и изменяя его коэффициент усиления. Для изменения усиления блока следует дважды по нему щелкнуть и в единственном поле диалогового окна задать значение коэффициента усиления.

Vissim позволяет исследовать одновременно несколько интеграторов с разными постоянными времени:

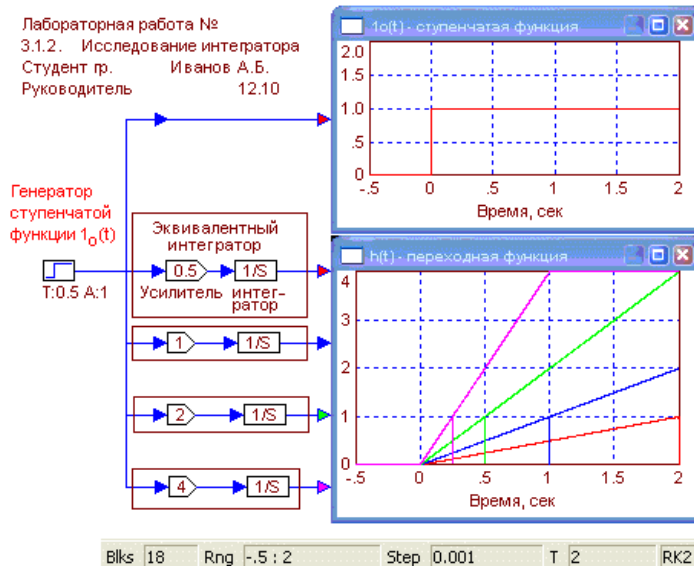


Рис. 3.2. Примерный вид виртуального лабораторного стенда для проверки возможности изменения постоянной времени интегратора посредством изменения коэффициента усиления усилителя, включенного последовательно с интегратором. Постоянные времени следует определять по графикам с точностью, не хуже чем в две значащих цифры

Интегратор Vissim'a не позволяет изменять его постоянную времени. Для этого применен усилитель (Blocks – Arithmetic - gain), усиление которого обратно пропорционально постоянной времени (см. формулу 2.6). Как видно из подписи к генератору ступенчатой функции, он создает ступеньку с амплитудой A , равной 1, задержанную на $T=0.5$ сек относительно начала моделирования с тем, чтобы на осциллографе она появлялась в нулевой момент времени. Внизу показана панель Vissim'a, на которой отображаются основные параметры моделирования: количество блоков – 18; модельное время (Simulate – Simulation Properties: Start и End) выбрано изменяющимся от -0.5 сек до 2 сек, шаг моделирования (там же Step Size) выбран равным 0.001 сек.

Примечание. На осциллографах рис.3.1 и 3.2 можно в режиме запоминания отобразить вместе с имеющимися еще несколько графиков для других значений входного сигнала. Для этого следует дважды щелкнуть в центре осциллографа и в появившемся окне диалога на вкладке Options (Параметры) поставить галочку в пункте Over Plot (Поверх предыдущих графиков). Затем, при наличии свободных входов осциллографа, можно перенести выход интегратора на следующий свободный вход осциллографа, чтобы цвет графика был другим, изменить величину ступеньки, например в два раза, и запустить процесс счета (моделирования).

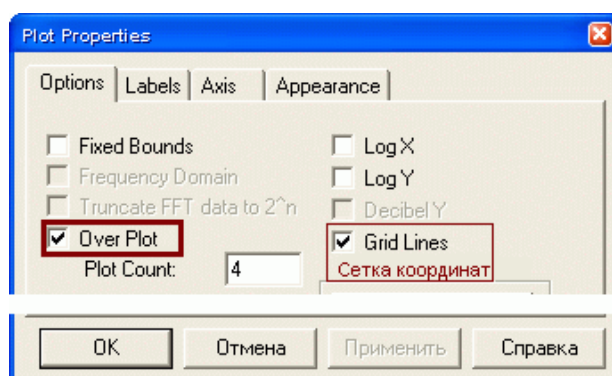


Рис. 3.3. Окно свойств осциллографа открыто на вкладке Options (Параметры). Отметка в поле Over Plot позволяет вывести на осциллограф несколько графиков (в данном случае до 4-х Plot Count)

Установить, как связаны коэффициент усиления и постоянная времени эквивалентного интегратора.

Можно ли утверждать, что передаточная функция последовательно включенных усилителя и интегратора равна произведению их передаточных функций?

Сохранить лабораторный стенд рис.3.2 с содержательным названием в личной папке. Сделать снимок экрана и сохранить его с содержательным названием в формате gif в подпапке Lab_2 лабораторной работы № 2 личной папки по ТАУ.

3.1.4. Сделать выводы о соответствии и о точности соответствия виртуального интегратора идеальному.

3.2. Исследование аperiodического звена

3.2.1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели аperiodического звена.

Аperiodическое звено создается вынесением на рабочее поле блока **transferFunction** (Blocks – Linear System - transferFunction) и заданием его параметров.

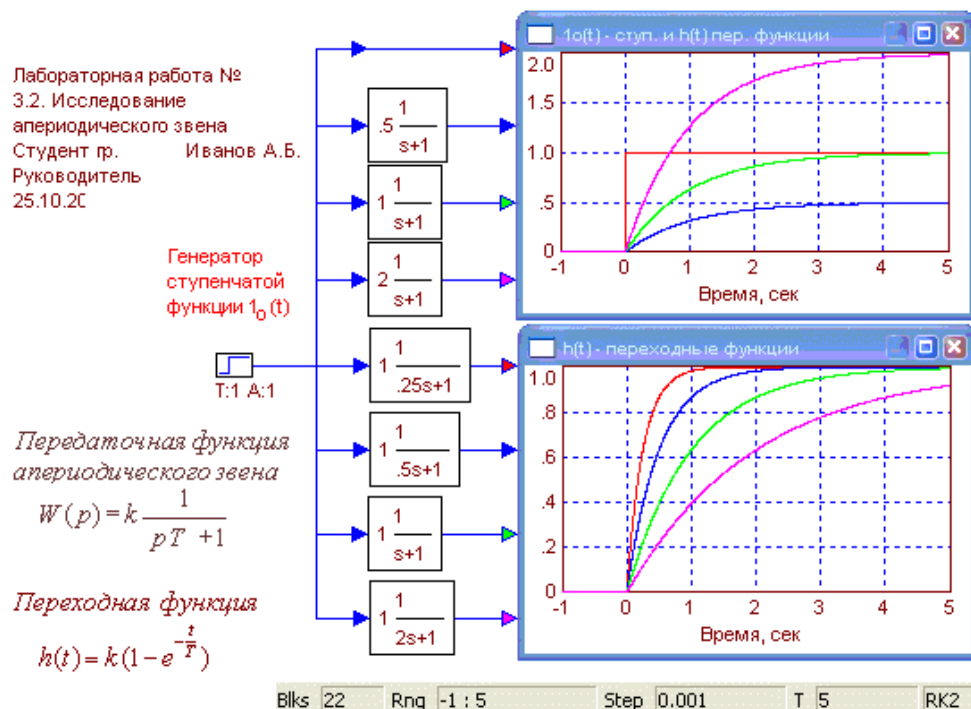


Рис. 3.4. Стенд для исследования аperiodического звена. Одновременно можно исследовать семь экземпляров звена с разными параметрами. В русской литературе аргумент передаточной функции обозначается как **p**, а в англо-американской как **s**

Параметры аperiodического звена задаются в окне диалога, появляющегося при двойным щелчке по блоку transferFunction:

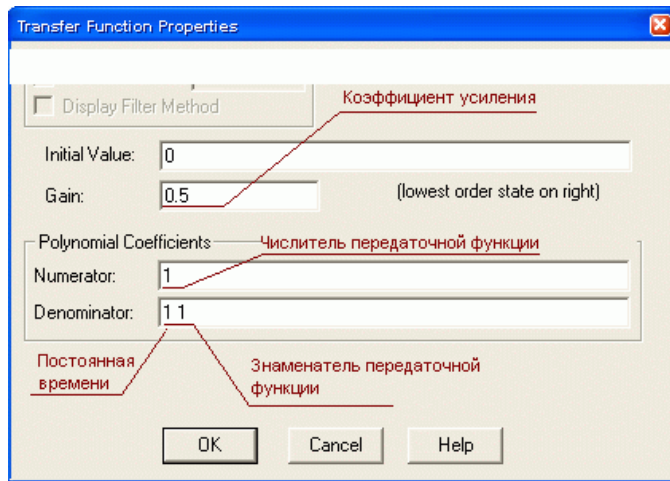


Рис. 3.5. Поля окна диалога для задания параметров аperiodического звена

Сохранить лабораторный стенд в личной папке с содержательным названием.

3.2.2. **Определить** по осциллограммам постоянные времени и коэффициенты усиления звеньев и указать, какая кривая соответствует какому звену. Объяснить почему.

Сделать снимок экрана и сохранить его с содержательным названием в формате gif в подпапке Lab_2 лабораторной работы № 2 личной папки.

3.2.3. **Вычислить** значения переходной функции для звена с параметрами $k = 2.0$, $T = 1.0$ сек или с другими параметрами, по выбору преподавателя, по формуле (2.13) и проставить в Paint'е точки на соответствующей осциллограмме. Вычисления можно провести в Маткаде, см. снимок документа с вычислениями.

Как проверить то, что реакция на сумму воздействий блока аperiodического звена равна сумме его реакций на каждое из них, т.е. линейность блока?

3.2.4. **Сделать вывод** о точности модели аperiodического звена, используемой в Vissim'е.

3.3. Исследование колебательного звена

3.3.1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели колебательного звена.

Колебательное звено создается вынесением на рабочее поле блока Передаточная функция - transferFunction (Blocks – Linear System - transferFunction) и заданием его параметров.

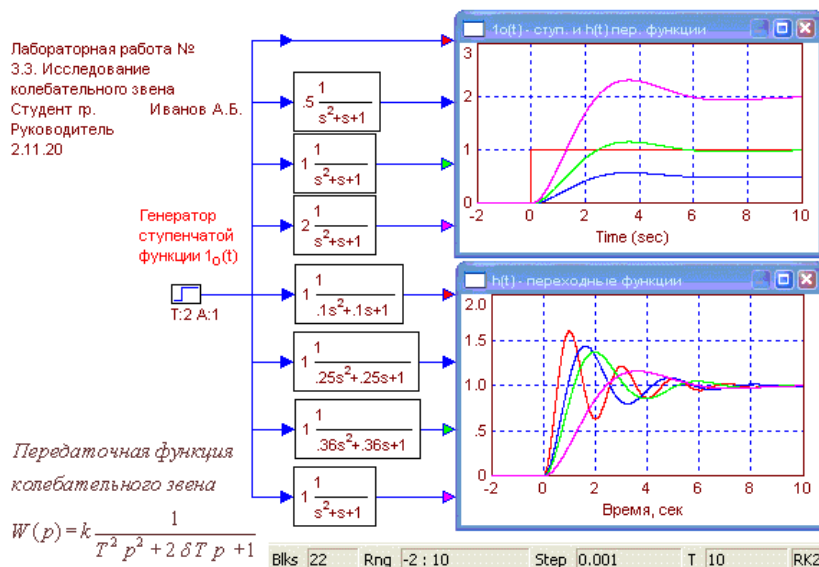


Рис. 3.6. Стенд для исследования колебательного звена

Сохранить лабораторный стенд в личной папке с содержательным названием и расширением vsm.

Параметры колебательного звена задаются так же, как и для аperiodического звена:

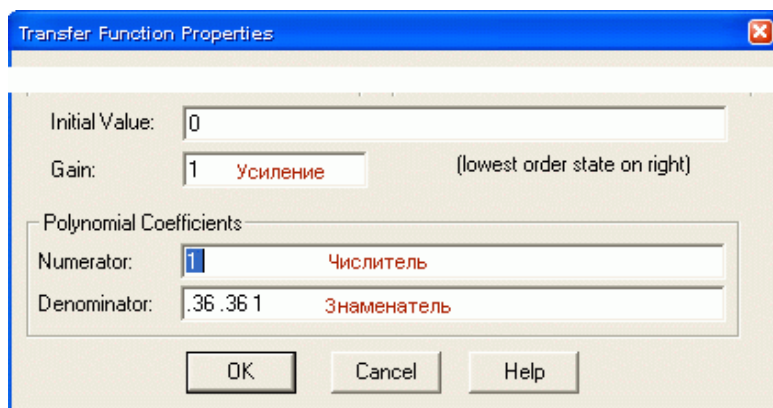


Рис. 3.7. Поля окна диалога для задания параметров колебательного звена

Числа (коэффициенты полиномов) должны быть отделены пробелами, аргумент s не вводится, программа выводит его в формуле сама.

3.3.2. **Определить** по осциллограммам параметры звеньев: постоянные времени, коэффициенты усиления и декременты затухания и указать, какая кривая соответствует какому звену. Объяснить почему.

3.3.3. **Вычислить** значения переходной функции $h(t)$ звена с параметрами $k = 1.0$, $T = 0.6$ сек и $\delta = 0.3$ или с другими параметрами, по выбору преподавателя, по формуле (2.14) и проставить в Paint'е точки на соответствующей осциллограмме. Вычисления можно провести в Маткаде, см. снимок документа с вычислениями. Сделать вывод о точности модели колебательного звена, используемой в Vissim'е.

Как проверить то, что реакция на сумму воздействий блока колебательного звена равна сумме его реакций на каждое из них?

3.3.4. Сохранить снимок экрана в личной папке. Сделать выводы

3.4. Исследование звена запаздывания

3.4.1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели звена запаздывания.

Звено запаздывания выносится на рабочее поле из пункта меню (Blocks – Time Delay - timeDelay), блок константы – из (Blocks – Signal Producer - const). Величина задержки сигнала в звене запаздывания определяется величиной сигнала, подаваемого на его верхний вход t . Задерживаемый сигнал подается на нижний вход x звена.

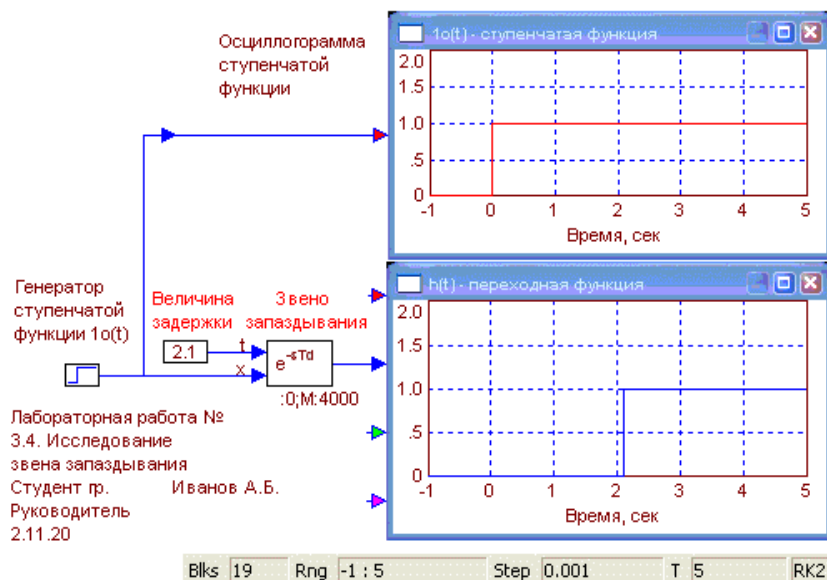


Рис. 3.8. Стенд для исследования звена запаздывания

Сохранить лабораторный стенд в личной папке с содержательным названием и расширением vsm.

3.4.2. Меняя величину задержки, задаваемой блоком константы двойным щелчком по нему и изменением значения, **убедиться**, что величина задержки, отображаемая осциллографом, равна величине сигнала, подаваемого на вход t звена запаздывания. Построить график величины запаздывания в звене, определяемой непосредственно по осциллографу, от задаваемой величины задержки.

3.4.3. **Сохранить** снимок экрана в личной папке. Сделать выводы.

3.5. Исследование сумматора и усилителя

3.5.1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели сумматора.

Сумматор выносится на рабочее поле из меню Blocks – Arithmetic – SummingJunction. Генераторы линейно растущего сигнала (ramp) и синусоидального (sinusoid) выносятся из меню Blocks – Signal Producer.

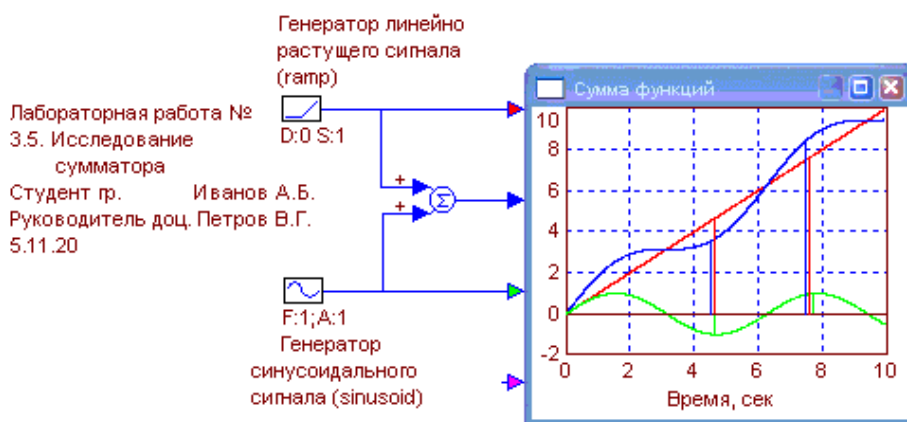


Рис. 3.9. Стенд для проверки работоспособности виртуального сумматора. В любой момент времени его выходной сигнал равен сумме входных сигналов. Сумматор успевает складывать меняющиеся во времени сигналы, следовательно, он обладает малой инерционностью

- 3.5.2. Увеличить частоту генератора синусоиды и скорость роста линейного напряжения. Проверить, что сумматор успевает суммировать и более быстрые сигналы.
- 3.5.3. Проанализировать осциллограммы. Сделать выводы.
- 3.5.4. Предложить методику и самостоятельно исследовать усилитель, в том числе, его быстродействие

Дополнительные задания

3.7. Эквивалентные схемы типовых звеньев

Апериодическое звено

Проверить эквивалентность схем аperiodического звена

3.7.1. **Построить** в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования эквивалентных моделей аperiodического звена:

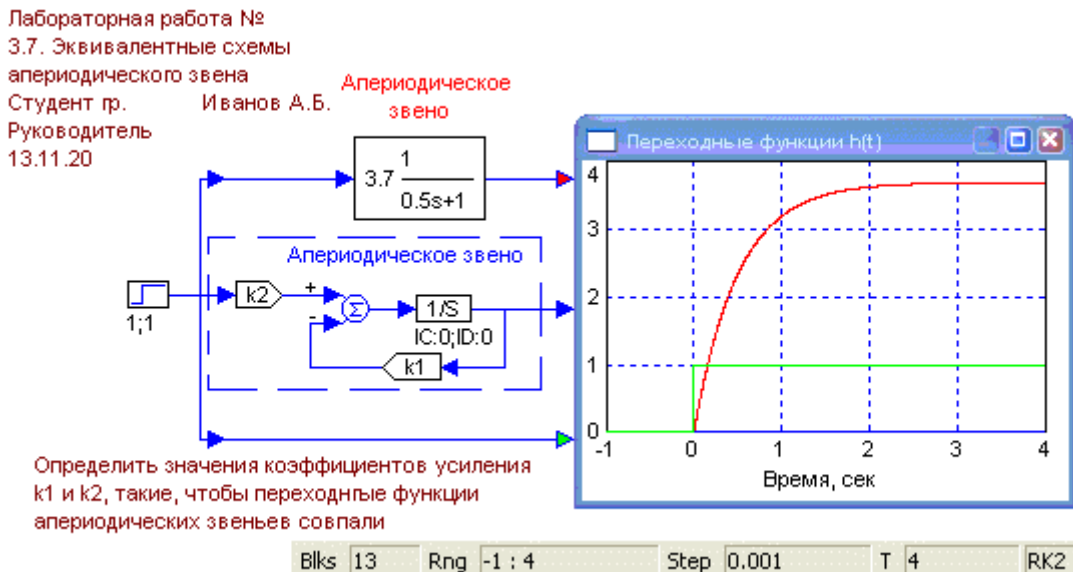


Рис.3.11. Стенд для проверки эквивалентности моделей аperiodического звена, заданной блоком transferFunctions и составленной из элементарных блоков (интегратора, сумматора и усилителей). Совпадение переходных функций будет свидетельствовать об идентичности моделей

3.7.2. Рассчитать значения коэффициентов усиления усилителей (см. рис. 2.10), таких, чтобы переходные функции совпали, и проверить эквивалентность моделей экспериментально. Сделать снимок экрана и выводы.

Примечание. Для удобства сравнения осциллограмм к выходному сигналу одной из моделей можно прибавить малую константу, например 0.05, тогда осциллограммы расположатся параллельно, и одна не будет закрываться другой.

Звено запаздывания

Проверить возможность аппроксимации звена запаздывания одним или несколькими аperiodическими звеньями

3.7.3. **Загрузить и запустить** файл модели:

а. Щелкнуть по ссылке: [загрузить файл Appr_Zv_Zap.vsm](#). Если откроется диаграмма Vissim с моделями звеньев запаздывания, то пропустить следующие пункты **б** и **в**. Сохранить модель с именем Appr_Zv_Zap.vsm в предварительно созданной подпапке Lab_2_Vis_Diagr в подпапке Lab_2 личной папки.

б. Если появится окно диалога с вопросом «Что следует сделать с загружаемым файлом?», то выбрать «Сохранить», указать путь к подпапке Lab_2_Vis_Diagr личной папки и сохранить там файл Appr_Zv_Zap.vsm.

в. Запустить программу Vissim и открыть из нее файл Appr_Zv_Zap.vsm, указав путь к названной папке

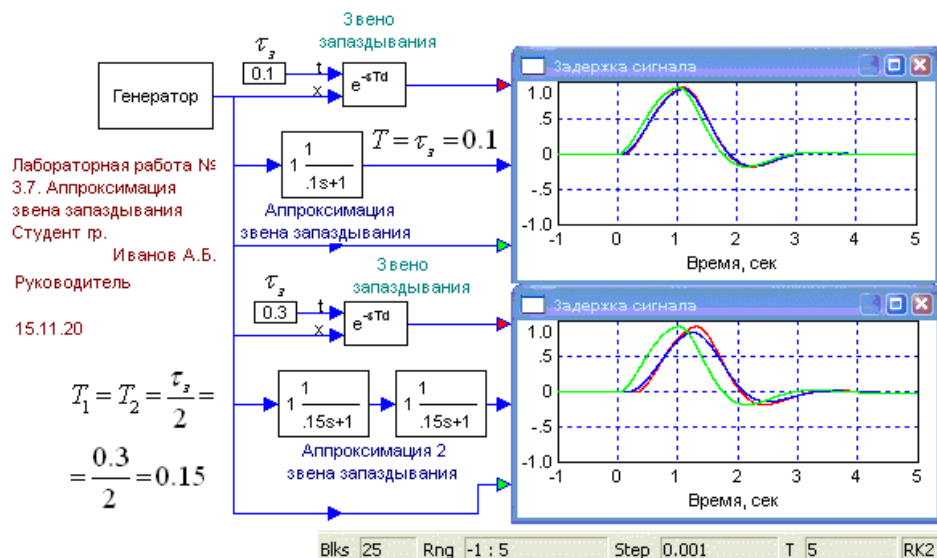


Рис. 3.12. Стенд для определения диапазона задержек, при которых звено запаздывания может быть приближенно заменено одним или несколькими последовательно соединенными аperiodическими звеньями

3.7.4. **Определить** пределы изменения задержки, при которой аperiodические звенья сравнительно мало искажают сигнал и приближенно можно считать, что он задерживается ими. Сделать снимок экрана и выводы.

4. Отчет и защита работы

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- цель и задачи работы, кратко сформулированные своими словами;
- краткую шпаргалку по теории типовых звеньев;
- снимки экранов;
- выводы и рекомендации.

Примечание: отчет предпочтительнее оформлять от руки, чертежным шрифтом, хотя допускается использование компьютера и принтера. Снимки экрана предпочтительнее распечатывать на принтере.

3.1. Исследование интегратора



Вывод: блок Integrator Vissim'a является интегратором

Рис. 4.3. Примерный вид третьей страницы отчета по лабораторной работе

5. Домашнее задание

5.1. Подготовить бланк отчета:

- Титульный лист;
- Цель и задачи работы (кратко, своими словами);
- Краткие теоретические сведения;
- Предусмотреть место для протоколирования хода выполнения работы и выводов.

5.2. Устно, а частично письменно, ответить на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое ступенчатая единичная функция $1_0(t)$ (функция включения, функция Хевисайда)?
2. Что такое переходная функция линейного звена?
3. Что такое передаточная функция линейного звена?
4. Записать выражения для передаточной и переходной функций пропорционального звена и интегратора, назвать их параметры и указать как эти параметры связаны с переходными характеристиками звеньев.
5. Записать выражения для передаточной и переходной функций аperiodического звена, назвать его параметры и указать как они связаны с переходной характеристикой аperiodического звена.

6. Записать выражения для передаточной и переходной функций колебательного звена, назвать его параметры и указать как они связаны с переходной характеристикой колебательного звена.

7. Записать выражения для передаточной и переходной функций звена запаздывания, назвать его параметры и указать как они связаны с переходной характеристикой звена запаздывания.

8. Каково условие физической реализуемости линейного звена?

9. Как выносятся на рабочее пространство Vissim'a пропорциональное звено и интегратор? Как задаются их параметры?

10. Как выносятся на рабочее пространство Vissim'a блок transferFunction (Передаточная функция)? Как задаются их параметры?

11. Какие линейные звенья могут быть промоделированы блоком Vissim'a transferFunction?

12. Почему линейные блоки характеризуют переходной функцией? Какая от нее польза?

Ответ: переходная функция является своеобразным «отпечатком пальца» звена. Для каждого звена переходная функция индивидуальна. Т.о. по переходной функции звено можно идентифицировать, построить его модель. Кроме того, поскольку произвольное воздействие на систему или объект может быть представлено суммой бесконечно малых, смещенных по времени ступенек (интеграл Дюамеля), то, зная переходную функцию и суммируя реакции линейного звена на каждую из ступенек, составляющих сложный сигнал, можно найти реакцию системы на сложное, произвольное воздействие.

13. Как проявляется свойство интегратора накапливать входной сигнал?

14. Как проявляется инерционное свойство апериодического звена? Чем оно обусловлено?

15. Как проявляется колебательность колебательного звена? Чем она обусловлена?

16. Задана разгонная характеристика некоторого объекта:



Определить наиболее подходящий тип звена, которым можно промоделировать объект, определить его параметры и обосновать выбор. Записать выражения для переходной и передаточной функций модели. Чем эта реальная разгонная характеристика отличается от идеальной переходной функции типового звена?

17. Задана разгонная характеристика некоторого объекта:



Определить наиболее подходящий тип звена, которым можно промоделировать объект и обосновать выбор. Определить параметры модели. Записать выражения для переходной и

передаточной функций модели. Чем реальная разгонная характеристика отличается от идеальной переходной функции типового звена?

18. Задана разгонная характеристика некоторого объекта:



Определить наиболее подходящий тип звена, которым можно промоделировать объект и обосновать сделанный выбор. Определить параметры модели. Записать выражения для переходной и передаточной функций модели.

19. Как проверить является ли линейным блок, т.е. то, что реакция блока на сумму воздействий равна сумме его реакций на каждое из них, а масштабному изменению входного сигнала соответствует пропорциональное изменение выходного?

Приложения

П 1. Блоки Vissim'a, используемые в лабораторной работе

1. Генератор единичной ступеньки step. Вызывается на рабочее поле: Blocks – Signal Producer – step.

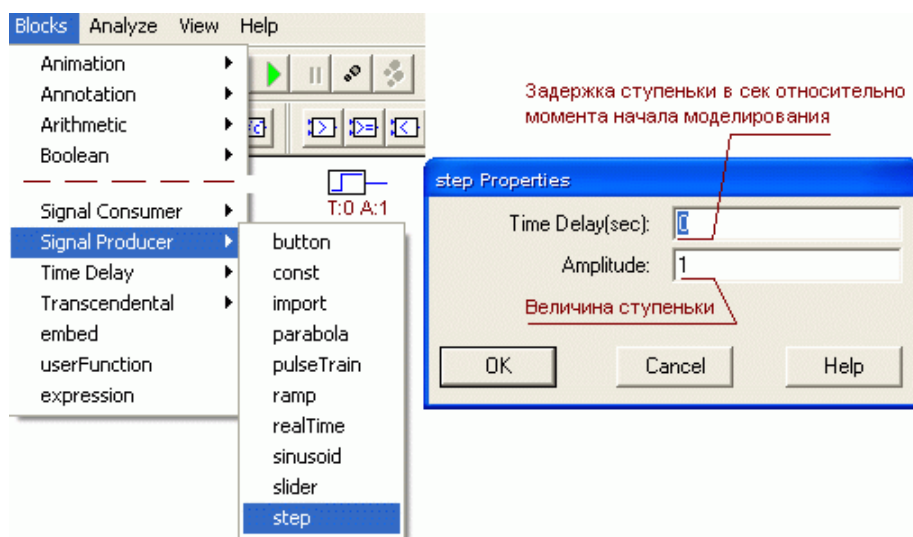


Рис. П 1. Вызов на рабочее поле Vissim'a генератора ступенчатого сигнала, его обозначение и окно для задания параметров, вызываемое двойным щелчком по блоку

2. Блок **transferFunctions**. См. рис.2.1 и 2.2.

3. Блок WirePositioner (фиксатор положения линии связи). С помощью этого блока изменяют на рабочем поле положение соединительных линий между блоками для придания схеме удобочитаемого, эстетичного вида. Вызывается на рабочее поле: Blocks – Annotation – WirePositioner.

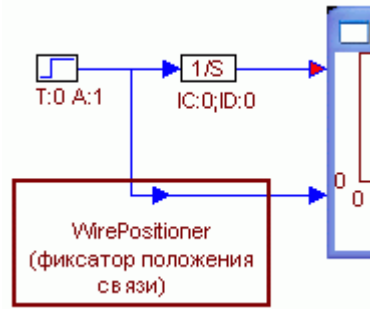


Рис. П 2. Вид фиксатора линии связи на рабочем поле программы Vissim

4. Интегратор (Blocks – Integration - Integrator). См. рис. 3.1.
5. Осциллограф (Blocks – Signal Consumer – Plot). См. рис.3.2.
6. Усилитель (Blocks – Arithmetic – gain).
7. Сумматор (Blocks – Arithmetic – SummingJunction).
8. Генератор линейно растущего сигнала (Blocks – Signal Producer – ramp).
9. Генератор синусоидального сигнала (Blocks – Signal Producer – sinusoid).

П 2. О выборе шага интегрирования

Точность модели с одной стороны, и продолжительность расчетов в моделирующей программе с другой, зависят от величины шага интегрирования и находятся в противоречии. При моделировании сложных объектов и систем приходится находить разумный компромисс, с тем чтобы, прежде всего, модель была достаточно точна, а кроме того вычислялась бы за сравнительно короткое время. Быстродействие моделирования становится особенно важным, когда модель представляет собой виртуальное управляющее устройство, которое с помощью специальных плат подключается к реальному объекту управления и, естественно, должно управлять им в реальном масштабе времени.

Практическое правило здесь состоит в том, чтобы выбирать шаг интегрирования в 10 -100 раз меньшим, чем наименьшая постоянная времени системы. Оптимальный шаг можно найти путем проб и ошибок, наблюдая, например, за переходными характеристиками модели. Если при очередном уменьшении в 2 -10 раз переходная характеристика не изменяется, значит, величина шага подобрана правильно.

П 3. Снимки экранов Маткада

Ниже приведены снимки экранов Маткада, в котором проведены расчеты соответствия переходных характеристик типовых звеньев, полученных в Vissim'e, переходным характеристикам, вычисленным по точным формулам. Обратите внимание на техническую эстетику оформления документов Маткада.

Mathcad - [Prov_Aper_zv.mod]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

Tutorials Go

Пример 1 обработки экспериментальных данных, полученных при моделировании типовых звеньев в программе Vissim

Лабораторная работа №2 Маткад вер. 10 и выше
по курсу ТАУ
Факультет
ст.гр Ахметов Ж. А.
Рук. доц.
Кафедра
25.11.20

**Проверка работоспособности блока transferFunction программы Vissim.
Апериодическое звено**

Дана переходная функция виртуального апериодического звена, полученная в программе Vissim:

The diagram shows a Vissim 30 interface. On the left, a block diagram consists of a 'Генератор ступенчатой функции 1o(t)' (Step function generator) connected to an 'Апериодическое звено k = 2, T = 1' (Aperiodic link) block. The transfer function of this block is given as $\frac{1}{2(s+1)}$. The output of the block is connected to a plot window titled '1o(t) - ступ. и h(t) пер. функции'. The plot shows a step function (red line) that jumps from 0 to 2.0 at t=0, and a smooth curve (blue line) representing the system's response h(t) that starts at (0,0) and asymptotically approaches the value 2.0. The x-axis is labeled 'Время, сек' (Time, sec) and ranges from -1 to 5. The y-axis ranges from 0 to 2.0.

3.2.3. Вычислить значения переходной функции для звена с параметрами $k = 2.0$, $T = 1.0$ сек и проставить в Paint'e точки на соответствующей осциллограмме.

Решение

Значение параметров аperiodического звена

Коэффициент усиления

$k := 2.0$

Постоянная времени

$T := 1.0$

Диапазон изменения времени

$t := 0, 0.5..5$

Синтаксис: начальное значение, следующее значение, конечное значение

Выражение для переходной функции:

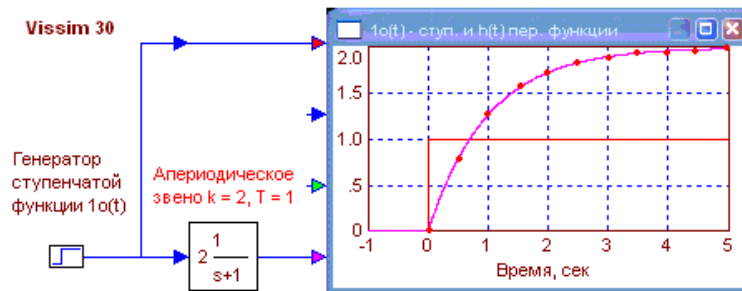
$$h(t) := k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Численные значения переходной функции

t =	h(t) =
0	0
0.5	0.787
1	1.264
1.5	1.554
2	1.729
2.5	1.836
3	1.9
3.5	1.94
4	1.963
4.5	1.978
5	1.987



Нанесем в Paint'e расчетные точки на экспериментальную кривую



Переходная функция аperiodического звена, полученная экспериментально в Vissim'e, совпадает с теоретической

Вывод: блок `transferFunctions` правильно моделирует аperiodическое звено

Рис. ПЗ. Окно Маткада (снимок), в котором проверяется соответствие блока Vissim'a аperiodическому звену

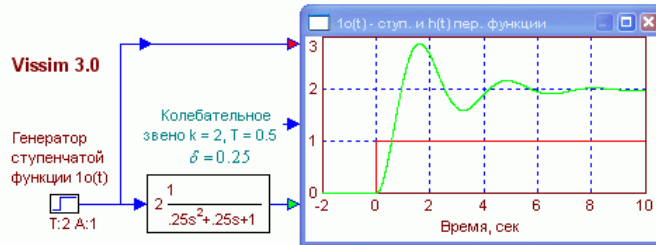
Пример 2 обработки экспериментальных данных, полученных при моделировании типовых звеньев в программе Vissim

Лабораторная работа №
по курсу ТАУ
Факультет
ст. гр
Рук.
Кафедра
26.11.20

Маткад вер. 10 и выше

**Проверка работоспособности блока
transferFunction программы Vissim.
Колебательное звено**

Дана переходная функция виртуального колебательного звена, полученная в программе Vissim:



3.3.3. **Вычислить** значения переходной функции $h(t)$ звена с параметрами $k = 2.0$, $T = 0.5$ сек и $\delta = 0.25$ по формуле (2.14) и проставить точки в Paint'e на снимке экрана соответствующей осциллограммы. Сделать вывод о точности модели колебательного звена, используемой в Vissim'e.

Решение

Значения параметров колебательного звена

Коэффициент усиления	$k := 2.0$
Постоянная времени	$T := 0.5$
Декремент затухания	$\delta := 0.25$

Диапазон изменения времени

$t = 0, 1 \dots 10$

Синтаксис: начальное значение, следующее значение, конечное значение

Выражение для переходной функции и ее параметров:

Частота затухающих колебаний, рад/сек

$$\omega_3 := \frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{T}$$

Начальная фаза

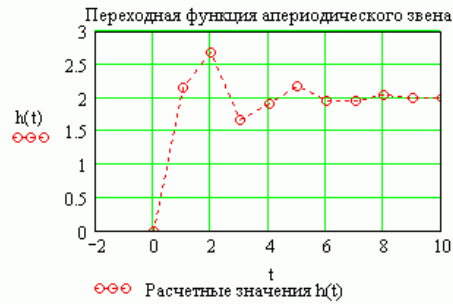
$$\phi := \arccos(\delta)$$

Переходная функция колебательного звена

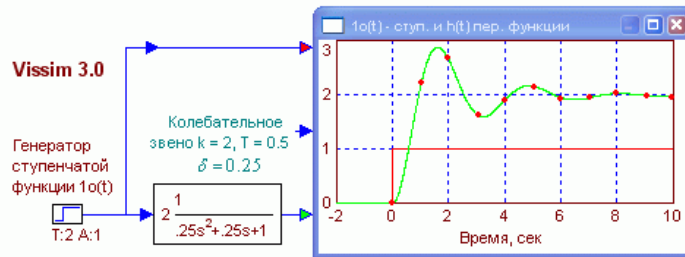
$$h(t) := k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \delta^2}} e^{-\delta \frac{t}{T}} \cdot \sin(\omega_3 \cdot t + \phi) \right)$$

Значения переходной функции

t =	h(t) =
0	0
1	2.141
2	2.674
3	1.655
4	1.901
5	2.17
6	1.963
7	1.954
8	2.034
9	2.002
10	1.987



Нанесем в Paint'e расчетные точки на экспериментальную кривую



Переходная функция колебательного звена, полученная экспериментально в Vissim'e, совпадает с теоретической

Вывод: блок `transferFunctions` правильно моделирует колебательное звено

Рис. П4. Снимок документа Маткада, в котором проверяется соответствие блока Vissim'a колебательному звену

П 4. Файлы моделей

Файлы моделей виртуальных стендов для исследования типовых звеньев, ссылки на офф-лайн загрузку которых даны ниже, открываются и работают в версии Vissim FAP 3.0 и более поздних (4, 5, 6).