

Владимирский государственный университет

С. И. ЛИХОДЕЕВ

**ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ В СРЕДЕ SimInTech**

Практикум



Владимир 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

С. И. ЛИХОДЕЕВ

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ В СРЕДЕ SimInTech

Практикум

Электронное издание



Владимир 2023

ISBN 978-5-9984-1604-0

© ВлГУ, 2023

© Лиходеев С. И., 2023

УДК 621.3+621.38

ББК 31.2+32.85

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент
зам. начальника отдела измерительной техники
ЗАО НПП «Автоматика»
В. М. Дерябин

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры информационных систем и программной инженерии
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
С. Ю. Кириллова

Лиходеев, С. И.

Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде SimInTech [Электронный ресурс] : практикум / С. И. Лиходеев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 135 с. – ISBN 978-5-9984-1604-0. – Электрон. дан. (6,1 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Представлено 15 практических работ по основным разделам курса «Математические модели технических объектов управления», «Электротехника и электроника» и «Системы автоматизации инженерных расчетов», которые выполняются в среде SimInTech.

Издание предназначено для студентов бакалавриата направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах», может быть полезно для магистрантов указанного направления при выполнении практических работ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 182. Табл. 12. Библиогр.: 5 назв.

ISBN 978-5-9984-1604-0

© ВлГУ, 2023

© Лиходеев С. И., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Практическое занятие 1 Моделирование и исследование типовых динамических звеньев	6
Практическое занятие 2 Исследование частотных характеристик систем автоматического управления.....	18
Практическое занятие 3 Анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования.....	25
Практическое занятие 4 Анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования с помощью частотных критериев устойчивости	32
Практическое занятие 5 Синтез систем автоматического регулирования	40
Практическое занятие 6 Исследование П-, И-, ПИ- регуляторов	45
Практическое занятие 7 Исследование качества переходных процессов линейной автоматической системы	54
Практическое занятие 8 Расчет цепи постоянного тока.....	60
Практическое занятие 9 Расчет цепи переменного тока	66

Практическое занятие 10	
Моделирование и исследование однофазного трансформатора	72
Практическое занятие 11	
Моделирование и исследование двигателя постоянного тока	82
Практическое занятие 12	
Моделирование и исследование асинхронного двигателя	95
Практическое занятие 13	
Моделирование и исследование автоматической системы регулирования скорости двигателя постоянного тока.	104
Практическое занятие 14	
Исследование автоматической системы стабилизации постоянного напряжения	112
Практическое занятие № 15	
Автоматическая система регулирования скорости с нелинейной обратной связью по току	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	134

ВВЕДЕНИЕ

Современные вычислительные средства позволяют без особого труда и затрат времени решать сложные задачи управления в технических системах не инженерными методами, а с использованием математических аппаратов любой степени сложности. При этом не требуется помощь программиста для реализации методов и визуализации проводимых исследований. Все это можно выполнять с применением среды динамического моделирования технических систем SimInTech.

Являясь альтернативой зарубежным аналогам, ПО SimInTech позволяет рассчитывать, моделировать, исследовать и синтезировать различные технические устройства (механические, гидравлические, теплотехнические, электротехнические и другие, в том числе средства и системы автоматики). Вся необходимая сопроводительная документация, методическое обеспечение и исчерпывающая справочная контекстная система SimInTech выполнена на русском языке, что для многих российских пользователей снимает языковой барьер, который имеет место при освоении и использовании таких программ, как Matlab-Simulink и других, с англоязычным методическим и справочным сопровождением [2].

Начинающий пользователь SimInTech может в процессе работы совершенствовать свои знания как в области моделирования и численных методов, так и в области программирования и визуализации данных.

Практическое занятие 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

1. Цель работы

Изучение временных и частотных характеристик типовых динамических звеньев с использованием SimInTech.

2. Предварительное домашнее задание

Составить уравнения и вывести передаточные функции $H(s)$ для всех типовых звеньев.

3. Краткие теоретические сведения

Под динамическим звеном понимается устройство любого физического вида, описанное дифференциальными уравнениями не более второго порядка [3].

Динамика большинства функциональных элементов систем автоматического регулирования (САР) независимо от исполнения может быть описана одинаковыми элементами. Такие элементы называют элементарными динамическими звеньями. Передаточная функция элементарного звена в общем виде задается отношением двух полиномов не более чем второй степени

$$H(s) = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}$$

Любую сложную передаточную функцию линеаризованной САР можно представить, как произведение передаточных функций элементарных звеньев. Каждому такому звену в реальной САР, как правило, соответствует какой-то отдельный узел. Зная свойства отдельных звеньев можно судить о динамике САР в целом.

Создание моделей в SimInTech

1. Назначение программы SimInTech

Программа SimInTech («Simulation in technik») - российская система модельно-ориентированного проектирования систем автоматического управления [1].

Программа предназначена для исследования нестационарных процессов в различных объектах управления. Разработка математиче-


ских моделей и алгоритмов управления происходит в виде структурного проектирования логико-динамических систем, описываемых с помощью отношений «вход-выход», в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и/или дифференциально-алгебраических уравнений.

По своим возможностям SimInTech является отечественной альтернативой таким программным продуктам, как SIMULINK (MathWorks), VisSim (Visual Solution), LabView (National Instruments) и т.д. Преимуществами SimInTech является то, что полноценная учебная версия распространяется бесплатно и полностью русифицирована, имеет открытый интерфейс для интеграции с различным ПО, присутствуют инструменты создания интерфейсов управления, имеется возможность моделирования в режиме «реального времени». При этом программа обладает высокой гибкостью и скоростью решения сложных математических задач, обширной справочной системой поддержки [2].

Блоки соединяются линиями связи, по которым распространяются сигналы. Для того, чтобы соединить блоки, надо щелкнуть ЛКМ по источнику сигнала и затем, при нажатой клавише **Ctrl**, по блоку-приемнику. Можно также протянуть мышкой линию связи между нужными выходом и входом.

Чтобы подать один сигнал на два блока (сделать «развилку»), надо сначала создать одну линию обычным способом. Чтобы провести вторую линию, следует нажать правую кнопку мыши на линии в точке развилки и протащить линию ко второму блоку.

Модель можно скопировать в буфер обмена в виде растрового рисунка. Для этого в окне модели надо выбрать в верхнем меню пункт «Сервис». Предварительно лучше уменьшить размеры окна до минимальных, чтобы не было белых полей.

Для того, чтобы запустить моделирование, надо щелкнуть ЛКМ по кнопке  на панели инструментов. Эта же кнопка позволяет остановить моделирование при необходимости.

Параметры моделирования (метод интегрирования, обработка ошибок и т.д) устанавливаются с помощью окна «Параметры расчета» рис. 1.1.

Параметры расчёта			
Название ▲	Имя	Формула	Значение
[-] Основные параметры			
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6
Конечное время расчёта	endtime		10
Максимальный шаг	hmax		0.001
Метод интегрирования	intmet		Эйлера
Минимальный шаг	hmin		0.001
Начальное время расчёта	starttime		0
Начальное значение неиници...	InitOutputs...		0
Начальный шаг интегрирован...	startstep		0
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Относительная ошибка сравн...	time_rel_e...		1E-12
[+] Генерация кода			
[+] Управление расчётом			
[+] Настройки решения НАУ			
[+] Визуализация данных			
[+] Удалённая отладка кода			
[+] Сортировка блоков			
[+] Тонкие настройки решения СЛАУ			
[+] Тонкие настройки решения НАУ			

Рис. 1.1. Установка параметров моделирования

Рассмотрим типовые динамические звенья, исследуемые в данной работе:

1. Безынерционное (идеальное усилительное) $H(s) = k$ звено реализуется с помощью элемента «Усилитель» библиотеки «Операторы» раздела SimInTech. Коэффициент усиления задаётся свойством усилителя.

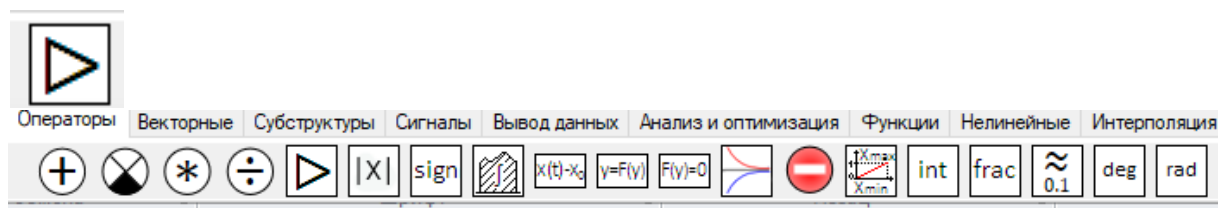


Рис. 1.2. Элементы библиотеки «Операторы»

2. Аperiodическое (инерционное) звено первого порядка $H(s) = \frac{k}{Ts+1}$, и аperiodическое звено второго порядка и другие звенья находятся в библиотеке «Динамические» рис. 1.3

$$H(s) = \frac{1}{T^2s^2 + T_3s + 1}$$

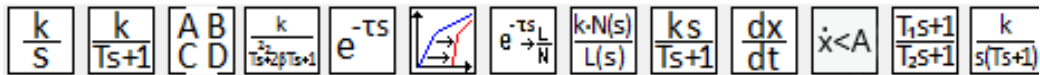


Рис. 1.3. Элементы библиотеки «Динамические»

Рассмотрим исследование колебательного звена. С этой целью создадим модель, которая показана на рис. 1.4.

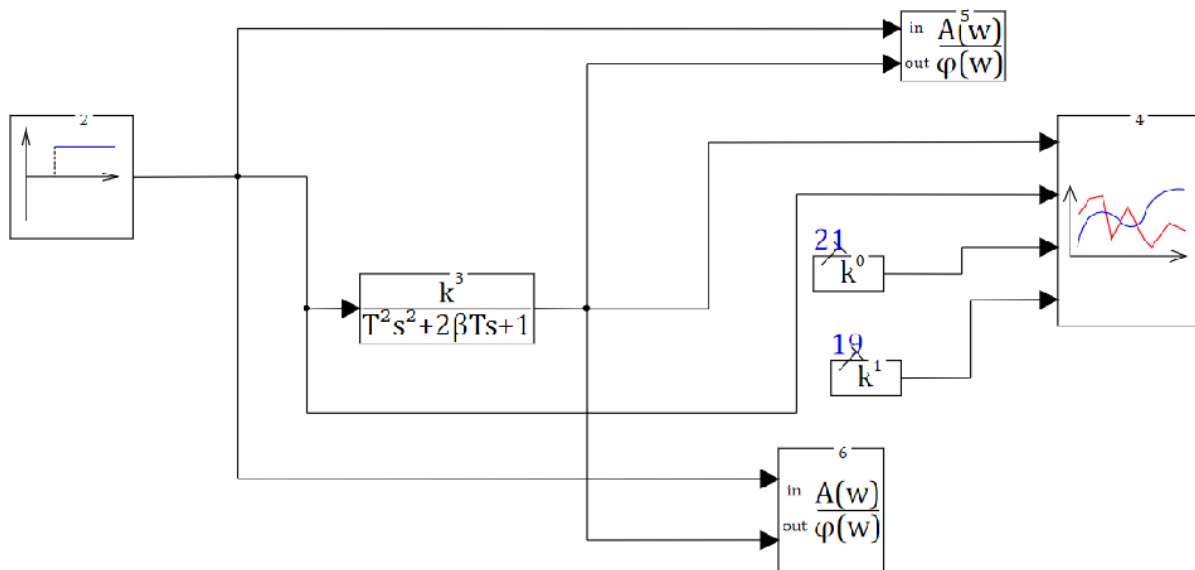


Рис. 1.4. Модель колебательного звена

Параметры колебательного звена показаны на рис. 1.5.

Свойства		Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название ▾		Имя	Формула	Значение	
Постоянные времени		T		[0.1]	
Начальные условия по производной		dx0		[0]	
Начальные условия		x0		[0]	
Коэффициенты усиления		k		[20]	
Коэффициент демпфирования		b		[0.2]	

Рис. 1.5. Параметры колебательного звена

Переходная характеристика, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 1.6.

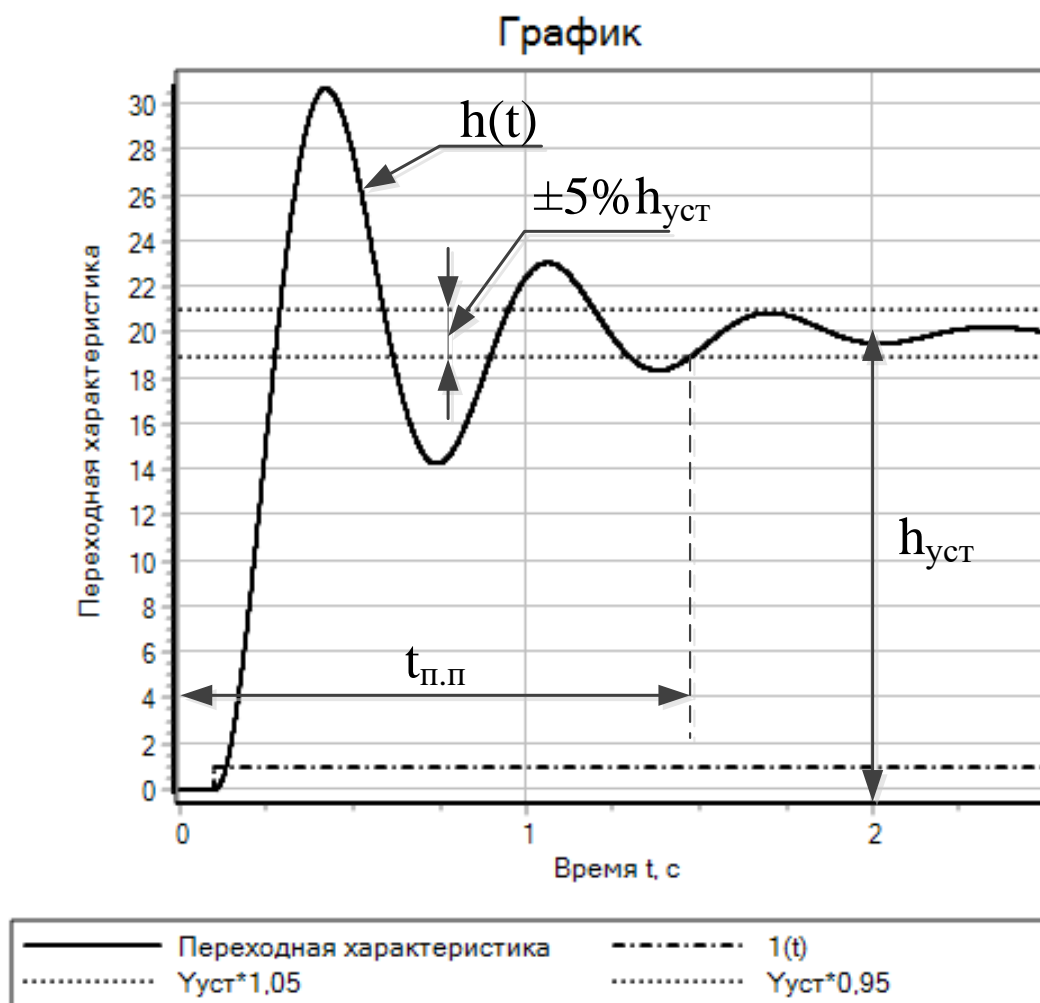


Рис. 1.6. Переходная характеристика

Годограф и логарифмический частотные характеристики, полученные в результате расчета, представлены на рис. 1.7 и рис. 1.8 соответственно.



Рис. 1.7. Годограф Найквиста

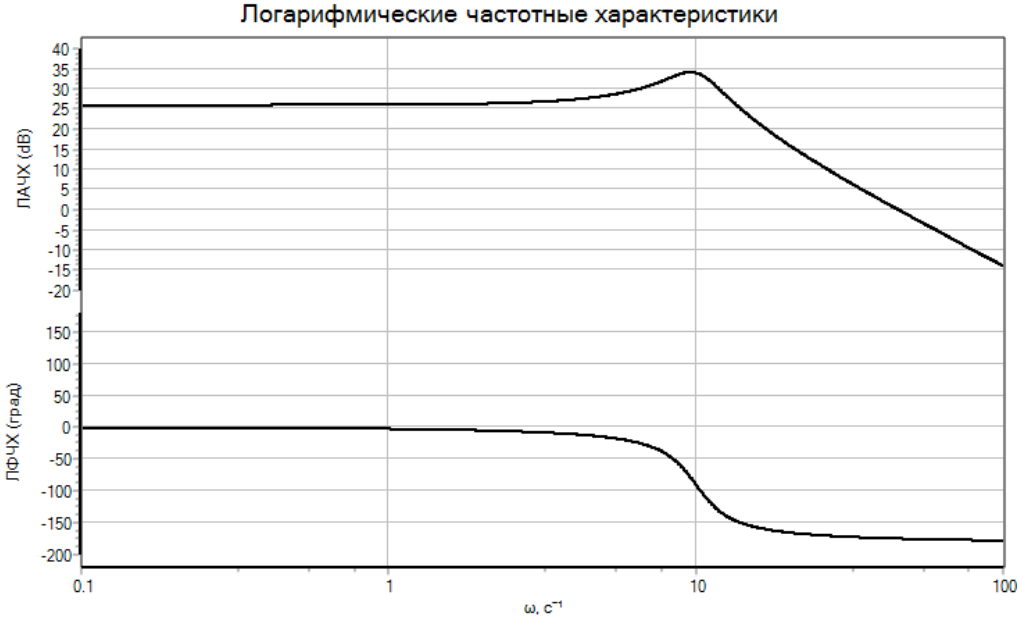


Рис. 1.8. Логарифмический частотные характеристики

Настройка блока для расчета логарифмических частотных характеристик (блок № 5 рис 1.4) дана на рис 1.9.

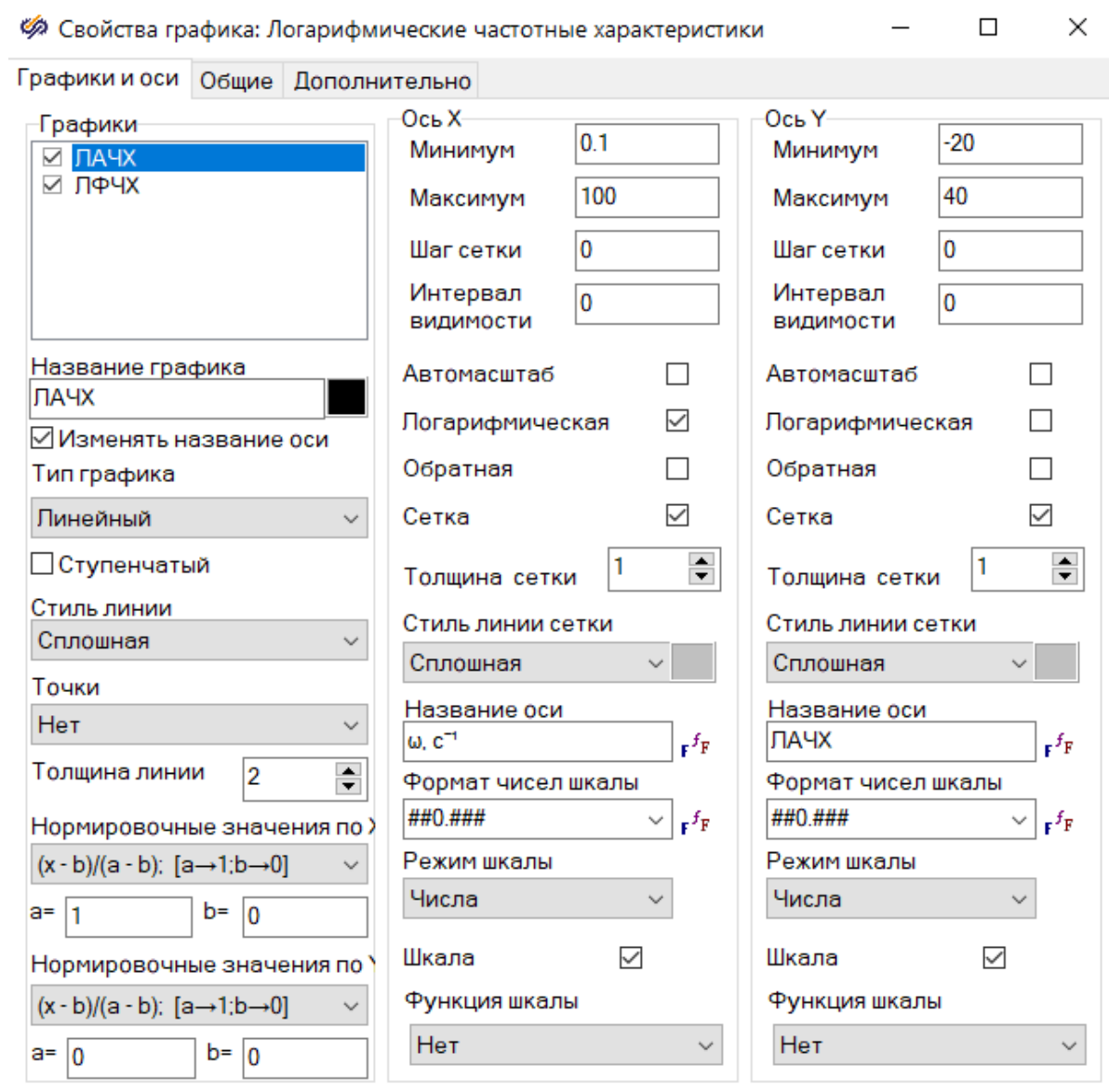


Рис. 1.9. Настройка блока для расчета логарифмических частотных характеристик

Для исследования влияния коэффициента демфирования (β) на характеристики колебательного цвена, составим модель, изображенную на рис. 1.10. Блок №7 «мультиплексор» находится в библиотеке «векторные»

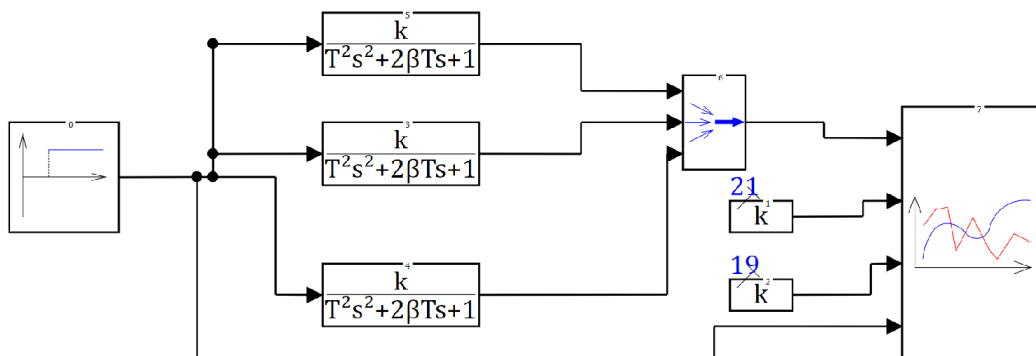


Рис. 1.10. Модель для исследования влияния коэффициента демпфирования (β) на характеристики колебательного звена

Настройка блока для расчета переходных характеристик (блок № 7 рис. 1.10) дана на рис. 1.11.

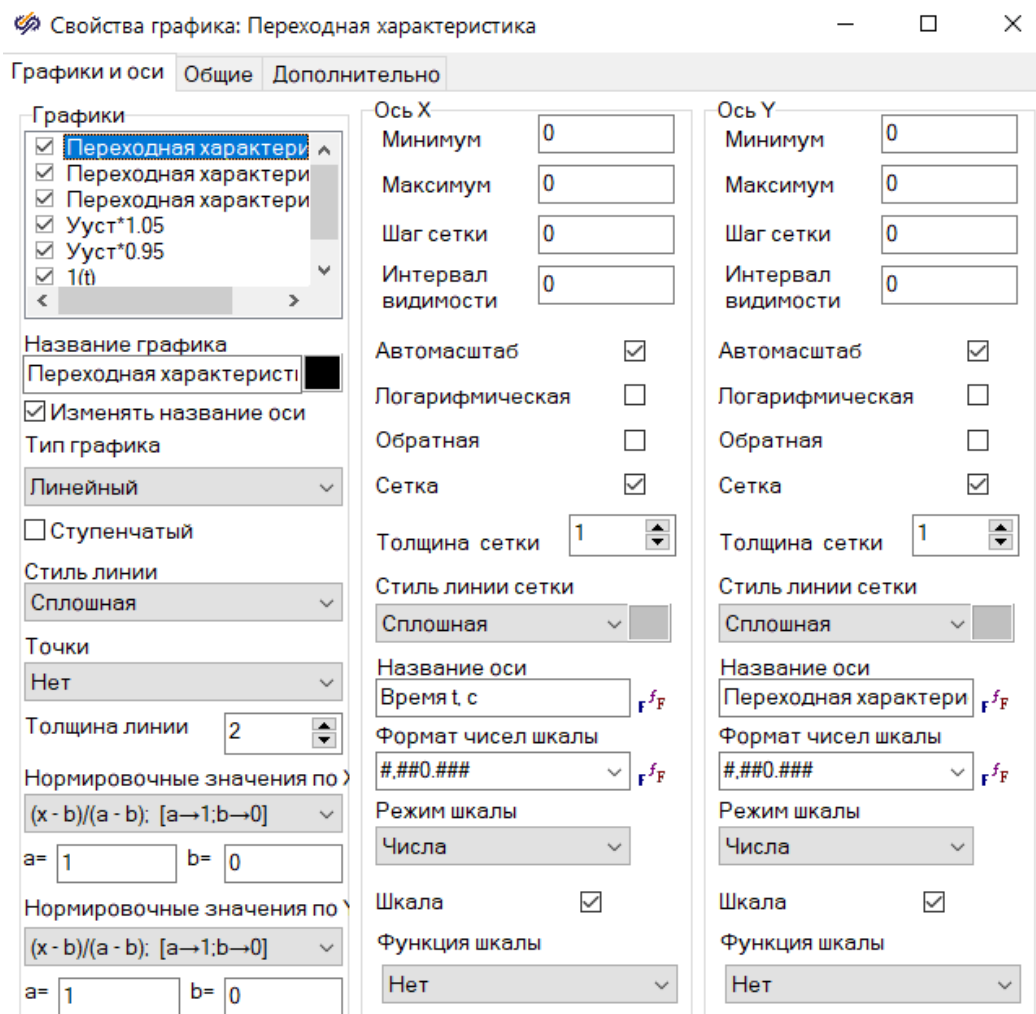


Рис. 1.11. Настройка блока для расчета переходных характеристик (блок № 7 рис. 1.10)

Результаты расчета представлены на рис. 1.12.

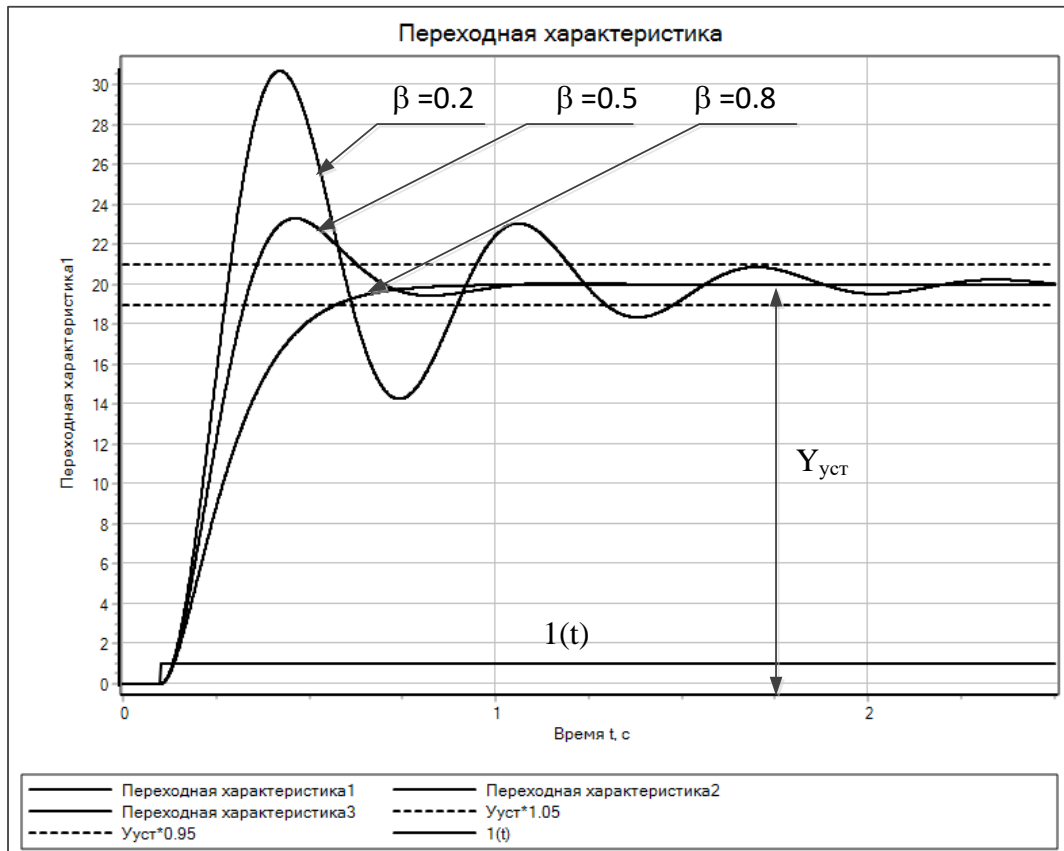


Рис. 1.12. Переходная характеристика при изменении коэффициента демпфирования (β)

Для исследования влияния коэффициента демпфирования (β) на годограф Найквиста, составим модель, изображенную на рис. 1.13.

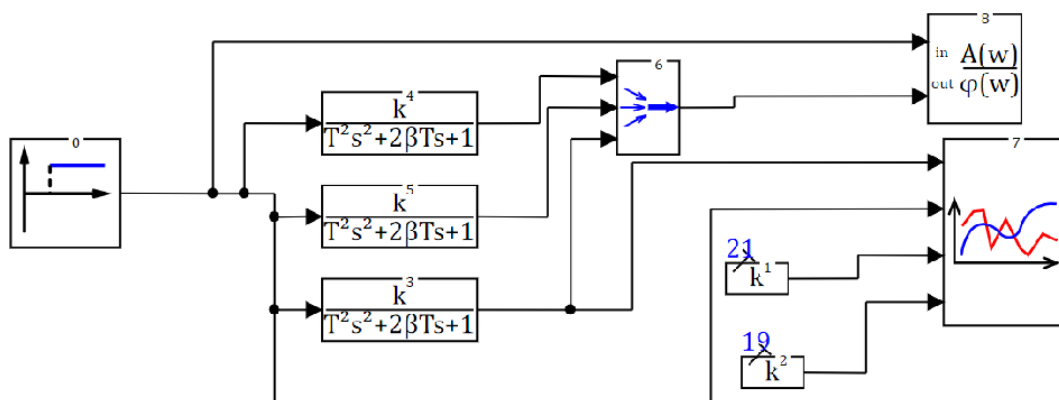


Рис. 1.13. Модель для исследования влияния коэффициента демпфирования (β) на годограф Найквиста

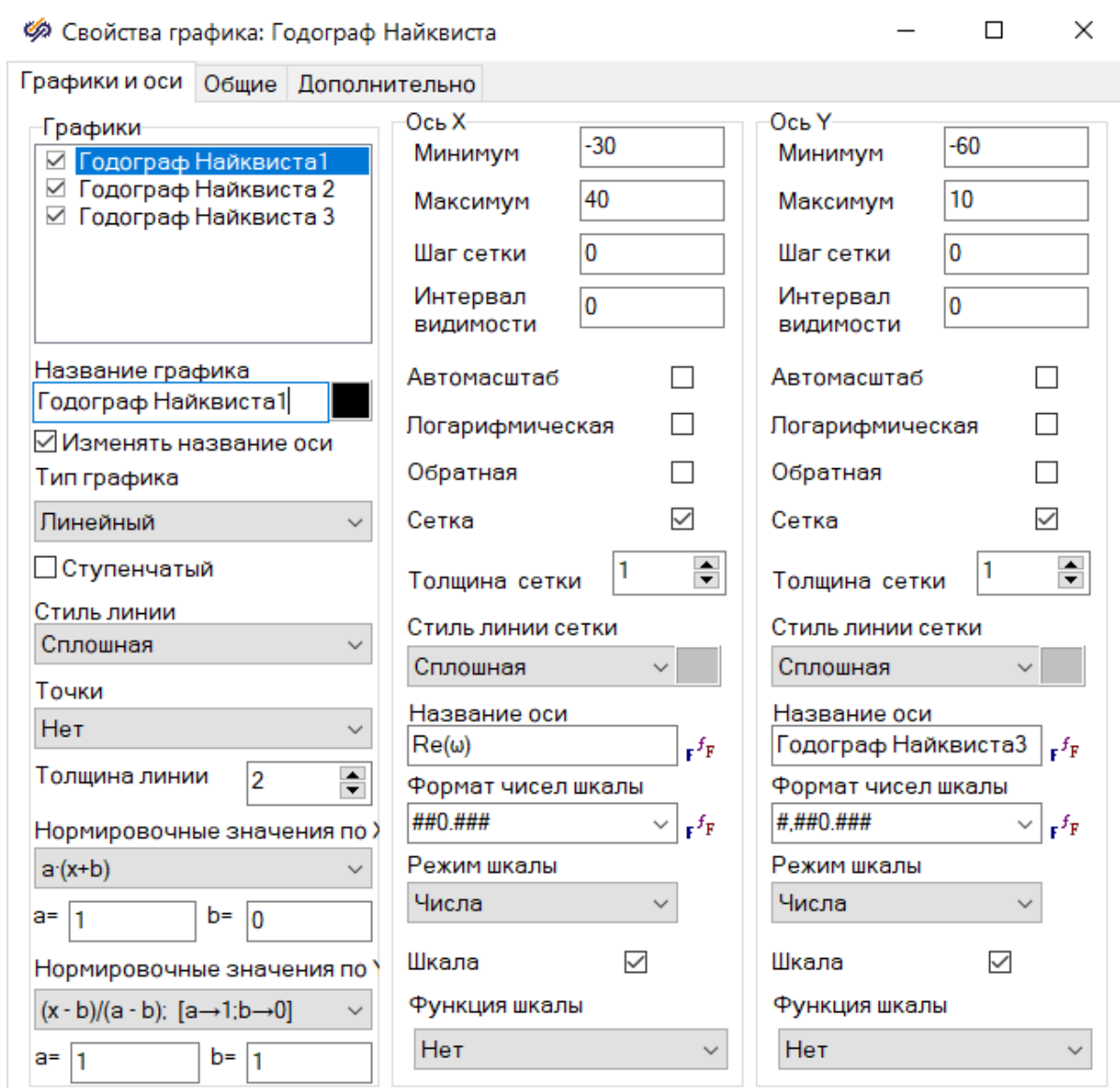


Рис. 1.14. Настройка блока для расчета годографа Найквиста (блок № 8 рис. 1.13)

Результаты расчета влияния коэффициента демфирования (β) на годограф Найквиста представлены на рис. 1.15



Рис. 1.15. Результаты расчета влияния коэффициента демпирования β на годограф Найквиста

4. Задание

1. Привести названия и графики, использованных типовых возмущающих воздействий. Описать изменения в реакции типовых звеньев на варьирование параметров воздействий.

2. Для каждого звена привести:

- ✓ название звена;
- ✓ вывод передаточной функции;
- ✓ исследуемую модель звена в SimInTech с рассчитанными характеристиками (переходная функция; ЛАЧХ и ЛФЧХ и годограф);

Таблица вариантов:

Таблица 1.1

№ варианта	Апериодическое звено 1		Апериодическое звено 2		Апериодическое звено второго порядка и колебательное			Интегрирующее звено	Изодромное звено			Реальное дифференцирующее звено	
	k_1	T_1	k_2	T_2	k_3	T_3	β		k_4	k_5	T_6	k_7	T_7
1	4	0.4	7	0.07	3	0.4	2.5 (0.25)	4	4	0.8	4	0.5	
2	2	0.7	4	0.05	1	0.4	2 (0.5)	4	4	0.8	4	0.5	
3	4	0.4	7	0.07	3	0.4	2.5 (0.25)	2	6	0.6	2	0.1	
4	4	0.4	5	0.02	3	0.4	1.5 (0.25)	4	4	0.6	4	0.5	
5	1	0.1	4	0.08	6	0.4	2.5 (0.5)	4	2	0.5	4	0.5	
6	1	0.8	7	0.07	3	0.4	1 (0.4)	4	4	0.8	6	0.5	
7	3	0.4	9	0.09	7	0.2	1.5 (0.1)	1	4	0.8	4	0.6	
8	4	0.5	7	0.02	5	0.2	1.8 (0.6)	1	4	0.8	6	0.3	
9	5	0.4	4	0.01	4	0.2	1.5 (0.4)	2	6	0.3	4	0.6	
10	7	0.8	2	0.04	3	0.2	1.5 (0.01)	1	4	0.5	8	0.3	
11	2	0.9	4	0.05	8	0.2	1.2 (0.3)	3	7	0.8	9	0.6	
12	3	0.4	7	0.06	3	0.2	1.8 (0.2)	4	4	0.7	4	0.5	

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы с параметрами.
2. Характеристики звеньев, выполненные в SIMINTECH.
3. Выводы.

6. Контрольные вопросы

1. Какие временные характеристики САУ вы знаете и какова их связь с передаточными функциями САУ?

2. Какие виды частотных характеристик САУ вам известны и какой их физический смысл?
3. Какие типовые динамические звенья вы знаете, их передаточные функции и дифференциальные уравнения?
4. Как получить частотные характеристики звеньев по их передаточным функциям?
5. Как строятся логарифмические частотные характеристики?

Практическое занятие 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1. Цель работы

Изучение частотных характеристик САУ (АФЧХ и ЛАФЧХ); исследование указанных характеристик при изменении параметров звеньев САУ.

2. Содержание работы

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе системы, вызванные гармоническим воздействием на ее входе [3].

В результате разбиения САУ на звенья и определения их математического описания в виде передаточных функций, частотных или переходных характеристик составляется структурная схема системы. По структурной схеме затем получают передаточную функцию или характеристики САУ в целом.

Наиболее просто описание САУ (передаточную функцию) можно найти, оперируя передаточными функциями звеньев. При последовательном соединении передаточная функция цепочки звеньев $H(s)$ равна произведению передаточных функций звеньев [3].

Передаточная функция группы параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев. Если звено с передаточной функцией $H_1(s)$ охвачено обратной связью через звено $H(s)_{oc}$, то передаточная функция такого замкнутого контура $H_3(s)$ определяется выражением:

$$H_3 = \frac{H_1}{1 \mp H_1 H_{oc}}$$

Здесь знак плюс в знаменателе соответствует отрицательной обратной связи, а минус – положительной.

На основании приведенных формул каждая группа звеньев может быть заменена одним эквивалентным звеном, а вся система управления приведена к одноконтурному виду.

Связь между частотными характеристиками системы и составляющих ее звеньев определяется следующим выражением:

$$K(j\omega)_{s=j\omega} = H(s)$$

Соответственно АФЧХ цепочки последовательно соединенных звеньев разомкнутой САУ равна:

$$K(j\omega) = \prod_{i=1}^n K_i(j\omega),$$

где $K(j\omega)_i$ – АФЧХ i -го звена САУ.

Из последней формулы можно получить:

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega),$$

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega),$$

$A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ – амплитудная и фазовая частотные характеристики САУ, а $A_i(\omega)$ и $\varphi_i(\omega)$ – соответствующие характеристики i -го звена.

При логарифмировании $A(\omega)$ получим выражение для ЛАЧХ цепочки звеньев $L(\omega)$

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega)$$

Рассмотрим пример. Для схемы, представленной на рис. 2.1 необходимо рассчитать частотные характеристики. Передаточные функции:

$$H_1 = \frac{20}{0,089s+1}; H_2 = \frac{10}{0,025s+1}; H_{oc} = 0,1.$$

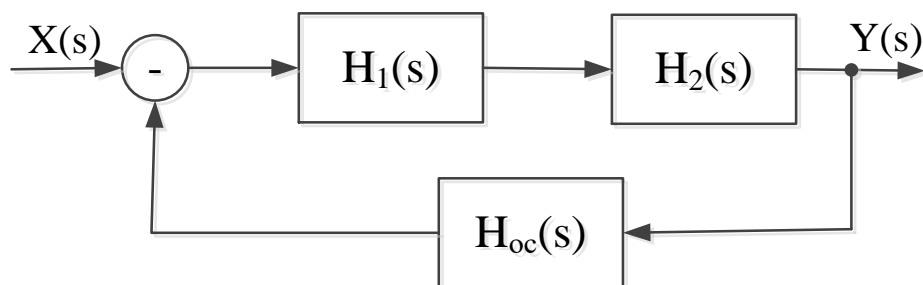


Рис. 2.1. Модель для исследования

Модель в SimInTech данной системы представлена на рис. 2.2

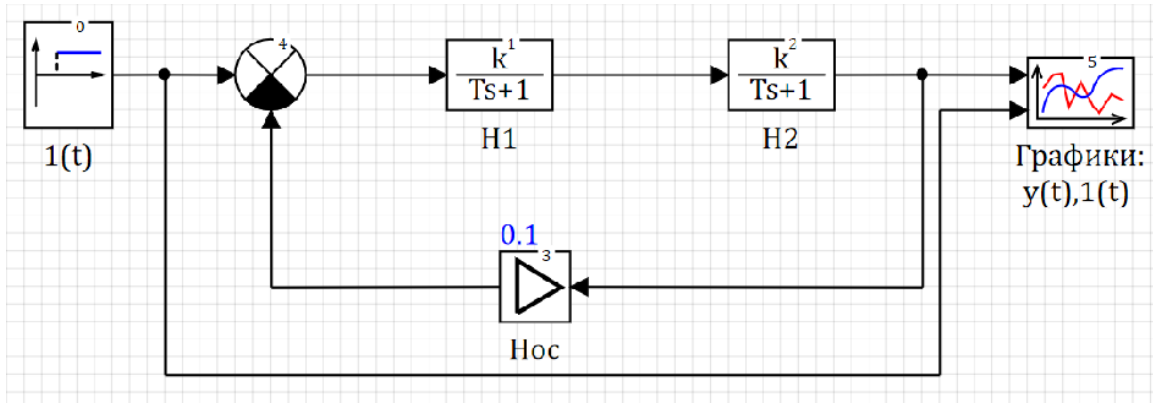


Рис. 2.2. Модель исследуемой системы

Результаты расчета показаны на рис. 2.3.

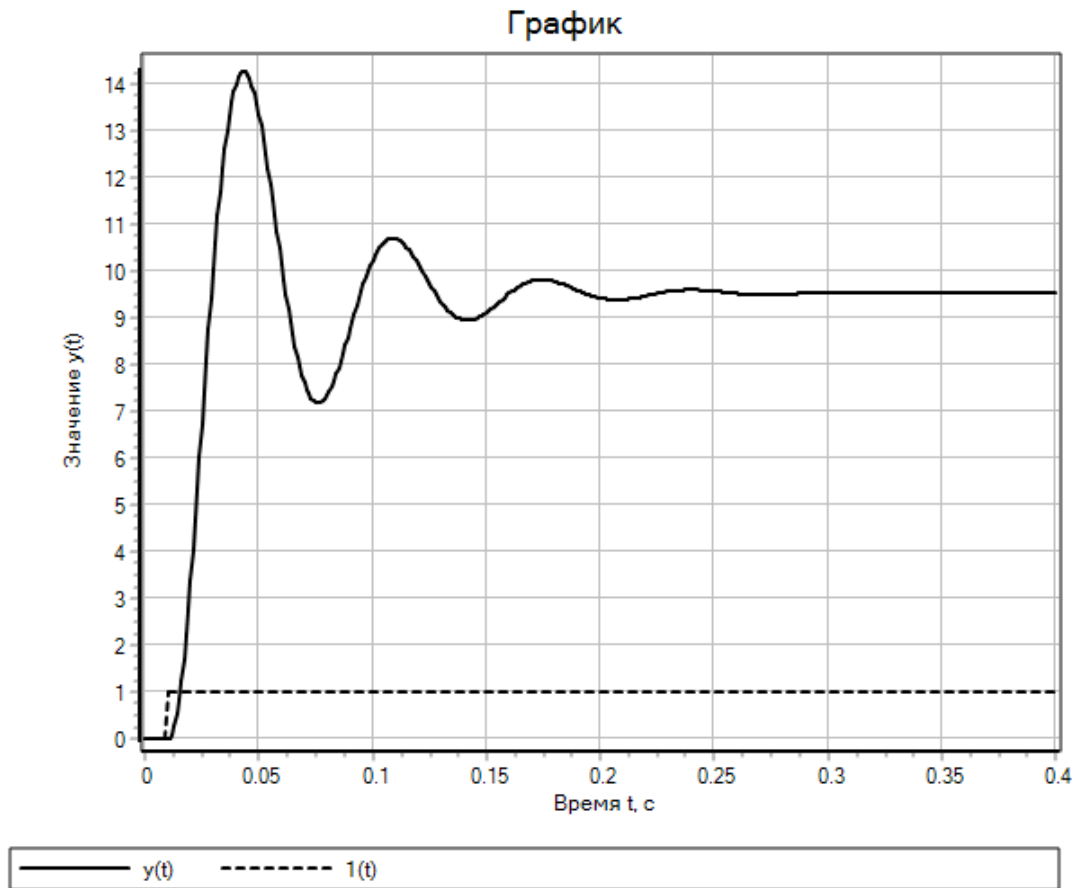


Рис. 2.3. Результаты расчета

Произведем расчет частотных характеристик и кривой Михайлова. Модель для расчета представлена на рис. 2.4.

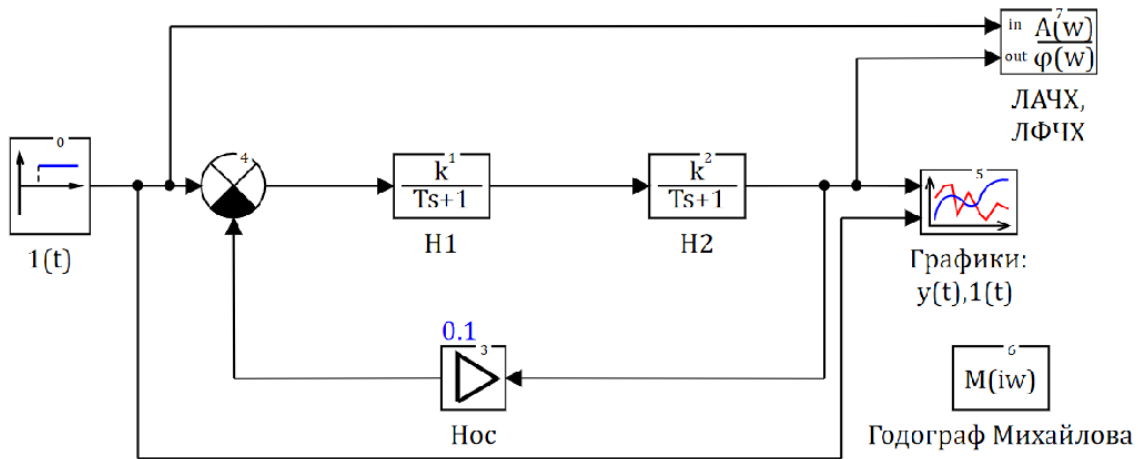


Рис. 2.4. Модель для расчета частотных характеристик и кривой Михайлова

Диалоговое окно настройки блока «Годограф Михайлова» представлено на рис. 2.5.

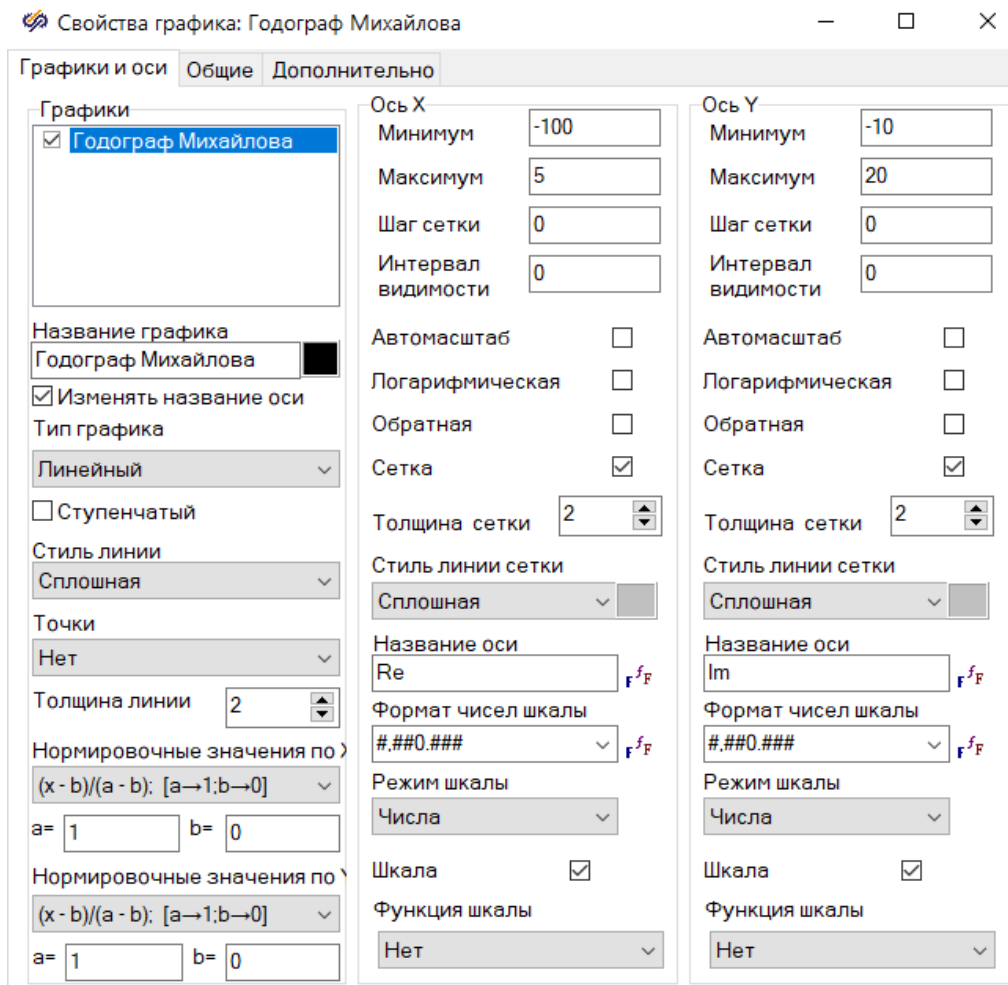


Рис. 2.5. Окно настройки блока «Годограф Михайлова»

Годограф Михайлова и частотные характеристики представлены на рис. 2.6 и 2.7 соответственно.

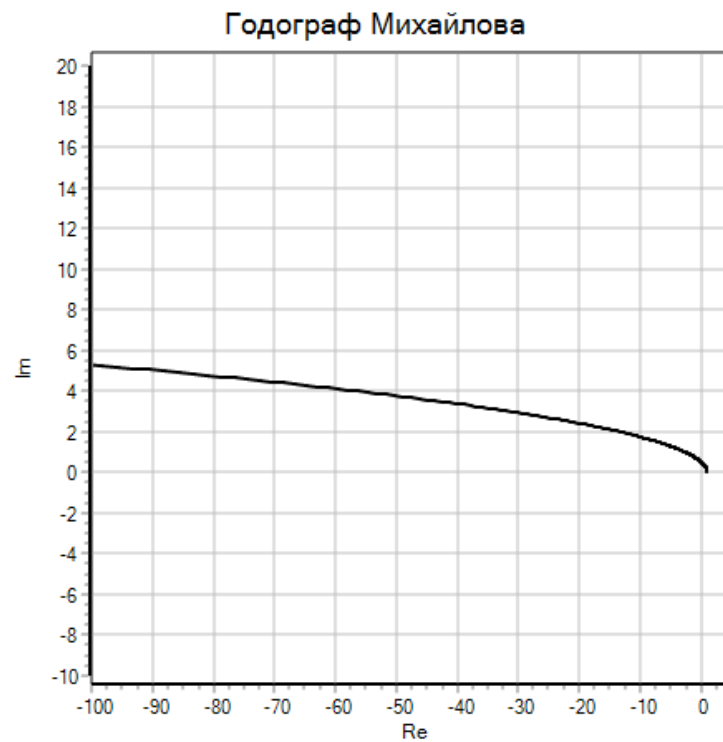


Рис. 2.6. Годограф Михайлова

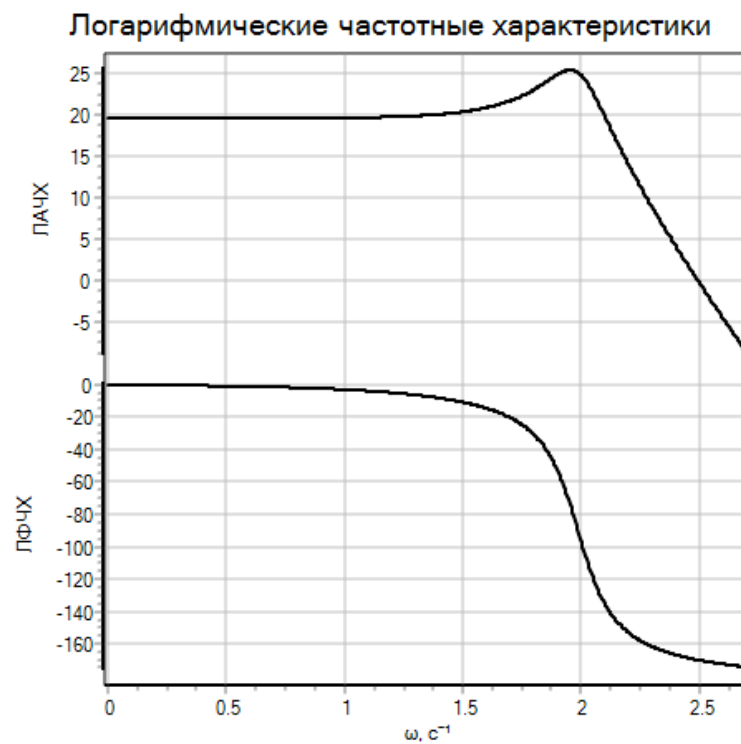


Рис. 2.7. Частотные характеристики

Для расчёта характеристик при разных коэффициентах усиления необходимо создать модель, представленную на рис. 2.8.

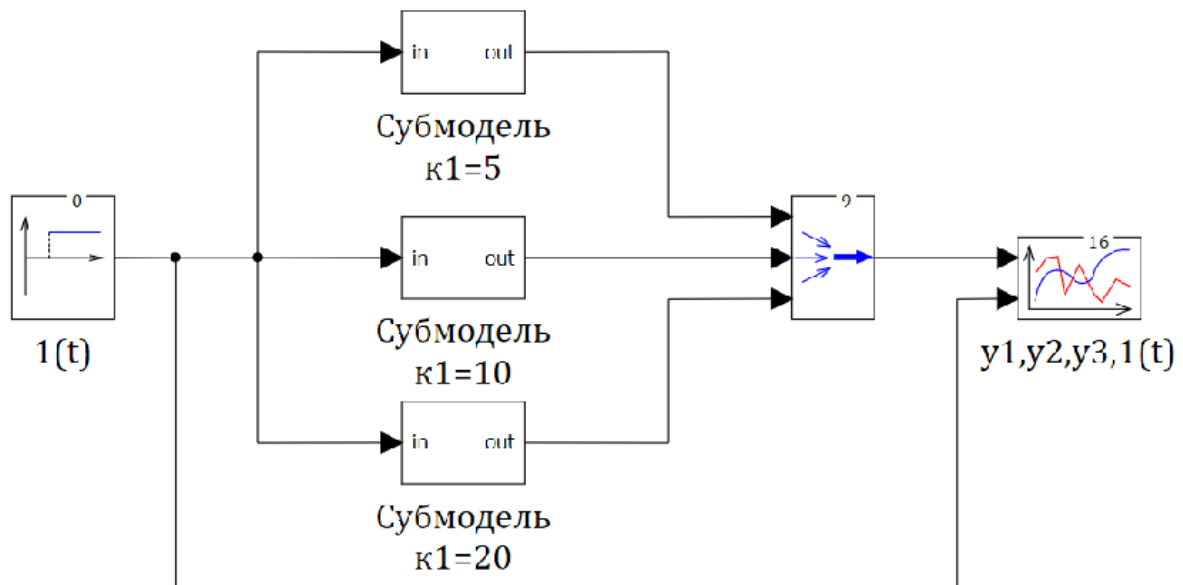


Рис. 2.8. Модель для исследования системы при разных коэффициентах передачи H_1

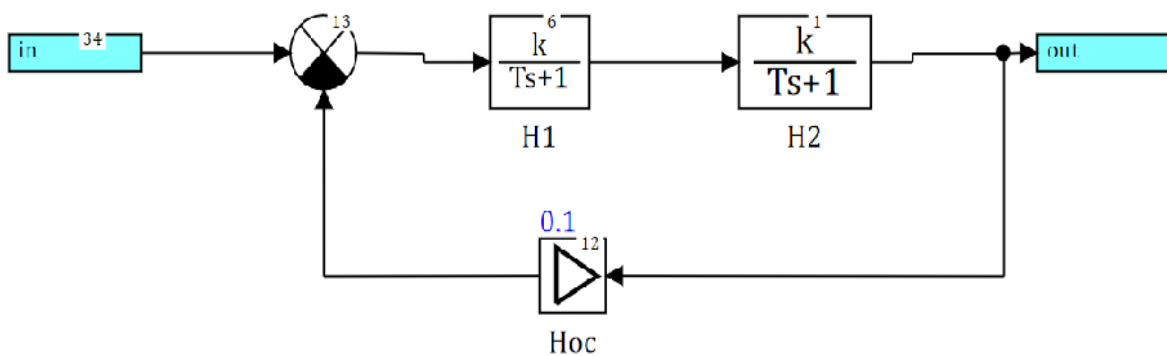


Рис. 2.9. Субмодель для исследования системы при разных коэффициентах передачи H_1

Другие subsystemы (рис 2.9) имеют такой же вид, но другие значения K_1 . Результаты расчета для трех коэффициентов усиления представлены на рис. 2.10.

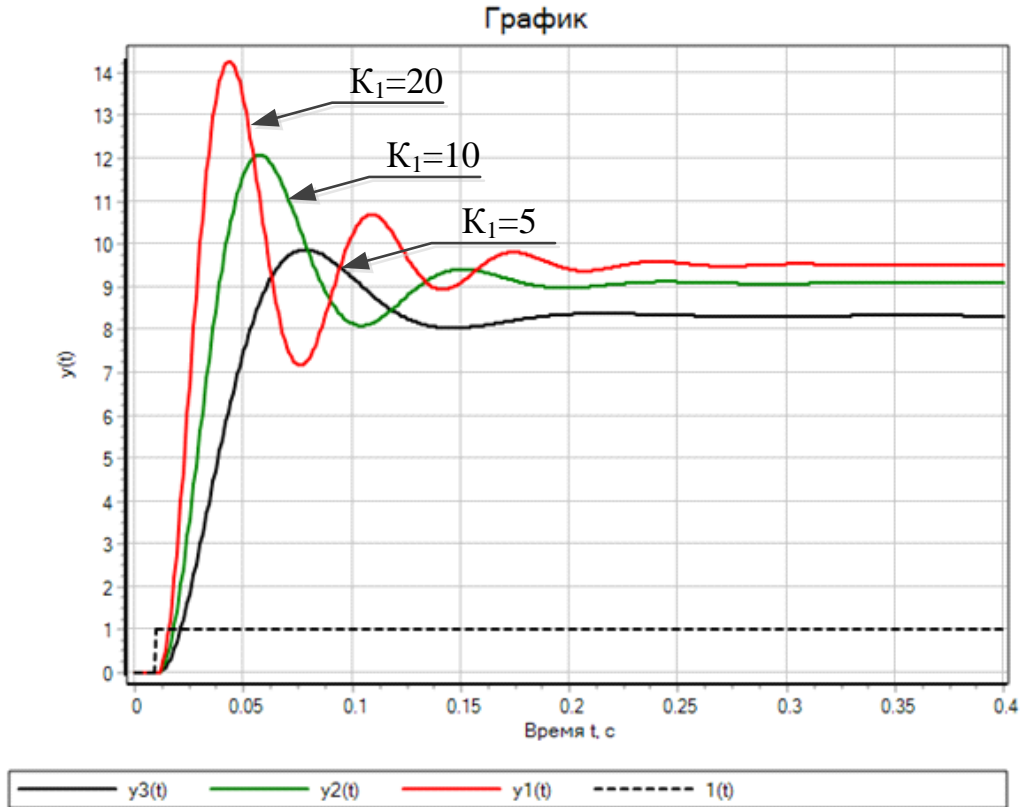


Рис. 2.10. Результаты расчета для трех коэффициентов усиления

3. Задание

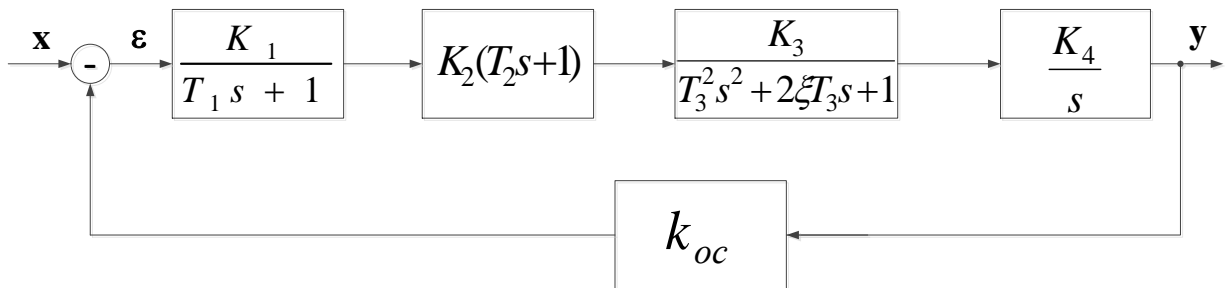


Рис. 2.11. Система автоматического управления

1. Для САУ, структурная схема которой показана на рис.2.11, получить выражения: передаточной функции, частотной передаточной функции и частотных характеристик.

2. Набрать модель разомкнутой САУ в SimInTech, структурная схема которой показана на рис.2.11, со следующими значениями параметров: $K_1 = 1$; $T_1 = 0,1$; $K_2 = 5$; $T_2 = 0,05$; $K_3 = 10$; $T_3 = 0,8$; $\xi = 0,5$; $K_4 = 0,2$; $K_{oc} = 1$.

3. Построить ЛАЧХ, ЛФЧХ разомкнутой системы.
4. Набрать модель замкнутой системы в SimInTech (рис.2.11) при изменении $K_1=1 \dots 10$;

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы с параметрами.
2. Набранные модели замкнутой и разомкнутой системы в SimInTech (рис.2.11)
3. Построенные характеристики системы.
4. Анализ частотных характеристик замкнутой САУ при изменении $K_1=1 \dots 10$;
5. Выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Как вычислить передаточные функции при последовательном и параллельном соединении звеньев?
2. Как определяются частотные характеристики различных соединений звеньев?
3. Как построить ЛАЧХ при последовательном соединении звеньев?
4. Каким образом выполняется приведение САУ к единичной обратной связи?
5. Как получить частотные характеристики САУ по передаточной функции?

Практическое занятие 3 АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Цель работы. Анализ устойчивости по частотным характеристикам и по полюсам. Знакомство с дополнительными возможностями SimInTech.

Для устойчивых систем необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения лежали слева от мнимой оси комплексной плоскости, то есть, были отрицательными. Если хотя бы один вещественный корень или пара комплексных сопряженных корней находится справа от мнимой оси, то система является неустойчи-

вой. Если имеется нулевой корень или пара чисто мнимых корней, то система считается нейтральной (находящейся на границе устойчивости и неустойчивости). Таким образом, мнимая ось комплексной плоскости является границей устойчивости [3].

1. Рассмотрим исследование системы (рис.3.1) с параметрами, приведёнными в таблице 3.1.

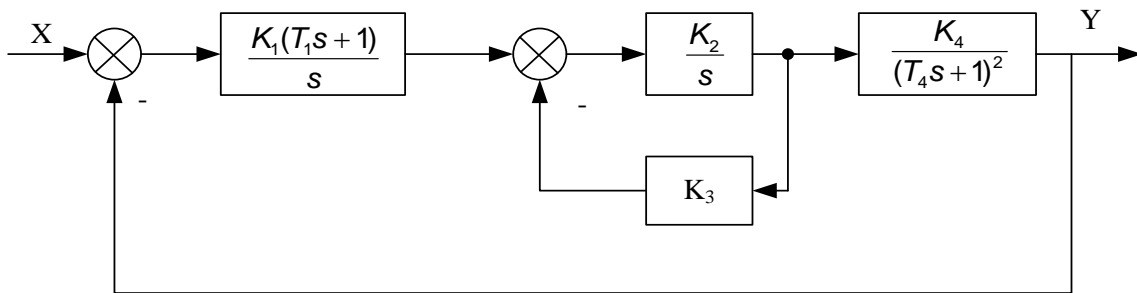


Рис. 3.1. Структурная схема САР

Таблица 3.1

K_1	K_2	K_3	K_4	$T_1(\text{сек})$	$T_4(\text{сек})$
3	3	20	5	0.25	0.15

После упрощения получим САР приведенную на рис. 3.2.

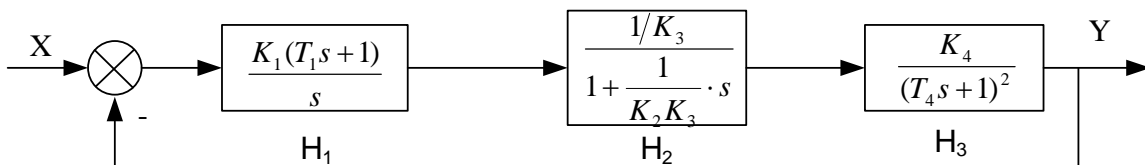


Рис. 3.2. Структурная схема преобразованной САР.

Структурная схема моделирования системы показана на рис. 3.3.

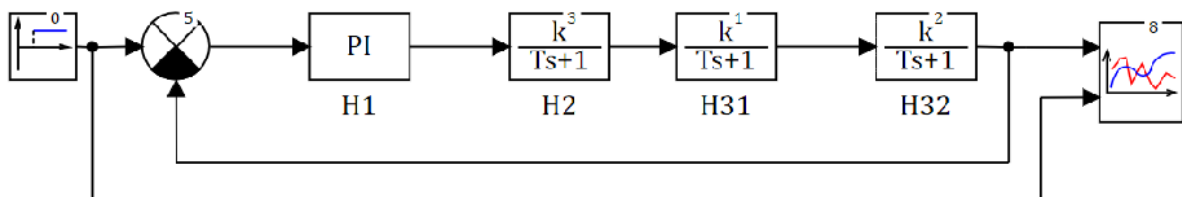


Рис. 3.3. Структурная схема моделирования САР

Результаты моделирования показаны на рис. 3.4.

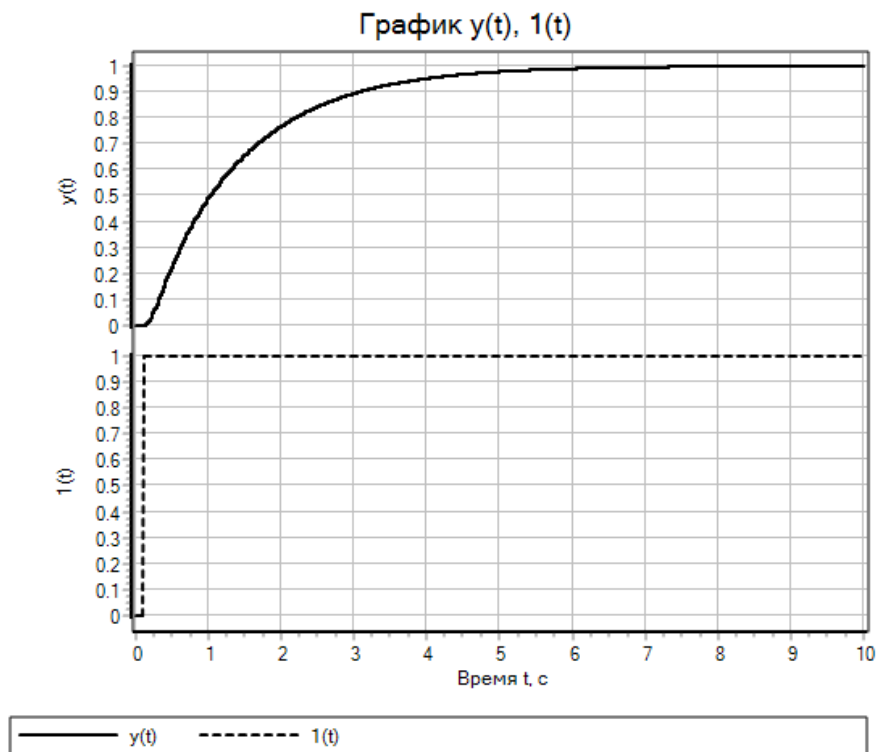


Рис. 3.4. Графики переходных процессов в САР

Вычислим в системе SimInTech передаточные функции, годограф Найквиста и логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы. Составим структурную схему модели, показанную на рис. 3.5.

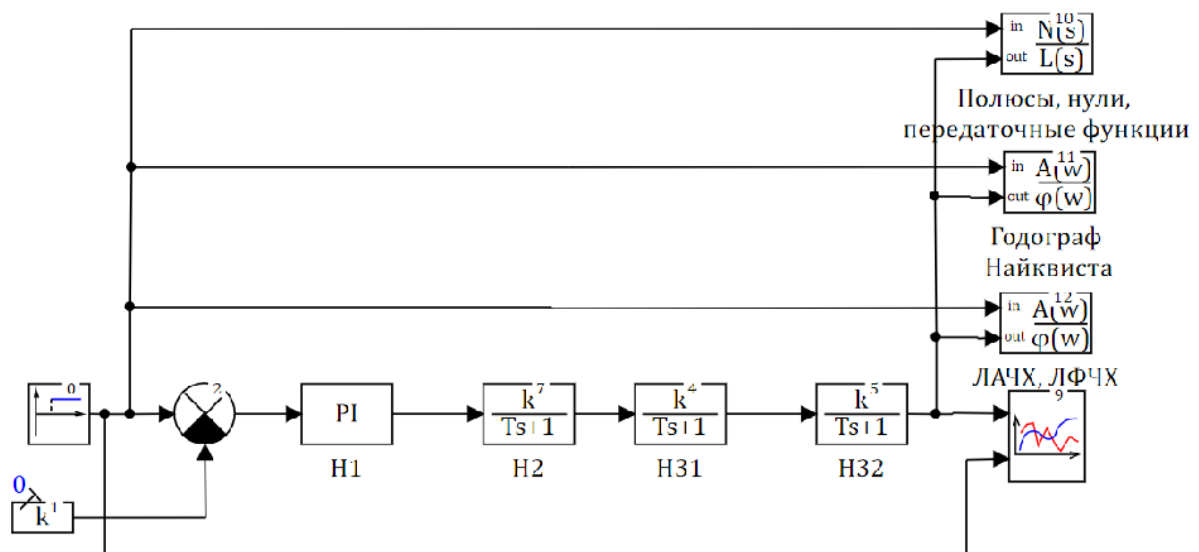


Рис. 3.5. Структурная схема модели разомкнутой системы

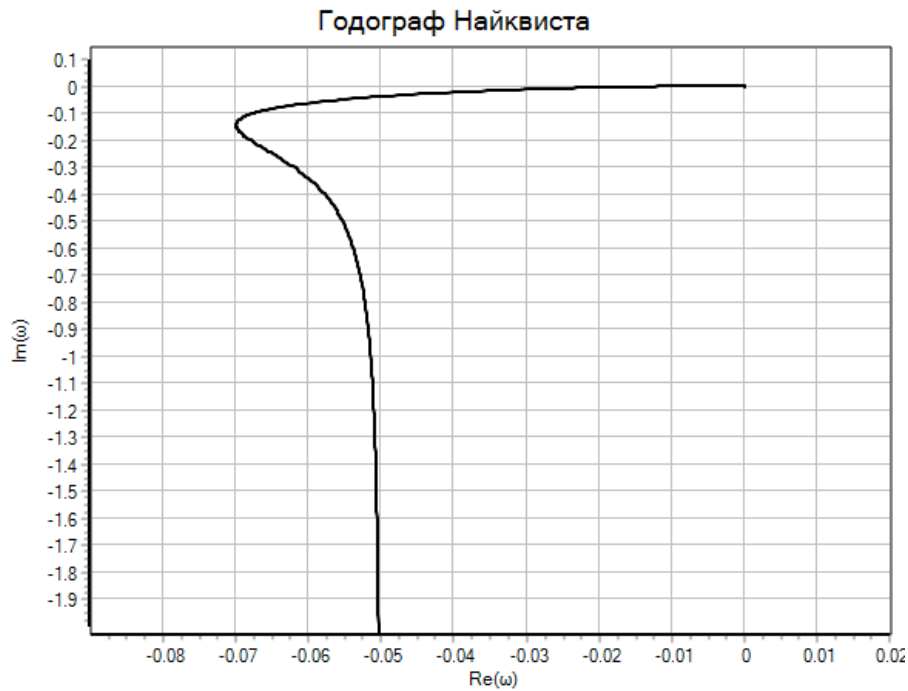


Рис. 3.6. Годограф Найквиста

Линия годографа разомкнутой САР не охватывает точку с координатами $(-1, 0 \cdot j)$, следовательно, САР в замкнутом состоянии будет устойчива.

Графики ЛАЧХ и ЛФЧХ. представлены на рис. 3.7.

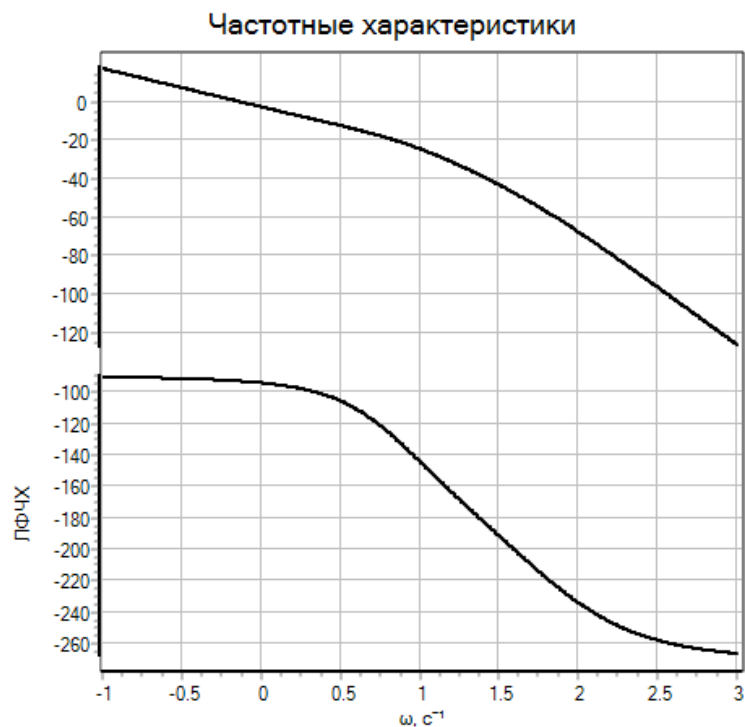


Рис. 3.7. Графики ЛАЧХ, ЛФЧХ

Для определения запасов по амплитуде и фазе необходимо выполнить нажатие правой кнопкой мыши на график ЛАЧХ, ЛФЧХ и выбрать пункт «Анализ данных» -> «Табличный просмотр» и определить запасы по фазе (в градусах) и амплитуде (в дБ). Эти запасы должны составлять ~ 94 градуса и ~ 30...40 дБ, соответственно. (Рис.3.8 и Рис.3.9)

Табличный просмотр данных

Тип выборки данных:

№	ЛАЧХ:Х	ЛАЧХ:У	ЛФЧХ:Х	ЛФЧХ:У
296	23.3345806228096	-37.4733570984044	23.3345806228096	-179.128135372261
297	23.7684028662483	-37.7955362676911	23.7684028662483	-179.866597954195
298	24.2102904673614	-38.1190478586877	24.2102904673614	-180.604282886949
299	24.660393372343	-38.4438912351013	24.660393372343	-181.341236432639
300	25.1188643150954	-38.7700664878559	25.1188643150954	-182.077503766679
301	25.585858869056	-39.0975744205548	25.585858869056	-182.813128705758
302	26.0615354999885	-39.4264165330974	26.0615354999885	-183.54815344131
303	26.5460556197549	-39.7565950034754	26.5460556197549	-184.282618278893
304	27.0395836410879	-40.0881126677752	27.0395836410879	-185.01656138394
305	27.5422870333812	-40.4209729984138	27.5422870333812	-185.750018534342

Рис. 3.8 Таблица значений ЛАЧХ и ЛФЧХ для определения запаса по амплитуде

Табличный просмотр данных

Тип выборки данных:

№	ЛАЧХ:Х	ЛАЧХ:У	ЛФЧХ:Х	ЛФЧХ:У
104	0.67920363261718	0.894420890997551	0.67920363261718	-92.6474100436908
105	0.691830970918932	0.735617013687609	0.691830970918932	-92.6985554017521
106	0.704693068967142	0.576854321907706	0.704693068967142	-92.7507571412364
107	0.717794291271357	0.418134088832602	0.717794291271357	-92.8040405290551
108	0.731139083483413	0.259457615792335	0.731139083483413	-92.858431587604
109	0.744731973905984	0.100826231962877	0.744731973905984	-92.9139571219636
110	0.758577575029179	-0.05775870604446...	0.758577575029179	-92.9706447480821
111	0.772680585095697	-0.216295814704125	0.772680585095697	-93.0285229219618
112	0.787045789695093	-0.374783684217336	0.787045789695093	-93.0876209698723
113	0.801678063387674	-0.533220879283573	0.801678063387674	-93.1479691196096
114	0.816582371358587	-0.691605940013234	0.816582371358587	-93.2095985328193

Рис. 3.9 Таблица значений ЛАЧХ и ЛФЧХ для определения запаса по фазе

Рассмотрим определение полюсов, нулей и коэффициентов передаточных функций для разомкнутой САР.

Запустим модель (рис.3.5) на расчёт. Двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку «Построение передаточных функций» открываем информационное окно с результатами расчета параметров передаточных функций. В окне «Коэффициенты передаточных функций» приведены результаты расчета коэффициентов числителей и знаменателей передаточной функции по возрастающим степеням s , полюсы и нули передаточных функций САР (рис.3.10).

Коэффициенты передаточной функции

Текущее время расчёта 10

Название	Имя	Формула
Числитель $W(s)$	TransitionFuncsBlock9.Ns	[[1996.008 , 499.002]]
Знаменатель $W(s)$	TransitionFuncsBlock9.Ls	[[0 , 2661.344 , 842.84764 , 73.213573 , 1]]
Нули (корни уравнения $N(s) = 0$)	TransitionFuncsBlock9.Zeros	[[-4+0j]]
Полюсы (корни уравнения $L(s) = 0$)	TransitionFuncsBlock9.Poluses	[[-6.6666667+5.0352595E-7i , -6.6666667-5.0352595E-7i , -59.88024+0i , 0+0j]]
Матрица А (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock9.A	[[-6.6666667 , 0 , 0 , 33.333333],[6.6666667 , -6.6666667 , 0 , 0],[0 , 0 , 0 , 0],[0 , 0 , 2.994012 , -59.88024]]
Матрица В (матрица входов)	TransitionFuncsBlock9.B	[[0],[0],[3],[2.245509]]
Матрица С (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock9.C	[[0 , 1 , 0 , 0]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock9.D	[[0]]

Рис. 3.10. Результаты расчета параметров передаточной функции для разомкнутой САР

Вычислим в системе SimInTech передаточные функции замкнутой системы. Структурная схема модели замкнутой системы представлена на рис. 3.11.

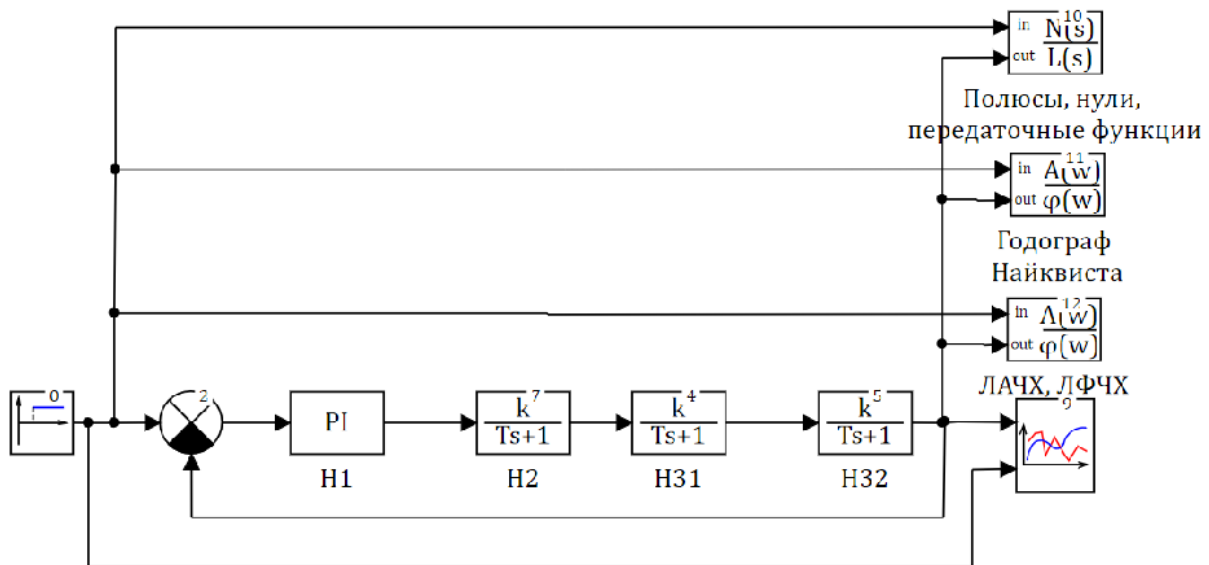


Рис. 3.11. Структурная схема модели замкнутой системы

Результаты расчета параметров передаточной функции для замкнутой САР даны на рис. 3.12.

Коэффициенты передаточной функции

Текущее время расчёта 10		
Название	Имя	Формула
Числитель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ns	[[1996.008 , 499.002]]
Знаменатель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ls	[[1996.008 , 3160.346 , 842.84764 , 73.213573 , 1]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Zeros	[-4+0i]]
Полюсы (корни уравнения L(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Poluses	[[-0.78473807+0i , -6.1925599+2.0033901i , -6.1925599-2.0033901i , -60.043715+0i]]
Матрица A (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock9.A	[[-6.6666667 , 0 , 33.333333 , 0],[6.6666667 , -6.6666667 , 0 , 0],[0 , -2.245509 , -59.88024 , 2.994012],[0 , -3 , 0 , 0]]
Матрица B (матрица входов)	TransitionFuncsBlock9.B	[[0],[0],[2.245509],[3]]
Матрица C (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock9.C	[[0 , 1 , 0 , 0]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock9.D	[[0]]

Рис. 3.12. Результаты расчета параметров передаточной функции для замкнутой САР

Для вычисления в системе SimInTech передаточной функции по ошибке, составим структурную модель, приведенную на рисунке 3.13.

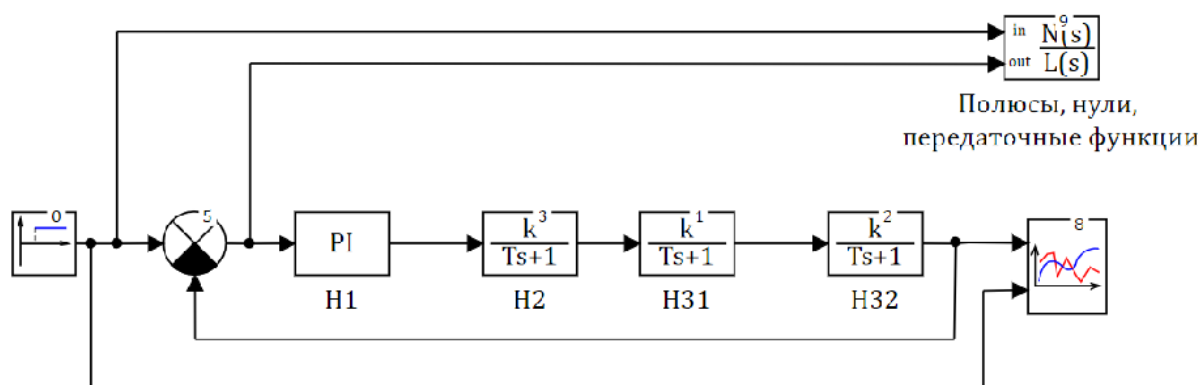


Рис. 3.13. Структурная схема модели замкнутой системы для вычисления передаточной функции по ошибке

Коэффициенты передаточной функции

Текущее время расчёта 10		
Название	Имя	Формула
Числитель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ns	[[0 , 2661.344 , 842.84764 , 73.213573 , 1]]
Знаменатель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ls	[[1996.008 , 3160.346 , 842.84764 , 73.213573 , 1]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Zeros	[[-6.6666667+5.0352595E-7i , -6.6666667-5.0352595E-7i , -59.88024+0i , 0+0i]]
Полюсы (корни уравнения L(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Poluses	[[-0.78473807+0i , -6.1925599+2.0033901i , -6.1925599-2.0033901i , -60.043715+0i]]
Матрица A (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock9.A	[[-6.6666667 , 0 , 33.333333 , 0],[6.6666667 , -6.6666667 , 0 , 0],[0 , -2.245509 , -59.88024 , 2.994012],[0 , -3 , 0 , 0]]
Матрица B (матрица входов)	TransitionFuncsBlock9.B	[[0],[0],[2.245509],[3]]
Матрица C (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock9.C	[[0 , -1 , 0 , 0]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock9.D	[[1]]

Рис. 3.14. Результаты расчета параметров передаточной функции по ошибке

Таблица 3.2

№	K_1	K_2	K_3	K_4	$T_1(\text{сек})$ с	$T_4(\text{сек})$
1	30	3	10	3	1	0.15
2	40	2	5	4	0.75	0.1
3	50	3	15	5	0.25	0.2
4	75	3	18	6	0.75	0.35
5	100	1	20	1	0.25	0.45
6	5	3	25	2	0.15	0.15
7	10	4	20	5	3	0.55
8	15	2	10	8	0.25	0.15
9	15	3	2	7	1.25	0.65
10	18	5	20	5	0.55	0.25

2. Содержание отчета

1. Модель (рис. 3.1.) САР. Вариант задается преподавателем (Таблица 3.2.).

2. Анализ устойчивости системы в замкнутом состоянии.

3. Вычисленный критический коэффициент усиления.

4. Выводы.

3. Контрольные вопросы

1. Понятие устойчивости автоматической системы.

2. Необходимое и достаточное условия устойчивости.

3. Критерий устойчивости Гурвица.

4. Определение запаса устойчивости автоматической системы.

5. Как определить критический коэффициент усиления?

Практическое занятие 4

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНЫХ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ

1. Цель работы. Использование критериев устойчивости Найквиста и Михайлова. Исследование влияния параметров систем на их устойчивость.

2. Содержание работы

1) Домашнее задание

1.1. По передаточной функции разомкнутой системы записать ее характеристический полином $D(s)$, определить его коэффициенты, выделить мнимую и вещественную составляющие.

1.2. Без применения программных инструментов построить асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ для передаточных функций:

$$H(s) = 100 \frac{0,02s + 1}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,2s + 1)};$$

$$H(s) = 10 \frac{4s + 1}{0,1s + s};$$

1.3. Для передаточных функций $H(s)$ вывести передаточные функции соответствующих замкнутых систем $H_{\text{зам}}(s)$.

2) Примеры использования критериев устойчивости Найквиста и Михайлова

Рассмотрим анализ устойчивости системы с помощью критерия устойчивости Михайлова.

Передаточная функция разомкнутой системы охваченной единичной обратной связью имеет вид:

$$H_p(s) = \frac{3}{0,02s^4 + 0,25s^3 + s^2 + 5s + 1};$$

Составим структурную модель для анализа устойчивости системы с помощью критерия устойчивости Михайлова (рис.4.1).

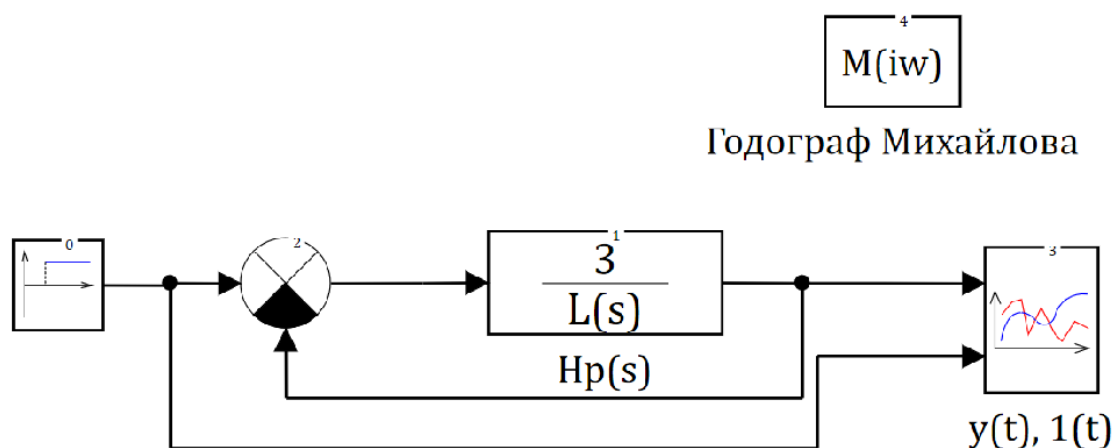


Рис. 4.1. Структурная модель для анализа устойчивости системы с помощью критерия устойчивости Михайлова

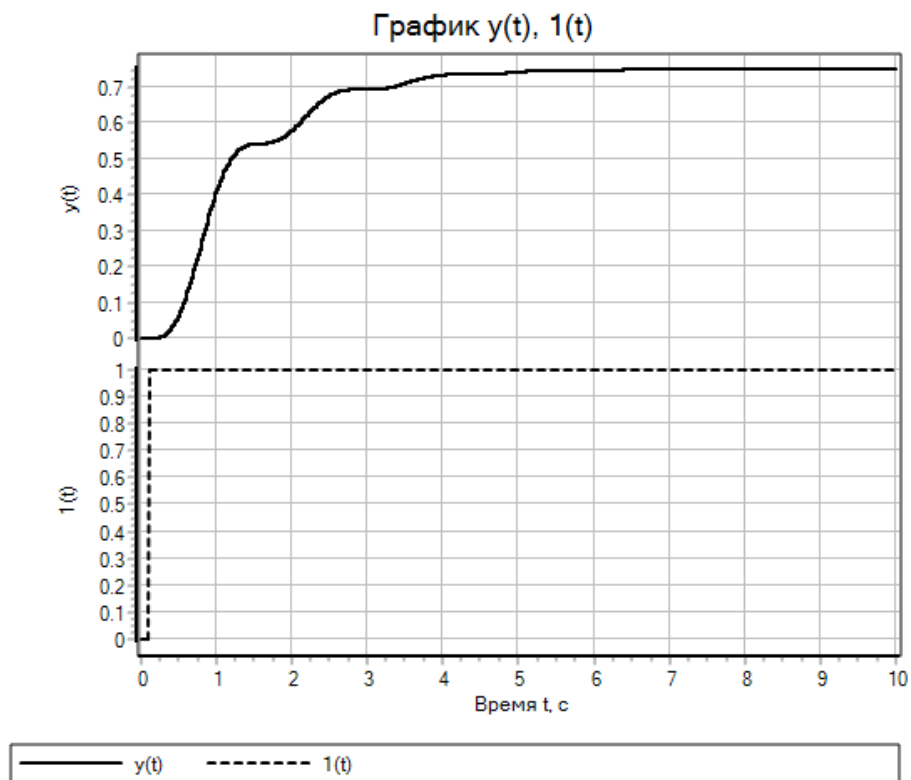


Рис. 4.2. Графики $y(t)$ и $1(t)$

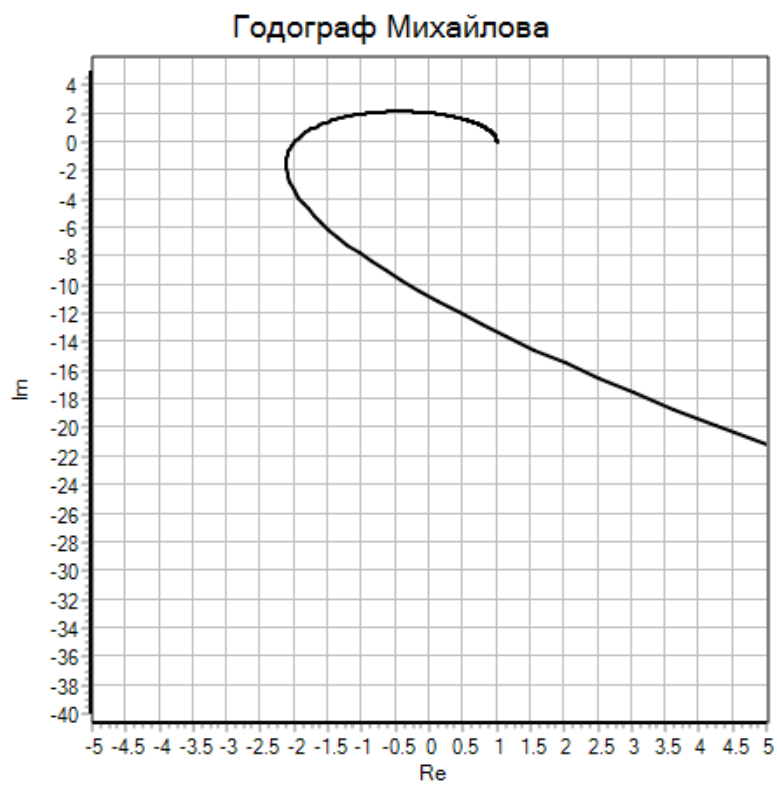


Рис. 4.3. Годограф Михайлова

При необходимости точных значений годографа Михайлова можно использовать активный курсор. Его использование показано на рисунках 4.4а и 4.4б.

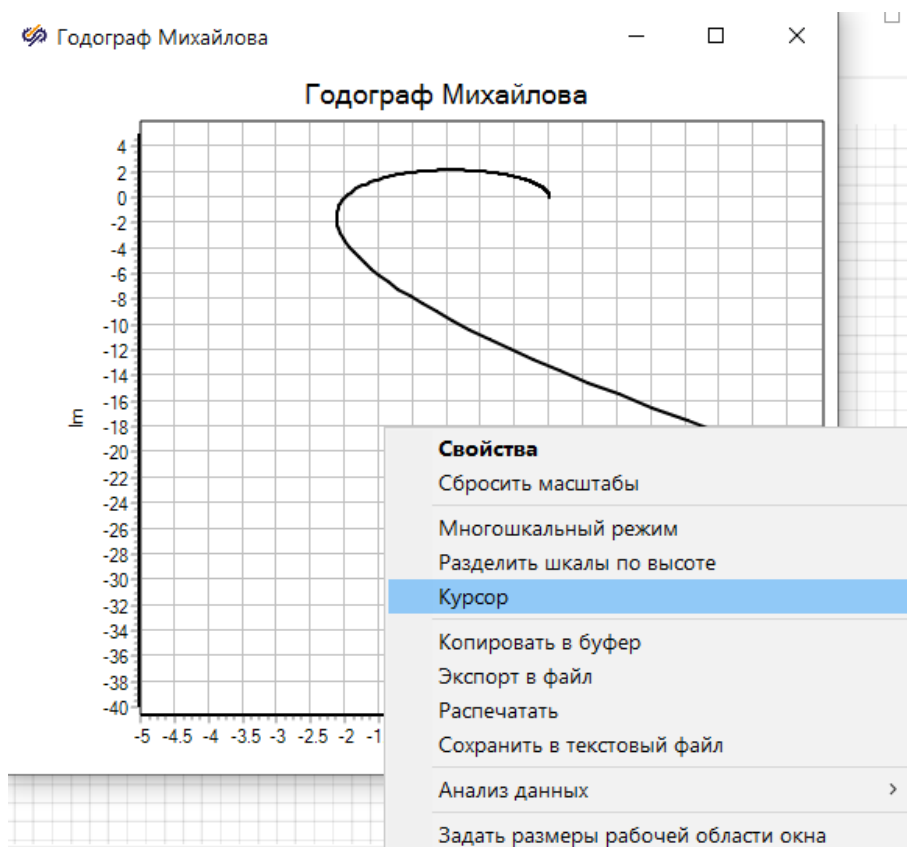


Рис. 4.4а. Годограф Михайлова

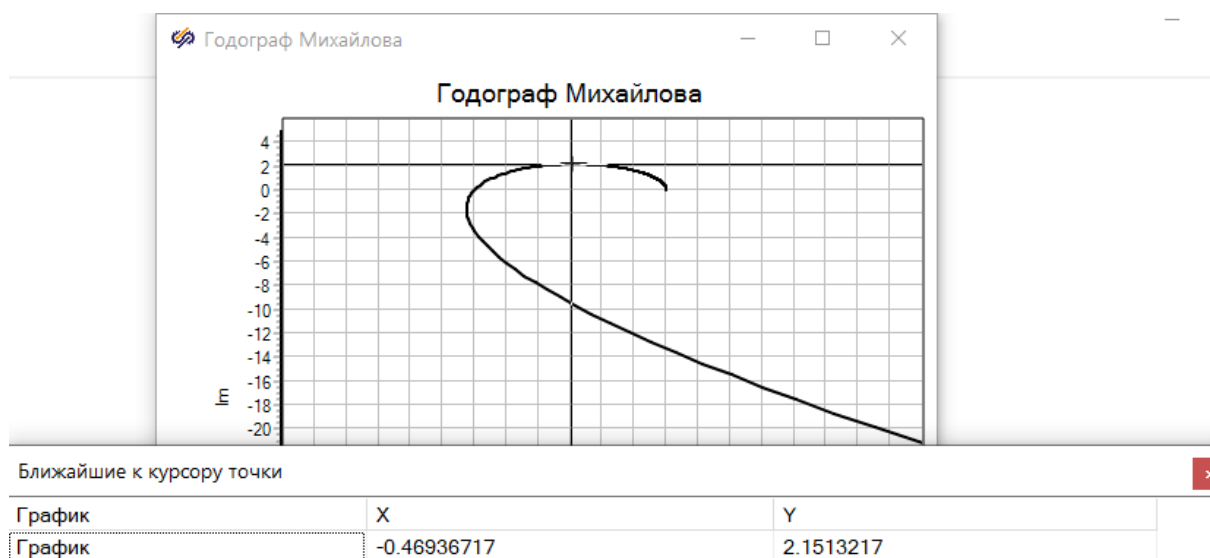


Рис. 4.4б. Годограф Михайлова

Вычислим в системе SimInTech годограф Найквиста разомкнутой системы. Составим структурную схему модели, показанную на рис. 3.5.

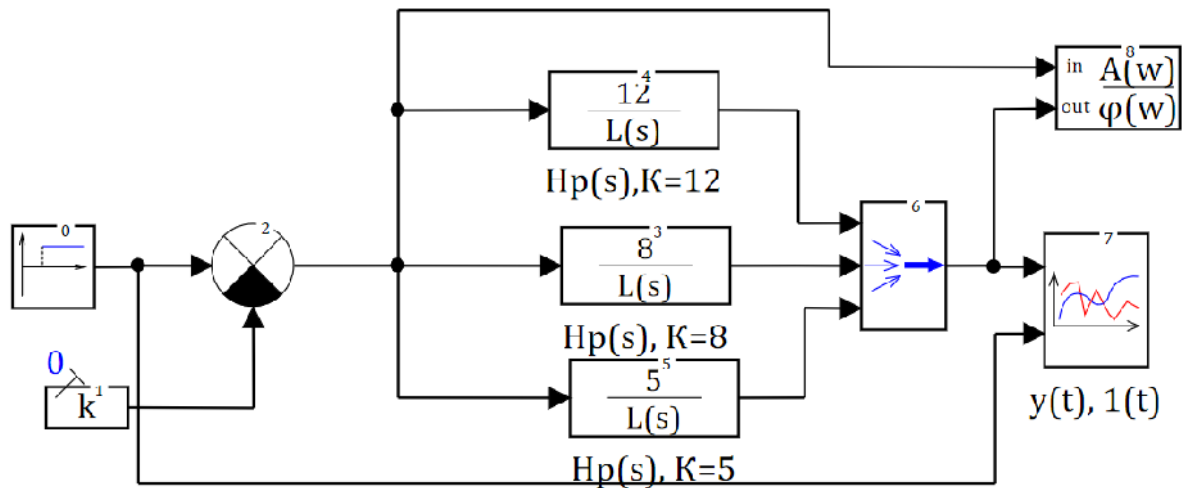


Рис. 4.5. Структурная схема модели разомкнутой системы

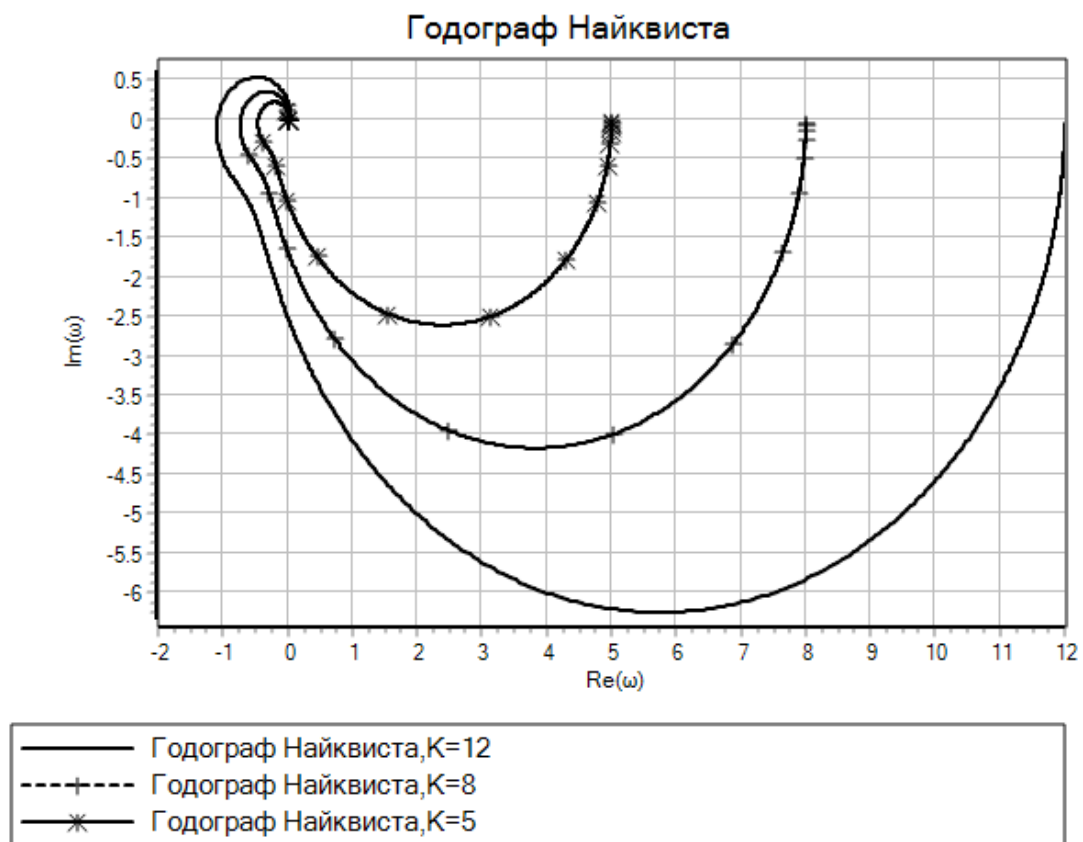


Рис. 4.6. Годограф Найквиста

Линия годографа разомкнутой САР при коэффициенте усиления $K=5$ и 8 не охватывает точку с координатами $(-1, 0 \cdot j)$, следовательно, САР в замкнутом состоянии будет устойчива. При коэффициенте усиления $K=12$ охватывает точку с координатами $(-1, 0 \cdot j)$, следовательно, САР в замкнутом состоянии будет не устойчива.

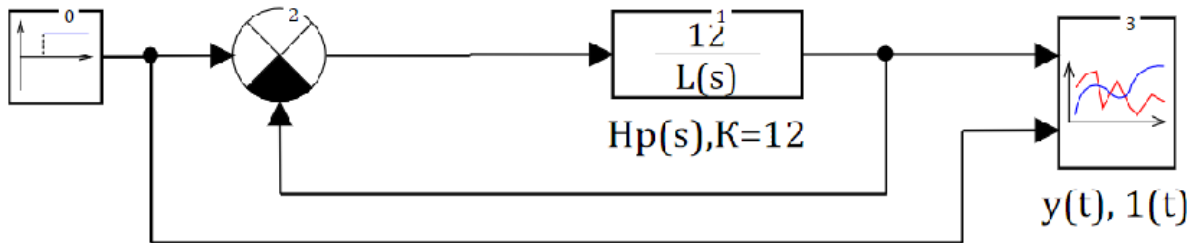


Рис. 4.7. Структурная схема модели исследуемой системы при $K = 12$

Графики (рис.4.8 и рис.4.9), полученные при расчете на модели исследуемой системы (рис.4.7) подтверждают сделанные выводы.

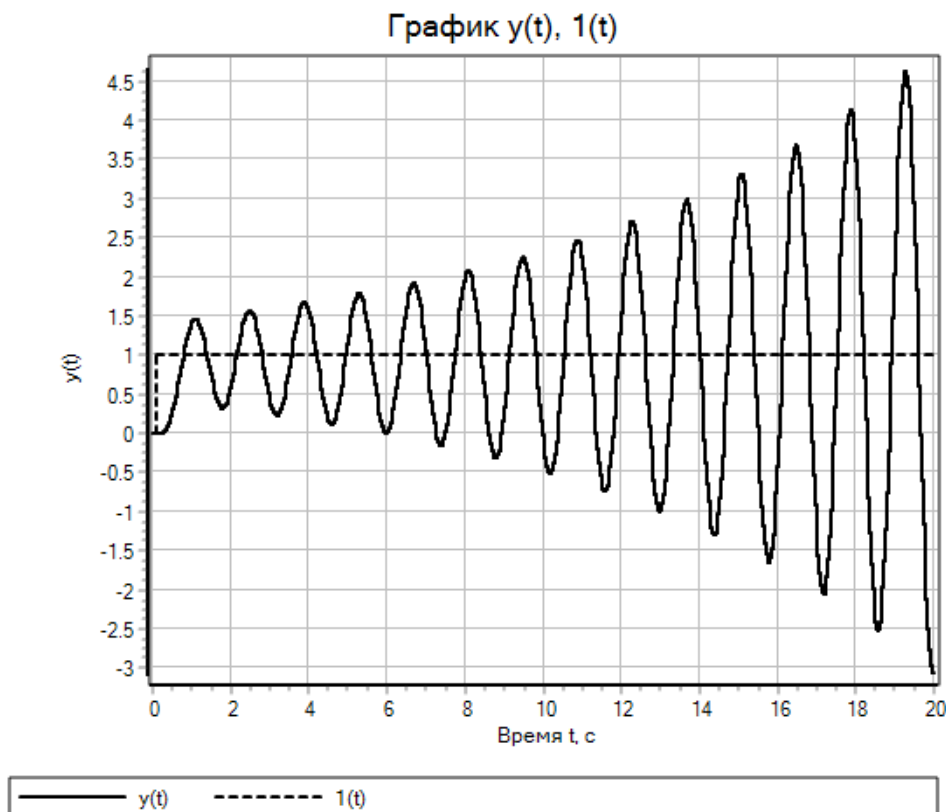


Рис. 4.8. Графики исследуемой системы при $K=12$.

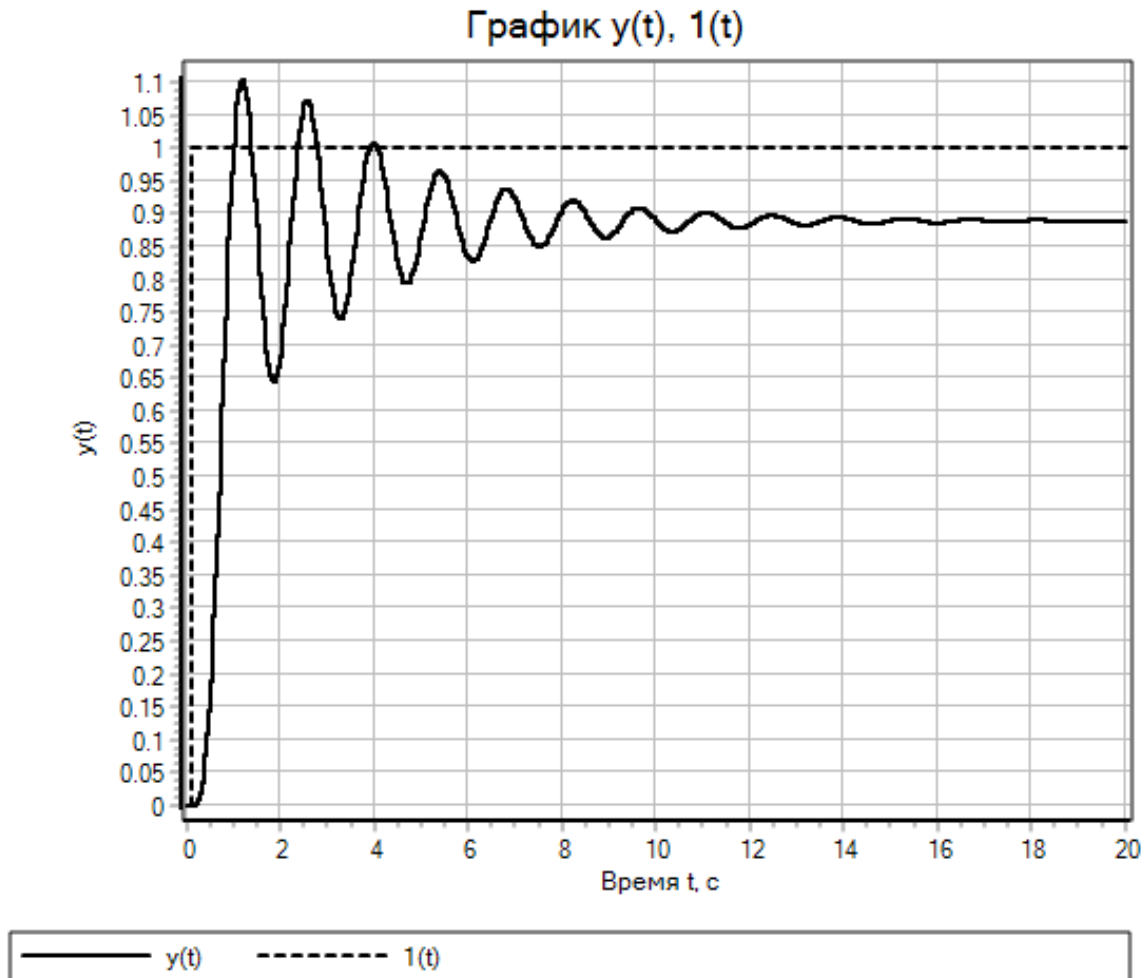


Рис. 4.9. Графики исследуемой системы при $K=8$.

3. Задание

1. Исследовать на устойчивость замкнутую систему, охваченную единичной отрицательной обратной связью (таблица 4.1), применяя критерий устойчивости Михайлова.

2. Исследовать на устойчивость замкнутую систему, охваченную единичной отрицательной обратной связью (таблица 4.1), применяя критерий устойчивости Найквиста.

2. Изучить влияние коэффициента усиления и постоянных времени на устойчивость системы и вид годографа Найквиста.

5. Исследовать на устойчивость замкнутую систему, охваченную единичной отрицательной обратной связью, используя логарифмические частотные характеристики.

Передаточные функции разомкнутой системы приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№	Передаточная функция разомкнутой системы
1	$H(s) = \frac{10(0,01s + 1)}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,2s + 1)};$
2	$H(s) = \frac{50(0,04s + 1)}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,3s + 1)};$
3	$H(s) = \frac{150}{s(s + 1)(0,2s + 1)^2};$
4	$H(s) = \frac{50(0,2s + 1)}{s(0,05s + 1)(0,01s^2 + 0,9s + 1)};$
5	$H(s) = \frac{10}{s(0,5s + 1)(s + 1)^2};$
6	$H(s) = \frac{10(0,01s + 1)}{s(0,1s + 1)(s + 1)^2};$

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Домашнее задание.
2. Передаточную функцию, записанную в виде произведения типовых динамических звеньев (нулей и полюсов её числителя и знаменателя).
3. Исследование на устойчивость с помощью критерия Найквиста.
4. Анализ влияние коэффициента усиления и постоянных времени на устойчивость системы и вид годографа Найквиста
5. Построенные логарифмические частотные характеристики с определёнными запасами устойчивости по амплитуде и фазе.
6. Выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Понятие устойчивости автоматической системы. Необходимое и достаточное условия устойчивости.
2. Определение устойчивости автоматической системы по частотной передаточной функции. Алгебраические критерии устойчивости.
3. Критерий устойчивости Гурвица.
4. Критерий устойчивости Михайлова.

5. Формулировка и графическая иллюстрация критерия устойчивости Найквиста.

6. Показатель колебательности. Оценка запаса устойчивости по частотным передаточным функциям.

7. Определение запаса устойчивости автоматической системы по амплитудно-фазовой характеристике. Запас устойчивости по амплитуде и по фазе.

Практическое занятие 5 СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Цель работы. Изучение метода логарифмических частотных характеристик и программных методов для синтеза САР.

2. Содержание работы

Структура автоматической системы, для которой выполняется синтез корректирующего устройства, показана на рис.5.1. Для каждого варианта (табл.5.1) задана передаточная функция объекта управления $H_0(s)$.

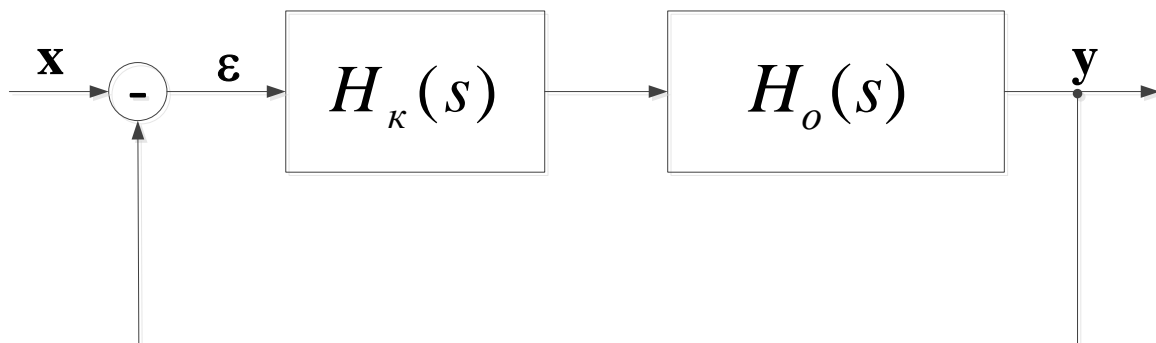


Рис. 5.1. Структурная схема системы с последовательным корректирующим устройством.

Желаемыми показателями качества системы для всех вариантов являются первый порядок астатизма и перерегулирование не более 5%. Желаемое время максимума t_m различно для каждого варианта (см. табл.5.1). Необходимо найти такую передаточную функцию корректирующего устройства $H_k(s)$, при которой обеспечивались бы заданные показатели качества.

Исходные данные к работе

Вариант	$H_0(s)$	t_m, c
1	$\frac{0.5}{(0.5s+1)(0.01s+1)}$	0.1
2	$\frac{0.1}{(s+1)s}$	0.5
3	$\frac{2}{(1.5s+1)s}$	0.3
4	$\frac{5}{(2s+1)(0.5s+1)}$	0.4
5	$\frac{0.02}{(0.8s+1)^2}$	0.2

Желаемая асимптотическая ЛАЧХ разомкнутой системы $L_{ж}(\omega)$, которая обеспечивает выполнение предъявляемых к системе требований, представлена на рис.5.2.

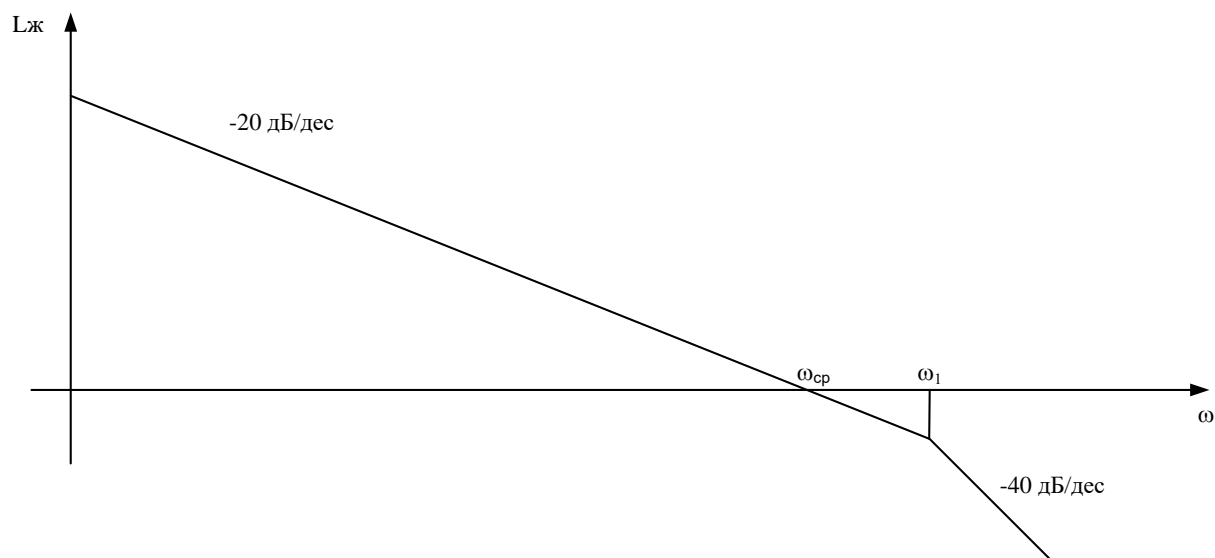


Рис. 5.2. Желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы

Наклон низкочастотного участка ЛАЧХ « -20 дБ/дек» обеспечивает первый порядок астатизма. Небольшое перерегулирование (не более 5%) обеспечивается определенным удалением сопрягающей частоты ω_1 от частоты среза $\omega_{ср}$. Рекомендуется принять $\omega_1 = 2\omega_{ср}$ (т.е. настройка на модульный оптимум). Выбор частоты среза определяет время максимума переходной функции в соответствии с формулой

$$\omega_{cp} = \frac{\pi}{t_m}$$

Пример расчета

Располагаемая передаточная функция объекта:

$$H_{зад}(s) = \frac{300}{s \cdot (T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad T_2 > T_3 \quad T_2 = 0.1c \quad T_3 = 0.001c$$

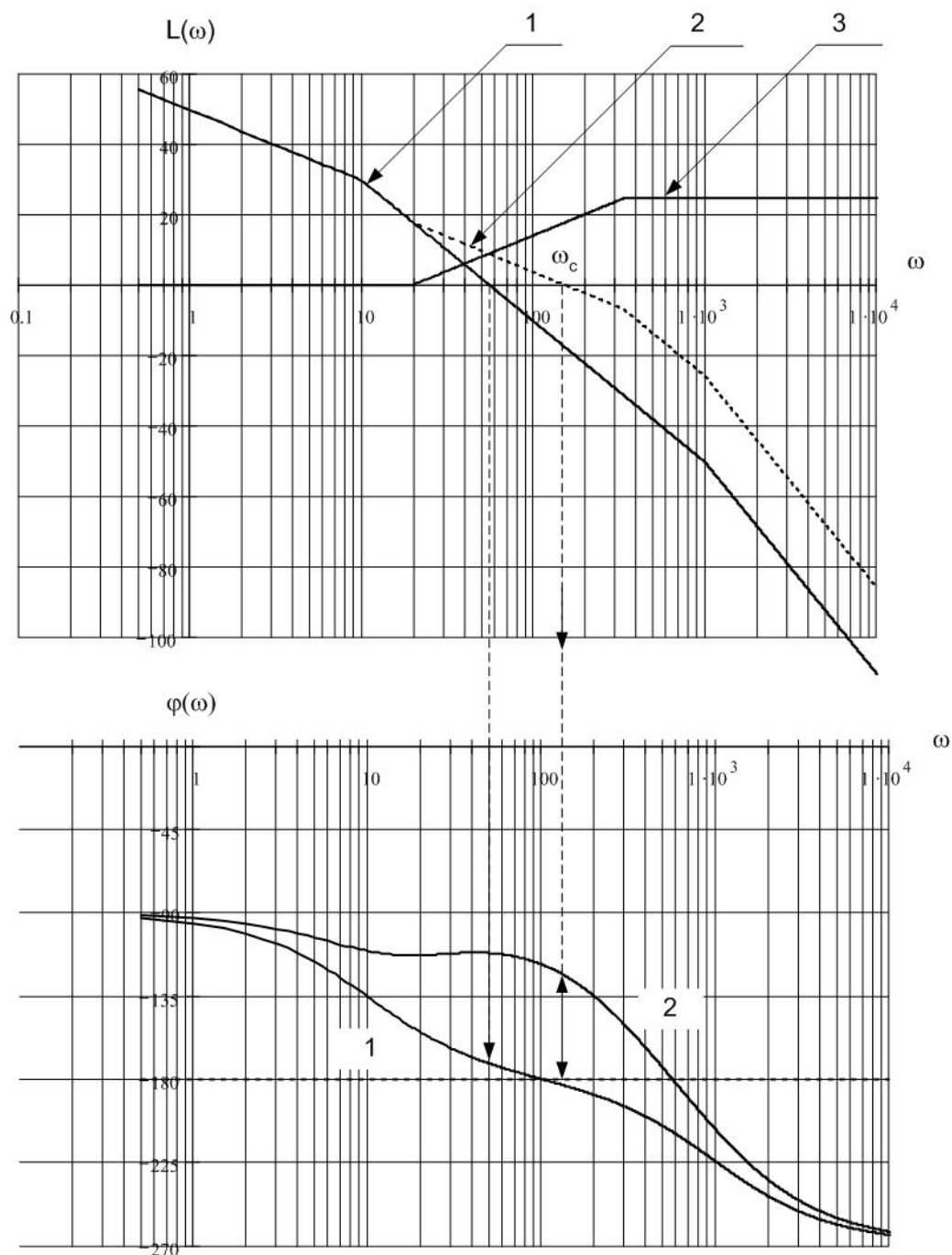


Рис. 5.3. ЛЧХ: желаемая, объекта и корректирующего звена разомкнутой Системы

На рис. 5.3 представлены следующие кривые:

1-ЛАЧХ и ЛФЧХ объекта;

2-желаемые ЛАЧХ и ЛФЧХ;

3-ЛАЧХ корректирующего звена ($L_{\text{жел.}} - L_{\text{об.}}$)

На рис 5.4 представлены переходные характеристики для скорректированной системы (1) и объекта (2):

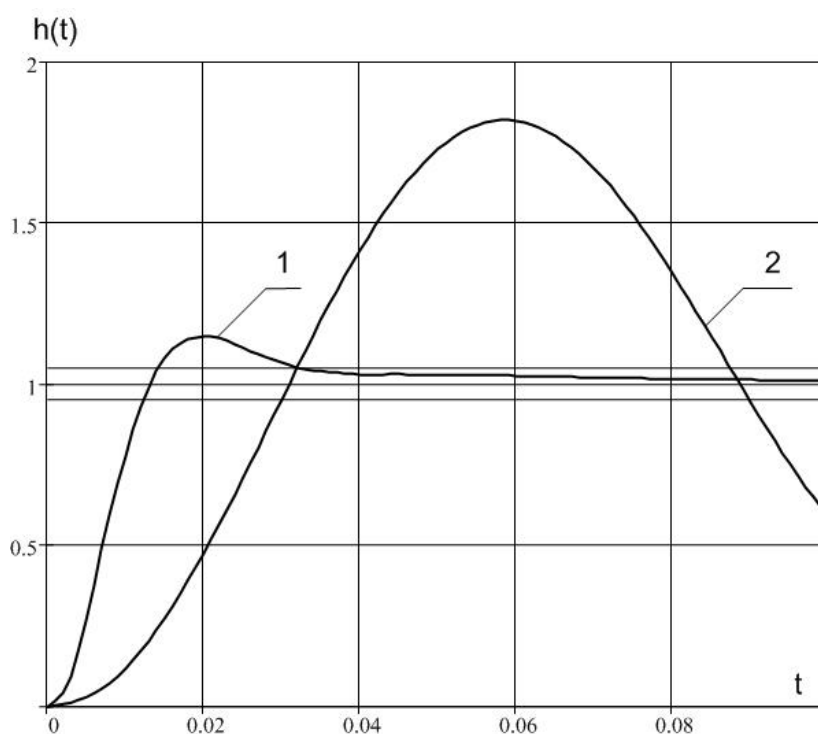
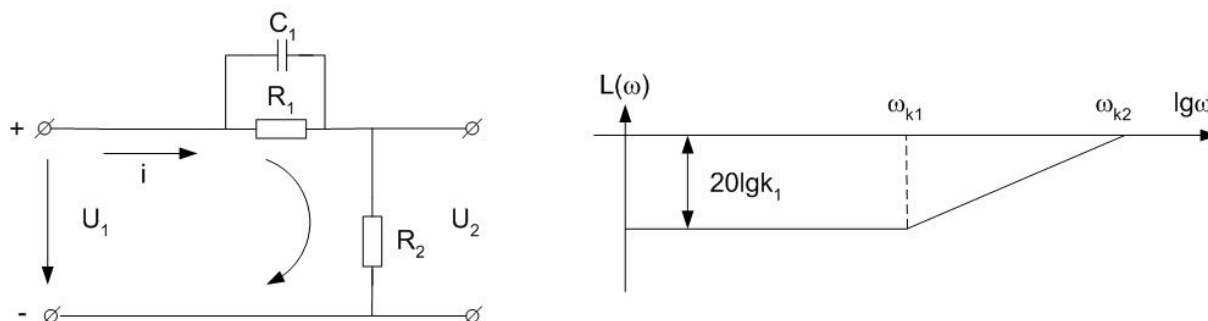


Рис. 5.4. Переходные характеристики для скорректированной системы (1) и объекта (2)

Расчет корректирующего устройства представлен ниже:



По таблице выбираем корректирующее устройство и рассчитываем его параметры.

$$H(s) = \frac{k_1(T_1s + 1)}{T_2s + 1} \quad T_1 = R_1C_1 \quad T_2 = k_1T_1$$

$$20\lg k_1 = 20\lg \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad T_1 = \frac{1}{\omega_{k1}} = R_1C_1 \quad T_2 = k_1T_1 = \frac{1}{\omega_{k2}}$$

3. Задание

В расчетной части выполняется синтез корректирующего устройства ручным способом (без использования компьютера).

- 1) Постройте желаемую ЛАЧХ разомкнутой системы $L_{ж}(\omega)$.
- 2) Постройте ЛАЧХ объекта управления $L_o(\omega)$ на одной координатной плоскости с $L_{ж}(\omega)$.

3) Путем вычитания графиков определите ЛАЧХ корректирующего устройства:

$$L_{к}(\omega) = L_{ж}(\omega) - L_o(\omega).$$

4) По полученной ЛАЧХ корректирующего устройства определите его передаточную функцию $H_{к}(s)$. Она должна получиться физически реализуемой (порядок числителя не превышает порядка знаменателя).

После определения ЛАЧХ корректирующего устройства необходимо выполнить проверку, путем моделирования. В SimInTech набираем схему модели системы (рис.5.1) с найденной передаточной функцией корректирующего устройства. Результаты моделирования системы, должны соответствовать заданию. Если это не так, необходимо проверить правильность выполнения предыдущих этапов.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать

1. Название и цель работы;
2. Постановку задачи синтеза и исходные данные;
3. Графики ЛАЧХ (процесс синтеза) выполненные на миллиметровой бумаге;
4. Найденную передаточную функцию корректирующего устройства (результат синтеза) и элемент, с помощью которого его можно реализовать;
5. Схему модели системы;
6. График переходной функции, полученной путем моделирования;
7. Выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Какие вам известны способы включения корректирующих устройств в САУ?
2. Как влияет регулирование по производным от ошибки на динамические показатели САУ в различных режимах регулирования?
3. Какие существуют виды обратных связей?
4. Как влияют обратные связи на показатели качества САУ?
5. Как выполнить расчет эквивалентной обратной связи?
6. Что такое комбинированное управление в САУ?

Практическое занятие 6 ИССЛЕДОВАНИЕ П-, И-, ПИ- РЕГУЛЯТОРОВ

1. Цель работы

Изучение использования П-, И-, ПИ- регуляторов.

2. Содержание работы

В качестве объекта управления выберем колебательное звено с передаточной функцией.

$$H_o = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} = \frac{10}{0.01s^2 + 0.08s + 1}$$

Структурная схема системы с регулятором в общем виде показана на рис. 6.1.

Основной целью использования регуляторов является уменьшение статической погрешности. Кроме того, подбирая параметры регуляторов, можно улучшить показатели переходного процесса: время регулирования и перерегулирование.

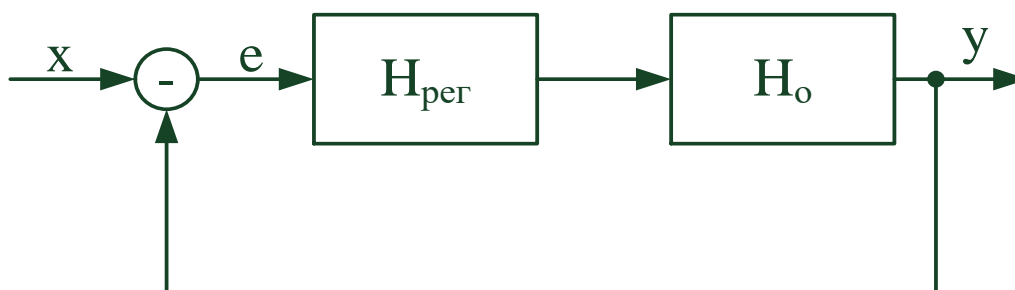


Рис. 6.1. Структурная схема системы с регулятором

Статическая погрешность $\varepsilon_{ст}$ представляет собой разность между сигналом, подаваемым на вход системы, и сигналом, установившемся на ее выходе после окончания переходного процесса.

Время регулирования t_p – это время, в течение которого кривая переходного процесса входит в пределы, определяющие точность регулирования. Эти пределы устанавливаются разработчиком системы. В данной работе точность регулирования, т.е. максимально допустимое отклонение кривой переходного процесса следует задавать не менее $\pm 5\%$ от установившегося значения. Таким образом, можно считать, что переходной процесс закончился после того, как кривая перестала выходить из заданного диапазона [3].

Перерегулированием (σ) называется максимальное отклонение переходной характеристики от установившегося значения:

$$\sigma = \frac{\Delta Y_{вых}}{Y_{вых.уст.}} 100 \%$$

Модель системы для исследования в SimInTech показана на рис 6.2.

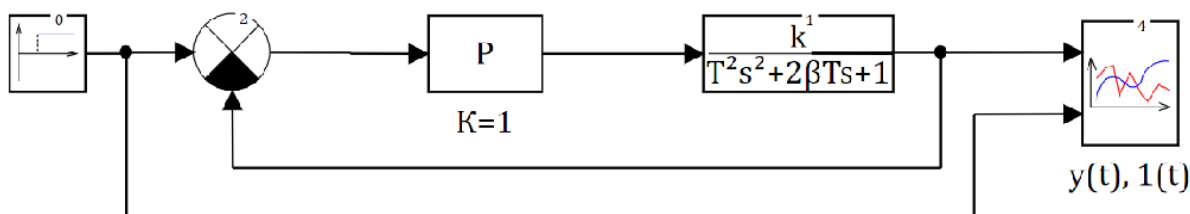


Рис. 6.2. Модель системы для исследования в SimInTech при $K=1$

Сначала исследуется система без регулятора, структурная схема модели представлена на рис. 6.2. Необходимо определить параметры переходной характеристики и занести данные в табл. 1.

Для исследования системы с П-регулятором строится модель по схеме, показанной на рис. 6.3.

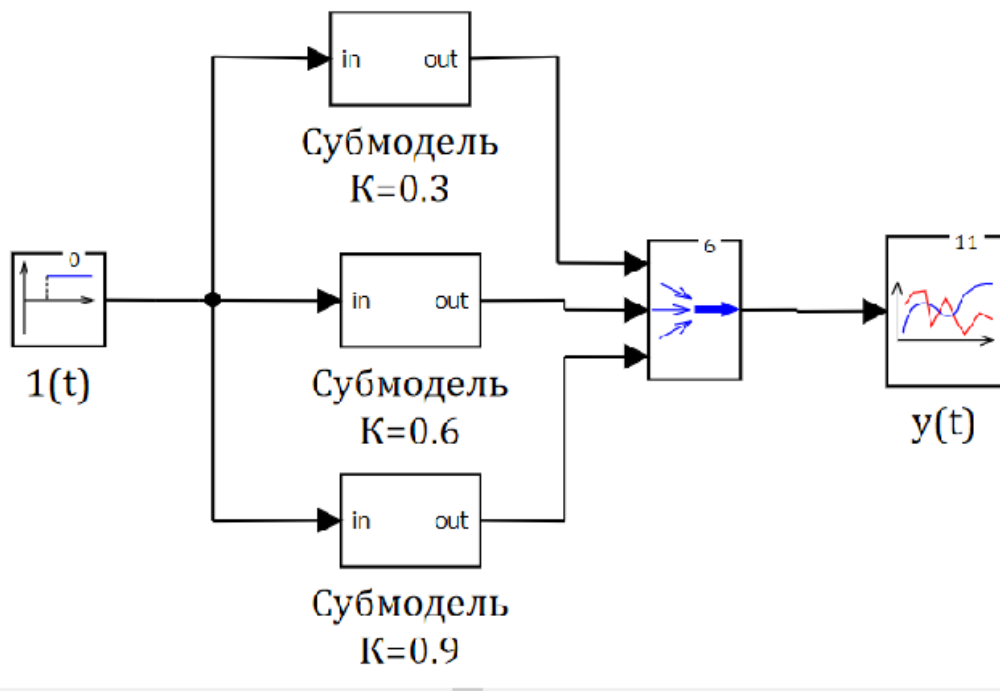


Рис. 6.3 Модель системы для исследования с П-регулятором

П-регулятор – это безинерционное звено с передаточной функцией $H_p=K_p$. Для нескольких значений коэффициента K_p определим параметры переходного процесса и занесем результаты в таблицу.

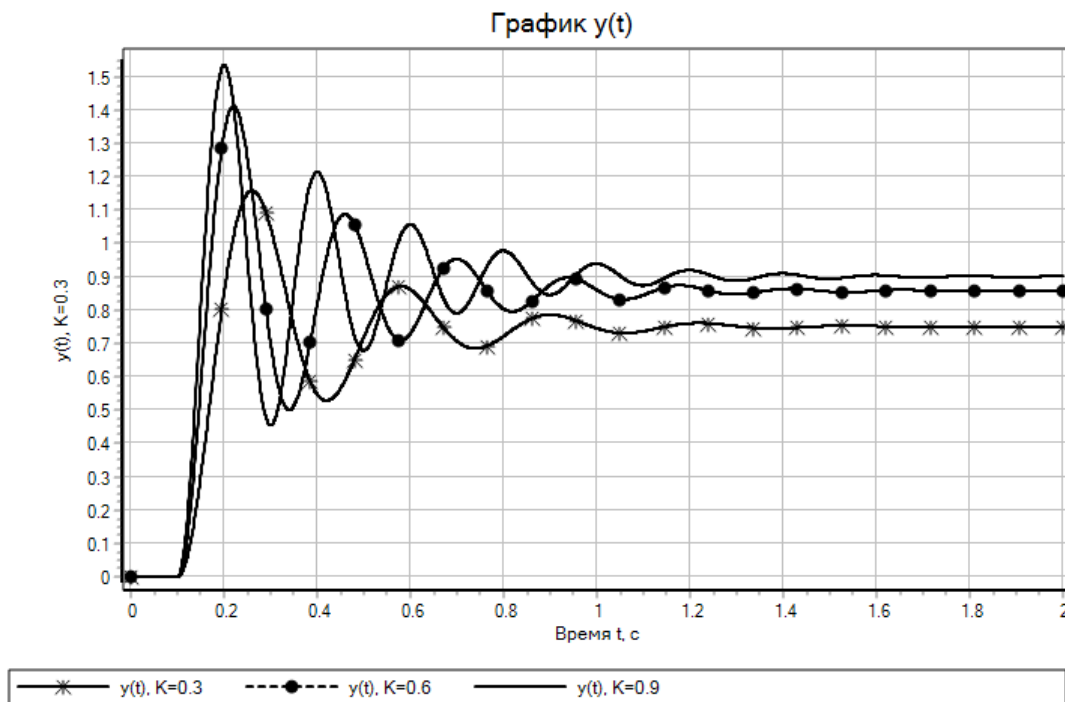


Рис. 6.4. Переходные характеристики системы с П-регулятором для разных K_p

Схема модели системы с И-регулятором показана на рис. 6.5.

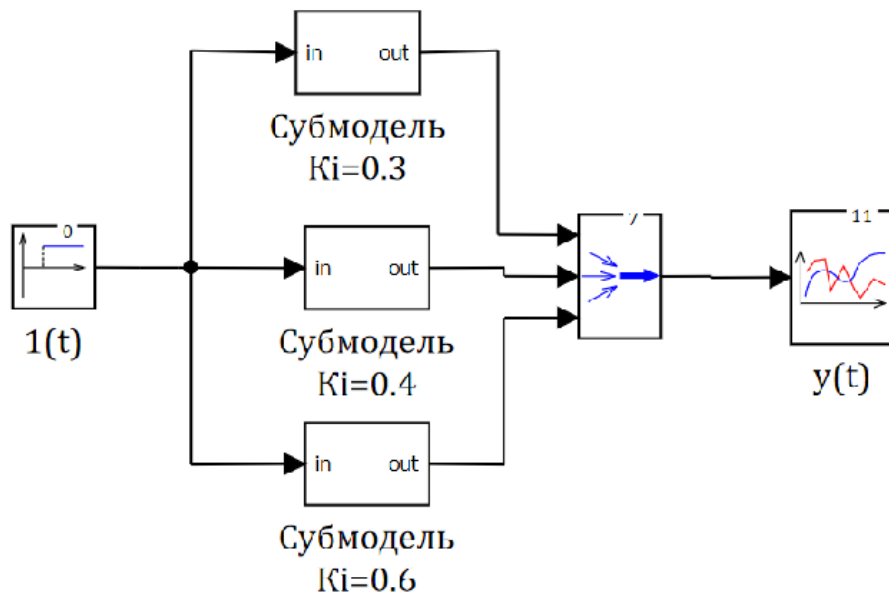


Рис. 6.5. Модель системы для исследования с И-регулятором

И-регулятор это интегратор с передаточной функцией

$$H_I(s) = \frac{K_I}{s}.$$

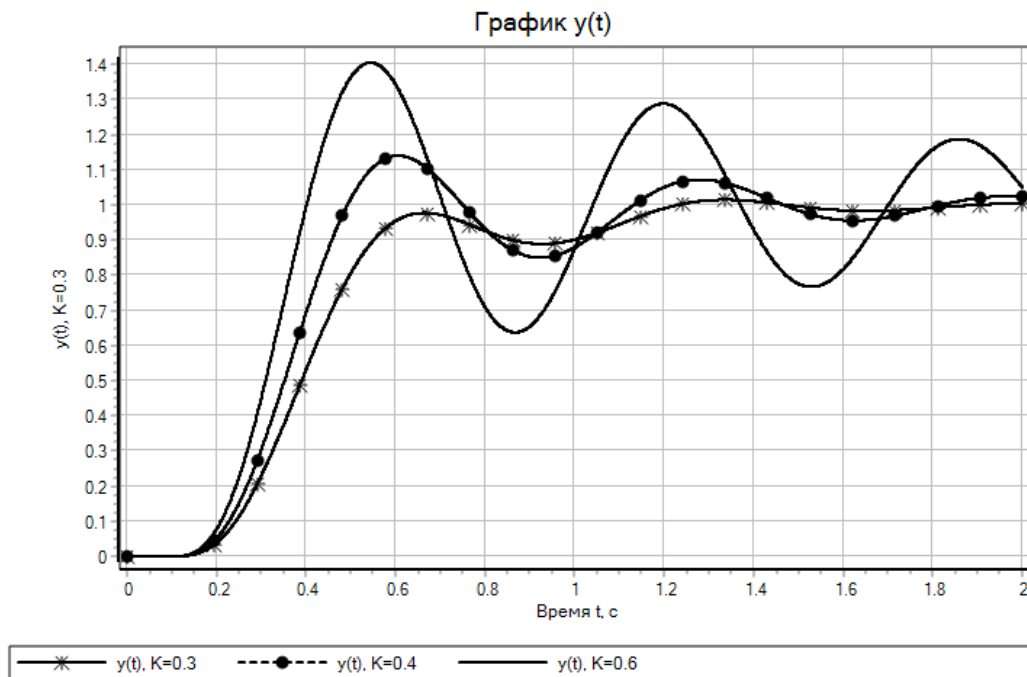


Рис. 6.6. Переходные характеристики системы с И-регулятором для разных $K_i=0,3$; $K_i=0,4$; $K_i=0,6$

Вычислить параметры переходных процессов для нескольких значений $K_{и}$ и занести данные в таблицу.

Схема модели системы с ПИ-регулятором приведена на рис. 6.7.

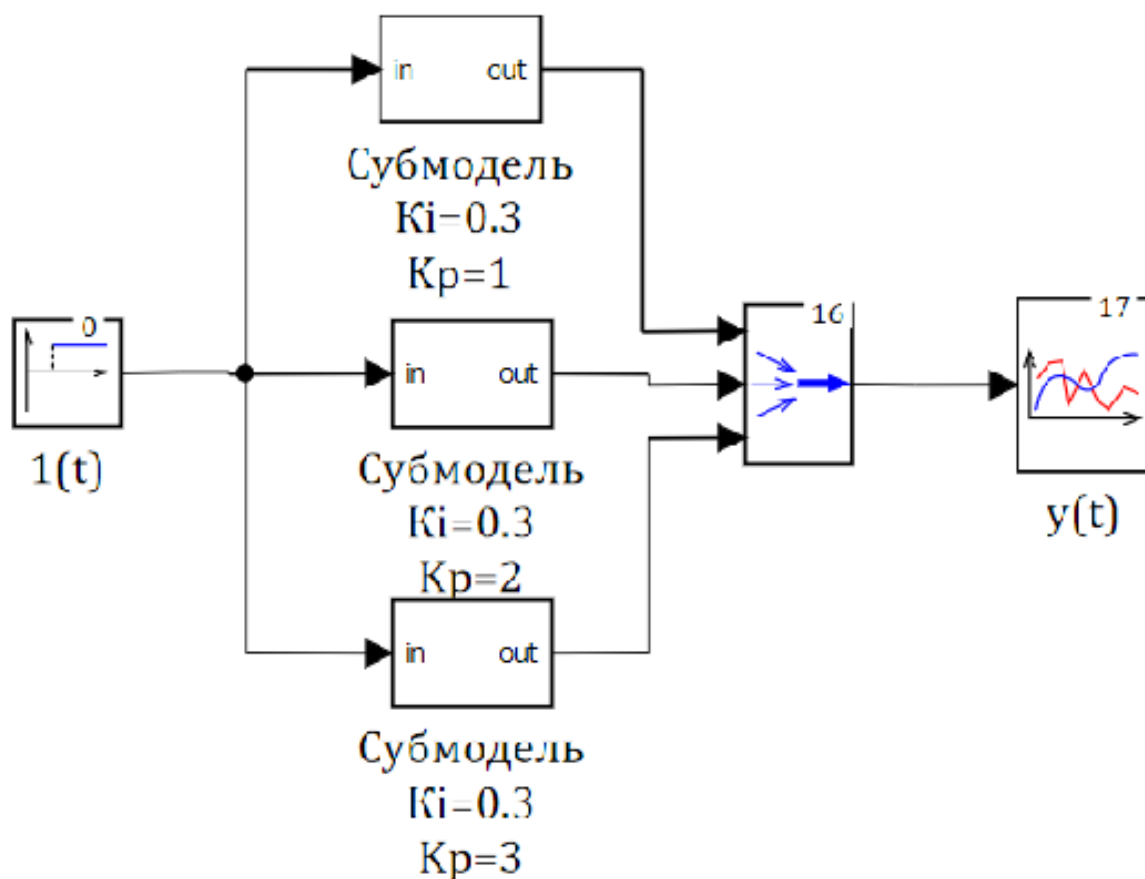


Рис. 6.7. Модель системы с ПИ-регулятором

ПИ-регулятор представляет собой параллельное соединение интегратора и усилителя. Его передаточная функция: $H_{ПИ}(s) = K_{П} + \frac{K_{И}}{s}$.

Вычислить параметры переходного процесса для нескольких значений $K_{и}$ и $K_{п}$ и занести результаты в табл.

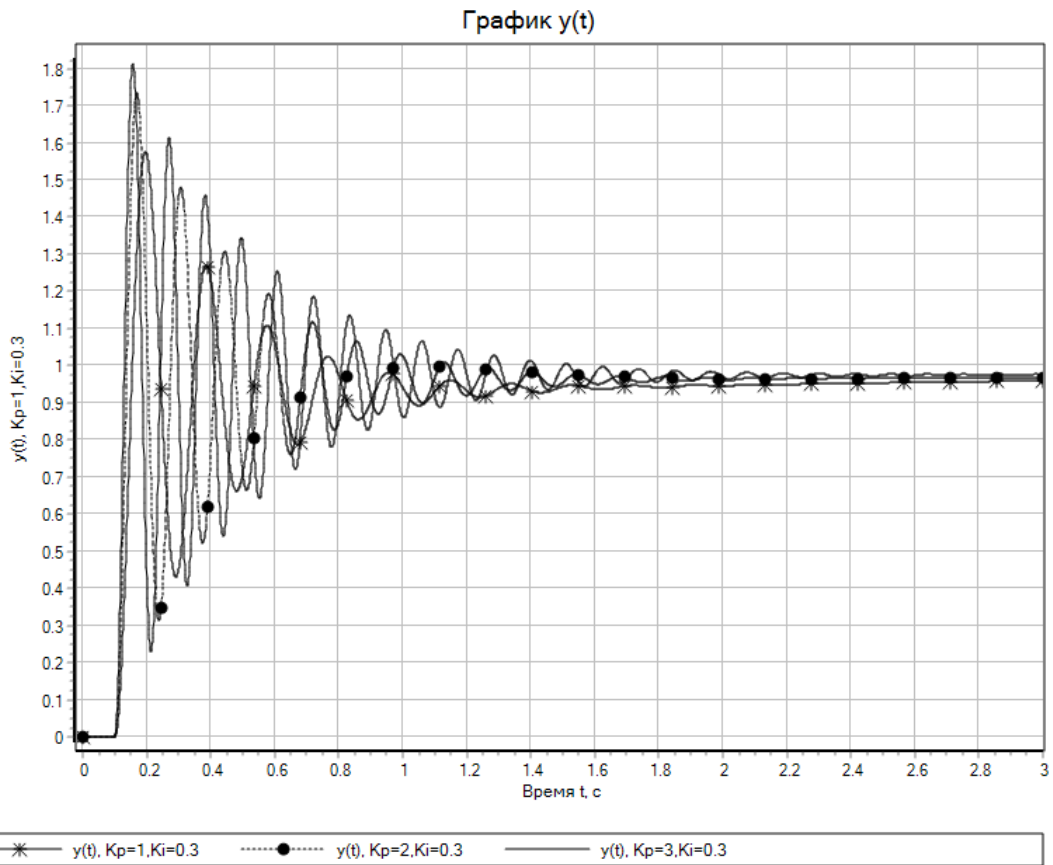


Рис. 6.8. Переходные характеристики системы с ПИ-регулятором для разных $K_p=1$; $K_p=2$; $K_p=3$

Таблица .6.1

Тип регулятора	Значение параметров регулирования	$X_{вх}, В$	$X_{уст}, В$	$\Delta X, В$	$\epsilon_{ст}, В$	$T_k, мс$	$t_p, мс$	$\sigma, \%$	Характер переходного процесса
Без регулятора	—								
П	$K_p=$								
	$K_p=$								
	$K_p=$								
И	$K_i=$								
	$K_i=$								
	$K_i=$								
ПИ	$K_p=$ $K_i=$								
	$K_p=$ $K_i=$								
	$K_p=$ $K_i=$								
	$K_p=$ $K_i=$								

Рассмотрим использование SimInTech для параметрической настройки регуляторов [2].

Рассмотрим простой пример, иллюстрирующий начальные основы использования SimInTech. Пусть требуется построить управление с обратной связью для объекта, имеющего передаточную функцию

$$H(s) = \frac{1}{(0.1s + 1)(0.3s + 1)}$$

так, чтобы замкнутая система имела перерегулирование менее 5% и время переходного процесса (входа в 5% зону установившегося значения) менее 2 секунд. В качестве регулятора будем использовать ПИ-регулятор с передаточной функцией вида

$$H_{pid}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s}$$

Задача состоит в том, чтобы выбрать такие его коэффициенты, которые обеспечивают указанные требования к качеству переходного процесса.

Построим SimInTech-модель объекта управления в соответствии со схемой, представленной на рис.6.9.

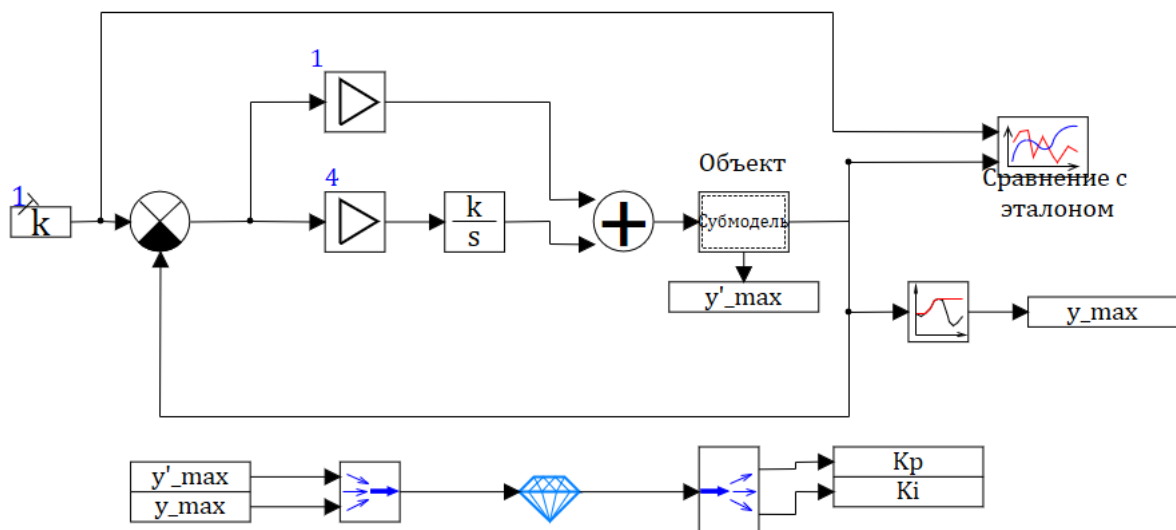


Рис. 6.9. Модель для настройки ПИ регулятора

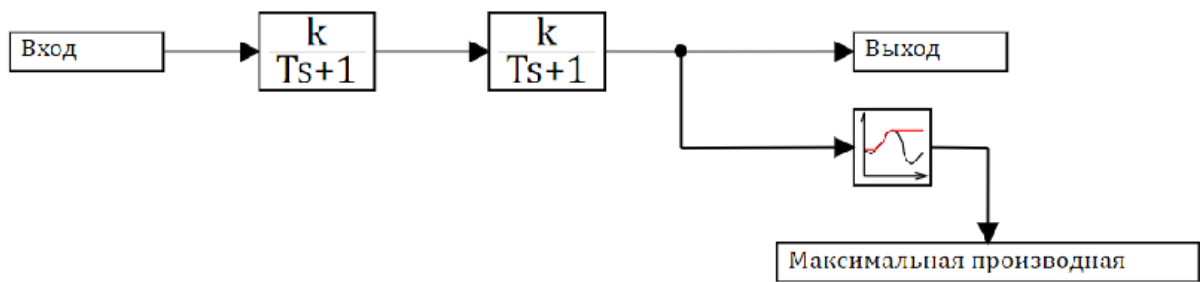


Рис. 6.10. Модель объекта

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расч...
1...	Ki	Сигнал1	Вещественное	Ненаправленный	0	4	Переменная
2...	Kp	Сигнал2	Вещественное	Ненаправленный	0	1	Переменная
3...	y_max	Сигнал1	Вещественное	Ненаправленный	0	1.0484779	Переменная
4...	y'_max	Сигнал1	Вещественное	Ненаправленный	0	1.0484779	Переменная
5...	i	количество итераций	Вещественное	Ненаправленный	10	10	Переменная

Рис. 6.11. Окно сигналов

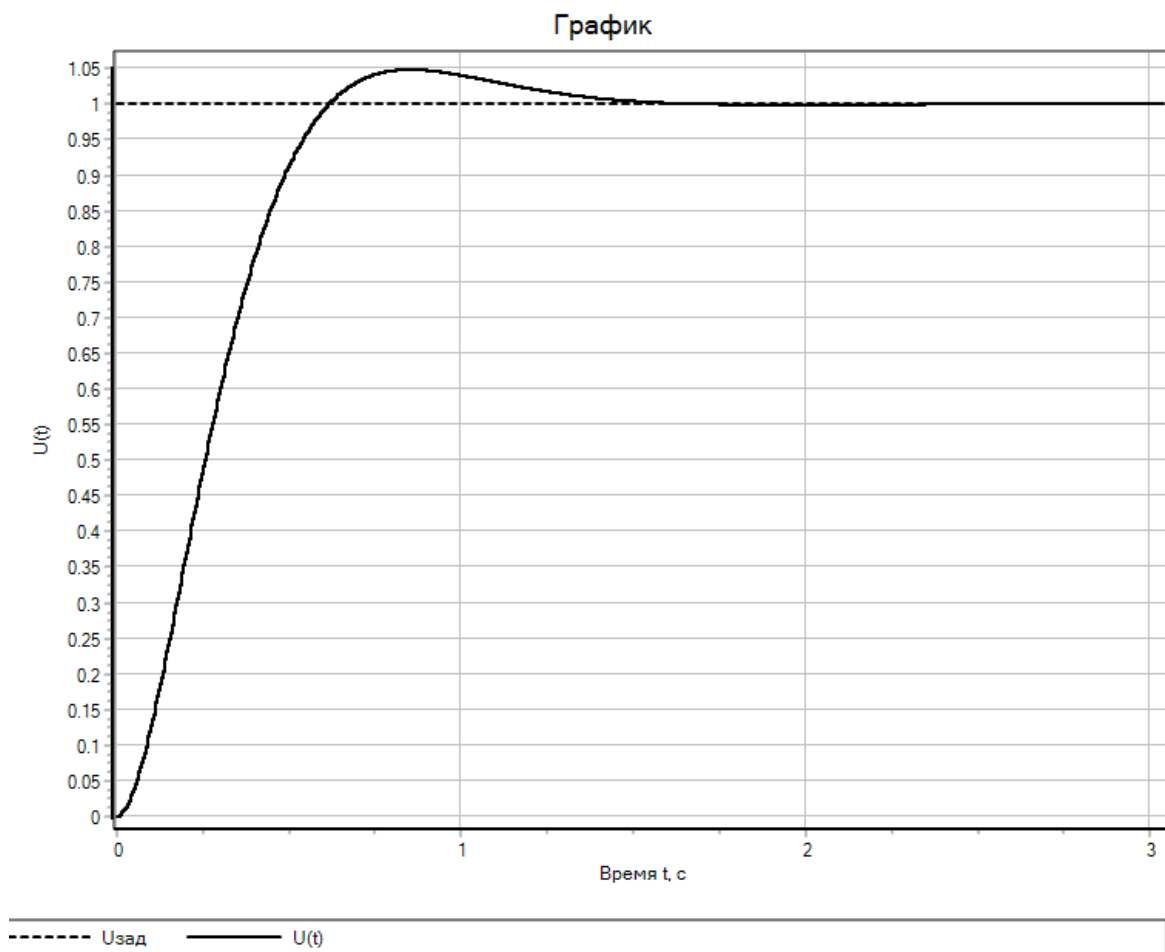


Рис. 6.12. Результаты расчета переходного процесса

Результаты расчета показывают, что параметры регулятора обеспечили заданные показатели качества переходного процесса.

3. Задание

1. Собрать схему (рис.6.1). В качестве H_0 взять передаточную функцию из схемы рис.6.9.

2. Снять переходные характеристики для различных параметров регуляторов.

3. Сравнить полученные результаты и сделать выводы.

4. Собрать схему (рис.6.9). Провести расчет параметров ПИ регулятора и сделать выводы.

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Модели системы с параметрами.

2. Переходные характеристики для различных параметров регуляторов.

3. Построенные переходные характеристики системы.

4. Заполненную таблицу 6.1.

5. Переходные характеристики и значения параметров регуляторов, найденных в пункте 4 задания.

6. Выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Какова цель использования регуляторов в САУ?

2. Каковы основные параметры переходного процесса?

3. Как изменится время регулирования t_p , если увеличить точность регулирования до $\pm 1\%$?

4. Что называется, статической погрешностью?

5. На основе проведенного анализа работы трех регуляторов выберите оптимальный.

Практическое занятие 7

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИНЕЙНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1. Цель работы

Определение показателей качества системы по переходной характеристике; исследование влияния параметров системы на показатели качества.

2. Содержание работы

Рассмотрим пример. Соберем в SimInTech схему исследуемой системы (рис.7.1). Набранная модель представлена на рис.7.2.

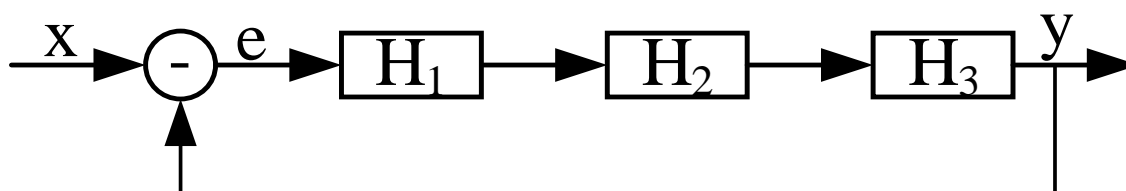


Рис.7.1. Структурная схема исследуемой системы

Передаточные функции исследуемой системы:

$$H_1 = \frac{0.1s + 1}{0.8s}; \quad H_2 = \frac{1}{0.2s + 1}; \quad H_3 = \frac{5}{0.01s^2 + 0.2s + 1};$$

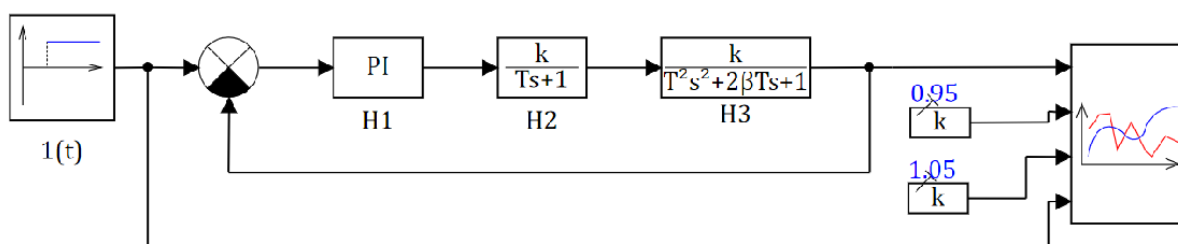


Рис. 7.2. Модель исследуемой системы

Переходная характеристика исследуемой системы представлена на рис.7.3.

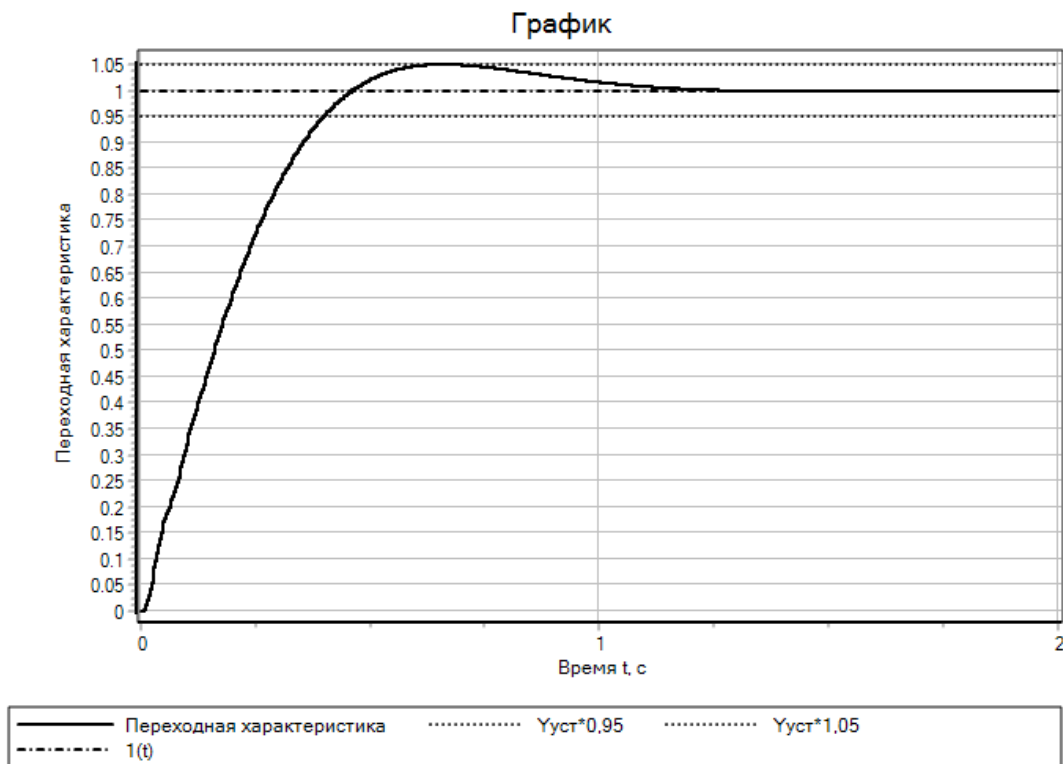


Рис. 7.3. Переходная характеристика исследуемой системы

Проведем анализ зависимости переходной характеристики системы от величины K_3 (коэффициент передачи передаточной функции H_3). Модель системы для проведения анализа представлена на рис. 7.4.

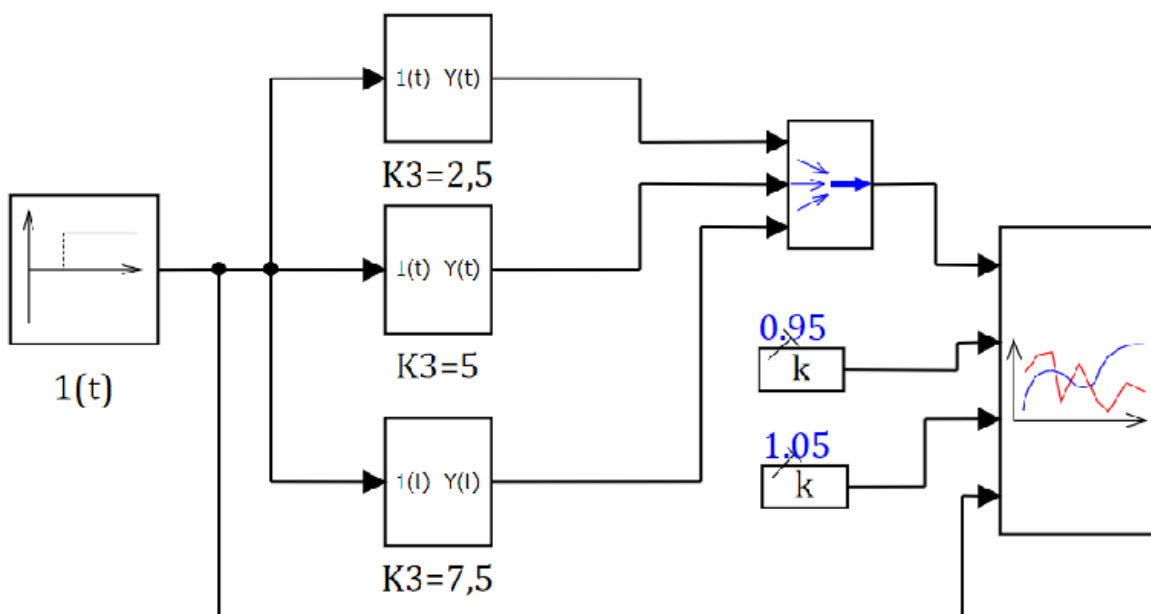


Рис. 7.4. Модель системы для проведения линейного анализа

Результаты расчёты приведены на рис. 7.5.

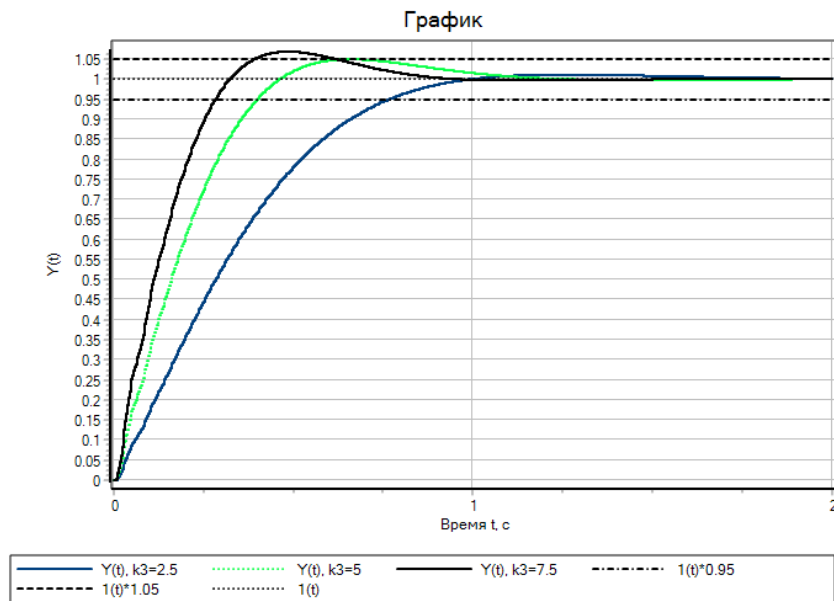
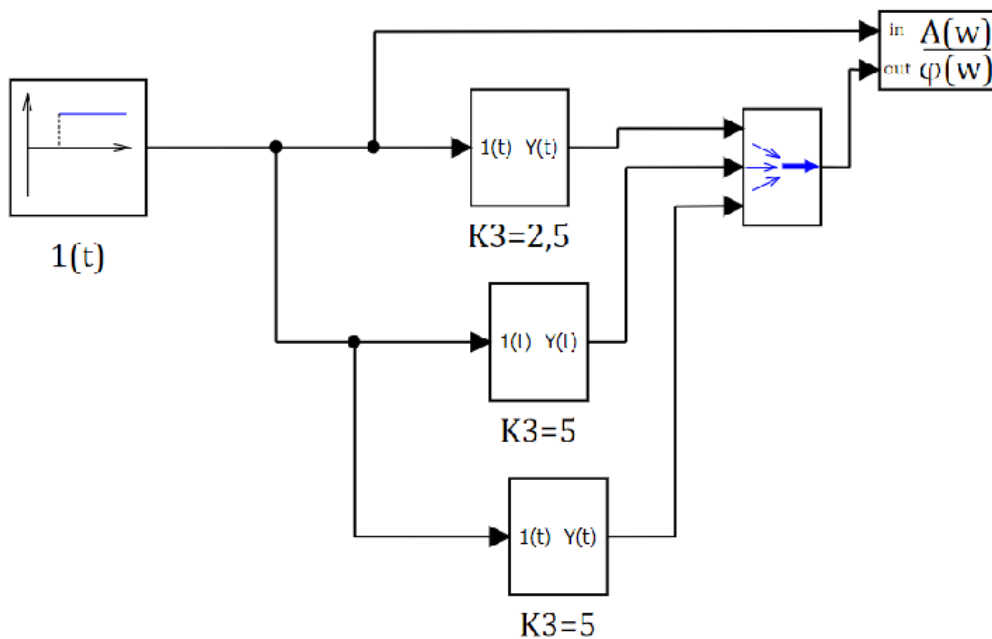


Рис. 7.5. Переходные характеристики исследуемой системы для $K_3= 2.5, 5.0$ и 7.5

K_3 - коэффициент передачи передаточной функции H_3 . С увеличением K_3 увеличивается перерегулирование и уменьшается время переходного процесса.

Построим годографы Найквиста для разомкнутой системы (рис. 7.1) для трех значений коэффициента K_3 . Модель дана на рис. 7.6.



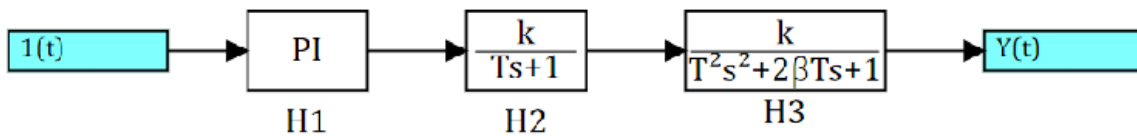


Рис.7.6. Модель для исследования годографов Найквиста для трех значений коэффициента K_3

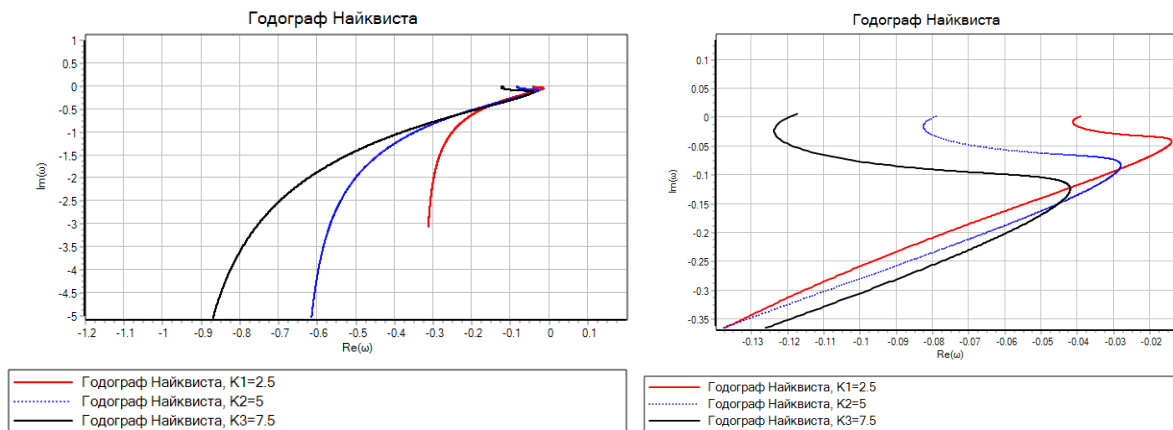


Рис.7.7. Годографы Найквиста для трех значений коэффициента K_3

Исследуем систему при значительном увеличении коэффициента усиления K_3 . Пусть $K_3=65$. Схема для исследования представлена на рис. 7.8. Результаты расчета (рис.7.9) показывают, что система в замкнутом состоянии неустойчива.

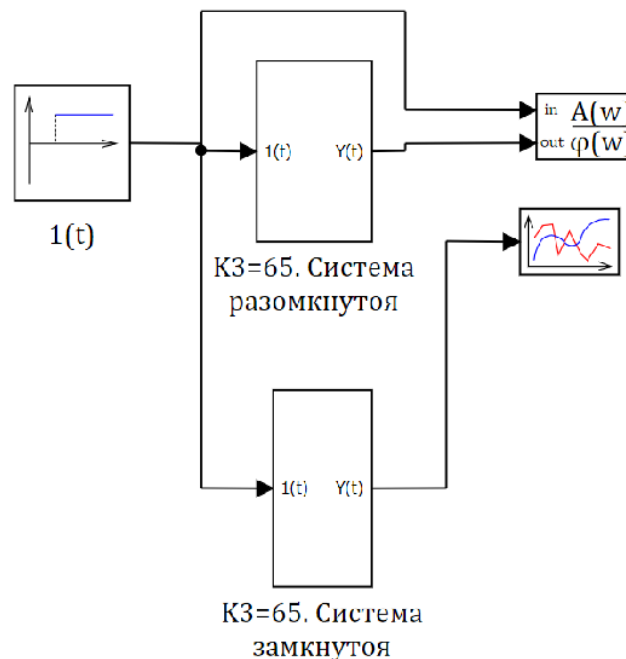


Рис. 7.8. Схема для исследования устойчивости

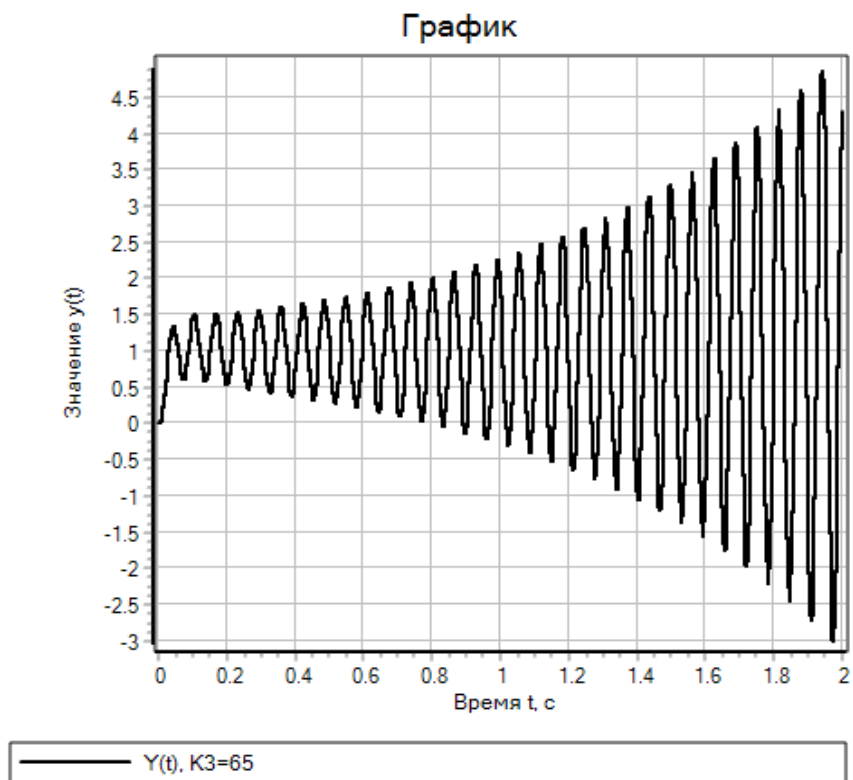
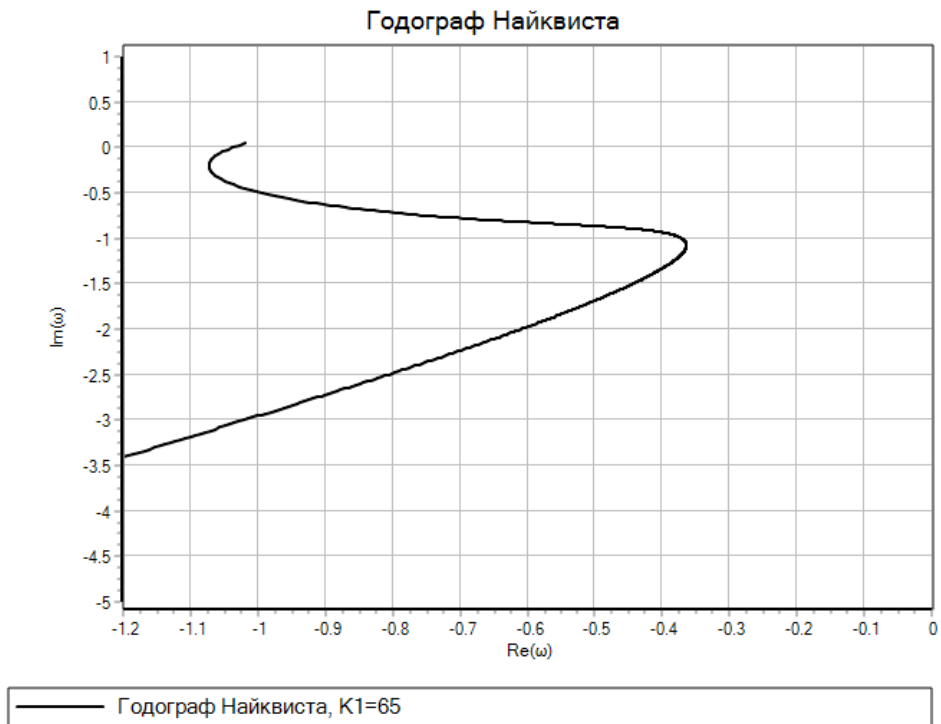


Рис. 7.9. Результаты расчета

3. Задания

1. Определите следующие показатели качества системы по ее переходной функции:

- время первого согласования t_1 ;
- время достижения максимума t_m ;
- время переходного процесса $t_{\text{пн}}$ (по входу переходной функции в зону $\pm 2\%$ от ее установившегося значения);
- перерегулирование σ ;

2. Проведите линейный анализ системы. Определите показатели качества и сравните с показателями качества, определенные в пункте 1 задания. Сделайте выводы.

3. Исследуйте, как изменятся показатели качества при увеличении и при уменьшении в 2 раза одного из параметров системы. Эксперимент проводится для следующих параметров:

- постоянная времени H_3 ;
- постоянная времени интегрального звена в H_1
- постоянная времени форсирующего звена в H_1 ;

При каждом изменении параметров определите показатели качества (см. п.1 задания) и сделайте вывод о том, как изменилось быстродействие системы и ее колебательность. Результаты исследования запишите в таблицу (табл.1).

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы;
2. Структурную схему исследуемой системы;
3. Переходную функцию системы при исходных значениях параметров с отмеченными на ней значениями показателей качества;
4. Переходную функцию системы при отсутствии перерегулирования и значение параметра, при котором она получена.

5. Контрольные вопросы

1. Определение показателей качества переходных процессов САУ?
2. Как вычисляются показатели качества по расположению нулей и полюсов передаточной функции САУ?
3. Каковы частотные критерии качества переходных процессов?
4. Какова связь частотных характеристик САУ с качеством ее переходной характеристики?
5. Как влияют параметры САУ на показатели качества?

Практическое занятие 8 РАСЧЕТ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы: создание модели и расчет токов и напряжения в цепи постоянного тока.

В данной работе необходимо построить в SimInTech модель электрической схемы представленной на рис. 8.1.

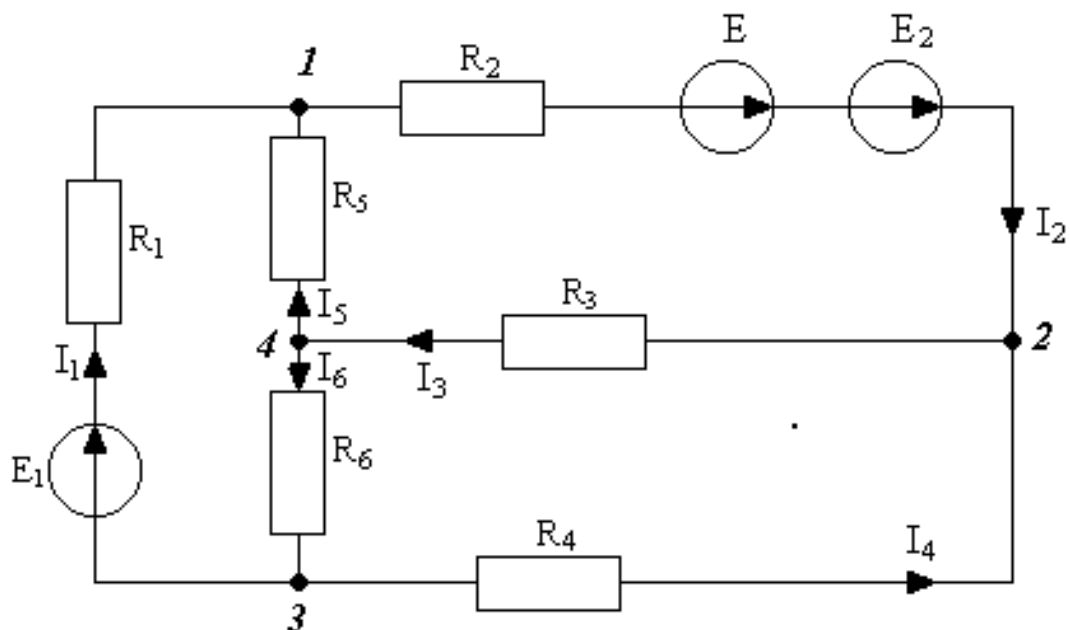


Рис. 8.1. Схема для исследования в пакете SimInTech

Пример модели представлен на рис. 8.2.

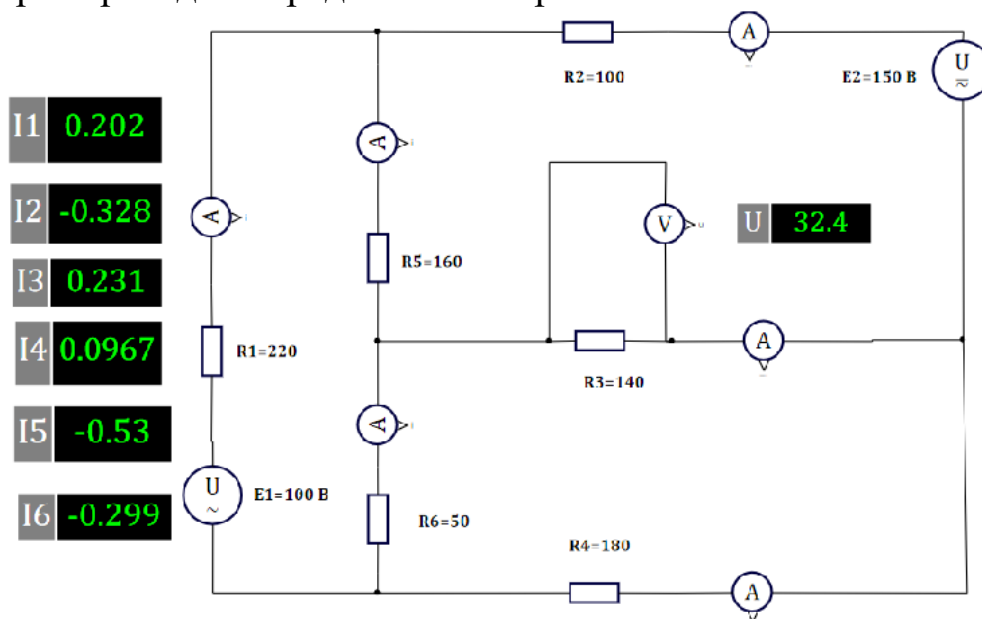


Рис. 8.2. Модель для исследования в пакете SimInTech

Датчики находятся в библиотеке «Сигналы». Для настройки датчика, например, с амперметром, который подключен последовательно с сопротивлением R_1 (Рис. 8.2.), необходимо в свойствах определить имя амперметра (Рис. 8.3). Затем, указать его в свойствах датчика (Рис. 8.4)

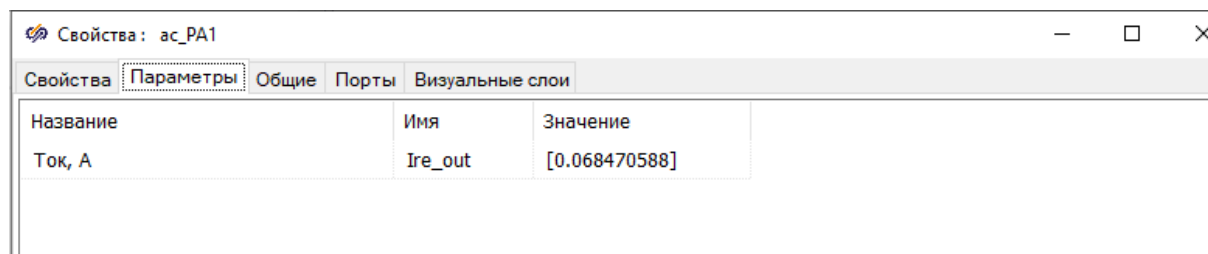


Рис. 8.3. Определение имени амперметра

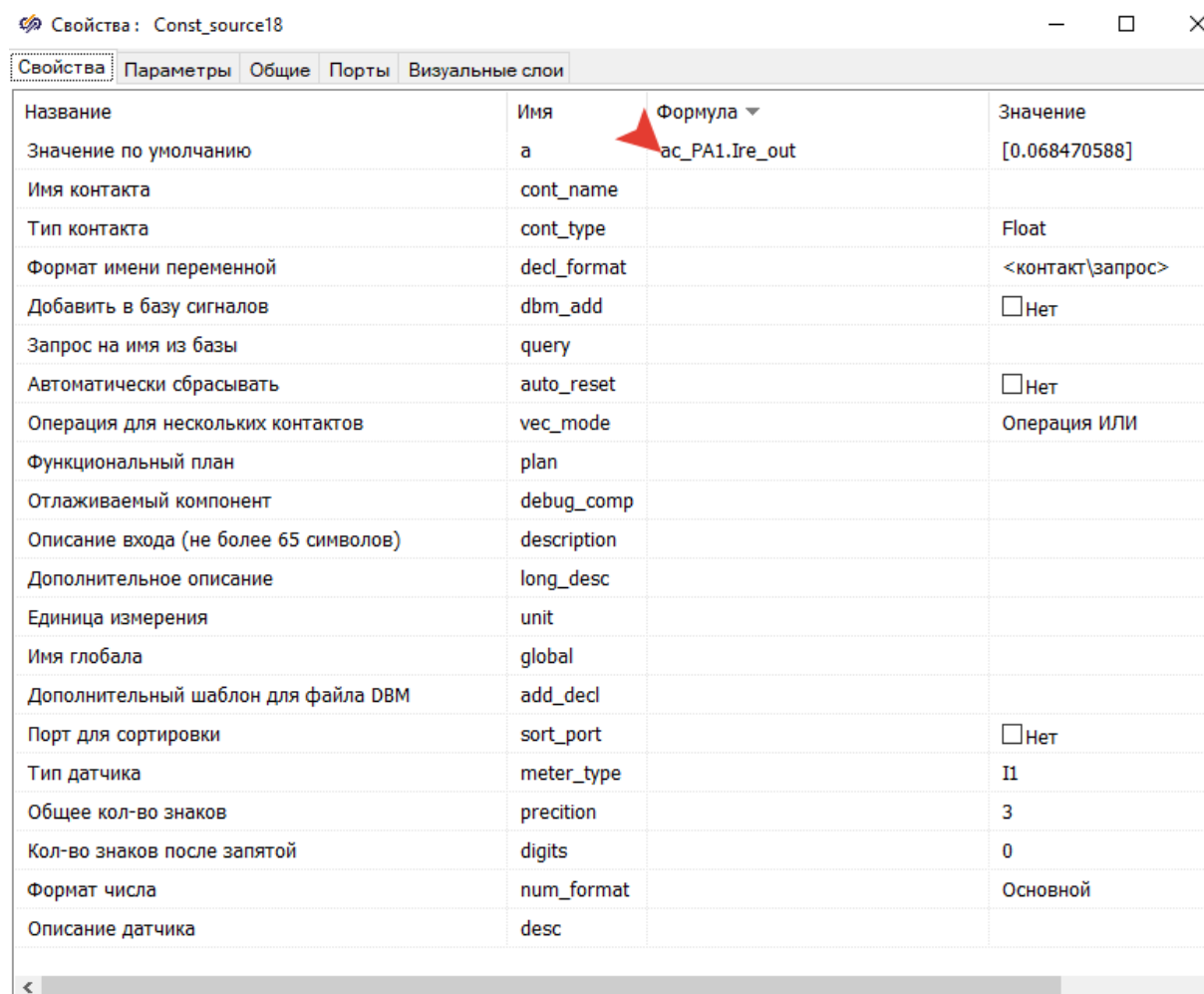


Рис. 8.4. Окно свойств датчика

Для проверки расчетов можно использовать баланс мощностей. Модель для расчета представлена на рис. 8.5.

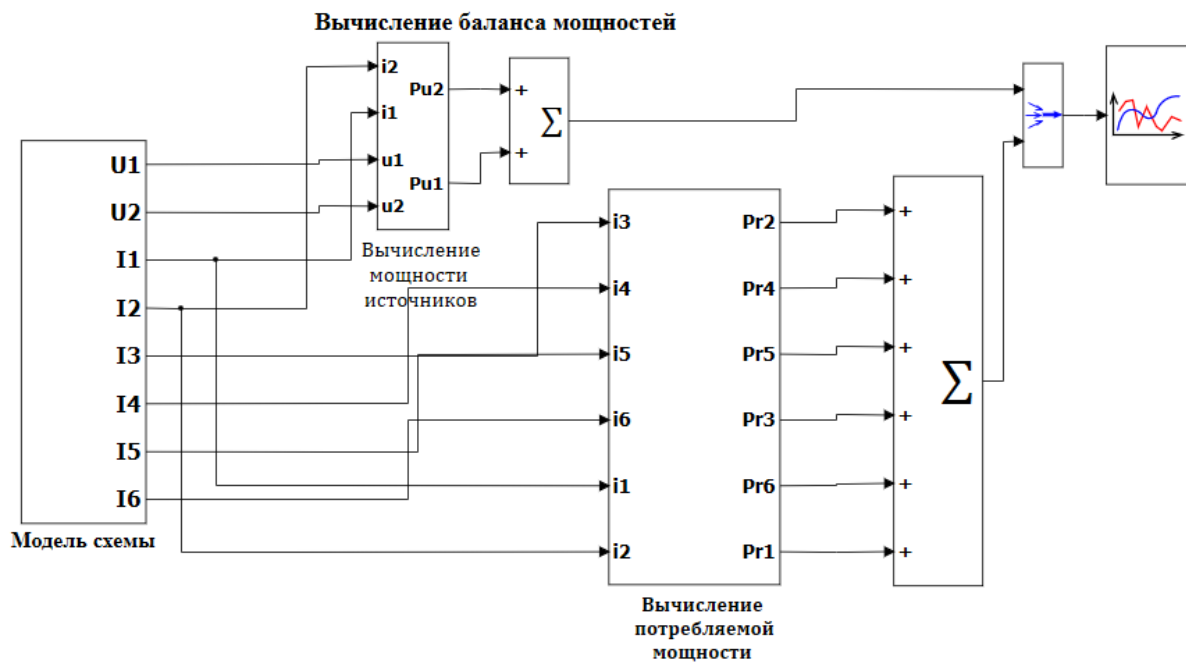


Рис. 8.5. Модель для расчета баланса мощностей

На рис. 8.6. изображена подсистема исследуемой схемы. Выходные порты находятся в библиотеке «Субструктуры»

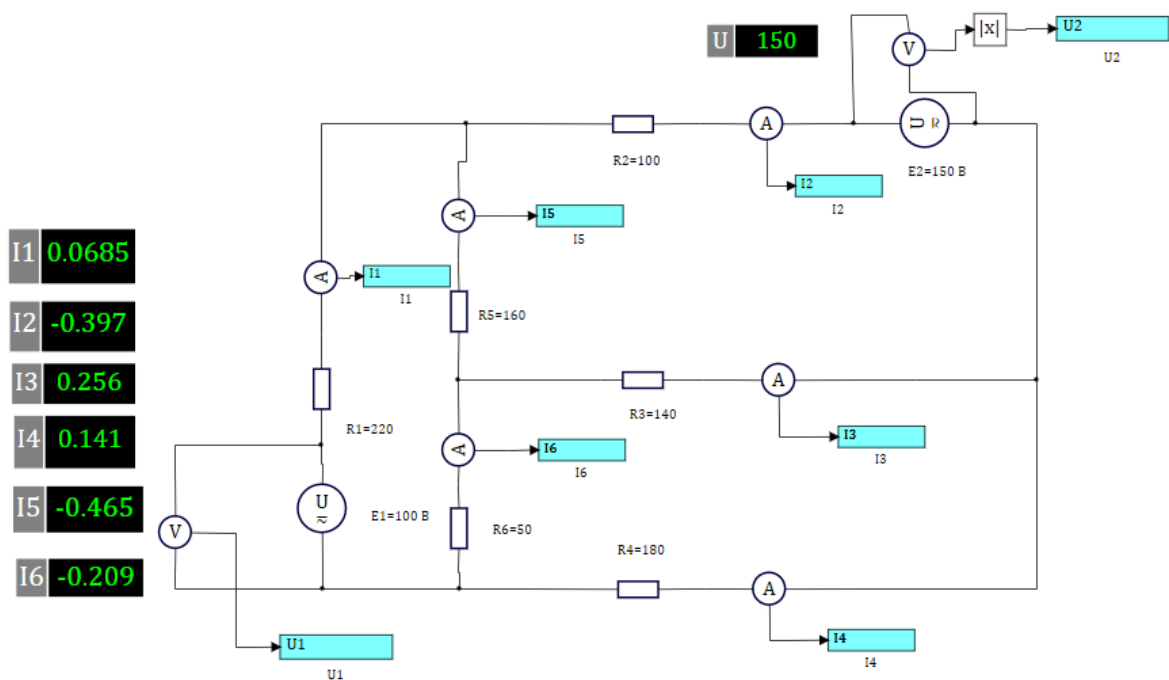


Рис. 8.6. Подсистема схемы

Для расчетов потребляемой мощности и мощности, которую отдают источники, используем модели представленные на рисунках 8.7 и 8.8.

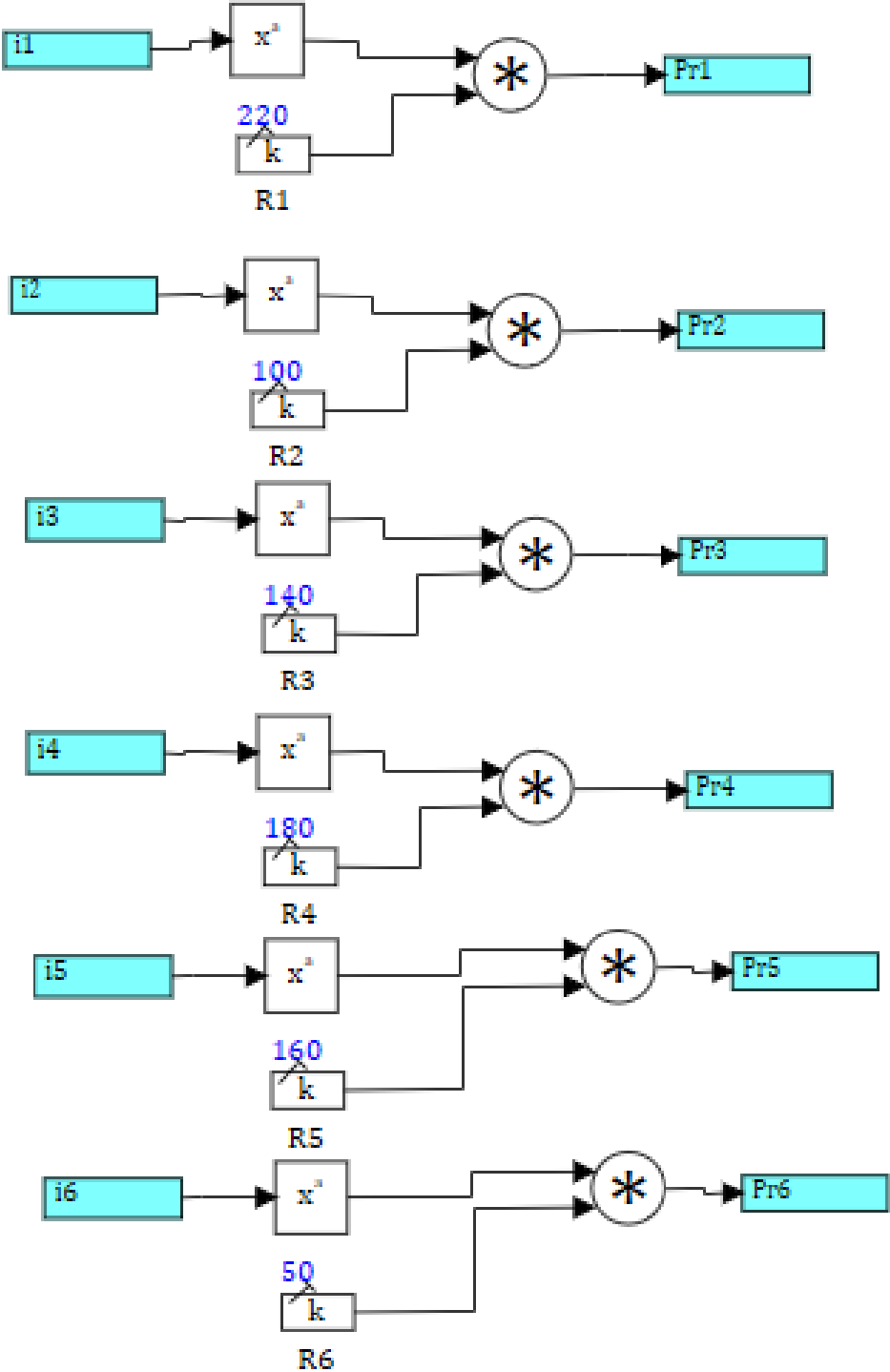


Рис. 8.7. Вычисление потребляемой мощности

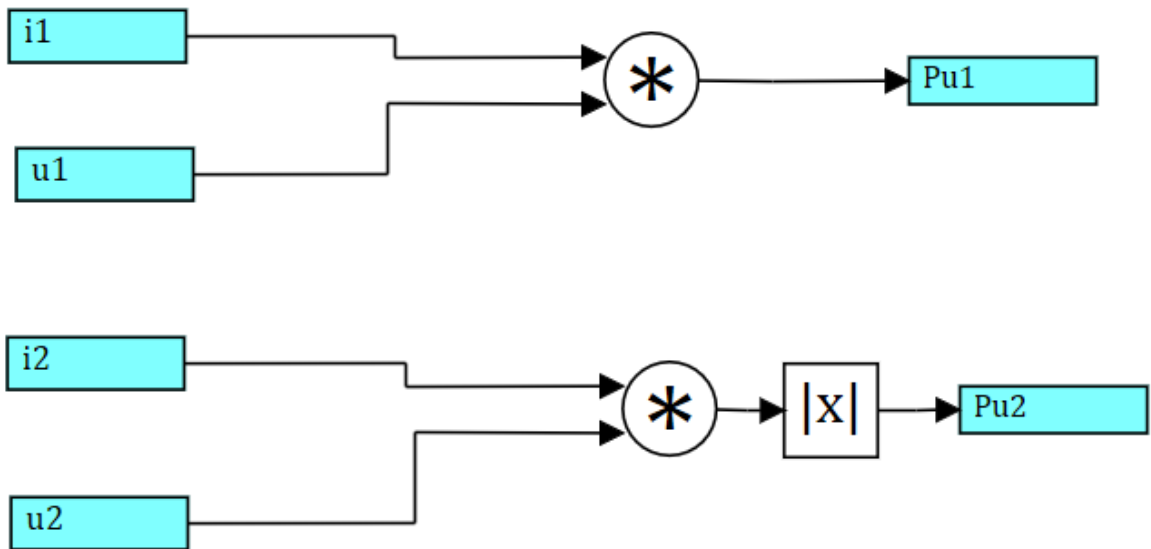


Рис. 8.8. Вычисление мощности, отдаваемой источниками

Результаты расчета представлены на рисунках 8.9 и 8.10.

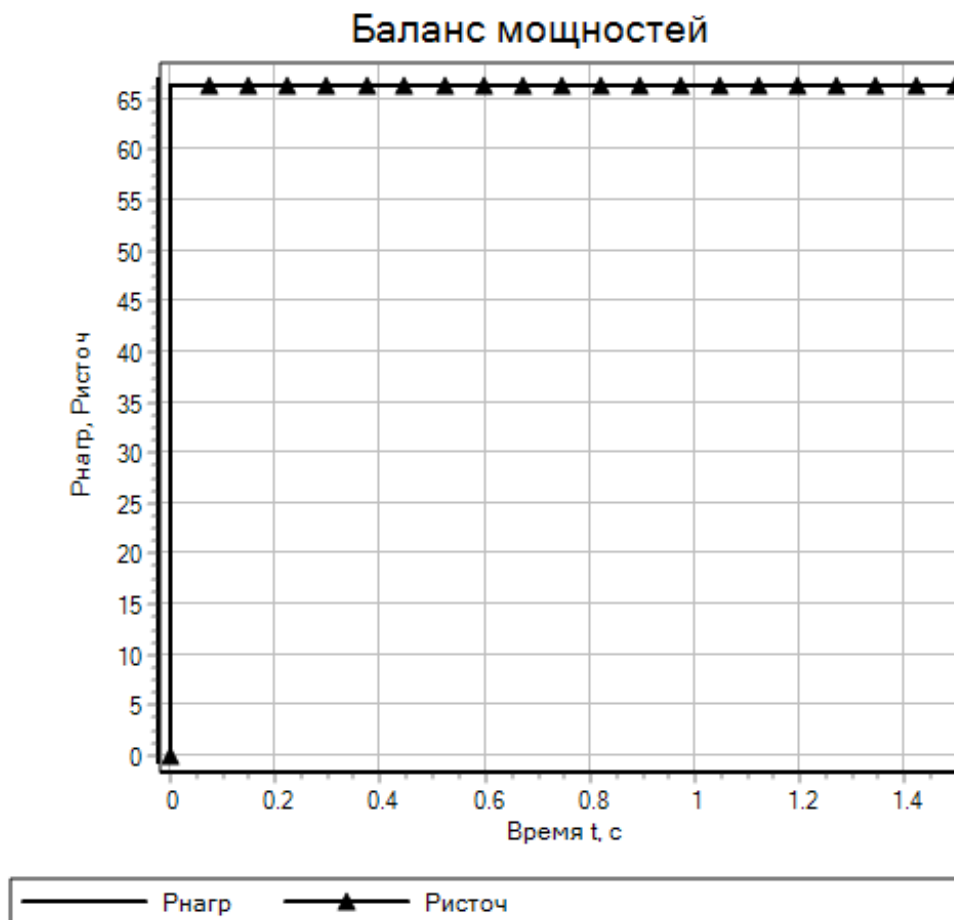


Рис. 8.9. Результаты расчета мощностей.

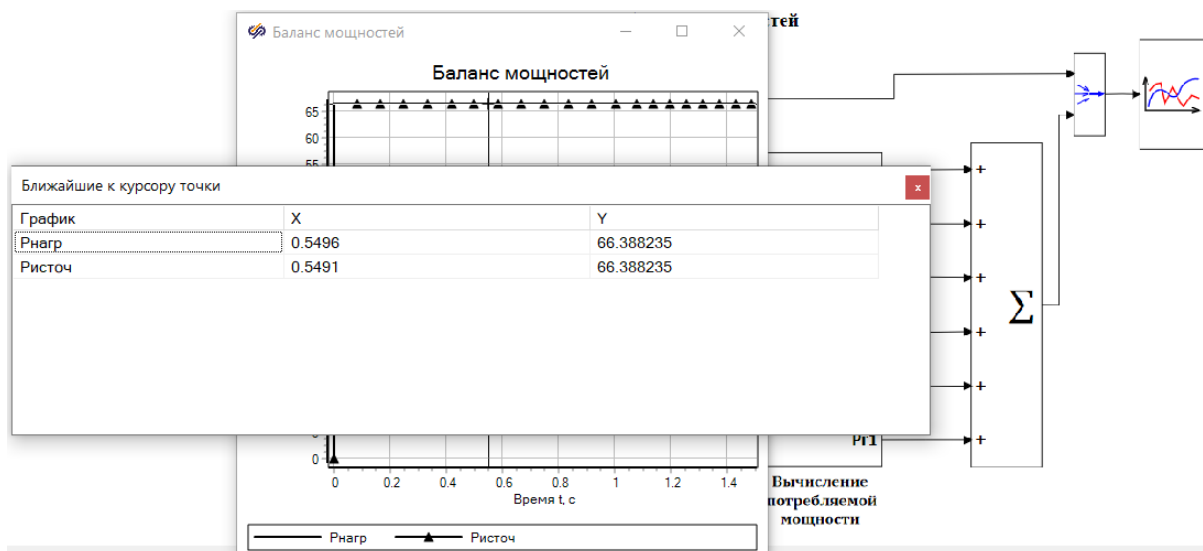


Рис. 8.10. Определения значений мощности с помощью курсора

Варианты для расчета схемы (рис.8.1) представлены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R ₁ Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660	760
R ₂ Ом	100	60	70	59	56	80	90	100	67	98	99	80	60
R ₃ Ом	140	100	100	90	80	60	120	120	40	120	90	110	120
R ₄ Ом	180	200	200	200	100	200	200	250	350	150	100	150	200
R ₅ Ом	160	250	270	220	300	160	220	300	170	180	190	200	220
R ₆ Ом	50	60	70	80	90	100	90	80	70	60	50	60	70
E ₁ В	100	150	150	110	150	150	150	140	160	150	170	150	200
E ₂ В	120	200	120	170	120	180	100	120	100	120	120	100	120

2. Задание к работе

Набрать на компьютере и исследовать электрическую схему, представленную на рис. 8.1

3. Порядок выполнения работы

1. Набрать и исследовать модель в SimInTech (рис 8.2).
2. Выполнить расчет баланса мощностей (Рис. 8.5).

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Заданную схему с параметрами.
- Схемы модели, выполненные в SimInTech, с рассчитанными токами и напряжениями.
- Выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Как запустить SimInTech?
2. В какой библиотеке SimInTech находятся сопротивления?
3. В какой библиотеке SimInTech находятся измерительные приборы?
4. Как проверить расчетное значение тока в сопротивлении R_3 ?
5. Как измерить значение напряжения на сопротивлении R_2 ?
6. Как измерить сопротивление между двумя точками схемы, представленной на рис. 8.1?

Практическое занятие 9 РАСЧЕТ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы: расчет токов, напряжений и мощности в цепи переменного тока.

Уравнения электрического равновесия напряжений и токов цепи синусоидального тока можно записать в аналитической форме и представить графически в виде векторных диаграмм [4].

При анализе цепей синусоидального тока необходимо иметь в виду следующее:

– реактивное индуктивное сопротивление X_L индуктивной катушки и реактивное ёмкостное X_C сопротивление конденсатора зависят от частоты f источника синусоидального напряжения $u = U_m \sin(2\pi ft + \Psi_u)$, т. е.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ и } X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C),$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота напряжения, рад/с; $f = 1/T$ – частота напряжения, Гц; T – период синусоидального напряжения, с; Ψ_u – его начальная фаза, рад или град;

– в ветвях с реактивными элементами L и C между напряжением и током возникает фазовый сдвиг φ .

Рассмотрим пример составления модели и расчет токов, напряжений и мощности для электрической цепи переменного тока в пакете SimInTech (рис.9.1), если $u = 200$ В; $r_1 = r_2 = 2$ Ом; $r_3 = 4$ Ом; $r_4 = 20$ Ом; $x_{C1} = x_{C2} = 8$ Ом; $x_L = 6$ Ом.

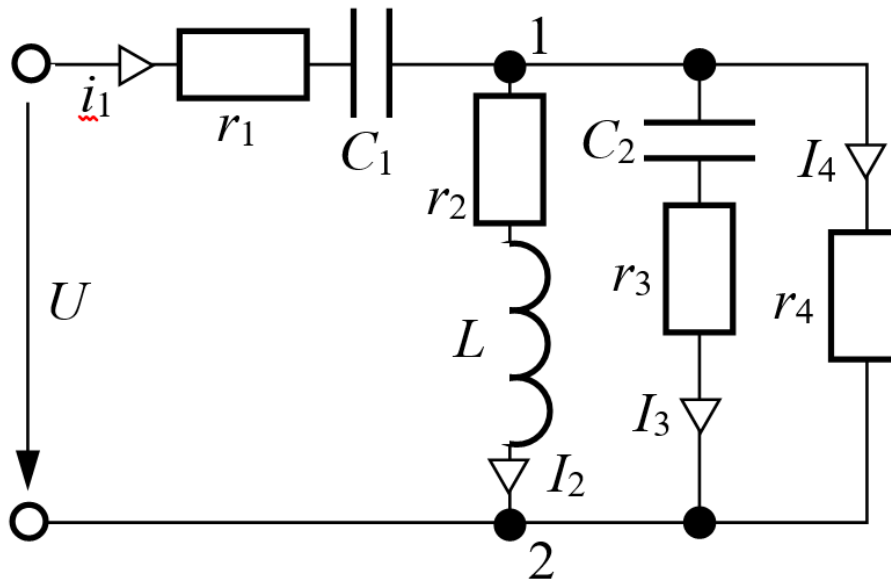


Рис.9.1. Электрическая цепь переменного тока для исследования.

Модель схемы (рис. 9.1) представлена на рис. 9.2.

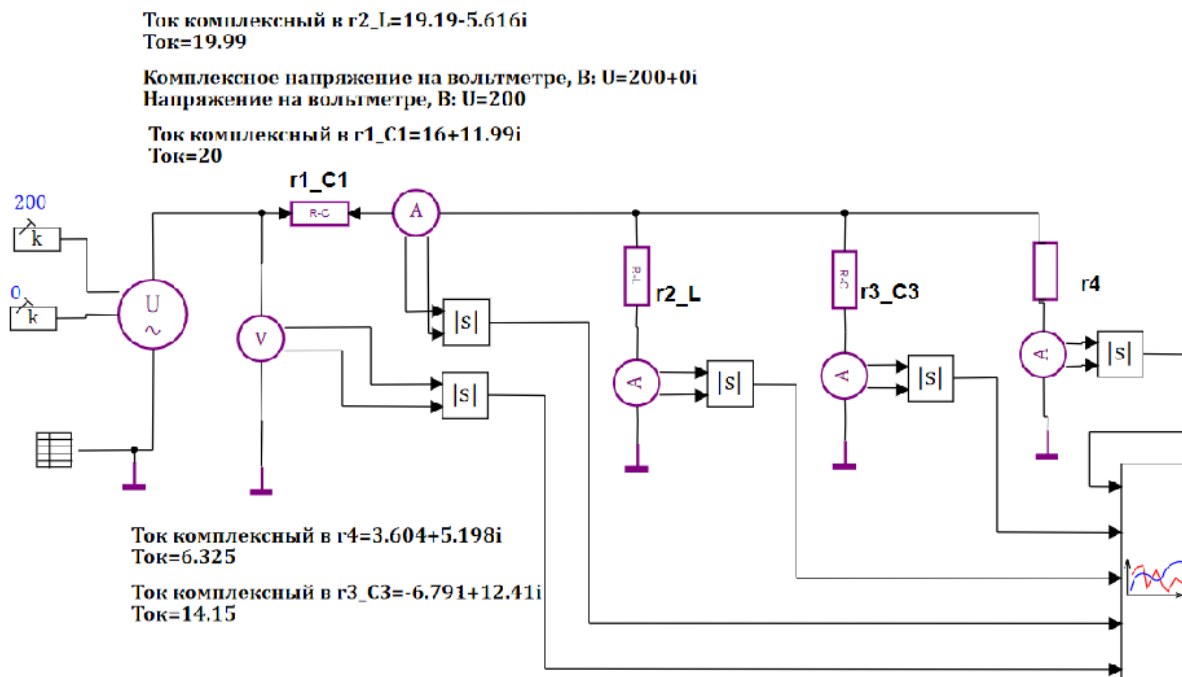


Рис.9.2. Модель электрической цепи переменного тока

Примитив «AutoLabel» является близким по своим свойствам к примитивам «Текст» и «Повернутый текст», но имеет ряд отличий (Справочная система SimInTech). Данный тип примитивов не вставляется из панели графических примитивов, а генерируется из окна «Параметры» для отображения значений выбранных характеристик объекта, либо сигналов проекта.

Рассмотрим алгоритм создания примитива «AutoLabel» на схеме (рис.9.3.) для сопротивления $r1_C1$.

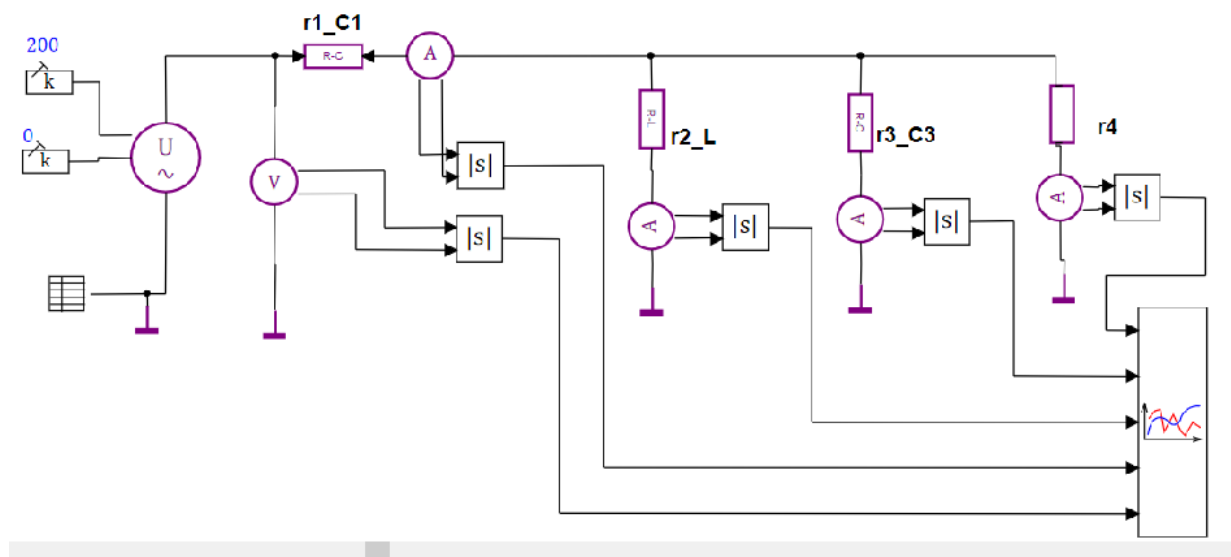


Рис.9.3. Пример создания примитива «AutoLabel».

1. Открываем окно «Параметры» для сопротивления $r1_C1$ из контекстного меню, вызванного на выбранном объекте.
2. В открывшемся окне выбираем вкладку с необходимыми характеристиками объекта или сигналами проекта (рис 9.4).
3. Затем необходимо кликнуть по кнопке «А». Откроется окно настройки будущего примитива.
4. При необходимости скорректировать тест подписи (рис 9.5).

Название	Имя	Значение
Ток комплексный (rms), A	I_out	16.00109+11.994785i
Ток (rms/inst), A	I_rms	19.997744

Рис.9.4. Окно «Параметры» для сопротивления r1_C1.

Подпись объектов

Объекты

- Блоки
- Линии связи
- Подчинённые объект
- Только выделенные

Фильтр имени

Фильтр класса

Стиль

Текст подписи

I_out=
I_rms=

Выводимые параметры

I_out
I_rms

Имя класса подписи

AutoLabel

Включить анимацию

Ok Отмена

Рис.9.5. Окно настройки примитива

Результат создания примитива «AutoLabel» для сопротивления $r1_C1$ представлен на рис. 9.6.

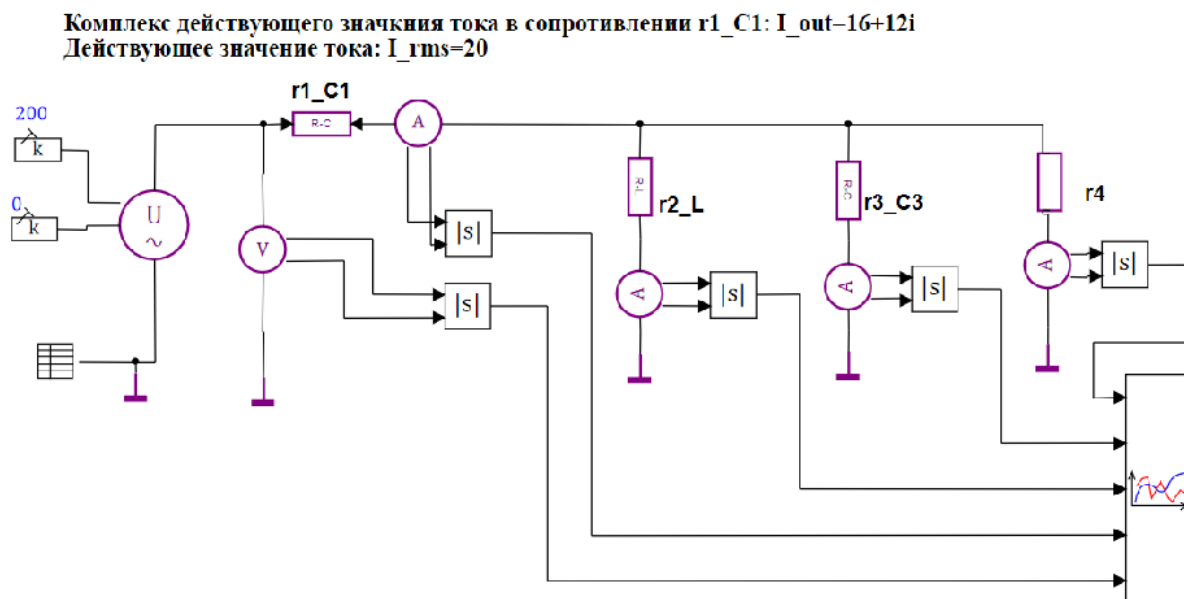


Рис.9.6. Результат создания примитива «AutoLabel» для сопротивления $r1_C1$.

Рассмотрим расчет мощности потребляемой схемой (рис.9.7). На вход схемы включим ваттметр и создадим для него «AutoLabel». Результат расчета представлен на рис. 9.7.

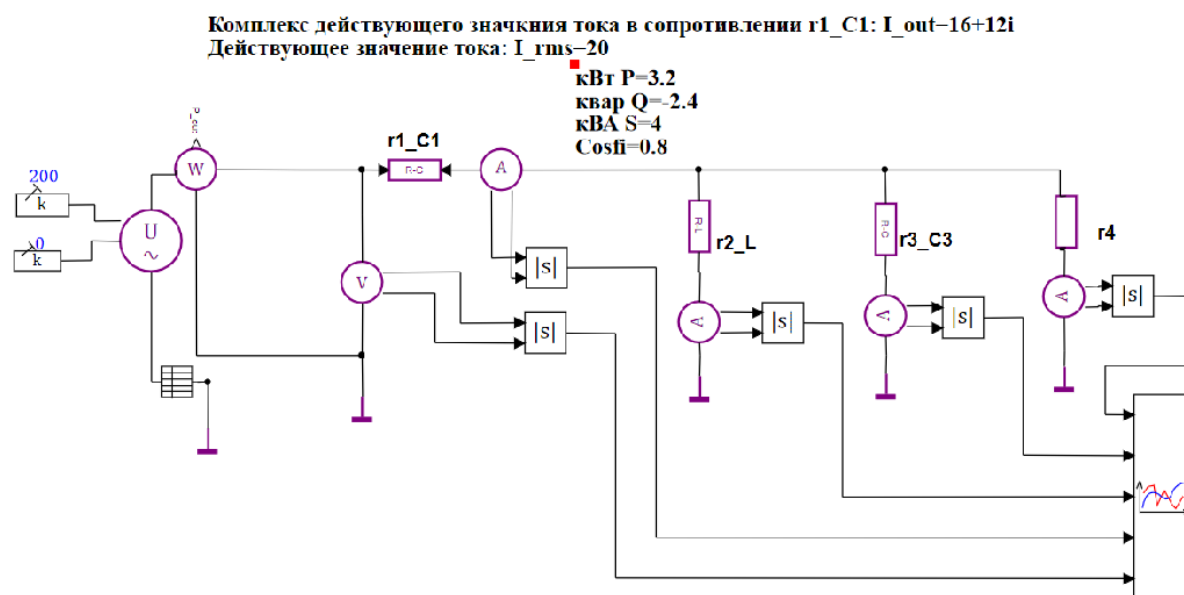


Рис.9.7. Модель для измерения мощности.

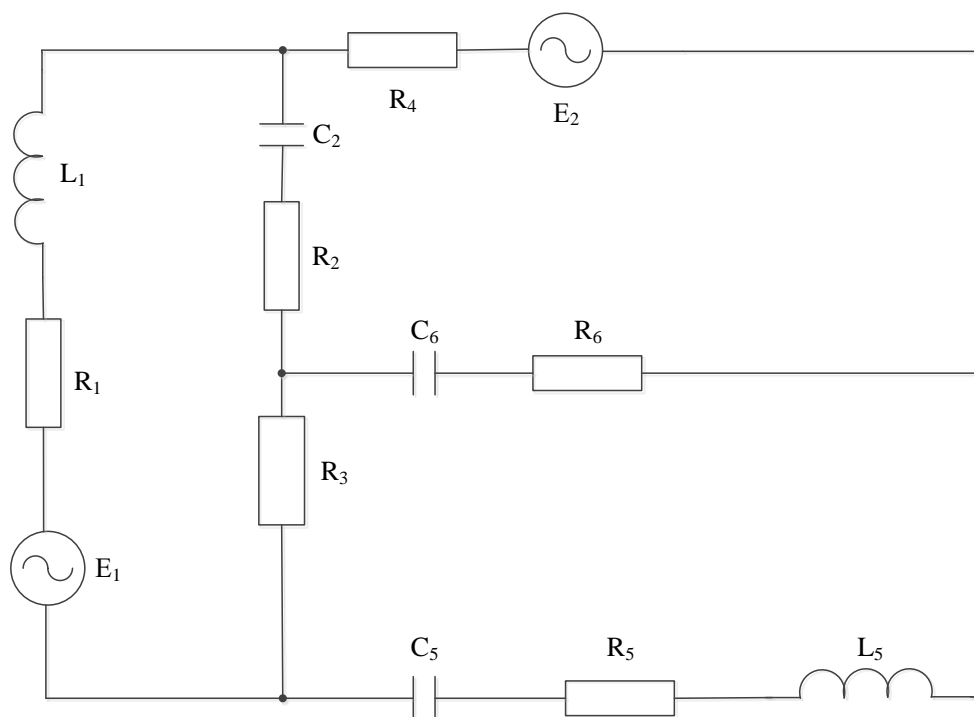


Рис.9.8. Схема для исследования

Варианты для расчета представлены в таблице 9.1.

Таблица 9.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R_1 Ом	220	560	160	360	260	270	280	660	360	460	560	660
L_1 Н·10 ⁻⁶	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
R_2 Ом	100	60	70	59	56	80	90	100	67	98	99	80
R_3 Ом	140	100	100	90	80	60	120	120	40	120	90	110
C_2 F·10 ⁻⁶	10	20	30	40	10	15	10	30	50	20	40	30
R_4 Ом	180	200	200	200	100	200	200	250	350	150	100	150
L_5 Н·10 ⁻⁶	20	10	40	40	30	35	30	20	10	20	40	30
R_5 Ом	160	250	270	220	300	160	220	300	170	180	190	200
C_5 F·10 ⁻⁶	40	50	30	60	70	65	50	30	70	40	30	20
R_6 Ом	50	60	70	80	90	100	90	80	70	60	50	60
C_6 F·10 ⁻⁶	30	40	40	50	70	60	55	35	60	45	35	25
E_1 В	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
E_2 В	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127

2. Порядок выполнения работы

- Набрать и исследовать модель (рис 9.8.).
- Промоделировать работу модели.
- Составить схему для расчета мощностей.

3. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Заданную схему с параметрами.
- Схему модели, выполненную в SimInTech, с рассчитанными токами и напряжениями.
- Схему для расчета мощностей.
- Выводы.

4. Контрольные вопросы

1. Как создать примитив «AutoLabel»?
2. Как задаются в модели значения индуктивности и емкости?
3. Что такое активная мощность?
4. Как вычислить активную мощность потребляемую схемой представленной на рис.9.8?
5. Что такое реактивная мощность?
6. Как вычислить реактивную мощность потребляемую схемой представленной на рис.9.8?
7. Как вычислить полную мощность потребляемую схемой представленной на рис.9.8?

Практическое занятие 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Цель работы

Исследование однофазного трансформатора.

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

При подключении первичной обмотки силового трансформатора к сети первичный ток i_1 , проходя по её виткам w_1 , возбуждает в сердечнике синусоидальный магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота питающего напряжения u_1 (рис.10.1). Этот поток, пронизывая витки w_1 первичной и витки w_2 вторичной обмоток, наводит в них ЭДС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

или (для действующих значений):

$$E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44f w_2 \Phi_m.$$

С вторичной обмотки снимается напряжение u_2 , которое подаётся к потребителю электрической энергии Z_H .

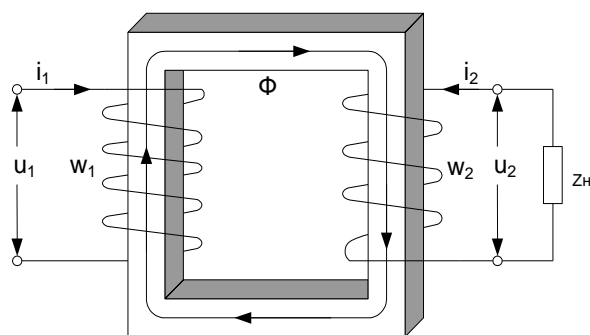


Рис. 10.1. Однофазный трансформатор.

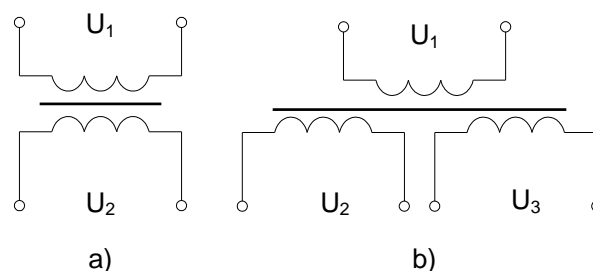


Рис. 10.2. Схемы трансформатора с одной и двумя вторичными обмотками

Схемы трансформатора с одной и двумя вторичными обмотками представлены на рис.10.2.

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенной нагрузке ($Z_H = \infty$) является его током холостого хода I_0 . Его выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току I_{1H} , т. е. $i_0 (\%) = 10\% I_{1H}$.

Ток холостого хода $i_0(\%)$ в силовых трансформаторах составляет (2...5) %, а в маломощных трансформаторах может составить (20...50) % номинального тока I_{1H} .

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют коэффициентом трансформации трансформатора:

$$n = E_1 / E_2 = w_1 / w_2.$$

Для определения коэффициента трансформации n , а также параметров схемы замещения и потерь мощности в трансформаторе проводят опыты холостого хода (опыт ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

Потери мощности при ХХ, называемые потерями в стали P_0 , которые затрачиваются в основном на нагрев магнитопровода от действия вихревых токов и циклического перемагничивания стали, т. е. $P_0 \approx P_x$.

При опыте КЗ в отличие от опасного аварийного короткого замыкания трансформатора, возникающего случайно при работе при напряжении $U_1=U_{2н}$, к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение $U_1=U_k$, при котором в его обмотках устанавливаются токи, равные соответствующим номинальным значениям:

Ввиду малости магнитного потока Φ (пропорционального пониженному напряжению U_k) при опыте КЗ и соответственно потерь в стали (а они пропорциональны магнитному потоку в квадрате, т. е. Φ^2) активная мощность, потребляемая трансформатором из сети, идёт в основном на нагрев обмоток, т. е. равна электрическим потерям (называемыми потерями в меди P_m) в проводах обмоток.

Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки при изменяемой нагрузке от тока нагрузки, т. е. $U_2=f(I_2)$, носит название внешней характеристики трансформатора.

Для исследования трансформатора составим модель в SimInTech. Модель представлена на рис. 10.3.

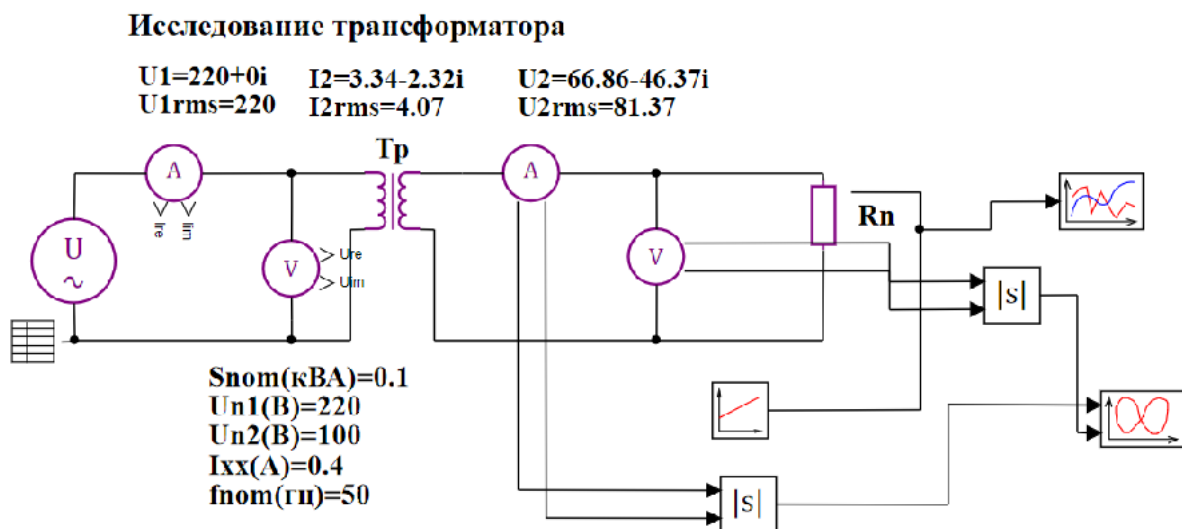
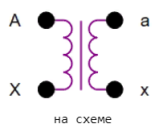


Рис. 10.3. Модель трансформатора



Блок реализует модель однофазного двухобмоточного трансформатора. Используется совместно с элементами библиотеки «ЭЦ - Статика (ЭЦС) v2.0».

Для подключения нагрузки R_n возьмем управляемую RLC, которая находится в библиотеки «ЭЦ - Статика (ЭЦС) v2.0» (рис.10.4).

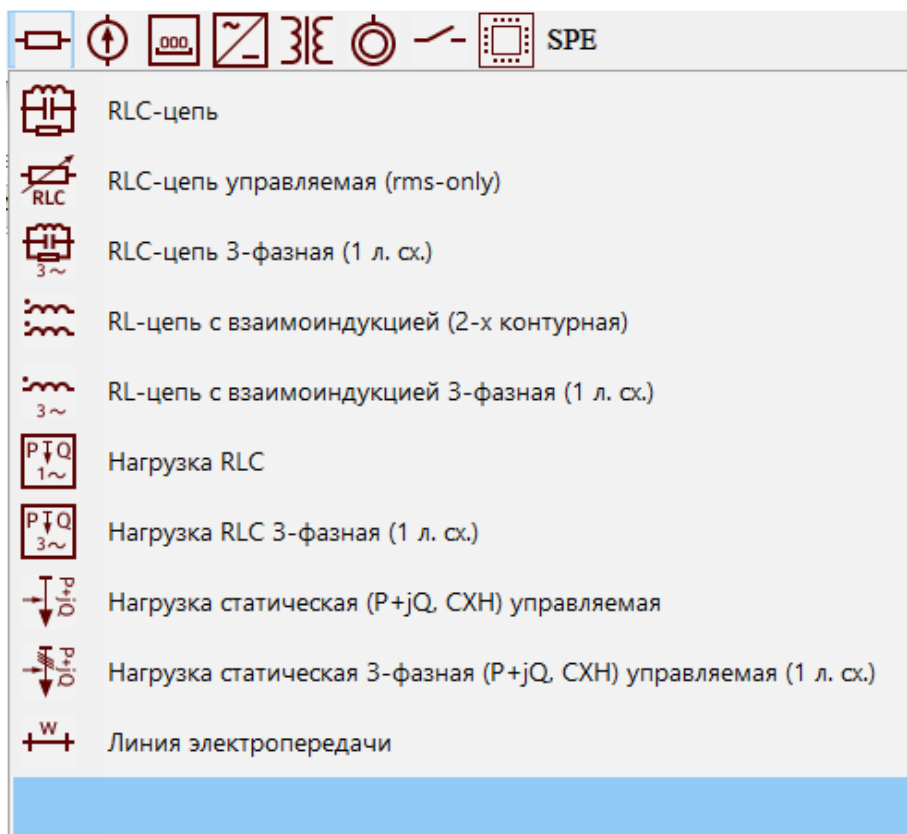


Рис. 10.4. Электротехнические элементы.

На вход управляемой RLC подключим линейный источник из библиотеки «Источники» (рис.10.5).



Рис. 10.5. Библиотека «Источники».

Настройка свойств линейного источника показана на рис. 10.6.

Свойства : Linear_source8			
Свойства Общие Порты Визуальные слои			
Название	Имя	Формула ▾	Значение
Свободный член	a		[10000]
Коэффициент при t	b		[-499.5]

Рис. 10.6. Настройка свойств линейного источника.

График изменения нагрузки от времени расчета, подключенной к вторичной обмотки трансформатора, показан на рис. 10.7

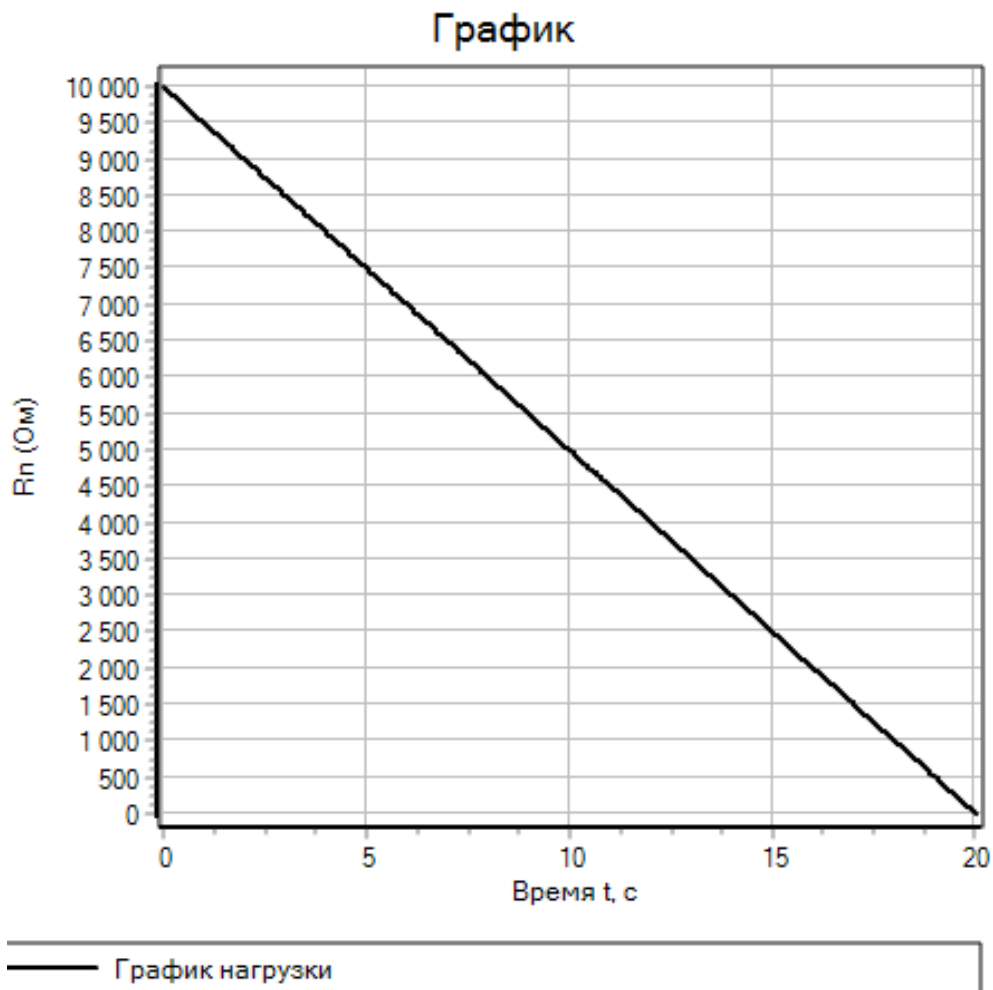


Рис. 10.7. График изменения нагрузки от времени расчета.

Рассчитанная внешняя характеристика трансформатора представлена на рис. 10.8.

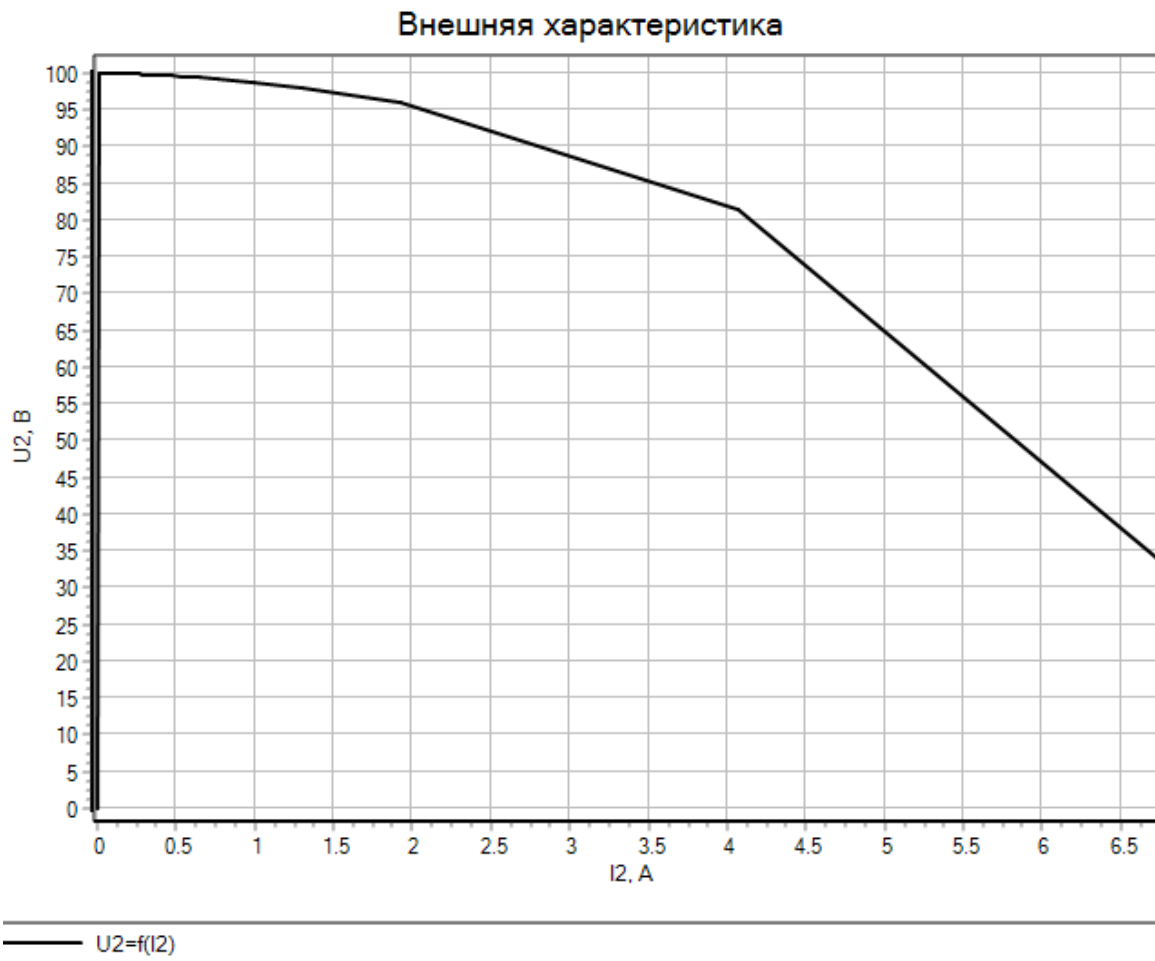


Рис. 10.8. Внешняя характеристика трансформатора.

Построим модель для расчета семейства внешних характеристик трансформатора при активной, активно - индуктивной и активно - емкостной нагрузках. Модель представлена на рис. 10.9. Она состоит из трех субмоделей. Субмодели для разного характера нагрузки представлены на рис.10.10, рис.10.11 и рис.10.12.

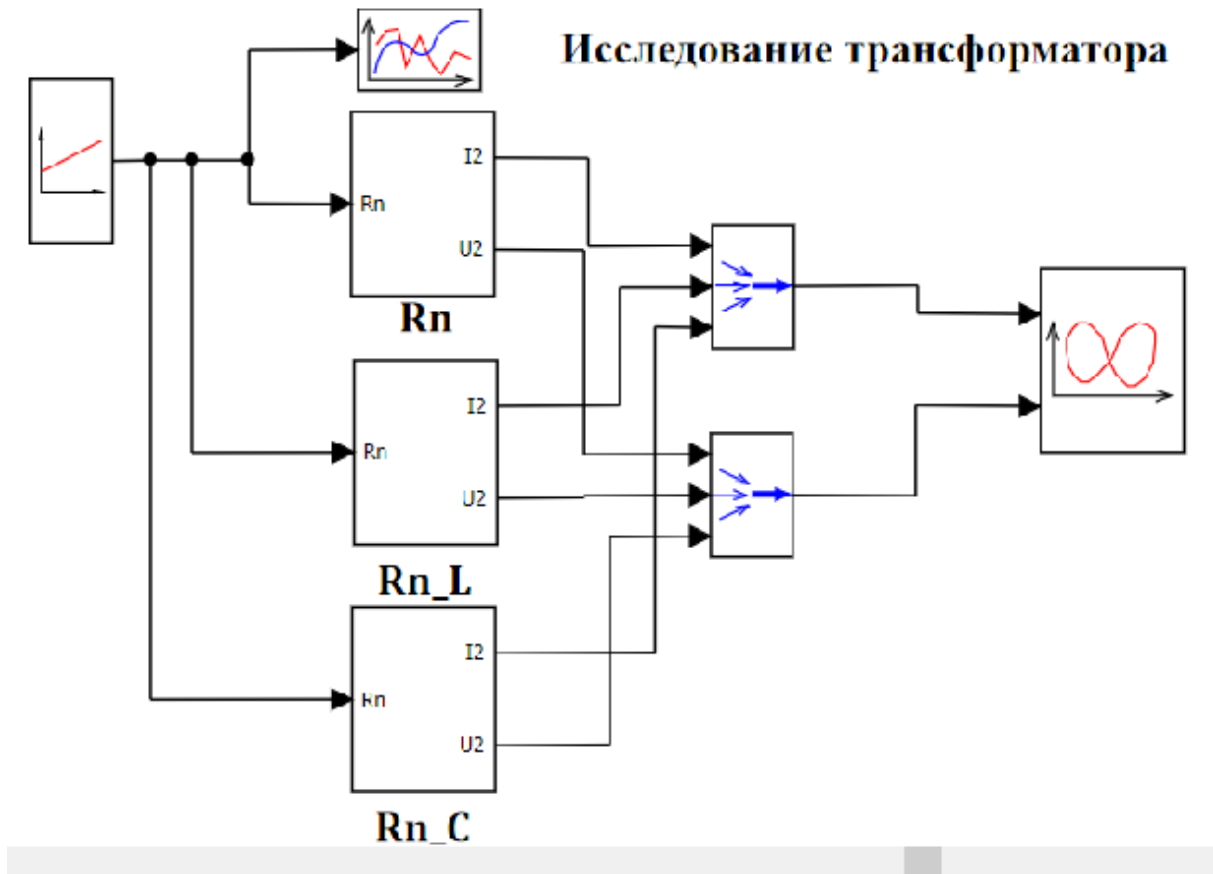


Рис. 10.9. Модель для расчета семейства внешних характеристик трансформатора

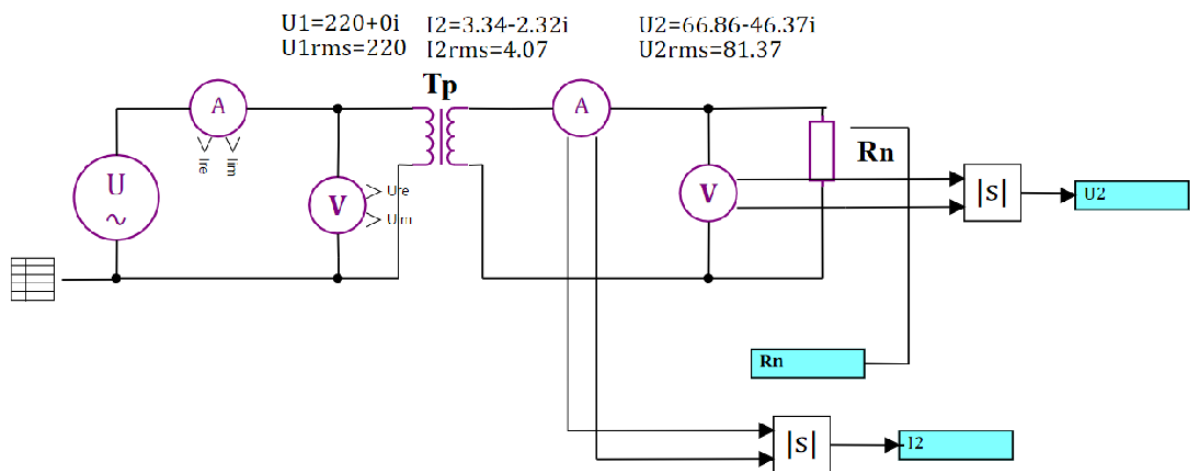


Рис.10.10. Субмодель для активной нагрузки трансформатора

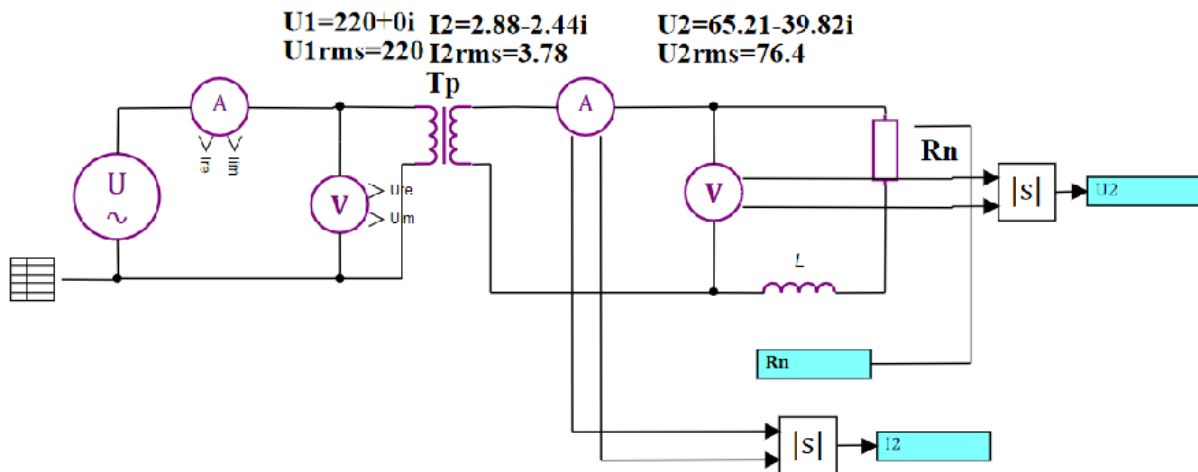


Рис.10.11. Субмодель для активно - индуктивной нагрузки трансформатора

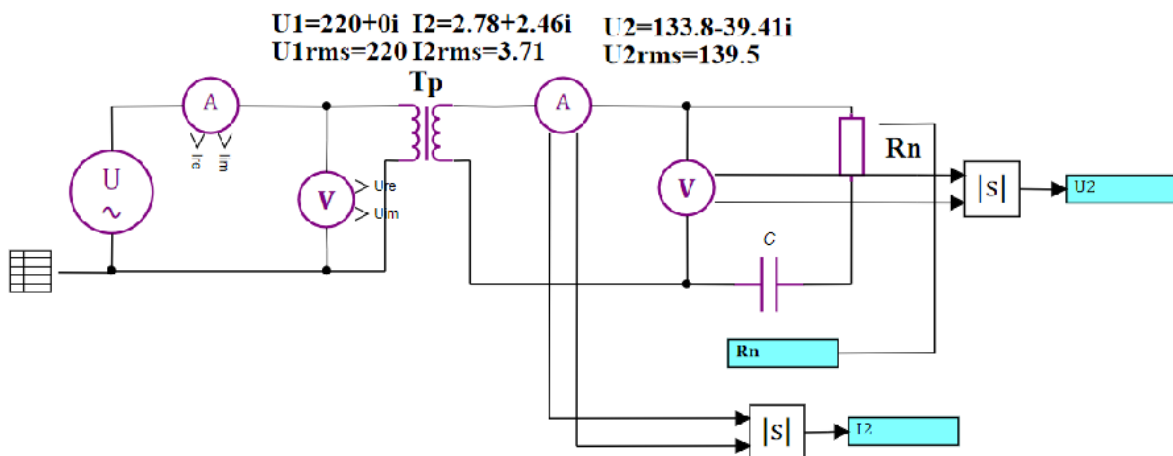


Рис.10.12. Субмодель для активно - емкостной нагрузки трансформатора

Семейство рассчитанных внешних характеристик трансформатора представлено на рис. 10.13.

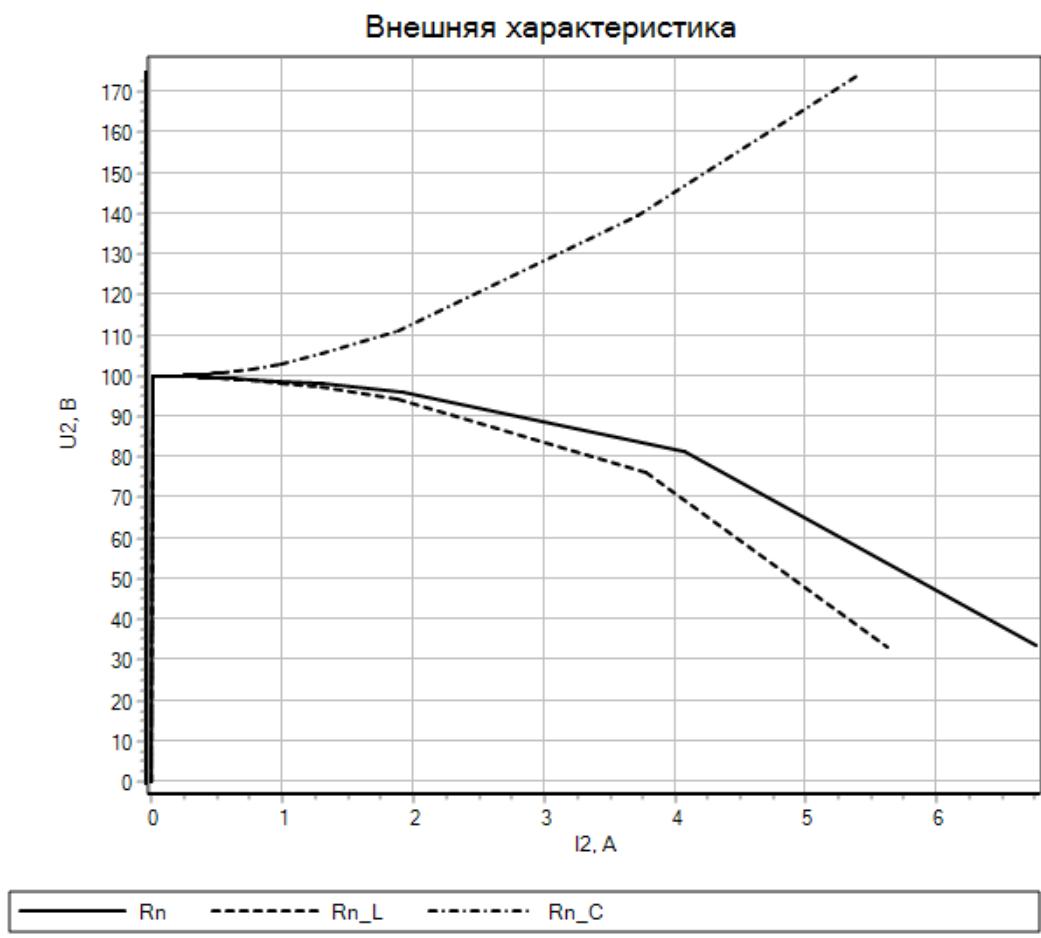


Рис.10.13. Семейство внешних характеристик трансформатора.
 $C=0.0001$ Ф; $L=0.01$ Гн; $R_n=10000\dots 10$ Ом

2. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рис. 10.3 и рис.10.9. Выбрать параметры трансформатора в таблице 10.1.

Таблица 10.1

Номер варианта	S_n , кВ·А	U_{1n} , В	U_{2n} , В	i_0 , %	u_k , %	P_0^* , Вт	P_M^* , Вт
1	0,100	220	12	24	9,0	1	3
2	0,100	220	24	24	9,0	1	3
3	0,100	220	42	24	9,0	1	3
4	0,160	220	12	23	7,0	1,5	4,2
5	0,160	220	24	23	7,0	1,5	4,2
6	0,160	220	36	23	7,0	1,5	4,2
7	0,160	220	48	23	7,0	1,5	4,2
8	0,250	220	24	22	5,5	2,2	6,0

Окончание табл. 10.1

Номер варианта	S_n , кВ·А	$U_{1н}$, В	$U_{2н}$, В	i_0 , %	u_k , %	P_0^* , Вт	P_M^* , Вт
9	0,250	220	36	22	5,5	2,2	6,0
10	0,250	220	48	22	5,5	2,2	6,0
11	0,400	220	12	20	4,5	3,2	7,5
12	0,400	220	24	20	4,5	3,2	7,5
13	0,400	220	36	20	4,5	3,2	7,5
14	0,400	220	48	20	4,5	3,2	7,5
15	0,630	220	36	19	3,5	5,0	12
16	1,000	220	36	18	2,75	7,0	16
17	0,100	380	12	24	9,0	1	3
18	0,100	380	36	24	9,0	1	3
19	0,250	380	36	22	5,5	2,2	6,0
20	0,250	380	48	22	5,5	2,2	6,0
21	0,400	380	36	20	4,5	3,2	7,5
22	0,400	380	48	20	4,5	3,2	7,5
23	0,630	380	12	19	3,5	5,0	12

2. Провести опыт ХХ трансформатора.

3. Провести опыт КЗ трансформатора.

Установить напряжения источника так, чтобы ток во вторичной обмотке трансформатора был равен номинальному току. Данные измерений занести в таблицу;

4. Рассчитать внешние характеристики трансформатора ($U_2=f(I_2)$) при резистивной, индуктивной и ёмкостной нагрузках и при токах 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 $I_{2н}$ ($I_{2н} \approx nI_{1н}$).

4. Начертить упрощенную Т-образную схему замещения нагруженного трансформатора. Рассчитать и построить векторные диаграммы нагруженного трансформатора при токе $I_1 = I_{1н}$ и нагрузках R, L и C.

3. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы

2. Расчёт параметров модели трансформатора.

3. Результаты измерений и расчётов.

4. Упрощенная схема замещения трансформатора, его векторные диаграммы при нагрузках R, L и C и графики внешних характеристик $U_2 = f(I_2)$.

5. Выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Укажите формулы расчёта коэффициента трансформации и трансформатора.
2. Как вычислить КПД трансформаторов?
3. Каким потерям мощности, в основном, соответствует показание ваттметра при опыте КЗ трансформатора?
4. Можно ли с помощью трансформатора изменить величину и частоту выходного напряжения?
5. Какие потери мощности определяют с помощью ваттметра, включенного в первичную цепь трансформатора при разомкнутой вторичной цепи?
6. Как проводится опыт холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

Практическое занятие 11 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы: исследование и расчет характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения (рис. 11.1), описывается следующей системой дифференциальных и алгебраических уравнений в абсолютных единицах:

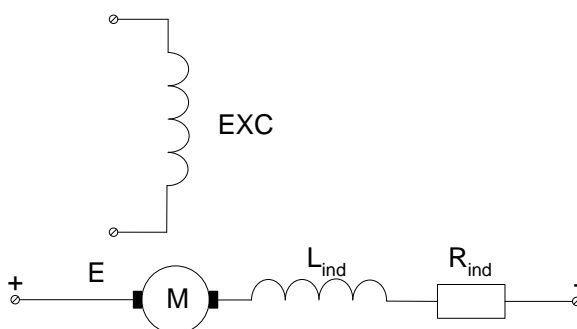


Рис. 11.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

$$u = e + R_{ind} \cdot i + L_{ind} \frac{di}{dt}; \quad (1)$$

$$M - M_r = J \frac{d\Omega}{dt}; \quad (2)$$

$$M = c_e \cdot \Phi \cdot i; \quad (3)$$

$$e = c_e \cdot \Phi \cdot \Omega, \quad (4)$$

где

u - напряжение на якорной обмотке двигателя;

e - электродвижущая сила (ЭДС) якоря;

i - ток якоря;

Φ - поток, создаваемый обмоткой возбуждения;

M - электромагнитный момент двигателя;

M_r - момент сопротивления движению;

ω - частота вращения вала двигателя;

R_{ind} - активное сопротивление якорной цепи;

L_{ind} - индуктивность якорной цепи;

J - суммарный момент инерции якоря и нагрузки, приведенный к валу двигателя;

c_e - коэффициент связи между скоростью и ЭДС.

Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением приведена на рис.11.2.

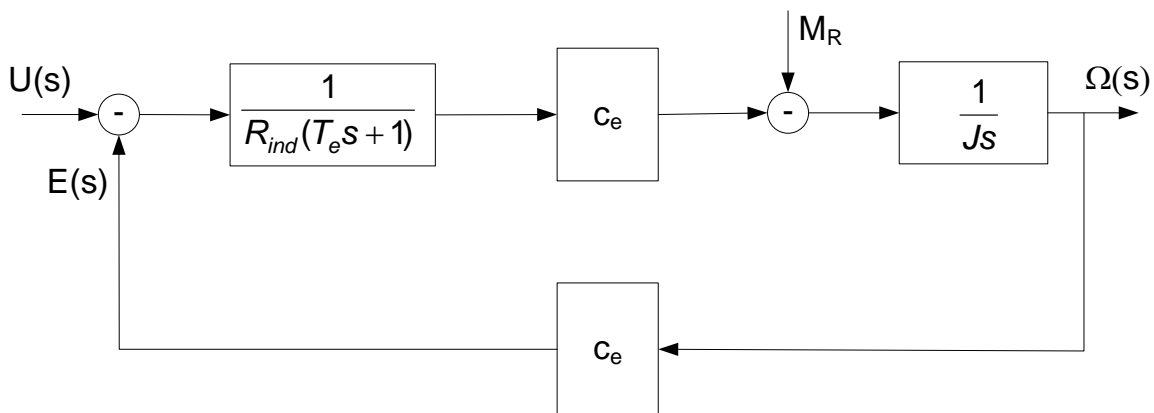


Рис. 11.2. Структурная схема двигателя постоянного тока

С точки зрения будущей модели, входными воздействиями являются напряжения якоря u и момент сопротивления движению M_r ; выходными переменными - электромагнитный момент двигателя M и скорость вращения вала двигателя ω , а переменными состояния - переменные стоящие под знаком производной (ток якоря i и частота вращения вала двигателя ω). Остальные переменные, входящие в состав уравнений (1) - (4) являются параметрами, численные значения которых, необходимо будет задавать при проведении моделирования.

Схема модели, а также графики электромагнитного момента и частоты вращения при прямом пуске двигателя показаны на рис.11.3. В примере приняты следующие значения параметров двигателя (в единицах СИ): $L_{ind}=0.001$, $R_{ind}=0.1$, $J=10$, $c_e=10$, $U=220$. Наброс нагрузки, производится в момент времени 0.2 с. Величина момента нагрузки равна 2500Нм. Модель для исследования динамических характеристик ДПТ, реализованная в SimInTech, приведена на рис.11.3. Результаты моделирования ДПТ даны на рис. 11.4.

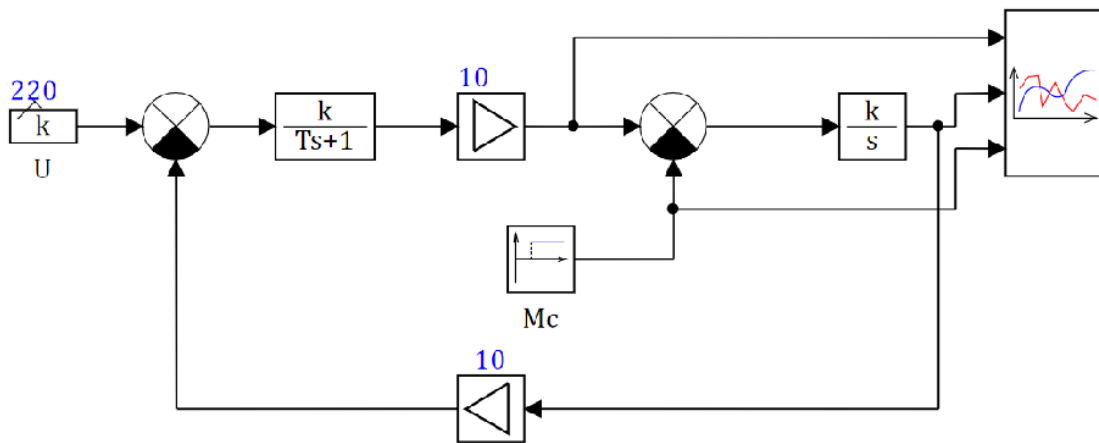


Рис.11.3. Схема модели ДПТ

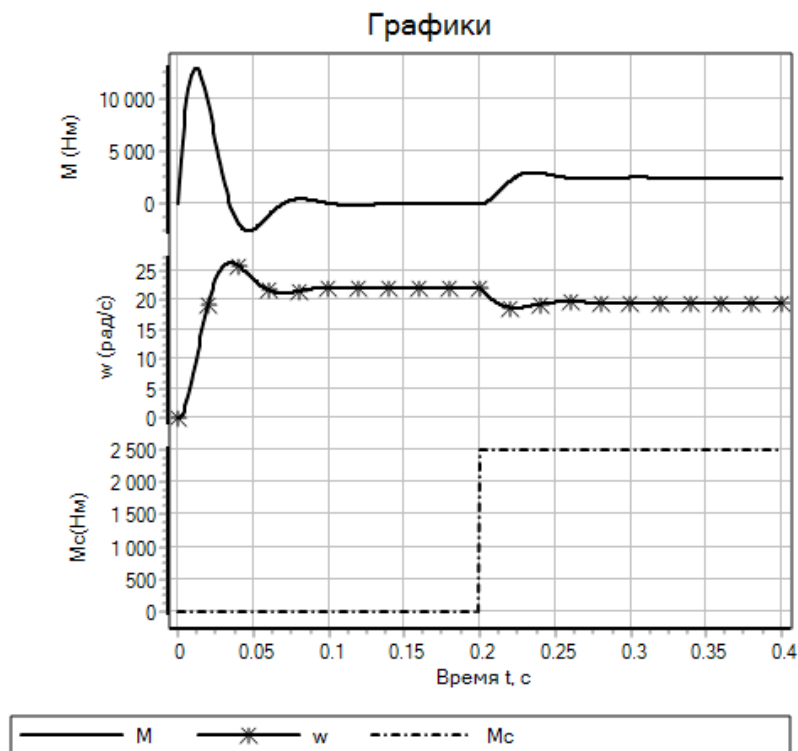


Рис.11.4. Графики электромагнитного момента и частоты вращения

Составим модель для исследования пусковых характеристик ДПТ. Она приведена на рис. 11.5

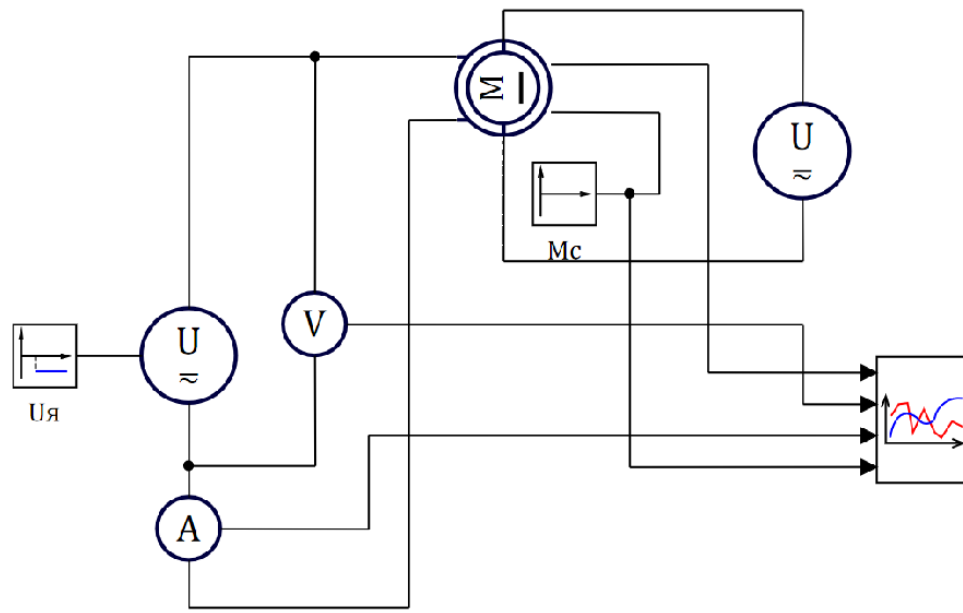


Рис. 11.5. Модель для исследования пусковых характеристик ДПТ

Результаты моделирования пуска двигателя даны на рис. 11.6. Зависимости частоты вращения, тока якоря ротора ДПТ, электромагнитного момента и напряжения, приложенного к ДПТ, представлены на рис. 11.6.

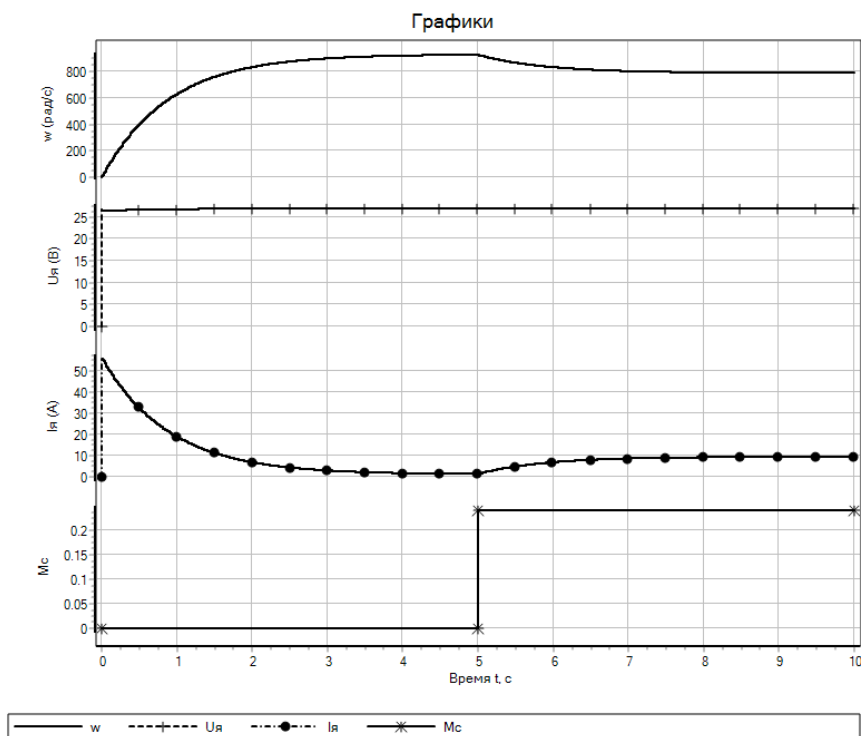


Рис.11.6. Результаты моделирования пуска двигателя при $U_{я} = \text{const}$.

Рассмотрим пусковые характеристики двигателя при изменении полярности напряжения питания (рис.11.7). Временной интервал (10 с) соответствует разгону ДПТ до заданной частоты вращения при моменте сопротивления равным нулю. В момент времени 10 с напряжение, приложенное к обмотке якоря ДПТ, меняет полярность. Он начинает тормозиться и затем происходит реверс (рис.11.7).

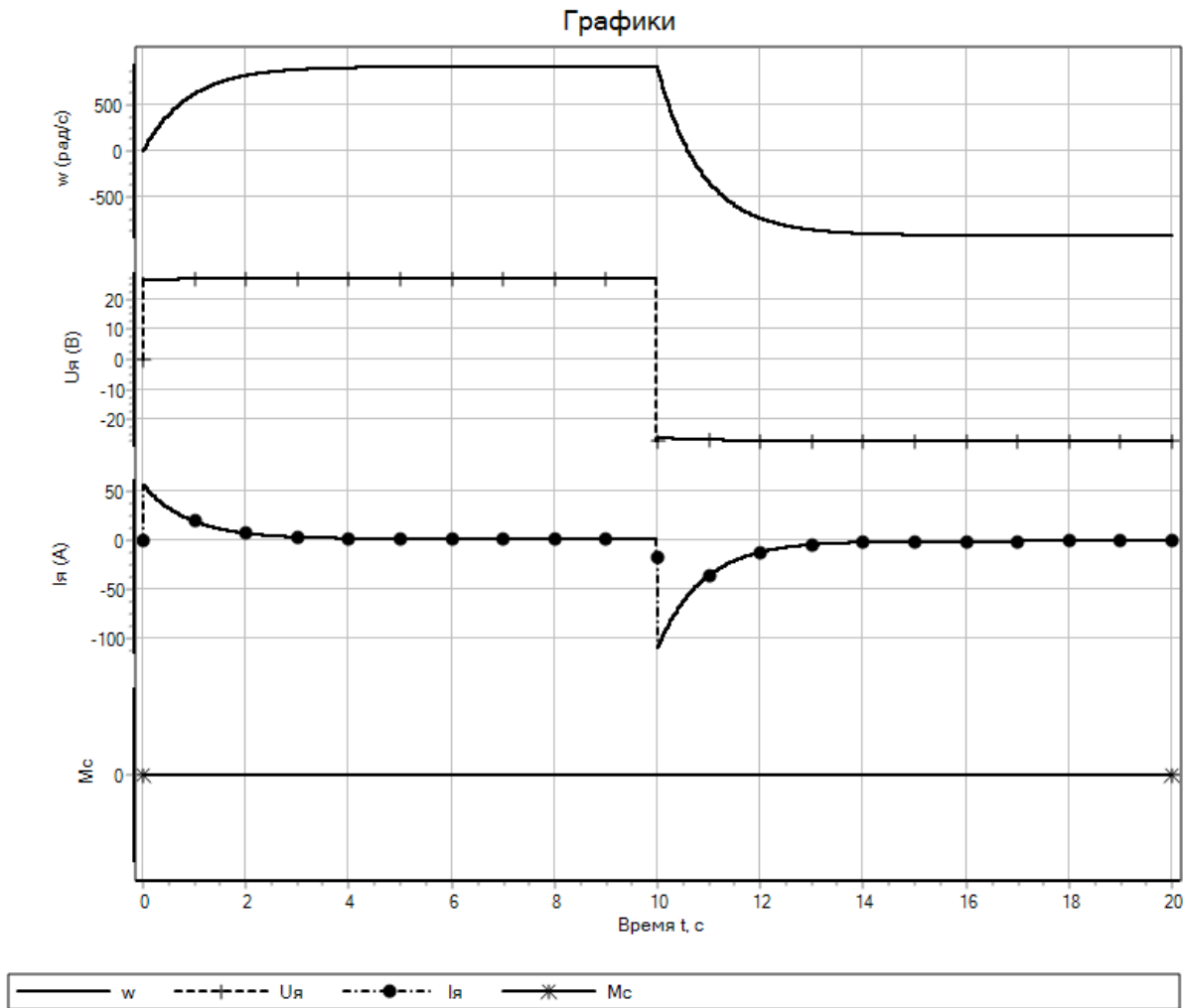


Рис.11.7. Результаты моделирования пуска и реверса двигателя при $M_c=0$.

Рассмотрим расчет механических характеристик $\omega=f(M_c)$. Модель для расчета механических характеристик ДПТ, приведена на рис. 11.8.

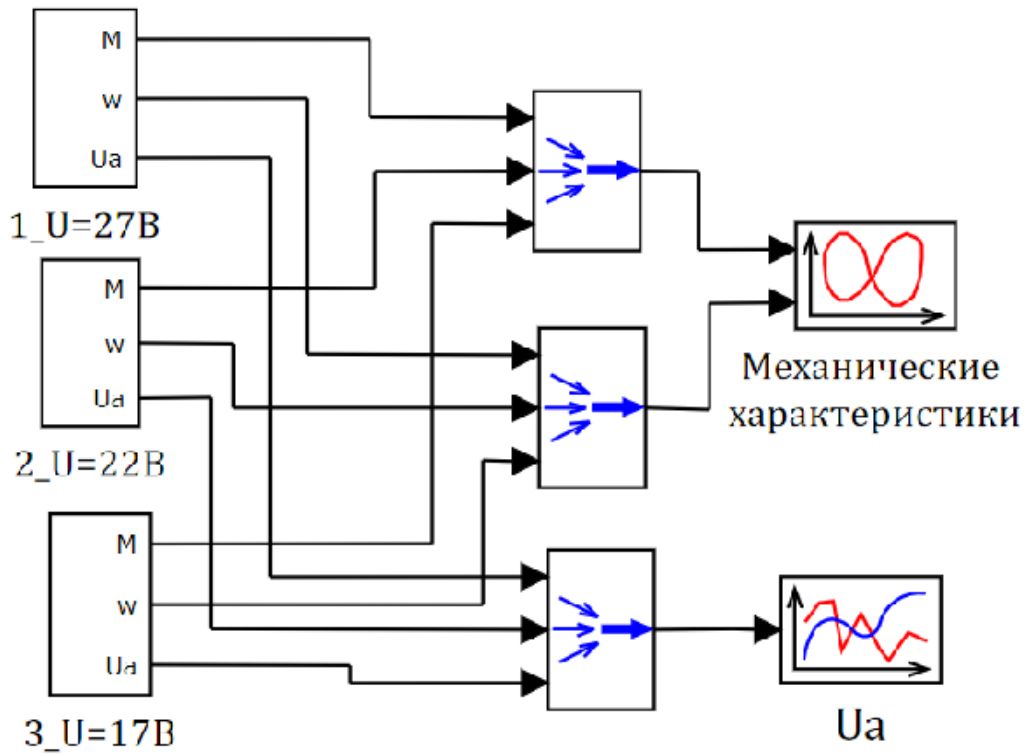


Рис.11.8. Модель для расчета механических характеристик ДПТ

Модель состоит из трех субмоделей, в которых напряжение питания якоря ДПТ, различно (рис.11.8). В первой субмодели $U=27$ вольт, во второй $U=22$ вольт и в третьей $U=17$ вольт.

Первая субмодель представлена на рис. 11.9.

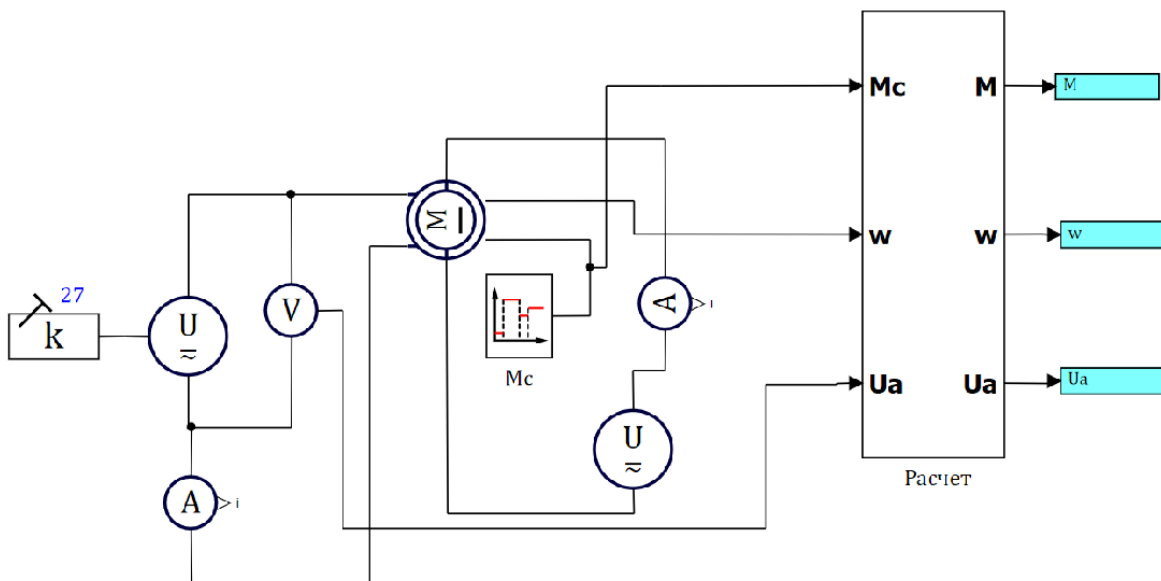


Рис.11.9. Субмодель для расчета механических характеристик ДПТ

Субмодель «Расчет» представлена на рис. 11.10.

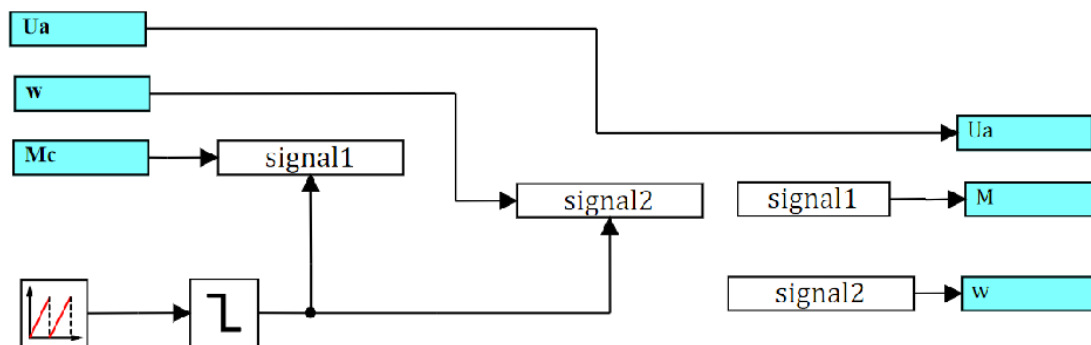


Рис.11.10. Субмодель «Расчет» для расчета механических характеристик ДПТ

Величина частоты вращения вала ДПТ записывается в локальный список сигналов проекта при достижении значения сигнала «пила» равного единице (рис.11.13 и рис.11.14). Момент считывания значения частоты происходит в момент изменения сигнала с единицы до нуля. Время постоянства момента сопротивления (рис.11.12) также равно 5 секундам.

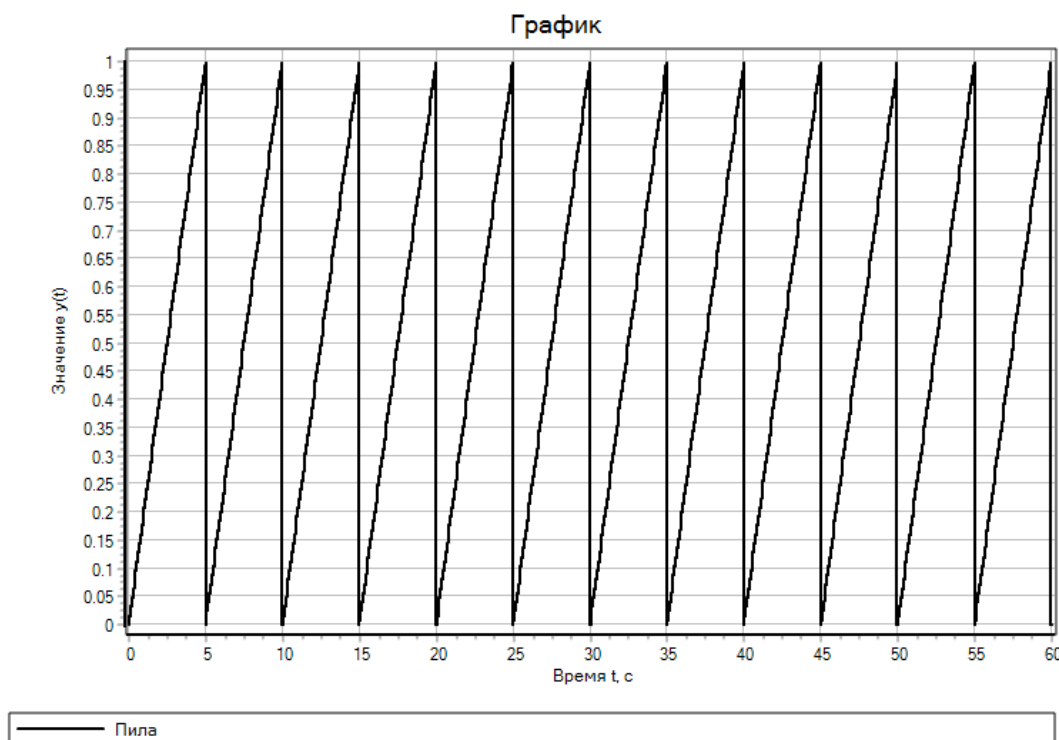


Рис.11.11. Сигнал «Пила» с периодом 5 секунд.

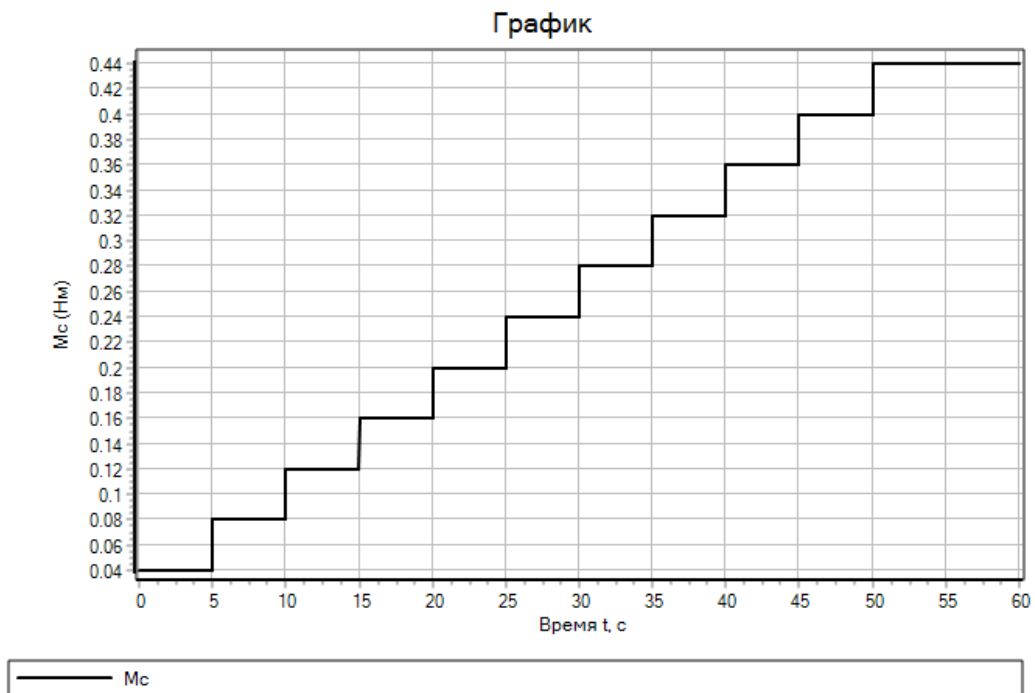


Рис. 11.12. Момент сопротивления, приложенный к валу ДПТ

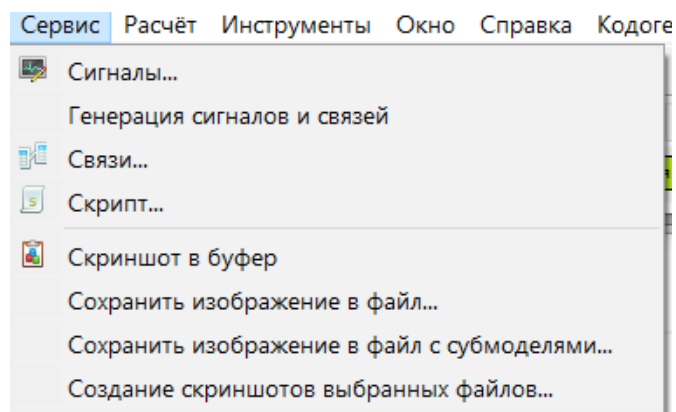


Рис. 11.13. База сигналов

№	Имя	Название	Тип д...	Режим	Формула	Значение	Способ...
1...	signal1	Сигнал1	Веще...	Вход	0	0.44	Перем...
2...	signal2	Сигнал2	Веще...	Вход	0	613.87312	Перем...

Рис. 11.14. База сигналов проекта

Семейство механических характеристик представлено на рис. 11.15. Изменение напряжения, подведенного к якорю двигателя при номинальном потоке, является в регулируемом электроприводе постоянного тока основным управляющим воздействием. Как правило, изменение напряжения возможно только в сторону уменьшения по сравнению с номинальным напряжением. При изменении напряжения пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода двигателя, а наклон механических характеристик при любом уровне напряжения одинаков, поэтому механические характеристики принимают вид параллельных прямых, показанных на рис. 11.15.

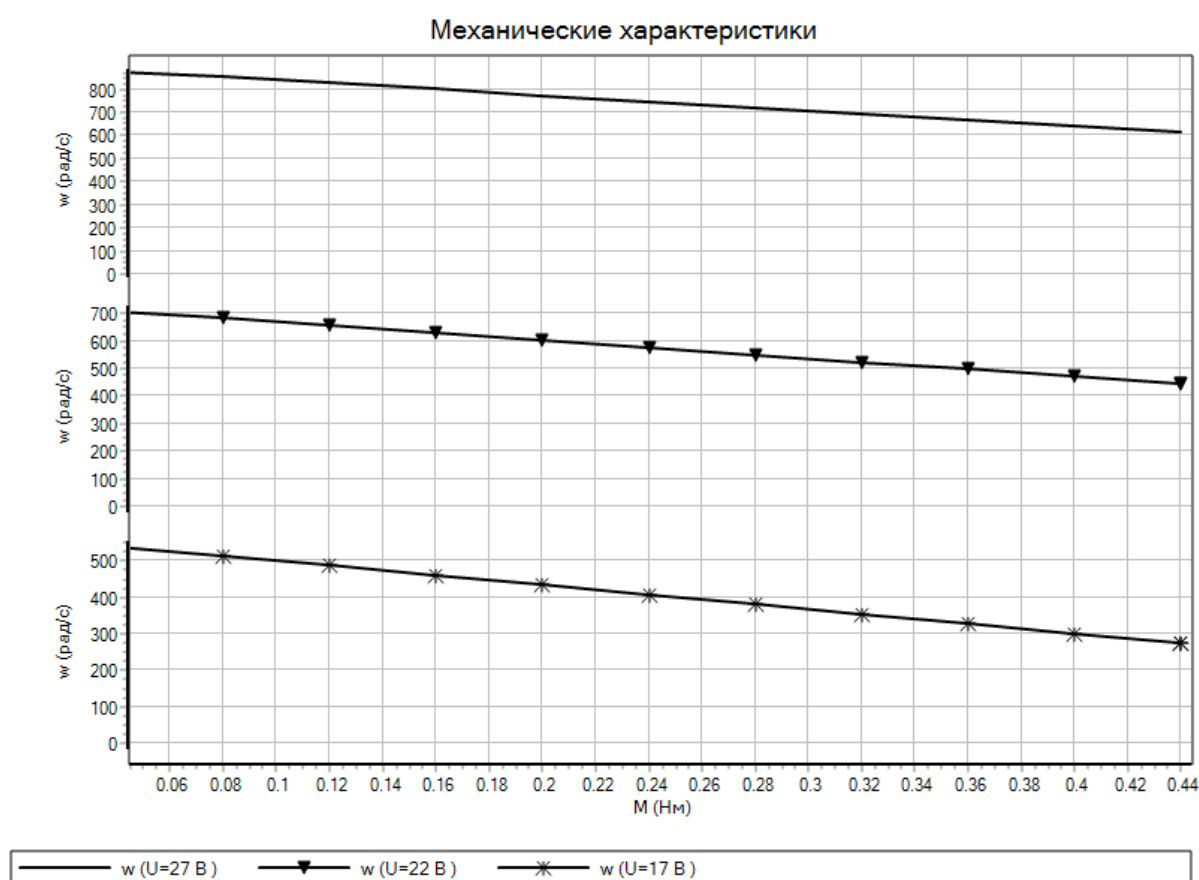


Рис. 11.15. Семейство механических характеристик при $U=var$

Модель для расчета семейства механических характеристик при уменьшении потока возбуждения представлено на рис. 11.16. Изменение потока двигателя Φ в связи с насыщением его магнитной цепи в номинальном режиме практически возможно в сторону уменьшения потока - ослабления поля двигателя. Уменьшение потока вызывает

увеличение скорости идеального холостого хода и уменьшение пускового момента. Соответственно наклон статической механической характеристики увеличивается пропорционально квадрату потока.

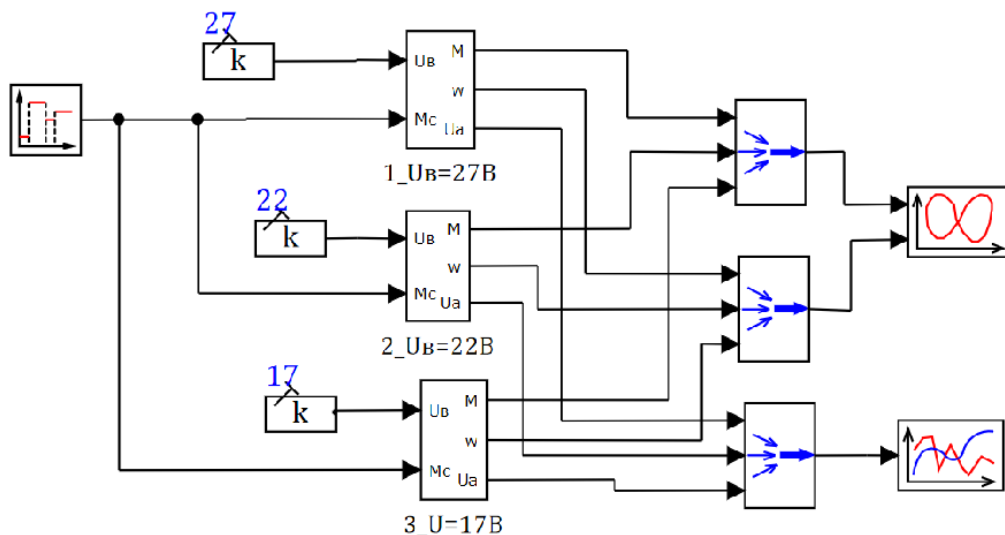


Рис. 11.16. Модель для расчета семейства механических характеристик при уменьшении потока возбуждения

Семейства механических характеристик при уменьшении потока возбуждения представлено на рис.11.17.

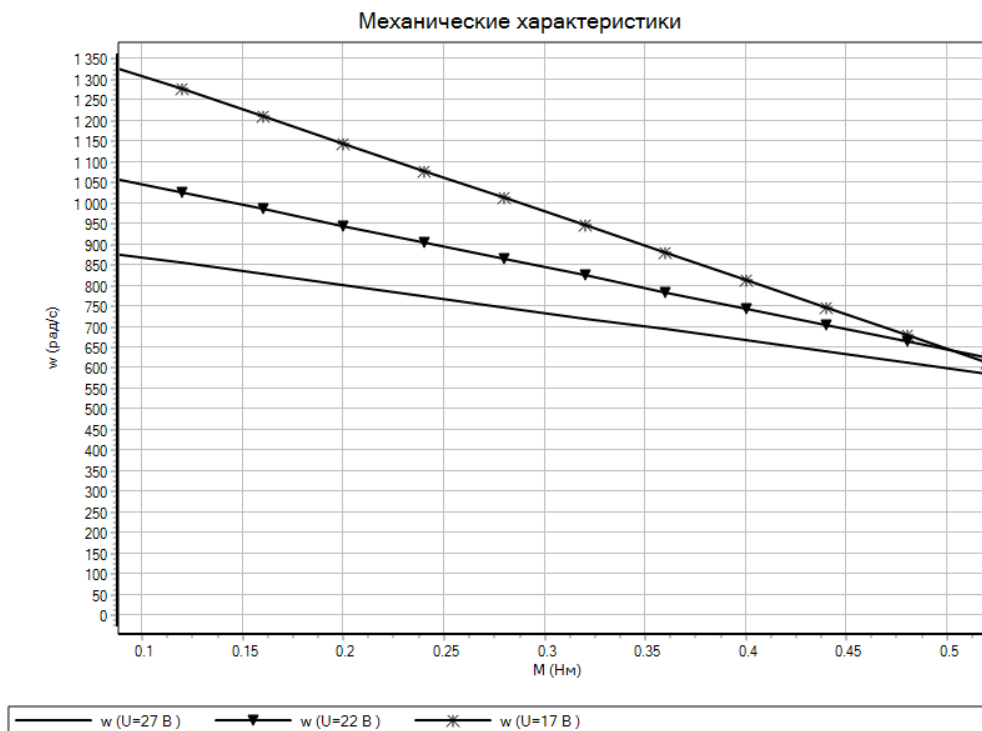


Рис. 11.17. Механические характеристик при уменьшении потока возбуждения

Семейства механических характеристик при изменении дополнительного сопротивления в цепи якоря представлено на рис.11.19. Дополнительное сопротивление можно менять, увеличивая сопротивление якорной обмотки в свойствах ДПТ (рис.11.18).

Свойства			
Параметры			
Общие			
Порты			
Визуальные слои			
Название	Имя	Формула ^	Значение
⊖ Номинальные			
Номинальное напряжение обмотк...	Unomf		27
Номинальное напряжение обмотк...	Unoma		27
Тип	TYPE		Д-180
Номинальная мощность, Вт	Pnom		180
Номинальная частота вращения, ...	Nnom		7500
Момент инерции, кгм2	J		0.0015
Доля механических потерь, %	Plos		13
⊖ Схема замещения			
Параметры обмотки возбуждения...	Zf		[0.441 , 45]
Параметры обмотки якоря [Ля, R...	Za		[0.001157 , 0.47144]
Коэффициент связи обмоток	Kaf		0.04837
⊖ Начальные условия			
⊖ Дополнительные параметры			

Рис. 11.18. Изменение дополнительного сопротивления якорной обмотки

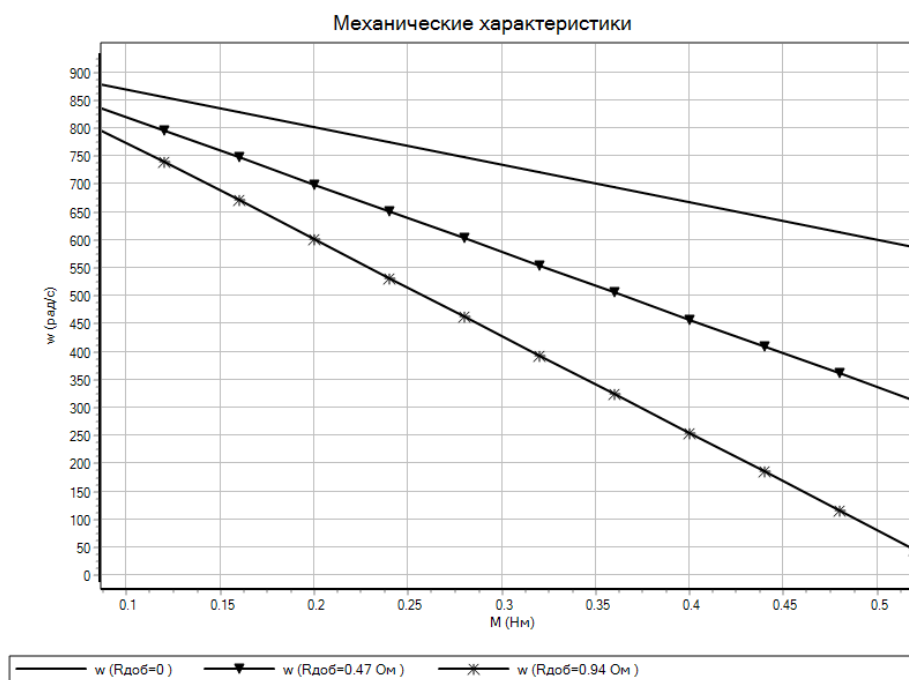


Рис. 11.19. Механические характеристики двигателя при изменении дополнительного сопротивления в цепи якоря

Проведем расчет рабочих характеристик ДПТ. Модель для расчета рабочих характеристик ДПТ, приведена на рис. 11.20.

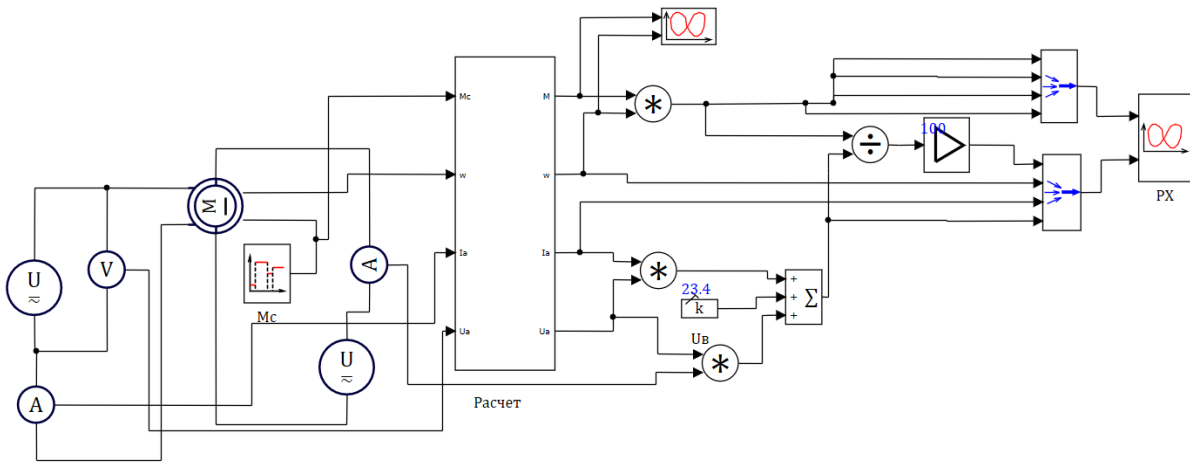


Рис. 11.20. Модель для расчета рабочих характеристик ДПТ

Схема субмодели «Расчет» для расчета рабочих характеристик ДПТ дана на рис. 11.21.

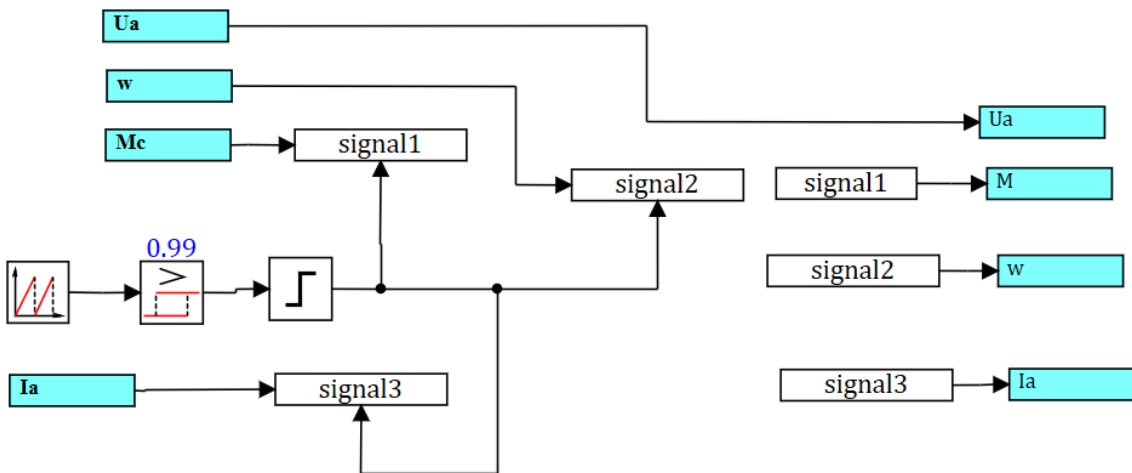


Рис. 11.21. Субмодель «Расчет» для расчета рабочих характеристик ДПТ

Рабочие характеристики ДПТ, приведены на рис. 11.22.

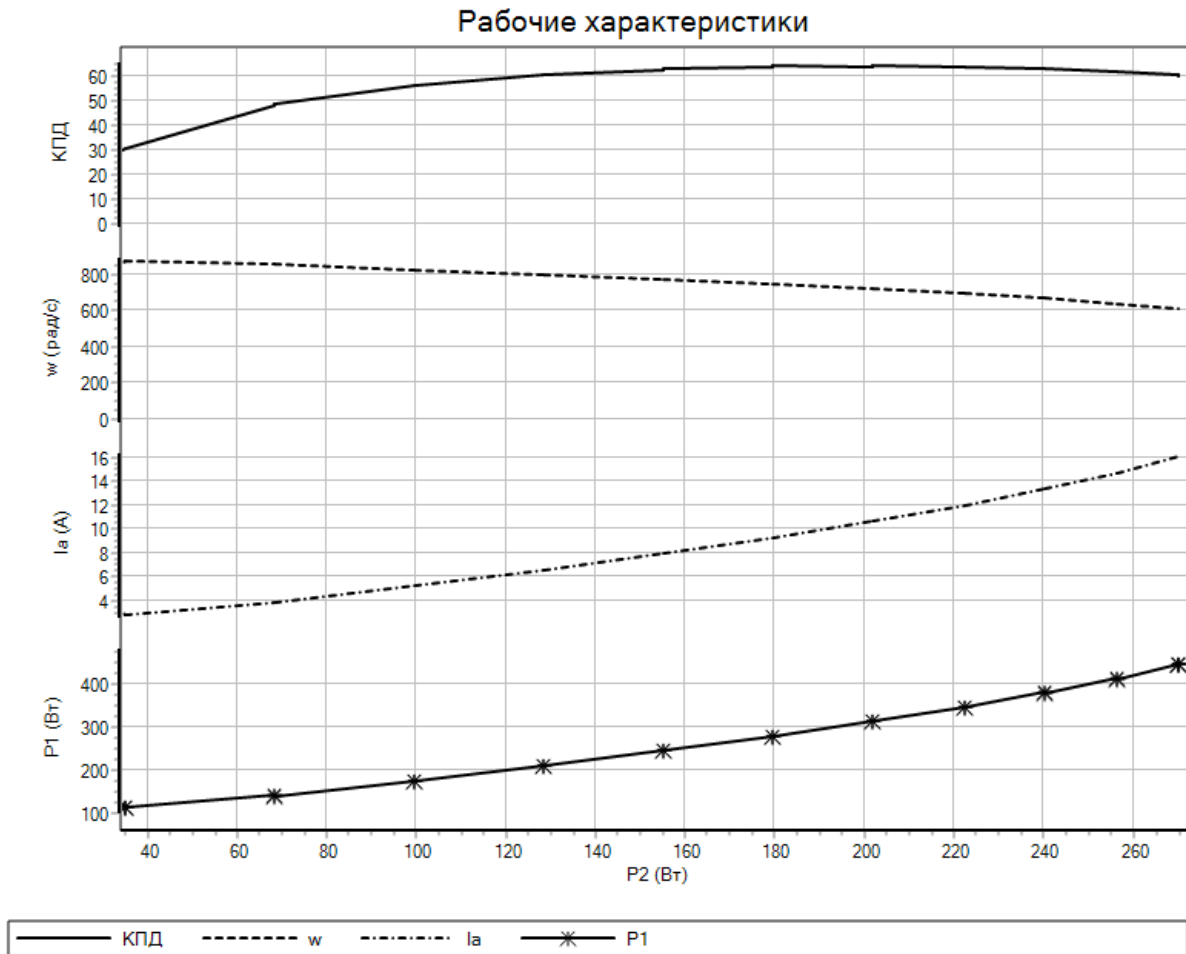


Рис. 11.22. Рабочие характеристик ДПТ

2. Порядок выполнения работы

- Собрать модель, представленную на рис.11.3 и исследовать частотные характеристики ДПТ.
- Собрать модель, представленную на рис.11.5 и исследовать режим пуска.
- Собрать модель, представленную на рис.11.8 и рассчитать механические характеристики.
- Собрать модель, представленную на рис.11.20 и рассчитать рабочие характеристики ДПТ.

3. Содержание отчёта

- Наименование и цель работы.

- Исследуемые схемы в SimInTech.
- Рассчитанные характеристики.
- Выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы двигателя постоянного тока?
2. Как устроен двигатель постоянного тока?
3. В чем состоит особенность пуска двигателя?
4. Для чего используется пусковой резистор, и из каких соображений выбирают его сопротивление?
5. Какой вид имеет механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением?
6. Какой вид имеют рабочие характеристики двигателя?
7. Как можно регулировать частоту вращения двигателя?
8. Как изменить направление вращения якоря?
9. При каких обстоятельствах двигатель идет «в разнос»?
10. Какими достоинствами обладает двигатель, и каковы его недостатки?
11. Где применяются двигатели с параллельным (независимым) возбуждением?

Практическое занятие 12

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. Цель работы: исследование и расчет характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

На рис.12.1 представлена модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя.

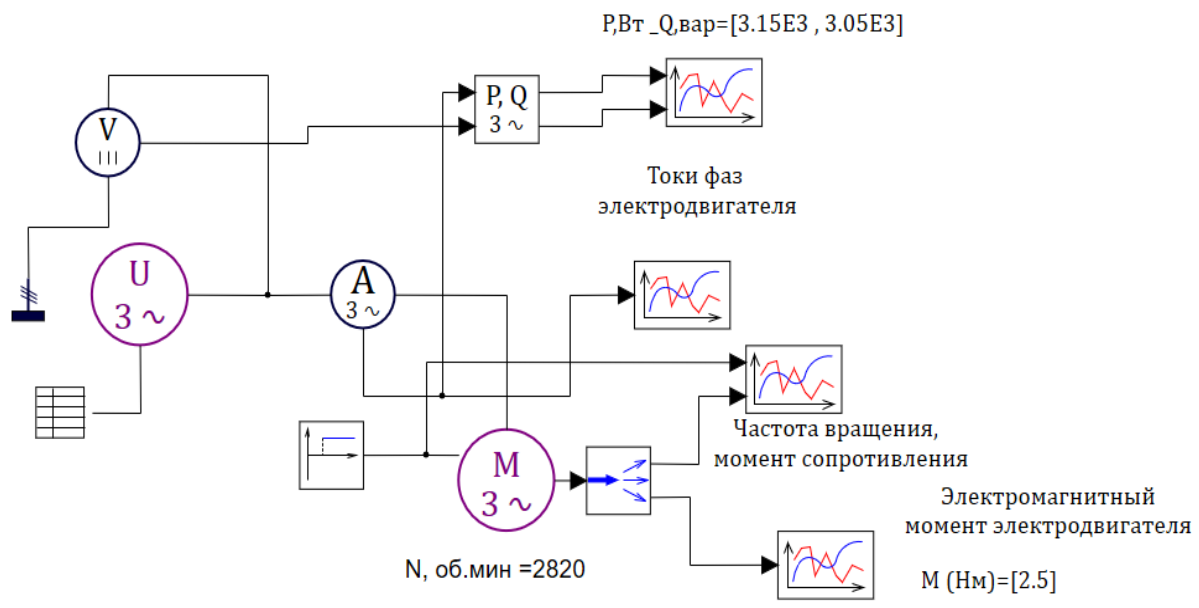


Рис. 12.1. Модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя

Данная модель содержит следующие блоки:

- источник переменного трехфазного напряжения U_a, U_b, U_c ;
- исследуемая трехфазная асинхронная машина АМ;
- Блок для вычисления мгновенных значений активной и реактивной мощности (P, Q) трехфазной цепи по мгновенным значениям токов и напряжений;
 - блок «Вольтметр» и «Амперметр» для измерения значений напряжения и тока фазы А;
 - Блок для отображение текущих результатов моделирования в виде временных зависимостей для одной или одновременно для нескольких переменных.

Параметры асинхронного двигателя представлены на рис.12.2.

Название ▲	Имя	Формула	Значение
Номинальные			
Момент инерции, кг·м ²	J		0.001
Номинальная мощность, кВт	Pnom		1.1
Номинальная частота вращения, об/мин	Nnom		2805
Номинальная частота питающей сети, Гц	fnom		50
Номинальное напряжение, В	Unom		380
Номинальный момент, Н·м	Mnom	3.74	3.74
Тип	TYPE		AIP71B2
Число пар полюсов	p		1
Схема замещения			
Расчет параметров схемы замещения			
Дополнительные			

Рис. 12.2. Окно параметров асинхронного двигателя

Окно настройки параметров контура расчета показано на рис.12.3.

Название ▲	Имя	Формула	Значение
Базовый метод расчёта	top_method	[0]	[0]
Включить отладочную печать	enable_debug_print		<input type="checkbox"/> Нет
Выполнять также на предварительных шагах	execallsteps		<input checked="" type="checkbox"/> Да
Максимальное к-во итераций контура	iter_count		5
Метод интегрирования	int_method		Неявный трапеций;
Метод расчета	method		В мгновенных значениях
Номинальная частота контура, Гц	f_nom		[50]
Параметры задаваемые из портов	in_ports		
Способ расчёта начального состояния	init_mode		Заданные н.у.;

Рис. 12.3. Окно настройки параметров контура расчета

Метод расчета «В мгновенных значениях» (Рис 12.3). Результаты моделирования представлены на рис.12.4.

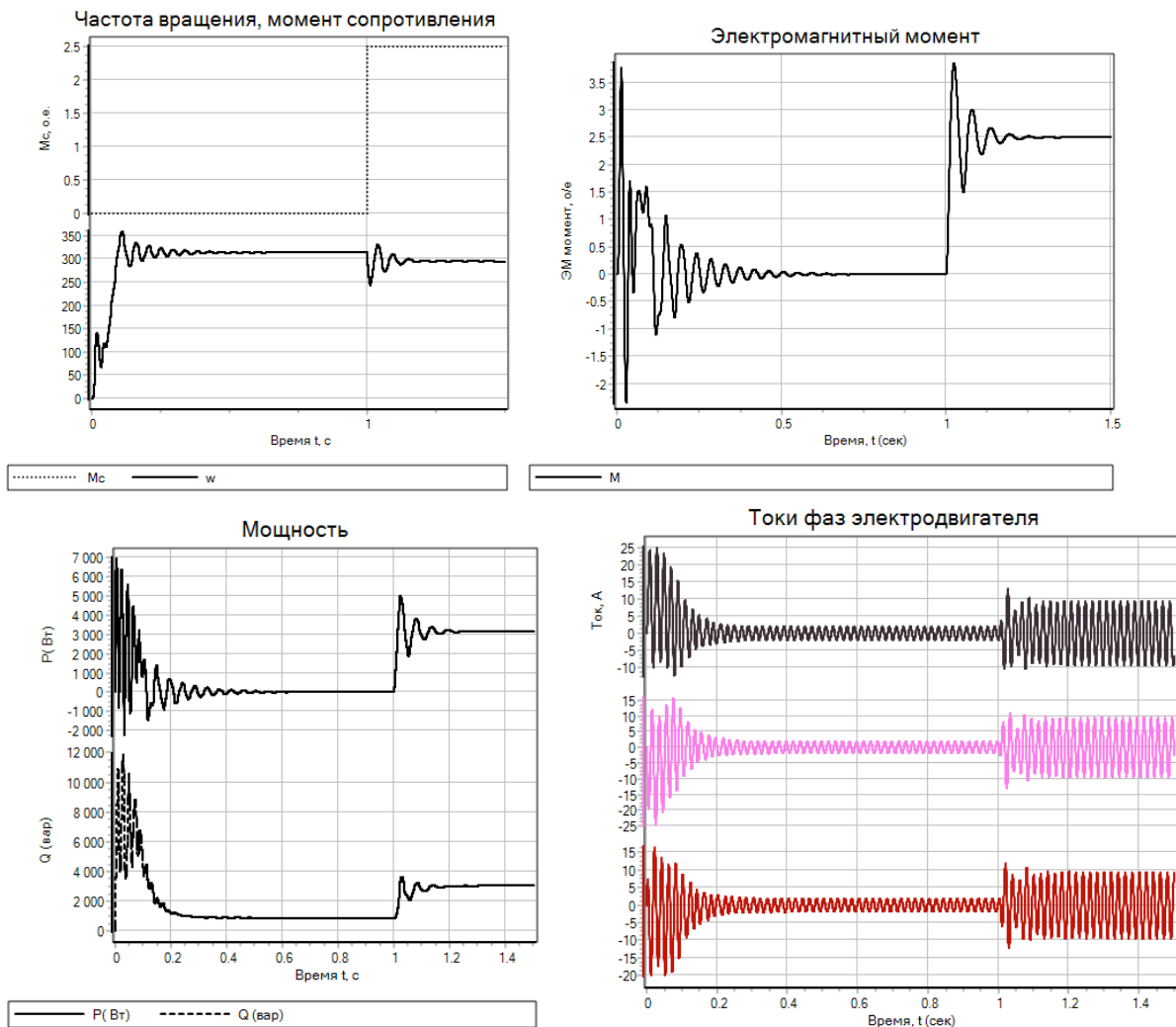


Рис. 12.4. Результаты моделирования процесса пуска АД

Рассмотрим модель пуска АД при методе расчета «В комплексных числах» (Рис 12.5).

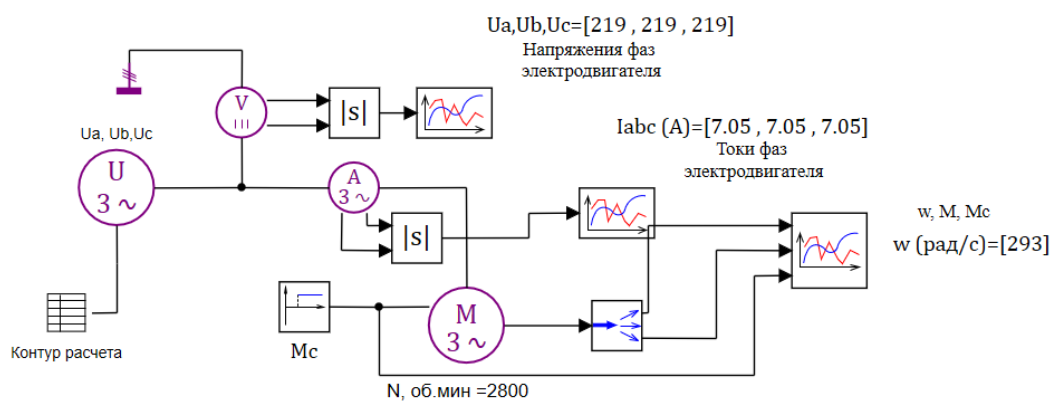


Рис. 12.5. Модель для проведения исследования режима пуска асинхронного двигателя «В комплексных числах»

Окно настройки параметров контура расчета показано на рис. 12.6.

Свойства			
Общие	Порты	Визуальные слои	
Название ▲	Имя	Формула	Значение
Базовый метод расчёта	top_method	[1]	[1]
Включить отладочную печать	enable_debug_print		<input type="checkbox"/> Нет
Выполнять также на предварительных шагах	execallsteps		<input checked="" type="checkbox"/> Да
Максимальное к-во итераций контура	iter_count		5
Метод интегрирования	int_method		Неявный трапеций;
Метод расчета	method		В комплексных числах
Номинальная частота контура, Гц	f_nom		[50]
Параметры задаваемые из портов	in_ports		
Способ расчёта начального состояния	init_mode		Заданные н.у.;

Рис. 12.6. Окно настройки параметров контура расчета

Результаты моделирования представлены на рис.12.7.



Рис. 12.7. Результаты моделирования процесса пуска АД в «В комплексных числах»

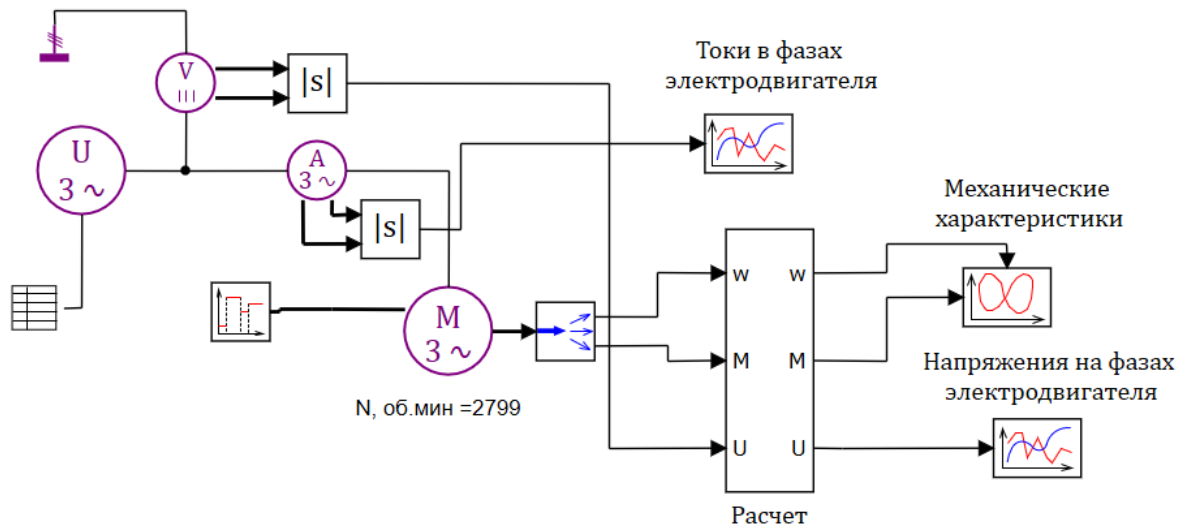


Рис. 12.8. Модель для расчета механических характеристик

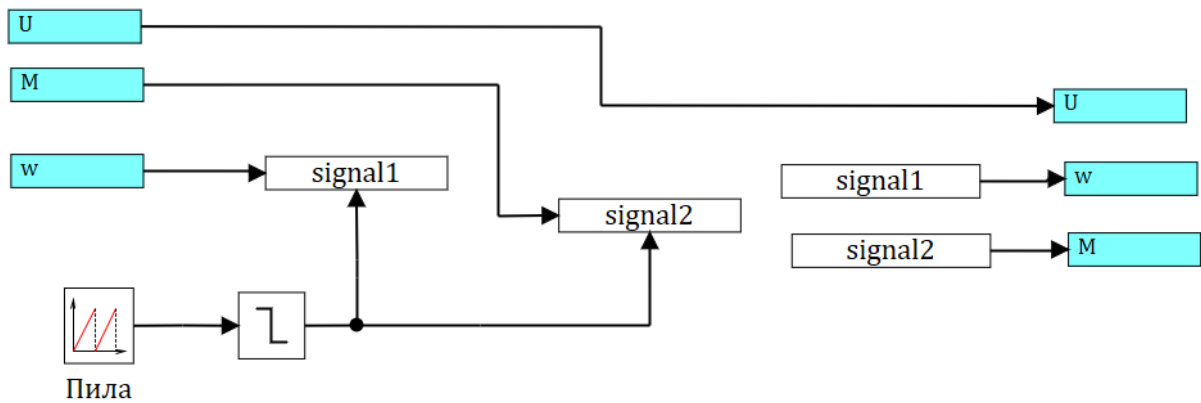


Рис. 12.9. Модель subsystemы «Расчет»

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	signal1	w	Веществен...	Вход	0	293.15847	Переменная
2	signal2	M	Веществен...	Вход	0	0.99999976	Переменная

Рис. 12.10. База сигналов проекта

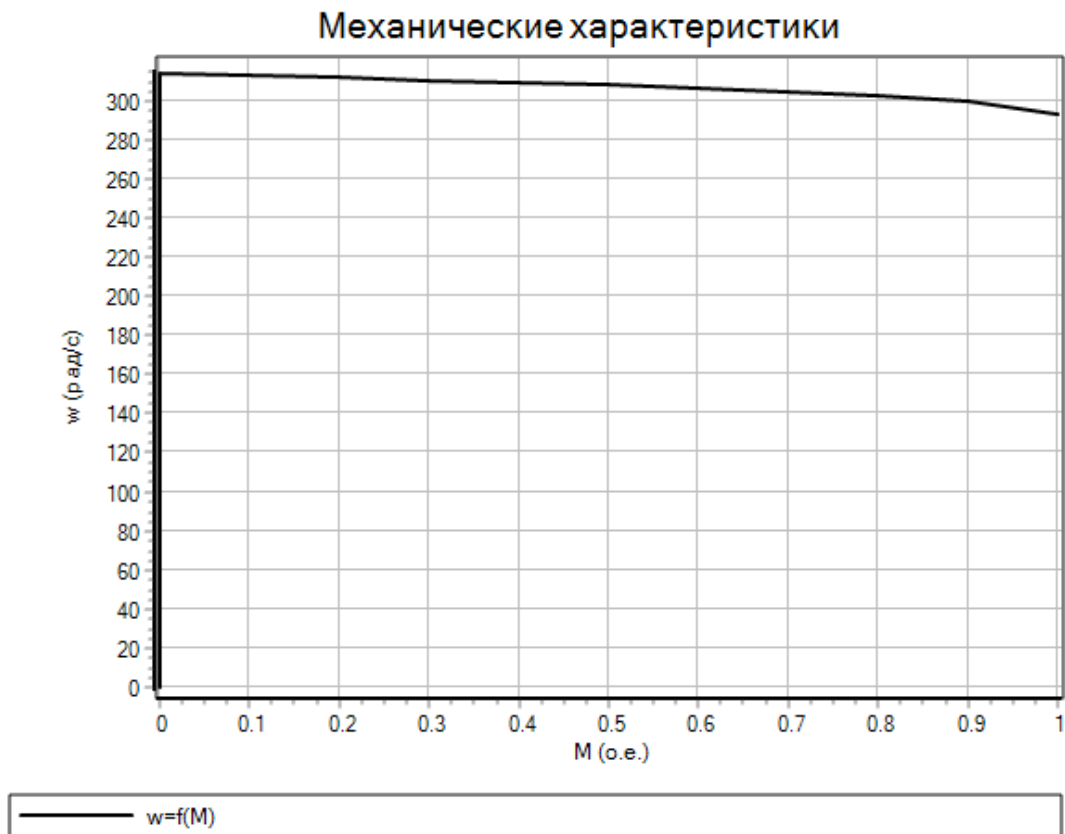


Рис. 12.11. Механическая характеристика

Проведем расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя. Модель для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя, приведена на рис.12.12.

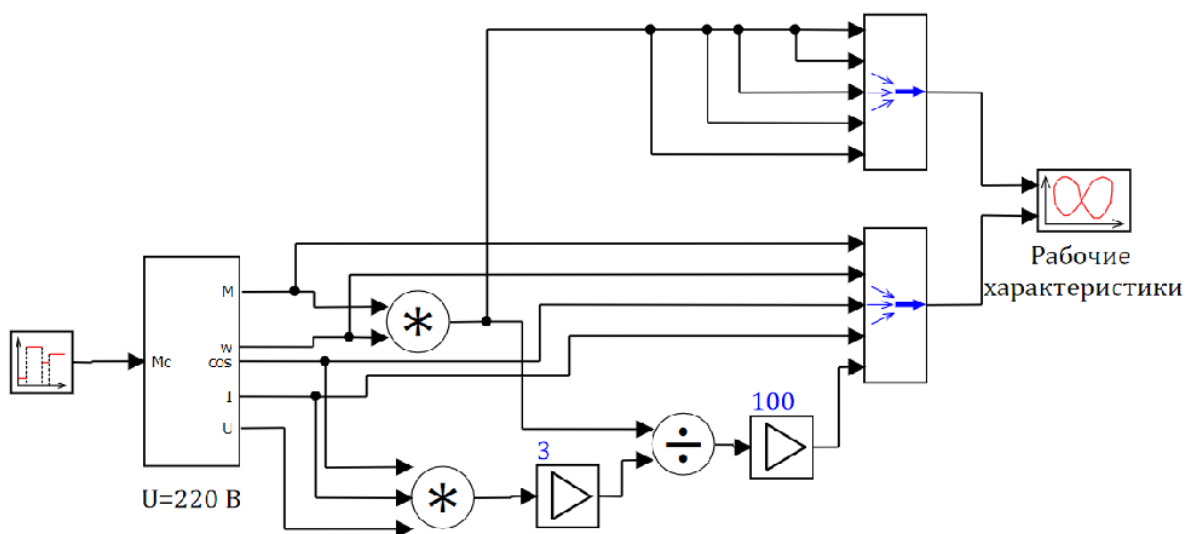


Рис. 12.12. Модель для расчета рабочих характеристик АД

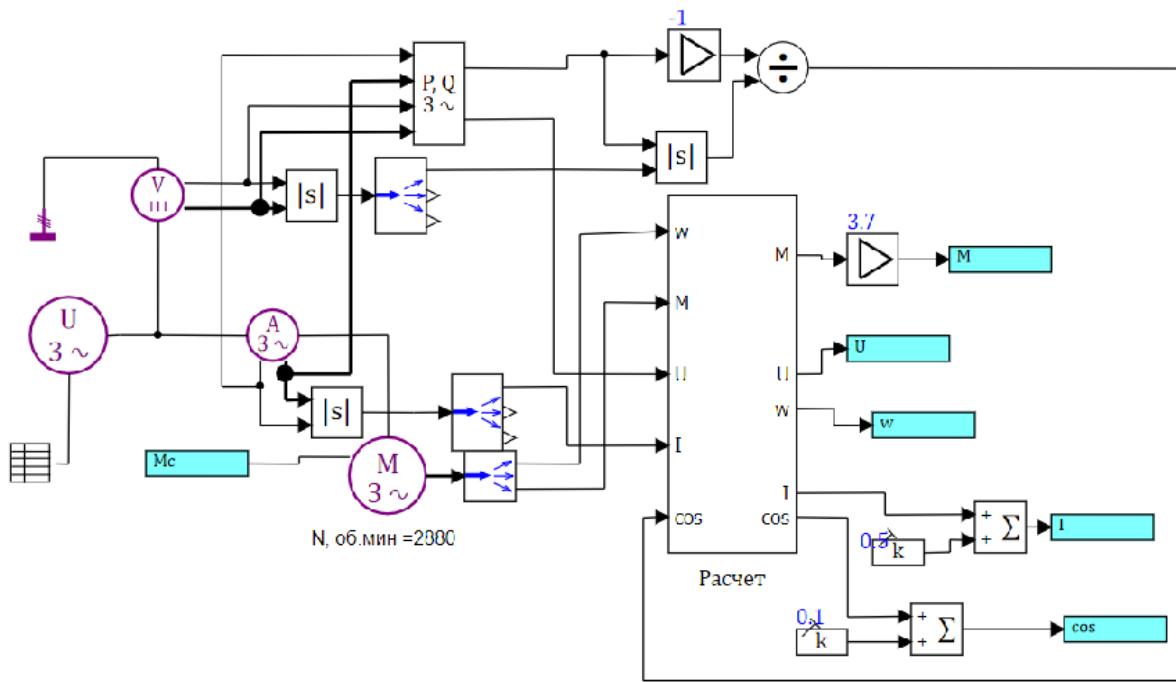


Рис. 12.13. Субмодель для расчета рабочих характеристик АД

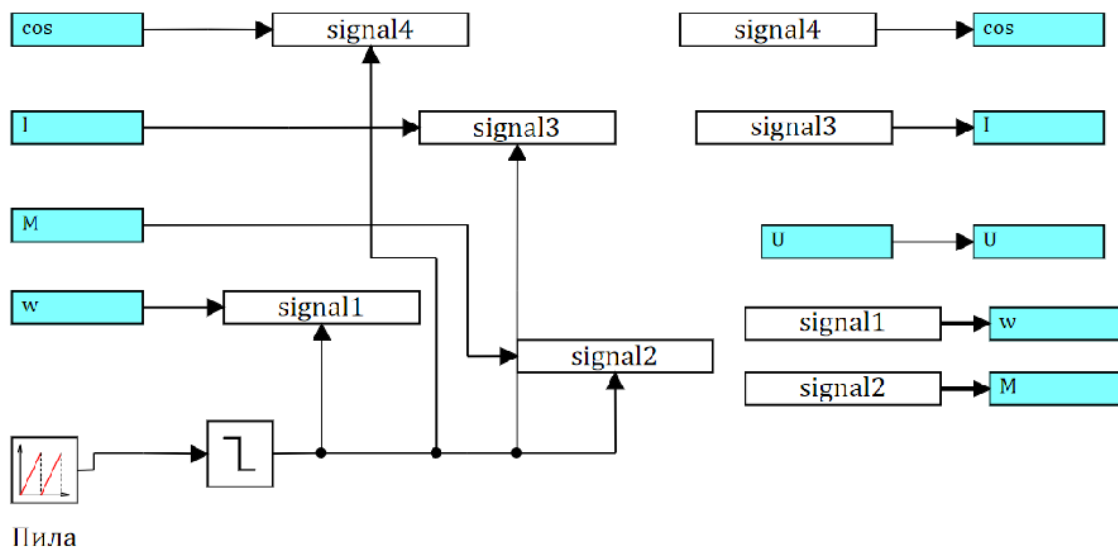


Рис. 12.14. Субмодель «Расчет» рабочих характеристик АД

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1...	signal1	w	Вещественное	Вход	0	301.59514	Переменная
2...	signal2	M	Вещественное	Вход	0	2.6	Переменная
3...	signal3	I	Вещественное	Вход	0	5.173784	Переменная
4...	signal4	cos	Вещественное	Вход	0	0.77745359	Переменная

Рис. 12.15. База сигналов проекта

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис.14.16) показывают зависимость его эксплуатационных параметров от мощности на валу P_2 . К этим параметрам относят ток I_a , активную мощность P_1 , КПД, частоту вращения ротора и коэффициент мощности двигателя.

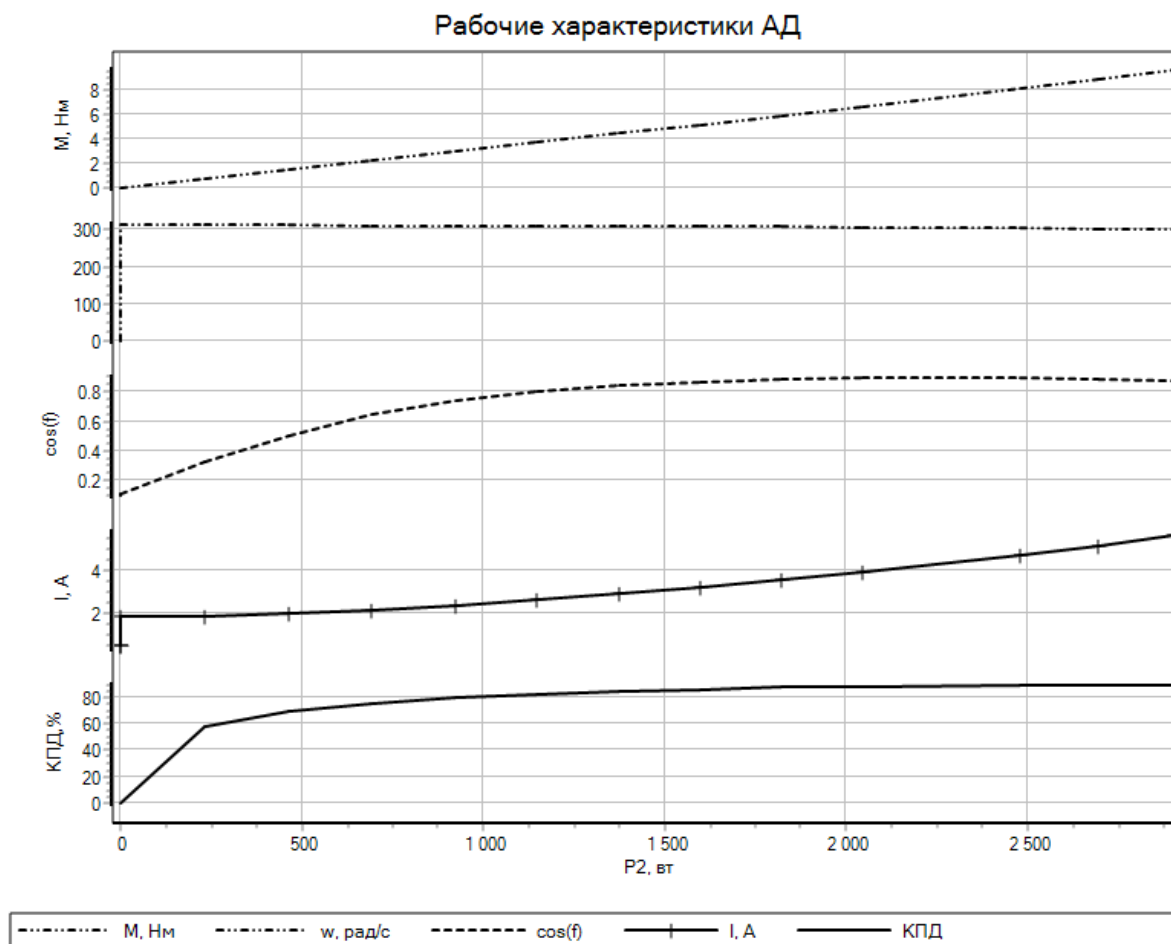


Рис. 12.16. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

2. Порядок выполнения работы

1. Собрать и исследовать рассмотренные модели
2. Провести расчет характеристик системы
3. Сделать выводы.

3. Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Исследуемые схемы в SimInTech.
3. Рассчитанные характеристики.
4. Выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. В чем различие статических и динамических характеристик асинхронного двигателя?
2. Назовите преимущества и недостатки асинхронного двигателя.
3. С какой целью в АД проводят регулирование частоты вращения при выполнении условия $U/f=\text{const}$?
4. Назовите способы регулирования частоты вращения АД.

Практическое занятие 13

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрим автоматическую систему регулирования скорости двигателя постоянного тока [5]. Функциональная схема системы приведена на рис.13.1. Система содержит: ЗС – задатчик скорости; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; УМ – усилитель мощности; ДТ – датчик тока; М – двигатель постоянного тока (ОВ – обмотка возбуждения, u_b – напряжение питания обмотки возбуждения); ОР – объект регулирования; ТГ – тахогенератор.

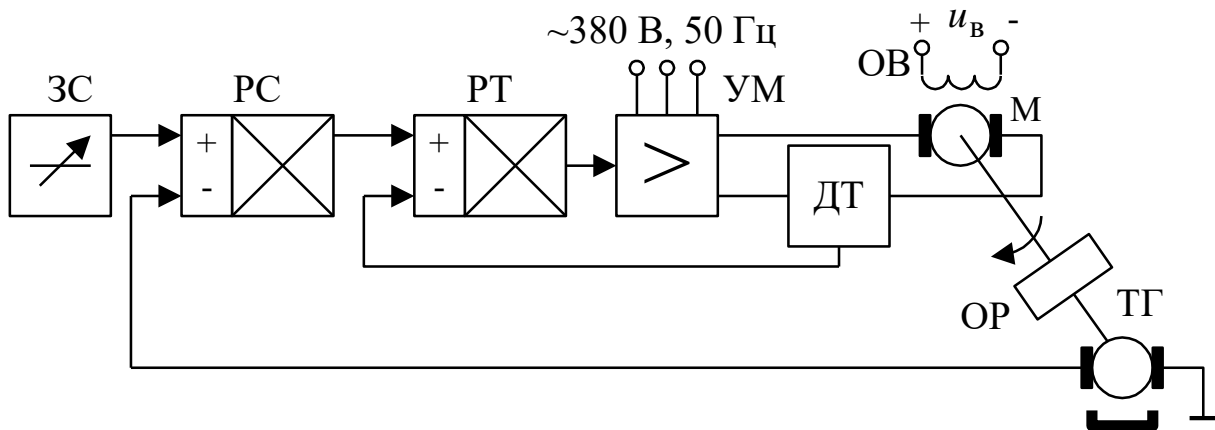


Рис. 13.1. Функциональная схема автоматической системы регулирования скорости

Структурная схема системы показана на рис.13.2.

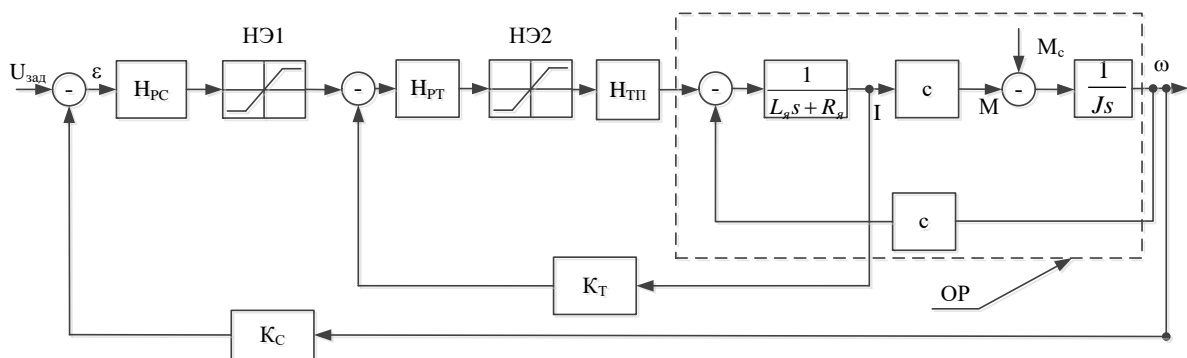


Рис. 13.2. Структурная схема

На схеме обозначено:

$U_{зад}$ – сигнал задания;

ε – ошибка регулирования;

$H_{pc}(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора скорости;

$$H_{pc}(s) = \frac{k_{pc}(T_{pc}s + 1)}{T_{pc}s};$$

k_{pc}, T_{pc} – коэффициент передачи и постоянная времени регулятора скорости;

$H_{Э1}$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора скорости;

$H_{PT}(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;

$$H_{PT}(s) = \frac{k_{PT}(T_{PT}s + 1)}{T_{PT}s}$$

k_{PT} , T_{PT} – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-интегрального регулятора тока;

$H_{ТП}$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора тока;

$$H_{ТП}(s) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}s + 1}$$

передаточная функция тиристорного преобразователя;

$k_{ТП}$, $T_{ТП}$ – коэффициент передачи и постоянная времени тиристорного преобразователя;

$R_{я}$, $L_{я}$ – активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя;

I – ток якорной обмотки;

c – конструктивная постоянная двигателя;

J – момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу двигателя;

K_T – коэффициент передачи датчика тока;

K_c – коэффициент передачи датчика скорости;

M_c – возмущающее воздействие (момента нагрузки);

M – электромагнитный момент двигателя;

Модель для исследования системы дана на рис. 13.3.

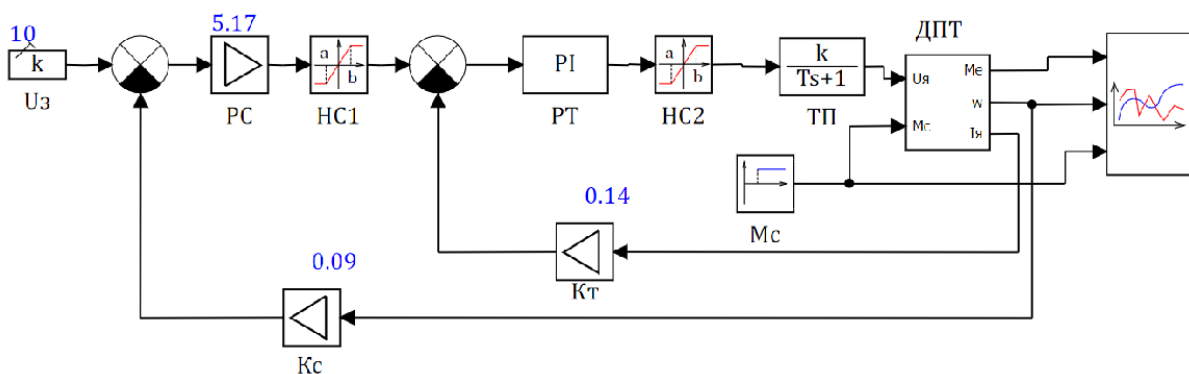


Рис. 13.3. Модель исследуемой системы

Модель объекта регулирования (ДПТ) реализована как субмодель и представлена на рис. 13.4.

Результаты моделирования даны на рис. 13.5. В момент времени 1.6 с. происходит наброс нагрузки с нуля до 50 Нм.

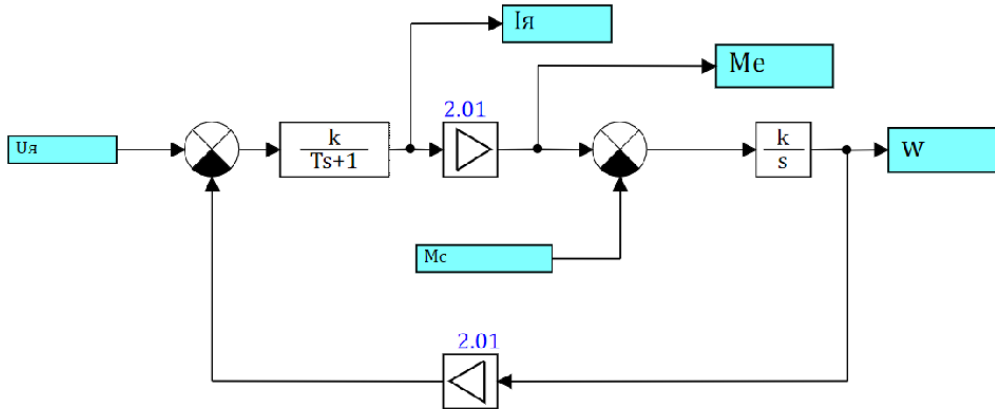


Рис. 13.4. Субмодель ДПТ

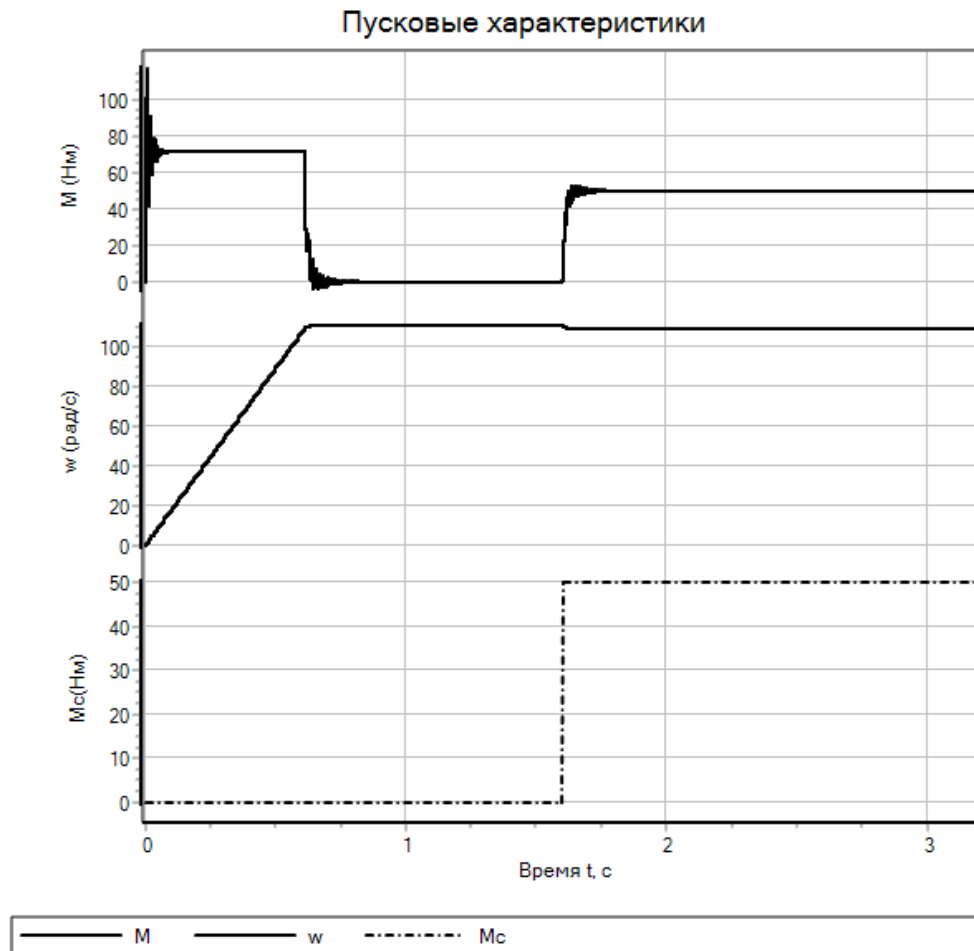


Рис. 13.5. Результаты моделирования процесса пуска

Для моделирования реверса возьмем схему, данную на рис.13.3 и будем менять в момент времени равной 1.6 секунды напряжения задания с 10 Вольт до -10 (рис.13.6).

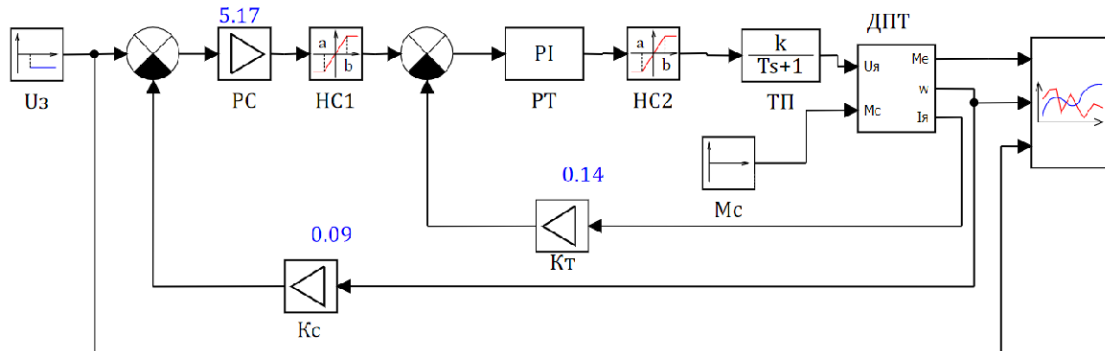


Рис.13.6. Модель для моделирования реверса ДПТ

Результаты моделирования даны на рис. 13.7.

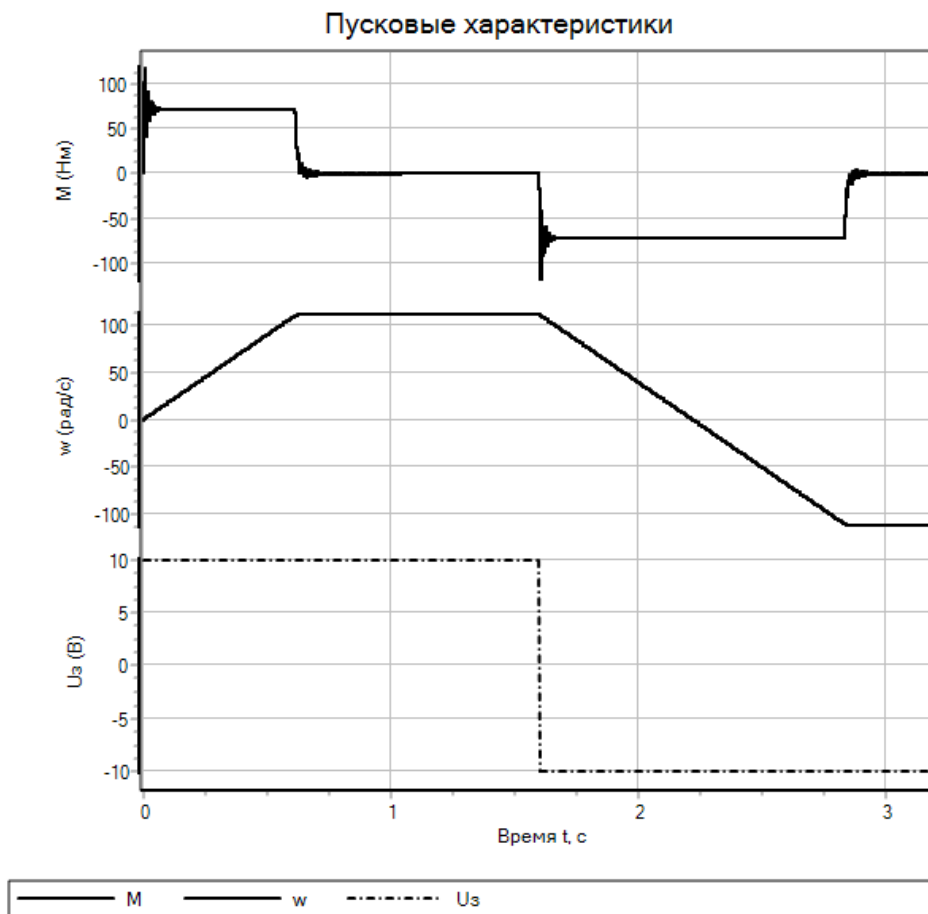


Рис. 13.7. Характеристики схемы при изменении напряжения с 10 вольт до -10 вольт при $M_c=0$

Рассмотрим расчет частотных характеристик и передаточной функции исследуемой схемы. Модель для расчета частотных характеристик разомкнутой системы, представлени на рис.13.8.

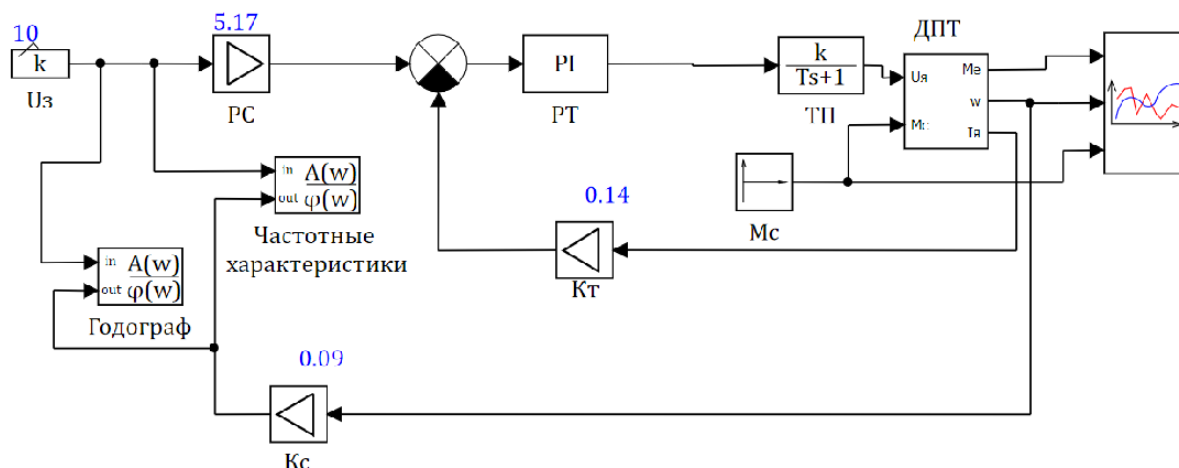


Рис. 13.8. Модель для расчета частотных характеристик

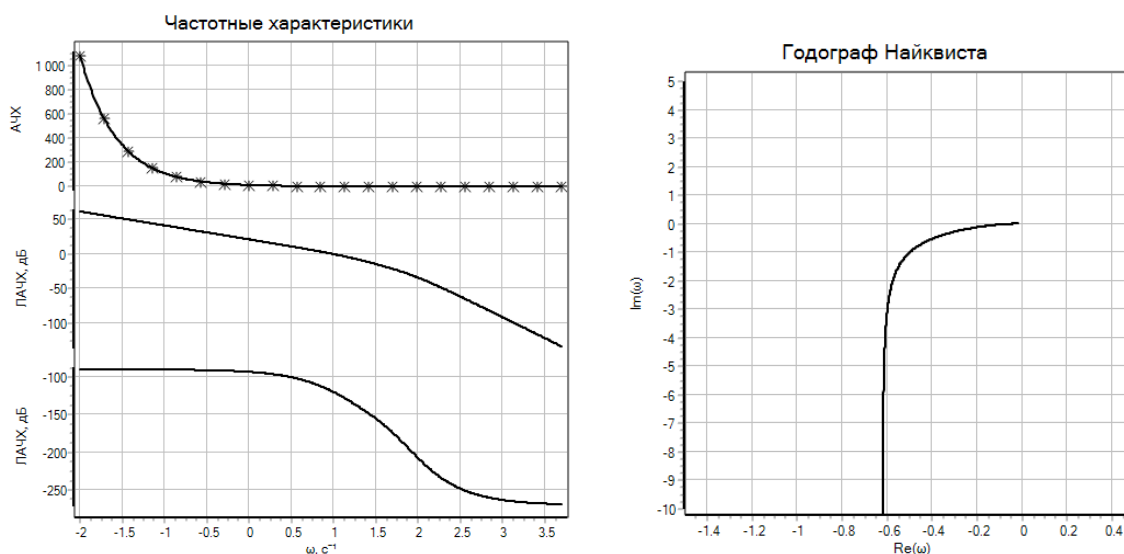


Рис. 13.9. Частотные характеристики и годограф Найквиста

Для определения передаточной функции разомкнутой системы можно использовать блок $H(s)$ (рис.13.10). Блок позволяет получить математическое описание динамического объекта (блока/системы). Для нелинейных систем, предварительно автоматически выполняется линеаризация в малой окрестности стационарного состояния. После чего, описание произвольного линейного стационарного динамиче-

ского объекта может быть получено в виде коэффициентов числителя передаточной функции вида

$$H(s) = \frac{N(s)}{L(s)},$$

где $N(s)$ и $L(s)$ – характеристические полиномы системы.

- Числитель - содержит массив коэффициентов b_i полинома числителя вида:
 $N(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m$, начиная с b_m .
- Знаменатель - содержит массив коэффициентов a_i полинома знаменателя вида:
 $L(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n$, начиная с a_n .
- Нули - массив нулей передаточной функции (корней характеристического полинома в числителе передаточной функции).
- Полюса - массив полюсов передаточной функции (корней характеристического полинома в знаменателе передаточной функции).
- Матрица A (собственная матрица) - значение собственной матрицы системы уравнений состояния.
- Матрица B (матрица входов) - значение матрицы входов системы уравнений состояния.
- Матрица C (матрица выходов) - значение матрицы выходов системы уравнений состояния.
- Матрица D (матрица обходов) - значение матрицы обходов системы уравнений состояния.

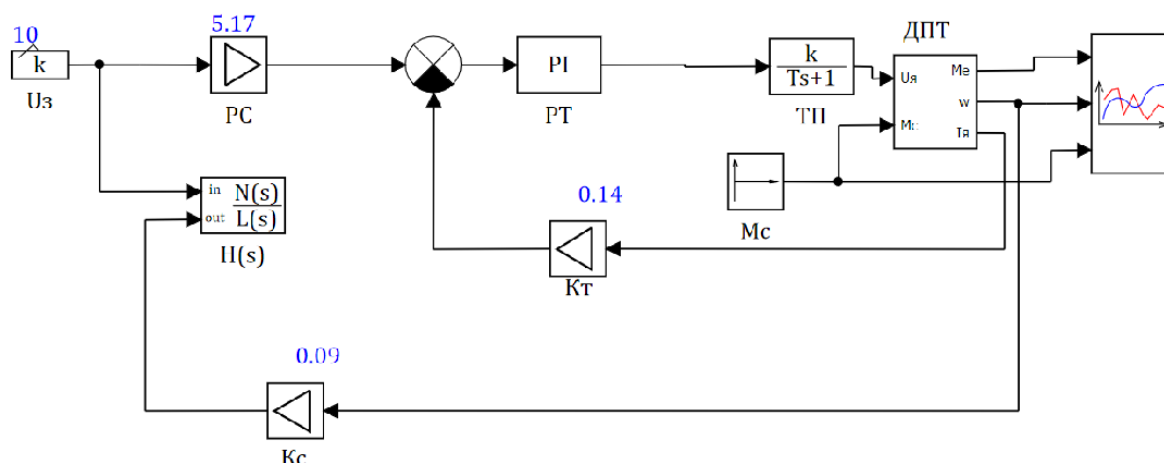


Рис. 13.10. Модель для определения передаточной функции разомкнутой системы

Результат вычисления передаточной функции представлен на рис.13.11.

Коэффициенты передаточной функции

Текущее время расчёта 0		
Название	Имя	Формула
Числитель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ns	[[983820.83 , 28109.166]]
Знаменатель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ls	[[0 , 91288.301 , 7889.2435 , 158.82353 , 1]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Zeros	[[[-35+0j]]]
Полюсы (корни уравнения L(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Poluses	[[[-16.460614+0i , -71.181458+21.887496i , -71.181458-21.887496i , 0+0j]]]
Матрица A (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock9.A	[[[-58.823529 , 0 , 32.058824 , -64.438235];[-0.48999999 , 0 , 0 , 0];[-52.500003 , 3750 , -1
Матрица B (матрица входов)	TransitionFuncsBlock9.B	[[0];[18.095];[1938.75];[0]]
Матрица C (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock9.C	[[0 , 0 , 0 , 0.09]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock9.D	[[0]]

Рис. 13.11. Результат вычисления передаточной функции

Данные для расчетов системы приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$u_{\text{зад}}, \text{В}$	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
K_{pc}	8	8	5	10	15	15	8	8	5	9	10	12
$T_{pc}, \text{с}$	0,4	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0	0,2
K_{pT}	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$T_{pT}, \text{с}$	0,0 5	0,05	0,0 2	0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$k_{ТП}$	30	30	40	47	37	37	30	40	37	38	37	37
$R_A, \text{Ом}$	0,5	0,5	2	1	0,8	2	0,5	1,5	1	2	0,5	1
$L_A, \text{мГн}$	25	25	50	75	100	120	0,02 5	20	30	80	50	90
$c, \text{В}\cdot\text{с}/\text{рад}$	1	1,5	2	1,3	1,5	1	2	1	1,5	1	1,8	1
$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,1	0,05	0,0 4	0,4	0,08	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
$k_T, \text{В}/\text{А}$	0,0 1	0,01	0,1 4	0,14	0,15	0,0 1	0,05	0,01	0,0 1	0,01	0,1 4	0,1 6
$k_c, \text{В}\cdot\text{с}/\text{рад}$	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

1. Порядок выполнения работы

- Собрать модель, представленную на рис.13.3 и исследовать частотные характеристики
- Построить частотные характеристики объекта регулирования (ОР).
- Собрать модель, представленную на рис.13.6 и исследовать режим пуска и реверс.
- Собрать модель, данную на рис. 13.10. Получить выражения для ПФ разомкнутой системы, замкнутой системы и передаточной функции по ошибке.
- Исследовать устойчивость замкнутой системы методами Найквиста.
- Рассчитать ПФ регулятора, доставляющего замкнутой системе желаемые показатели качества.

2. Содержание отчёта

- Наименование и цель работы.
- Исследуемые схемы в SimInTech.
- Рассчитанные характеристики.
- Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы двигателя постоянного тока?
2. Как устроен двигатель постоянного тока?
3. В чем состоит особенность пуска двигателя?
4. Для чего используются регуляторы скорости и тока?
5. Как изменить направление вращения ДПТ?

Практическое занятие 14

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Возможно, ни одна электронная плата не может обойтись сегодня хотя бы без одного источника стабильного постоянного напряжения.

Нормальная работа электронных устройств возможна при поддержании напряжения питания в указанных допустимых пределах.

Например, для питания измерительных устройств, работающих с точностью 0,1%, требуется стабильность напряжения питания 0,01%. Большинство выпрямителей не обеспечивают заданной стабильности напряжения. Изменение напряжения питания может произойти из-за изменения напряжения в сети переменного тока или из-за изменения постоянного тока в устройстве. При изменении сопротивления нагрузки изменяется ток и падение напряжения на внутреннем сопротивлении выпрямительных устройств, что приводит к изменению питающего напряжения.

Для поддержания напряжения питания в допустимых пределах между фильтром и нагрузкой включается устройство, называемое стабилизатором напряжения

Принципиальная электрическая схема системы автоматической стабилизации постоянного напряжения показана на рис. 14.1. [5]

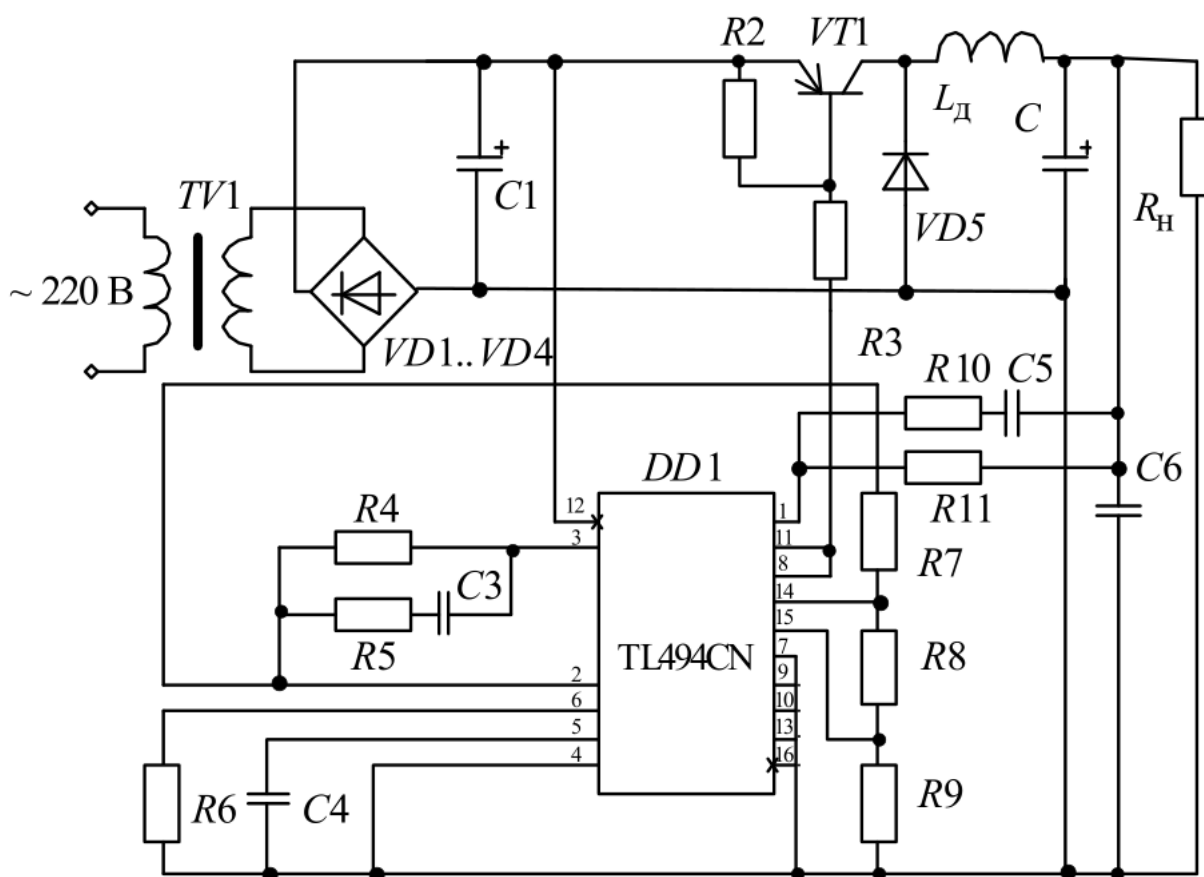


Рис. 14.1. Принципиальная схема стабилизатора постоянного напряжения

Электропитание стабилизатора осуществляется от сети 220 В, 50 Гц через понижающий трансформатор TV1. На диодах VD1 –VD4 реализован выпрямитель переменного напряжения. Конденсатор С1 предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Силовой транзисторный ключ выполнен на транзисторе VT1. Дроссель напряжением задания и формирование широтно-модулированного сигнала управления силовым ключом VT1. Конденсатор С5 выполняет роль дифференцирующего элемента в цепи обратной связи.

Структурная схема непрерывной модели системы приведена на рис. 14.2 [5].

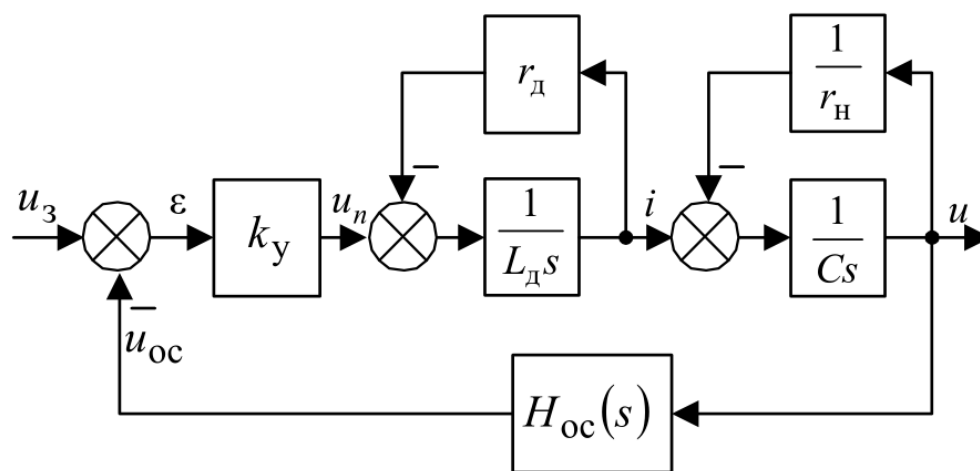


Рис. 14.2. Структурная схема автоматической системы стабилизации постоянного напряжения

На схеме обозначено:

u_3 – сигнал задания;

ε – ошибка регулирования;

k_y – общий коэффициент передачи ШИМ преобразования;

u_n – среднее значение выходного напряжения ШИМ-преобразователя;

L_d, r_d – индуктивность и активное сопротивление дросселя;

i, u – ток и напряжение;

C – емкость конденсатора;

r_n – сопротивление нагрузки;

$H_{oc}(s)$ – передаточная функция цепи обратной связи;

$$H_{oc} = k_{oc} \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}$$

k_{oc} – коэффициент обратной связи;

T_1, T_2 – постоянные времени интегро-дифференцирующего корректирующего устройства в цепи обратной связи.

Модель автоматической системы стабилизации постоянного напряжения представлена на рис. 14.3.

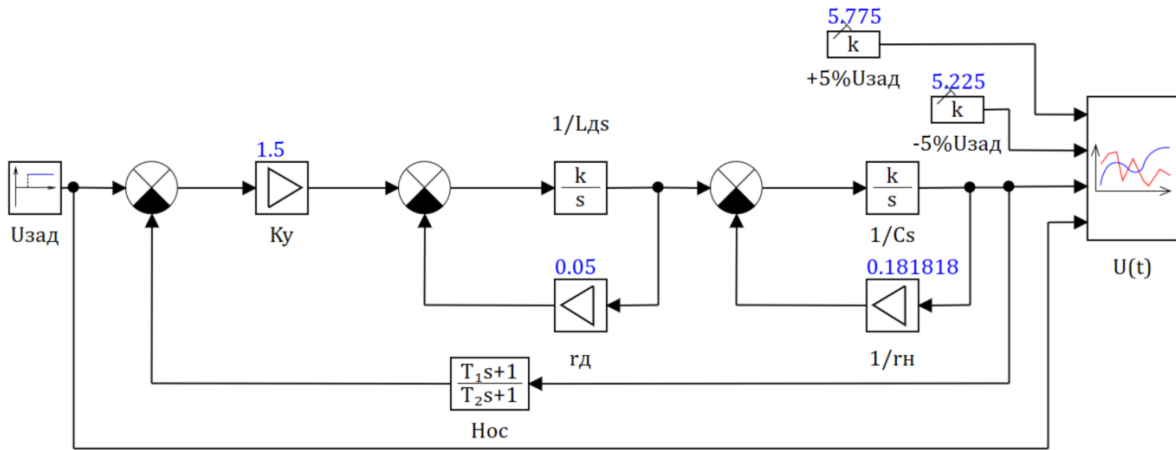


Рис. 14.3. Модель автоматической системы стабилизации постоянного напряжения

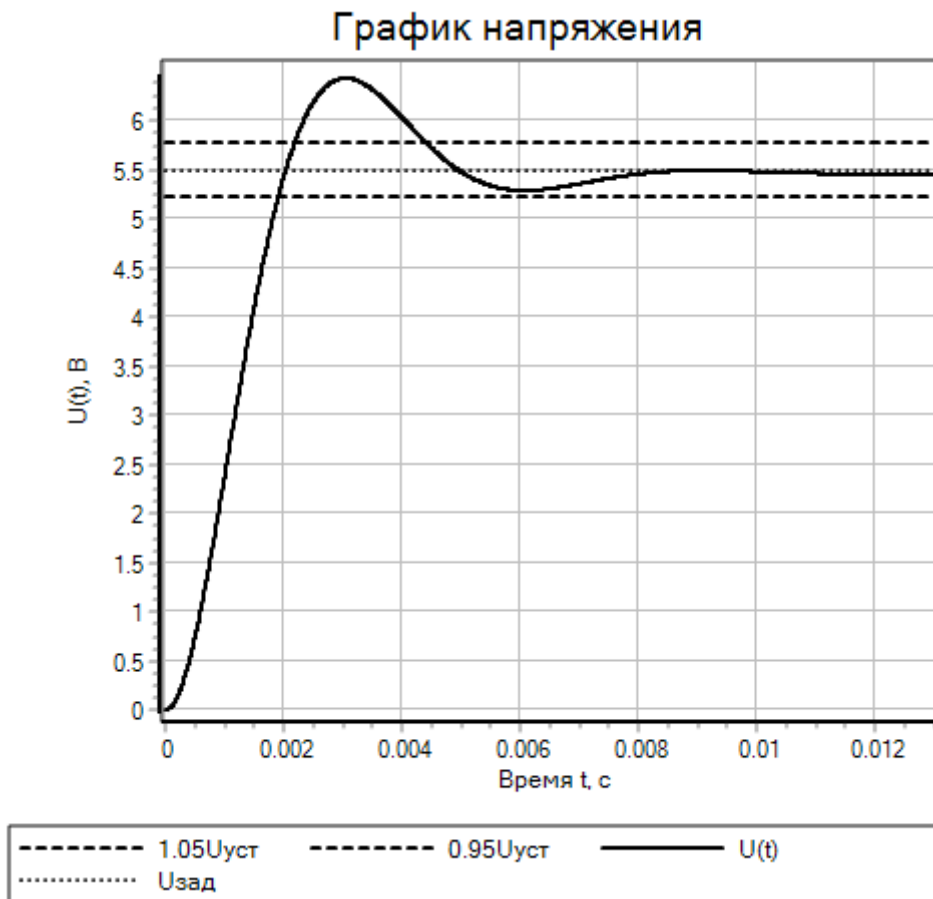


Рис. 14.4. Динамическая характеристика автоматической системы стабилизации постоянного напряжения

Проведем исследование модели при различных значениях задающего напряжения. Модель системы представлена на рис 14.5.

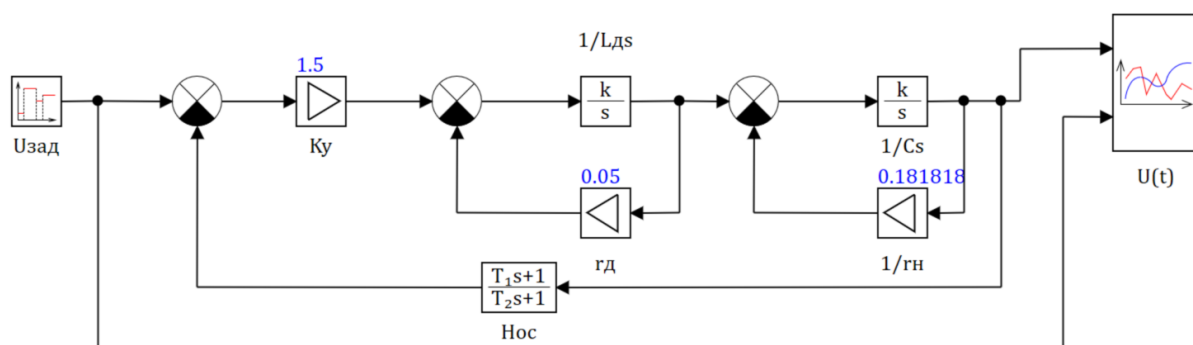


Рис. 14.5. Модель автоматической системы стабилизации постоянного напряжения.

Результаты расчета представлены на рис.14.6. Система работает стабильно при набросах и сбросах напряжения задания.

График напряжения при различных значениях задающего напряжения.

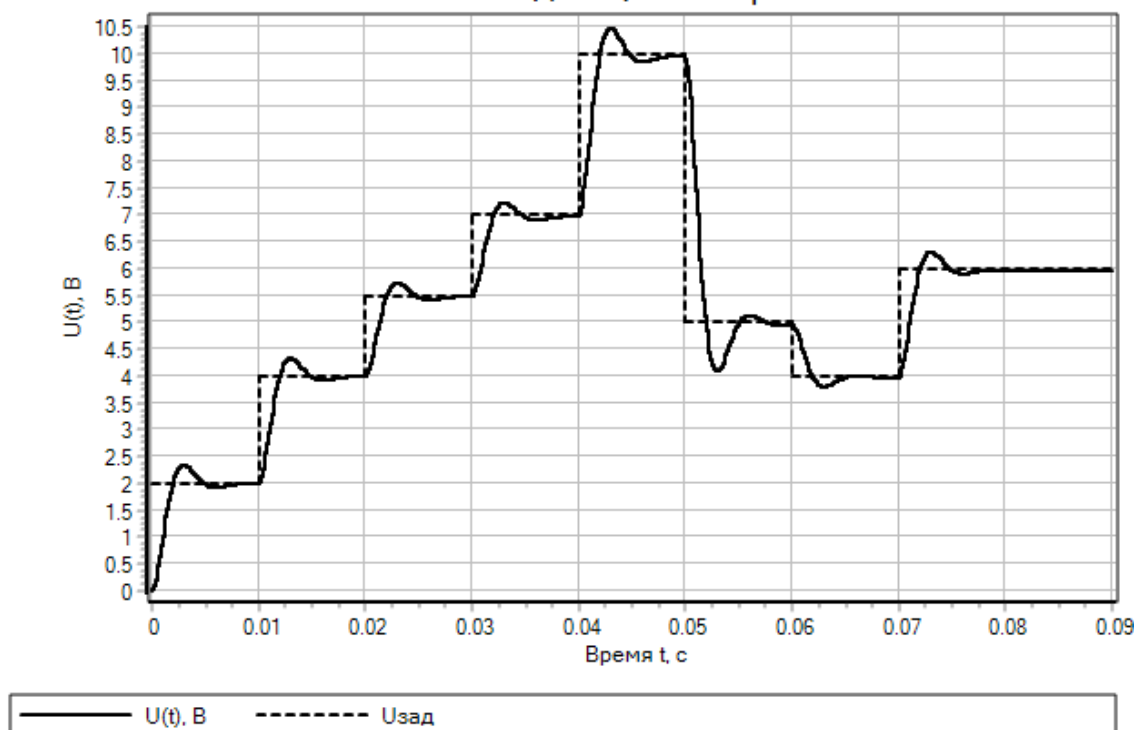


Рис. 14.6. Динамическая характеристика автоматической системы стабилизации постоянного напряжения при различных $U_{зад}$

Вычислим в системе SimInTech передаточные функции САР разомкнутой $H_{раз}$ и замкнутой системы $H_{зам}$ и передаточную функцию по ошибке $H_{ошиб}$. Модель представлена на рис. 14.7.

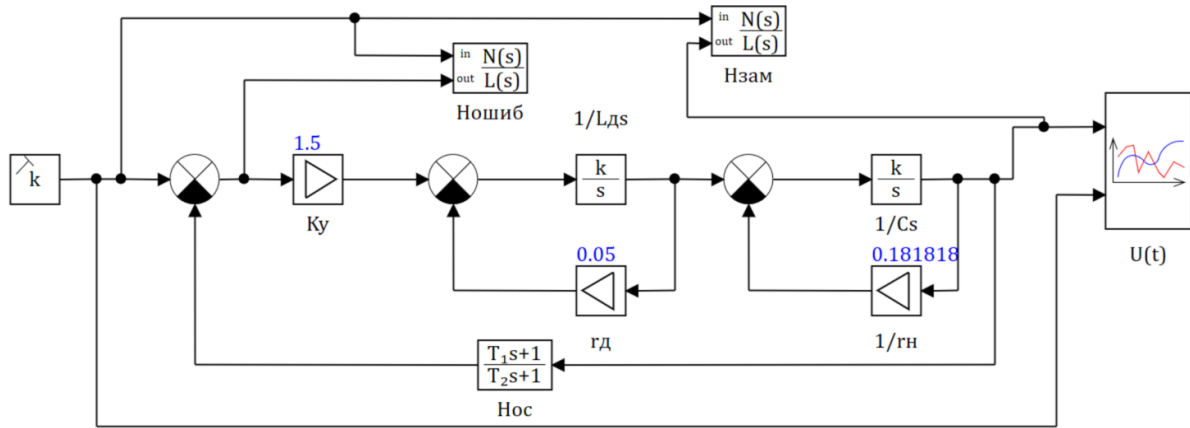


Рис. 14.7. Модель для вычисления передаточных функций замкнутой системы $H_{зам}$ и передаточную функцию по ошибке $H_{ошиб}$

Текущее время расчёта 0.013

Название	Имя	Формула
Числитель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ns	[[1.25E10 , 1250000]]
Знаменатель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ls	[[1.2575758E10 , 11750000 , 10174.242 , 1]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Zeros	[[-10000+0i]]
Полюсы (корни уравнения L(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Poluses	[[-573.66575+1031.5272i , -573.66575-1031.5272i , -9026.9109+0i]]
Матрица A (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock9.A	[[-83.333334 , -20000 , 17500]; [500 , -90.909091 , 0]; [0 , 10000 , -10000]]
Матрица B (матрица входов)	TransitionFuncsBlock9.B	[[2500]; [0]; [0]]
Матрица C (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock9.C	[[0 , 1 , 0]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock9.D	[[0]]

а)

Коэффициенты передаточной функции

Текущее время расчёта 0.013

Название	Имя	Формула
Числитель W(s)	TransitionFuncsBlock10.Ns	[[-1.5003977E14 , -1.4566148E11 , -13752500]]
Знаменатель W(s)	TransitionFuncsBlock10.Ls	[[1.2575758E10 , 11750000 , 10174.242 , 1]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	TransitionFuncsBlock10.Zeros	[[-1156.2904+0i , -9435.3458+0i]]
Полюсы (корни уравнения L(s) = 0)	TransitionFuncsBlock10.Poluses	[[-573.66575+1031.5272i , -573.66575-1031.5272i , -9026.9109+0i]]
Матрица A (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock10.A	[[-83.333334 , -20000 , 17500]; [500 , -90.909091 , 0]; [0 , 10000 , -10000]]
Матрица B (матрица входов)	TransitionFuncsBlock10.B	[[2500]; [0]; [0]]
Матрица C (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock10.C	[[-5501 , -5509 , -5494]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock10.D	[[0]]

б)

Рис. 14.8. Результаты вычисления передаточной функции замкнутой системы (а) и передаточной функции по ошибки (б)

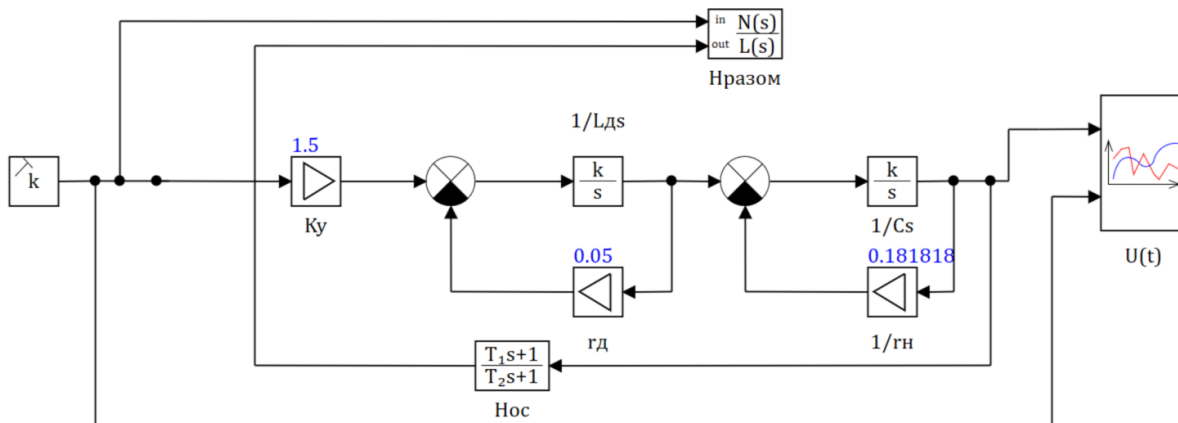


Рис. 14.9. Модель для вычисления передаточных функций разомкнутой системы (Нразом)

Кoeffициенты передаточной функции

Текущее время расчёта 0.013

Название	Имя	Формула
Числитель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ns	[[1.25E10 , 10000000]]
Знаменатель W(s)	TransitionFuncsBlock9.Ls	[[75757577 , 1750000 , 10174.242 , 1]]
Нули (корни уравнения N(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Zeros	[[-1250+0i]]
Полусы (корни уравнения L(s) = 0)	TransitionFuncsBlock9.Poluses	[[-83.333334+0i , -90.909091+0i , -10000+0i]]
Матрица A (собственная матрица)	TransitionFuncsBlock9.A	[[-83.333334 , 0 , 0]; [500 , -90.909091 , 0]; [0 , 10000 , -10000]]
Матрица B (матрица входов)	TransitionFuncsBlock9.B	[[2500]; [0]; [0]]
Матрица C (матрица выходов)	TransitionFuncsBlock9.C	[[0 , 8 , -7]]
Матрица D (матрица обхода)	TransitionFuncsBlock9.D	[[0]]

Рис. 14.10. Результаты вычисления передаточной функции разомкнутой системы

Определим устойчивость системы в замкнутом состоянии, используя критерий устойчивости Найквиста [3]. Модель для исследования устойчивости представлена на рис.

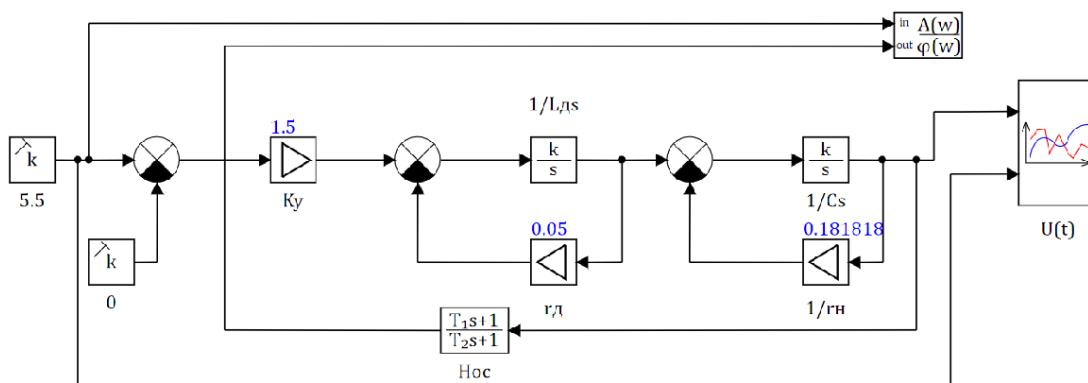
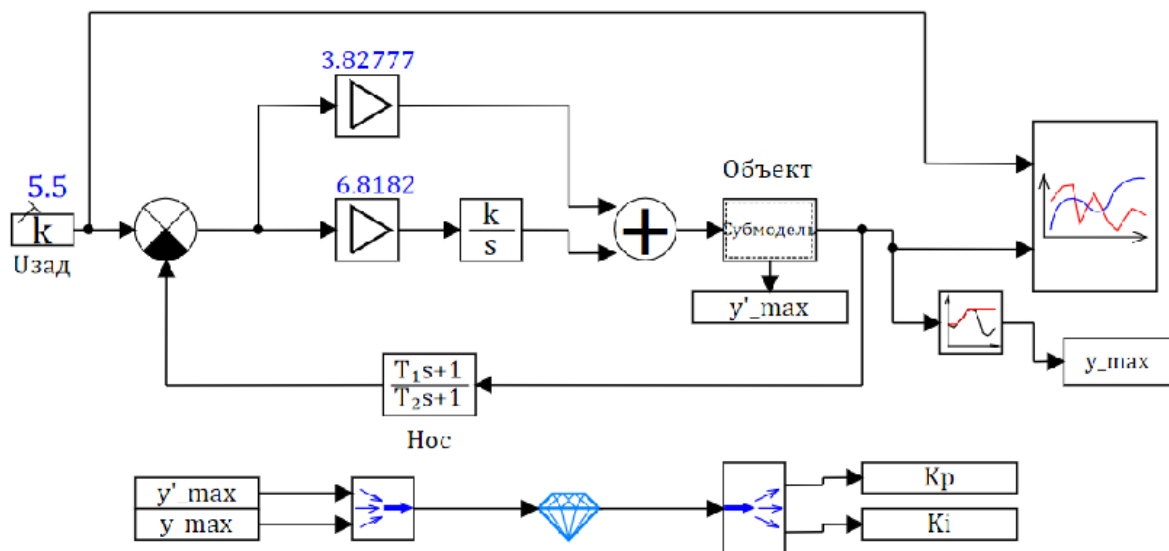


Рис. 14.11. Модель для исследования устойчивости

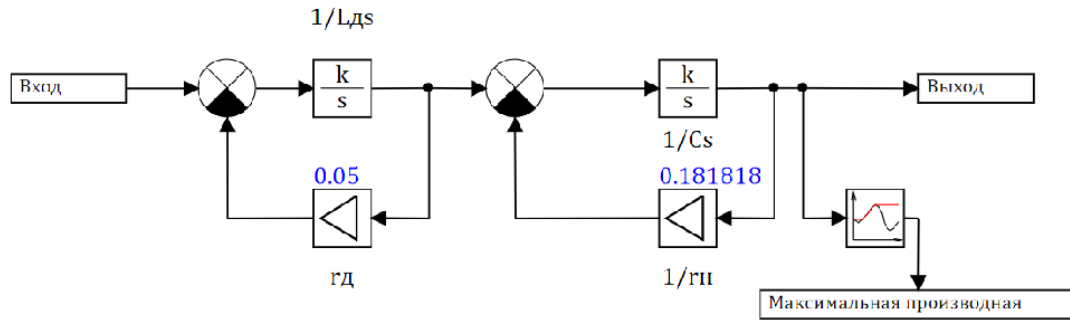


Рис. 14.12. Годограф Найквиста

Проведем параметрическую оптимизацию исследуемой системы автоматического регулирования напряжения (САР) по методике, изложенной в [2]. С этой целью разработаем модель, представленную на рис. 14.13.



а) Схема модели



б) Схема объекта

Рис. 14.13. Модель для определения оптимальных параметров ПИ регулятора, K_p и K_i

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1...	K_i	Сигнал1	Вещественное	Ненаправленный	0	6.8181671	Переменная
2...	K_p	Сигнал2	Вещественное	Ненаправленный	0	3.827699	Переменная
3...	y_{max}	Сигнал1	Вещественное	Ненаправленный	0	5.618788	Переменная
4...	y'_{max}	Сигнал1	Вещественное	Ненаправленный	0	5.618788	Переменная
5...	i	количество итераций	Вещественное	Ненаправленный	0	0	Переменная

Рис. 14.14. Список сигналов проекта

В результате параметрической оптимизации были определены параметры ПИ регулятора: $K_p = 3.83$, $K_i = 6.82$. Значения коэффициентов даны на рис. 14.14. Для сравнения параметров переходного процесса оптимизированной и данной САП используем модель, представленную на рис. 14.15. Расчитанные кривые напряжений даны на рис. 14.16.

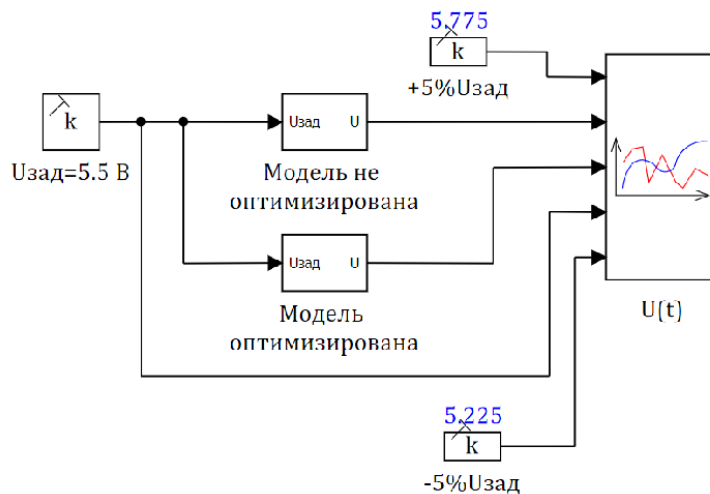


Рис. 14.15. Модель для сравнения параметров переходного процесса оптимизированной и данной САП

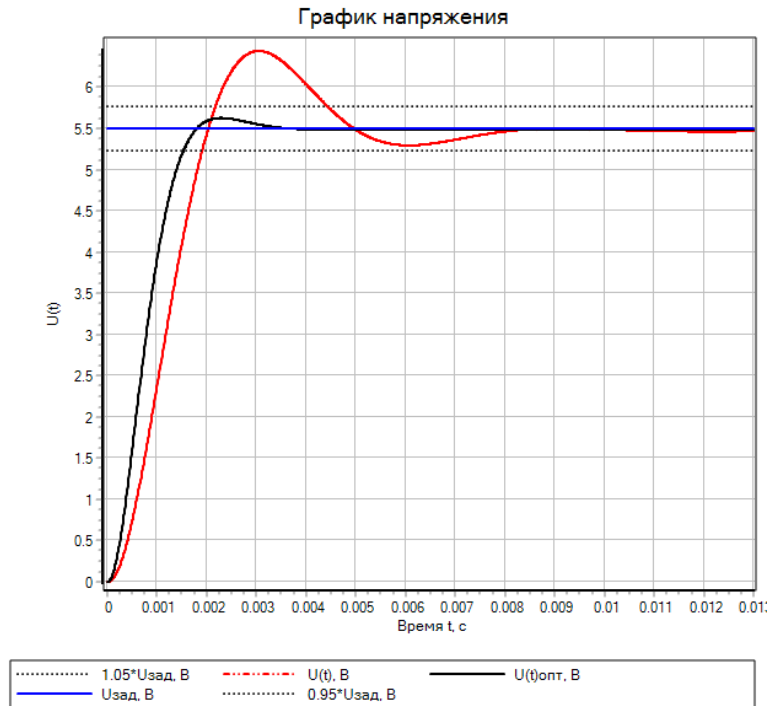


Рис. 14.16. Динамические характеристики автоматической системы стабилизации постоянного напряжения

Проведенный анализ показывает:

- перерегулирование было -17%, стало -2,2%;
- время переходного процесса было -0,00443 с, стало -0,0018 с.

Рассмотрим расчёт зависимости выходного напряжения U , тока I_H и ошибки регулирования $E_{\text{рег}}$ в зависимости от величины напряжения задания $U_{\text{зад}}$. Модель для расчёта выше указанных зависимостей изображена на рис. 14.17.

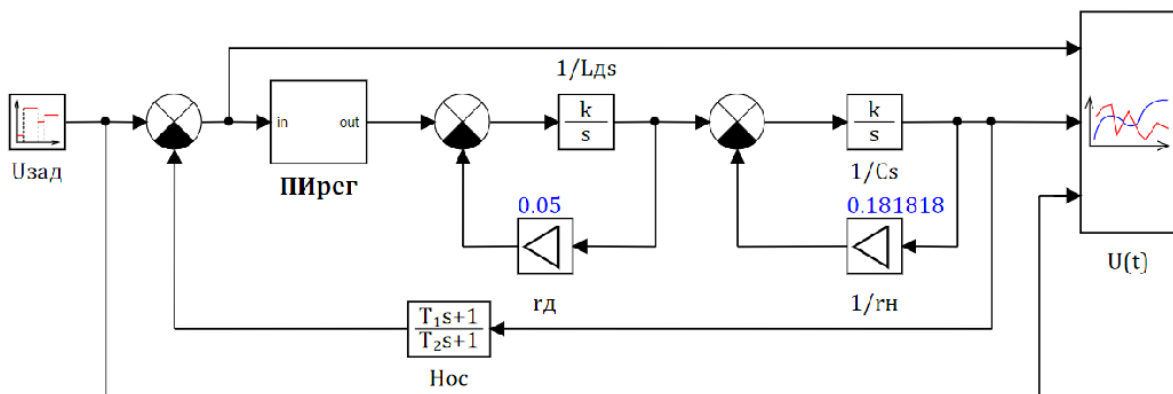


Рис. 14.17. Модель для расчета зависимости выходного напряжения U , тока I_H и ошибки регулирования $E_{\text{рег}}$ при различных $U_{\text{зад}}$

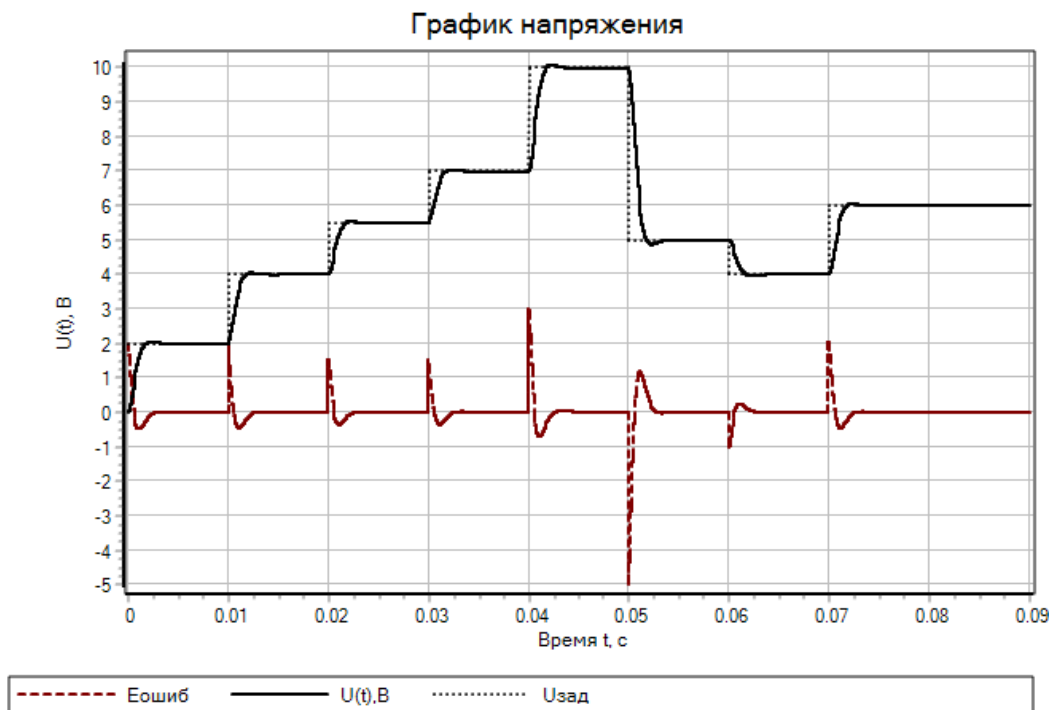
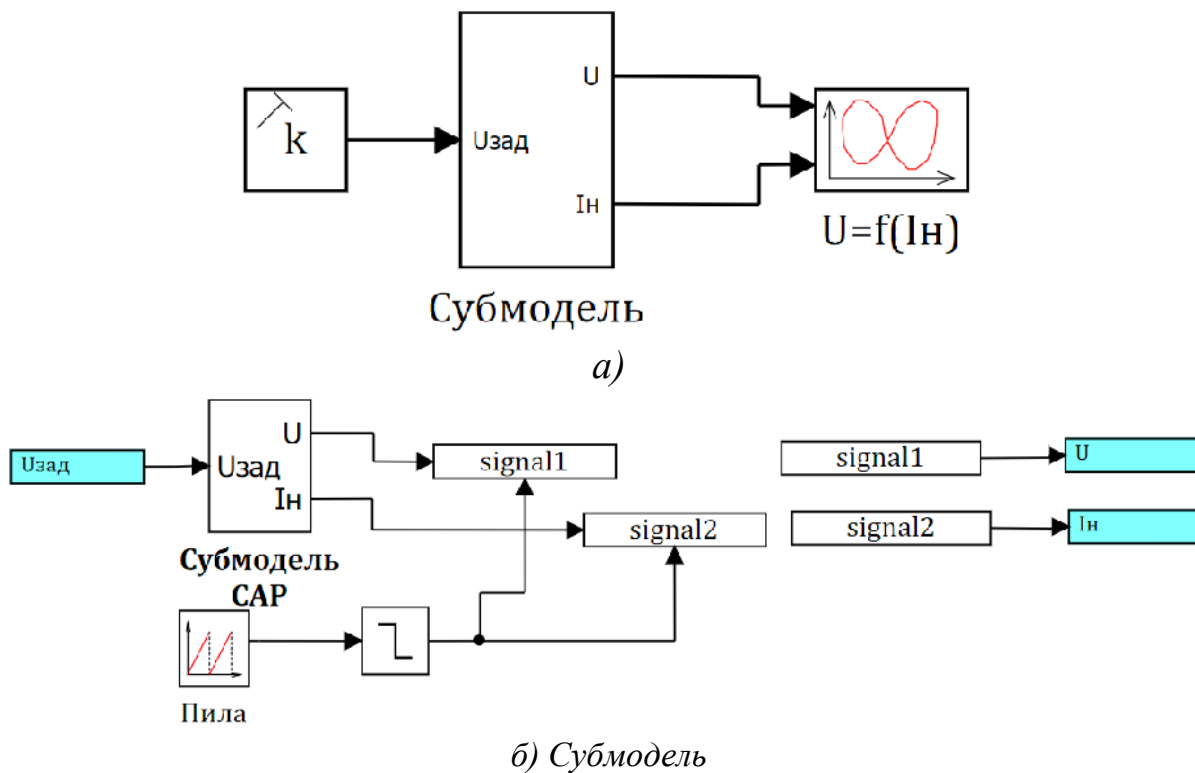
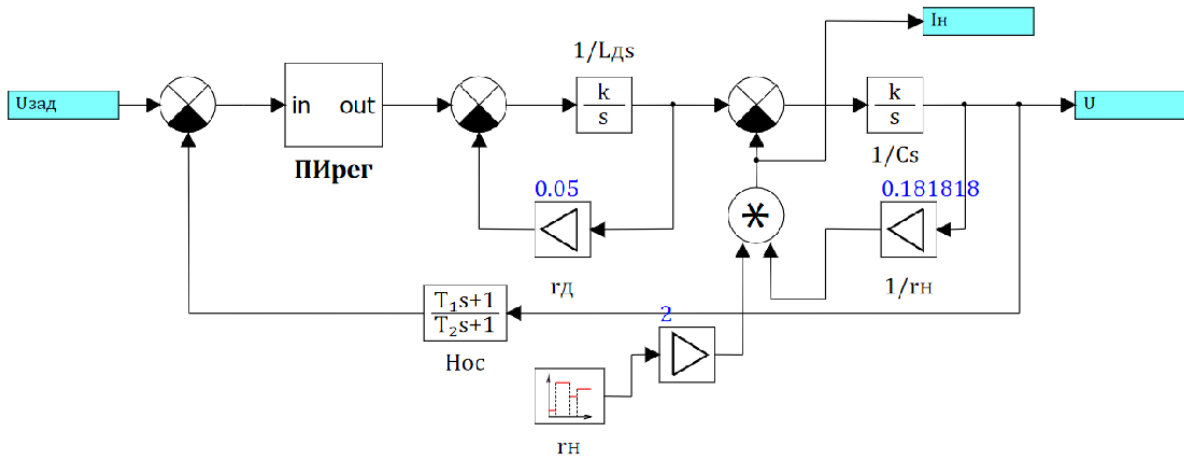


Рис. 14.18. Зависимости напряжения U , тока I_H и ошибки регулирования $E_{рег}$ при различных $U_{зад}$.

Составим модель для расчёта зависимости напряжения от тока нагрузки. Схемы проекта представлены на рис 14.19.





в) Субмодель САР

Рис. 14.19. Схемы проекта

Результаты расчета изображены на рис. 14.20.

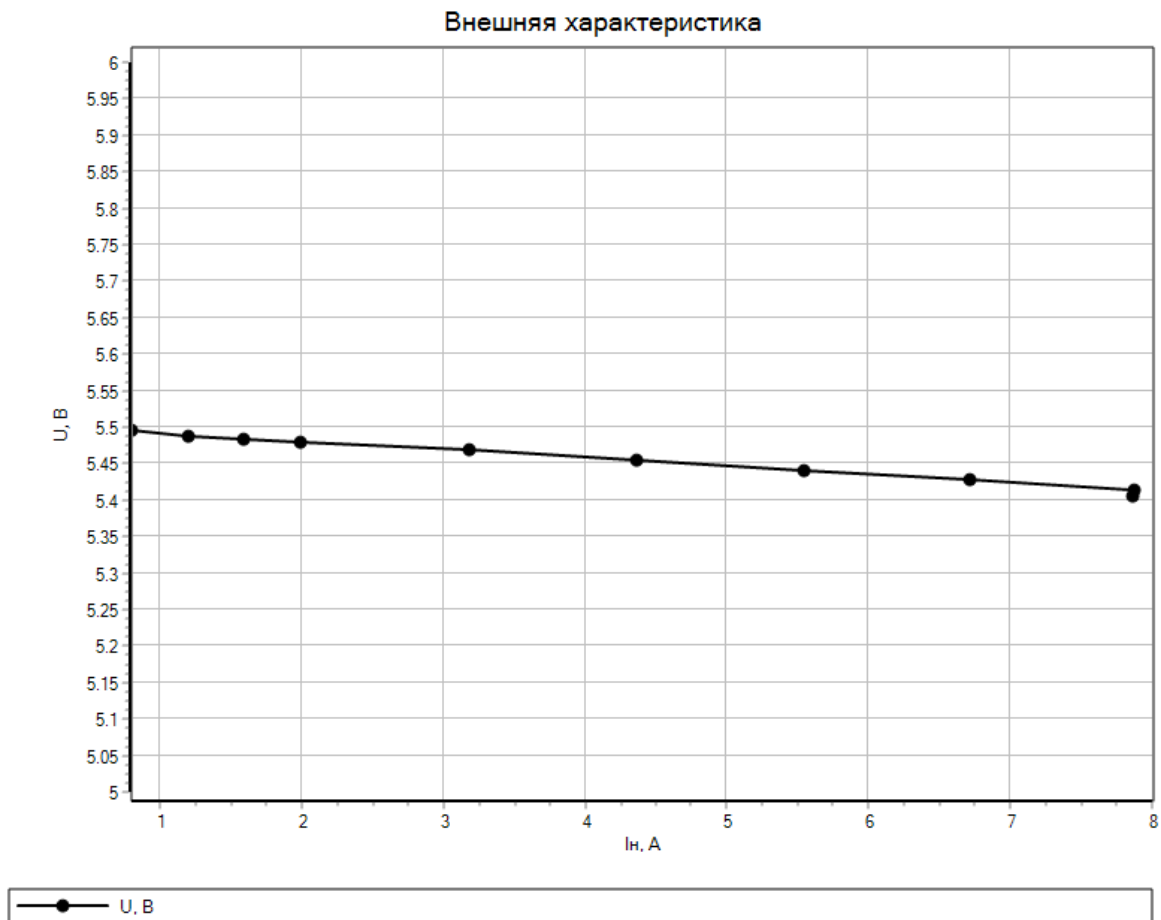


Рис. 14.20. Зависимость напряжения от тока нагрузки

Данные для расчетов автоматической системы стабилизации постоянного напряжения приведены в таблице 14.1.

Таблице 14.1

Параметр	Вариант								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$u_3, В$	5,5	6	7	8	9	5,5	6	5,5	6,6
K_y	1,5	2	1,5	2	2	1,5	4	2	2
$R_d, Ом$	0,05	0,1	0,08	0,08	0,1	0,08	0,1	0,08	0,1
$L_d, мГн$	6	5	5	2	2	2	4	5	3
$C, мкФ$	2000	2000	1000	4000	2000	4000	4000	4000	2000
$R_n, Ом$	5,5	2,5	2	2	3	2	2	2	2,5
K_d, K_{oc}	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	1	0,9
$T_1, мс$	0,8	0,5	0,8	1,2	0,9	0,8	1,2	1,2	1
$T_2, мс$	1	1	0,9	1	1	1	1	1	1,2

1. Задание

1. Набрать модель исследуемой системы (Рис. 14.3).
2. Провести исследование динамических характеристик системы.
3. Исследовать зависимость выходного напряжения U и ошибки регулирования в зависимости от напряжения задания $U_{зад}$ и сопротивления нагрузки R_n .
4. Определить передаточные функции (рис.14.7).
5. Определить устойчивость системы функции (рис.14.11).
6. Провести параметрическую настройку ПИ регулятора (рис. 14.13).
7. Рассчитать внешнюю характеристику (рис.14.19)

2. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Заданные схемы и модели с параметрами.
2. Рассчитанные характеристики, выполненные в SimInTech.
3. Выводы.

3. Контрольные вопросы

1. Объясните роль дросселя L и конденсатора C в устройстве.
2. Как влияет величина постоянной времени T_1 на статические и динамические характеристики системы?
3. Проанализируйте возможность использования в системе релейного регулирующего устройства.
4. Какими способами можно уменьшить погрешность регулирования напряжения?

Практическое занятие № 15

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ

Функциональная схема системы приведена на рис.15.1 [5]. Система содержит: ЗС – задатчик скорости; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; УМ – усилитель мощности; ДТ – датчик тока; ФП – функциональный преобразователь; М – двигатель постоянного тока (ОВ – обмотка возбуждения, u_B – напряжение питания обмотки возбуждения); ОР – объект регулирования; ТГ – тахогенератор.

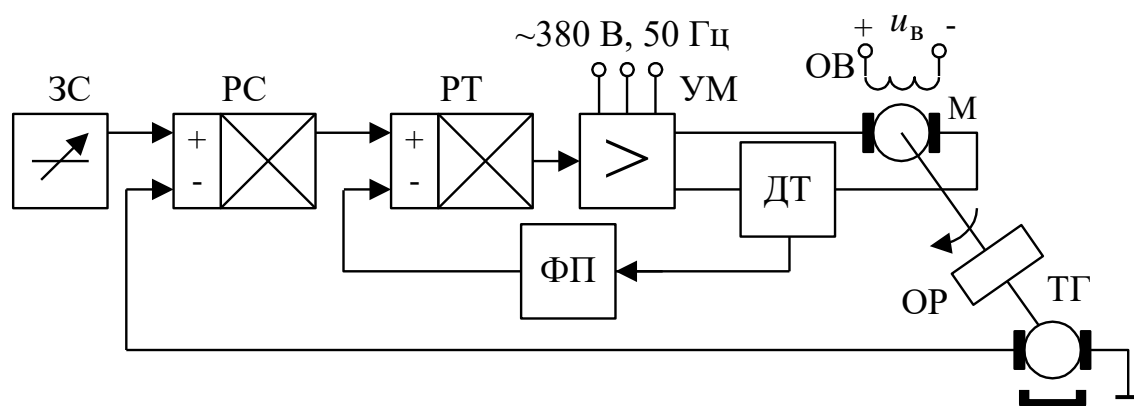


Рис. 15.1. Функциональная схема автоматической системы регулирования скорости с нелинейной обратной связью по току

Структурная схема системы показана на рис. 15.2. На схеме обозначено:

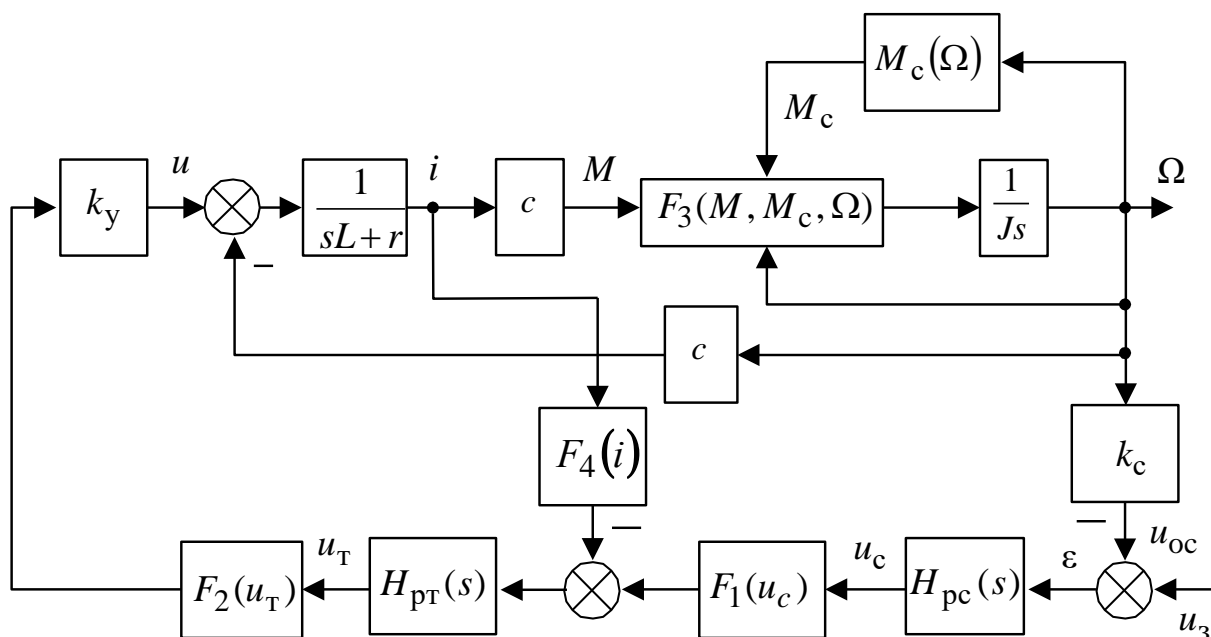


Рис. 15. 2. Структурная схема системы регулирования скорости

$U_{\text{зад}}$ – сигнал задания;

ε – ошибка регулирования;

$H_{\text{pc}}(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора скорости;

$$H_{\text{pc}}(s) = \frac{k_{\text{pc}}(T_{\text{pc}}s + 1)}{T_{\text{pc}}s};$$

$K_{\text{pc}}, T_{\text{pc}}$ – коэффициент передачи и постоянная времени регулятора скорости;

u_c – выходной сигнал регулятора скорости без учета ограничения;

$F_1(u_c)$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора скорости;

$$F_1(u_c) = \begin{cases} u_c & \text{при } |u_c| \leq u_m; \\ -u_m & \text{при } u_c \leq -u_m; \\ +u_m & \text{при } u_c \geq u_m; \end{cases}$$

u_m – максимального значение выходного сигнала регулятора скорости $u_m = 10 \text{ В}$;

$H_{pT}(s)$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока;

$$H_{pT}(s) = \frac{k_{pT}(T_{pT}s + 1)}{T_{pT}s};$$

K_{pT} , T_{pT} – коэффициент передачи и постоянная времени пропорционально-интегрального регулятора тока;

u_T – выходной сигнал регулятора тока без учета ограничения;

$F_2(u_T)$ – нелинейная характеристика, отражающая ограничение выходного сигнала регулятора тока;

$$F_2(u_T) = \begin{cases} u_T & \text{при } |u_T| \leq u_M; \\ -u_M & \text{при } |u_T| \leq -u_M; \\ +u_M & \text{при } |u_T| \geq u_M; \end{cases}$$

K_y – коэффициент передачи усилителя мощности;

u – выходное напряжение усилителя мощности;

r , L – активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки двигателя;

i – ток якорной обмотки;

c – конструктивная постоянная двигателя;

J – момент инерции механической нагрузки, приведенный к валу двигателя;

K_c – коэффициент передачи датчика скорости;

$M_c(\Omega)$ – зависимость момента нагрузки от скорости;

$$M_c(\Omega) = M_0 \operatorname{sgn} \Omega;$$

M_0 – момент трения покоя;

M – электромагнитный момент двигателя;

$F_3(M, M_c, \Omega)$ – нелинейная зависимость, моделирующая торможение двигателя за счет сил трения;

$$F_3(M, M_c, \Omega) = \begin{cases} M - M_c & \text{при } \Omega \neq 0; \\ 0 & \text{при } |M| - |M_c| < 0 \text{ и } \Omega = 0; \end{cases}$$

$F_4(i)$ – статическая характеристика функционального преобразователя;

$$F_4(i) = k_T (i + \alpha i^2 \operatorname{sgn} i);$$

K_T – коэффициент передачи датчика тока;

α – коэффициент пропорциональности.

Исходные данные для расчета автоматической системы регулирования скорости приведены в таблице 15.1.

Таблица 15.1

Параметр	Вариант										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$u_3, В$	2	2,5	3	4	3	2,5	3	2,5	5	4	4,5
k_{pc}	10	10	20	10	10	20	20	25	10	15	20
$T_{pc}, с$	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,3	0,1	0,2	0,25
k_{pr}	10	10	5	5	10	8	10	10	8	15	10
$T_{pr}, с$	0,05	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,05	0,02	0,01	0,025
k_y	30	30	25	25	25	25	40	40	40	30	45
$r, Ом$	0,5	0,5	0,4	0,4	1	1	1	1	0,3	0,5	0,4
$L, мГн$	25	25	8	8	80	80	50	50	40	25	60
$c, В·с/рад$	1	1	1	1	0,8	1,2	1	1	0,9	0,8	1
$J, кг·м^2$	0,5	0,5	0,5	1,0	0,2	0,5	0,8	1,0	0,4	0,5	0,6
$k_T, В/А$	0,002	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$k_c, В·с/рад$	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
$M_0, Н·м$	20	25	25	10	20	20	15	20	20	15	10
$\alpha, 1/А$	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,01	0,01	0,01	0,1	0,2	0,01

Модель исследуемой системы представлена на рис. 15.3.

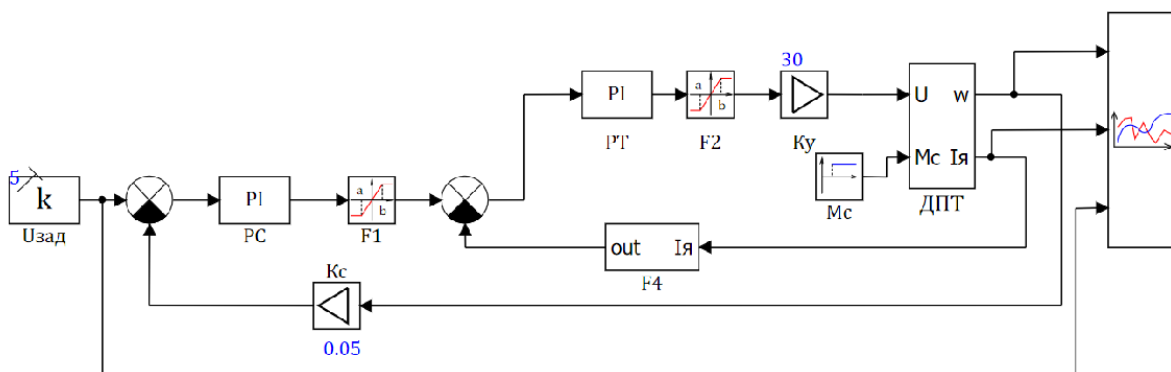
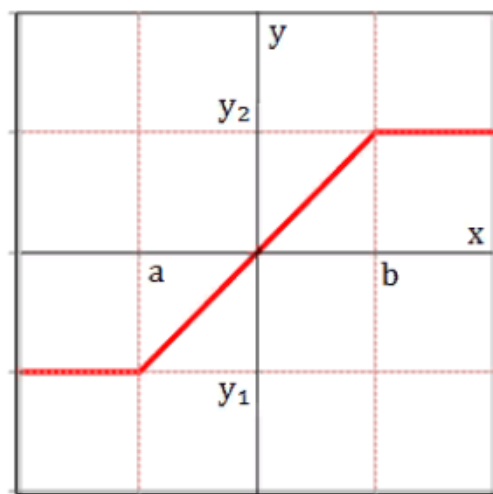


Рис. 15.3. Модель системы регулирования скорости

Функции F1 и F2 реализованы на элементах, которые реализует алгоритм линейного звена с насыщением (рис. 15.4).



$$y(t) = \begin{cases} k \cdot x(t), & \text{если } a < x(t) < b \\ y_1, & \text{если } x(t) \leq a \\ y_2, & \text{если } x(t) \geq b \end{cases}$$

Рис. 15.4. Линейное звено с насыщением

Модель функции F4 представлена на рис. 15.5. В схеме реализовано следующее уравнение:

$$F_4(i) = k_T \left(i + \alpha i^2 \operatorname{sgn} i \right)$$

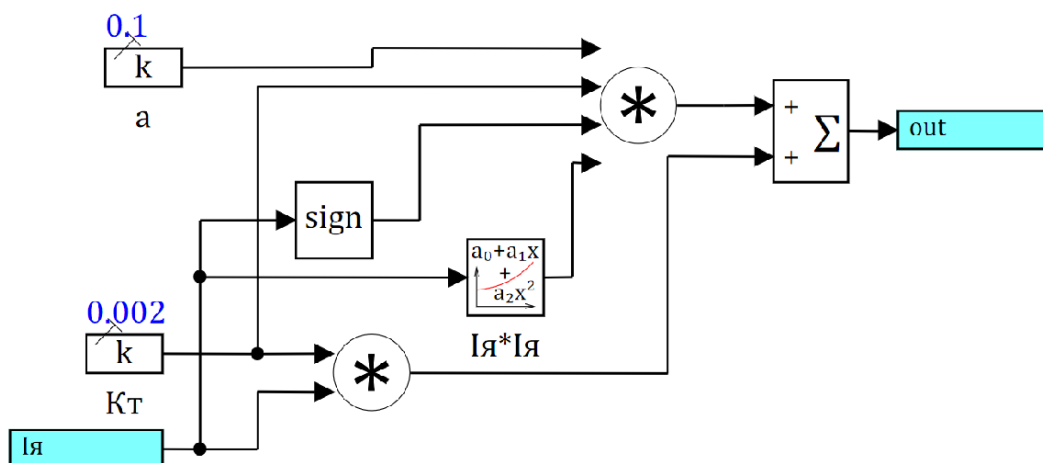


Рис. 15.5. Модель функции F4

Графики разгона ДПТ при напряжении задания равным 5 вольт, представлены на рис. 15.6.

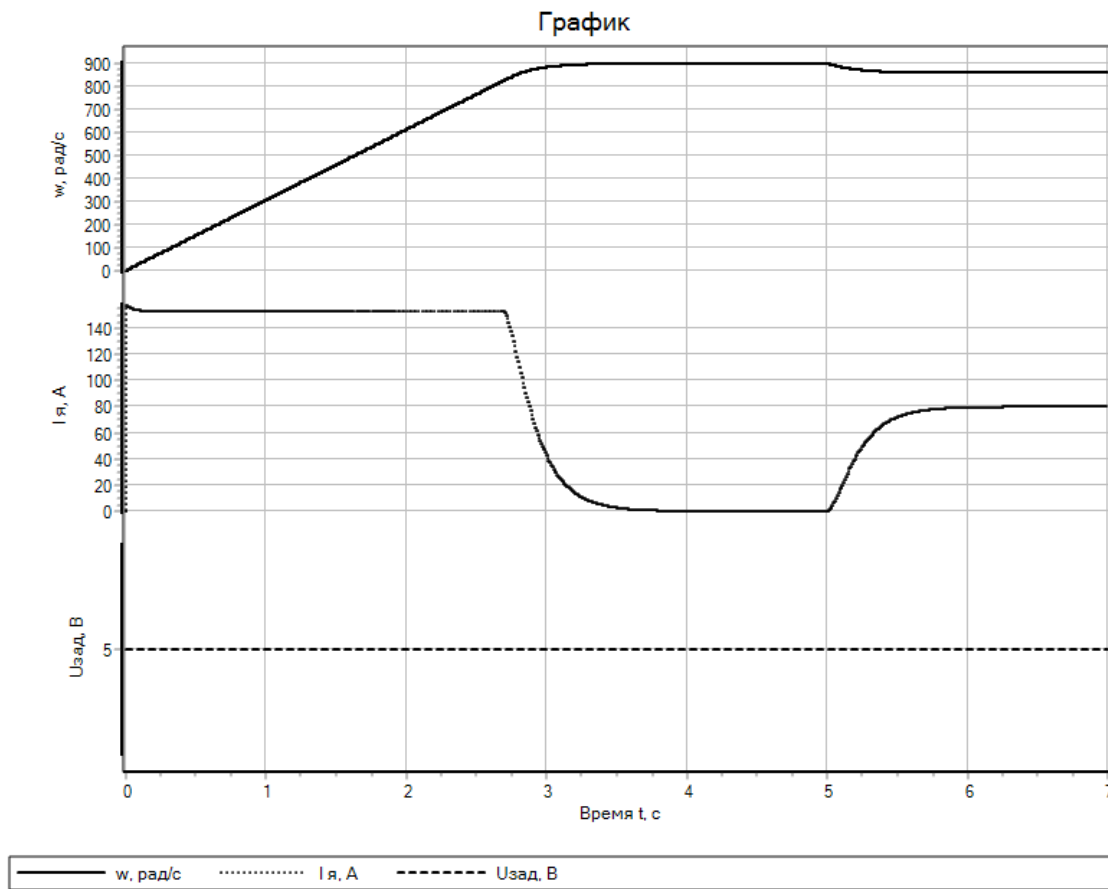


Рис. 15.6. Графики разгона ДПТ при напряжении задания 5 вольт

Модель для исследования схемы при переменных величинах момента сопротивления, дана на рис. 15.7.

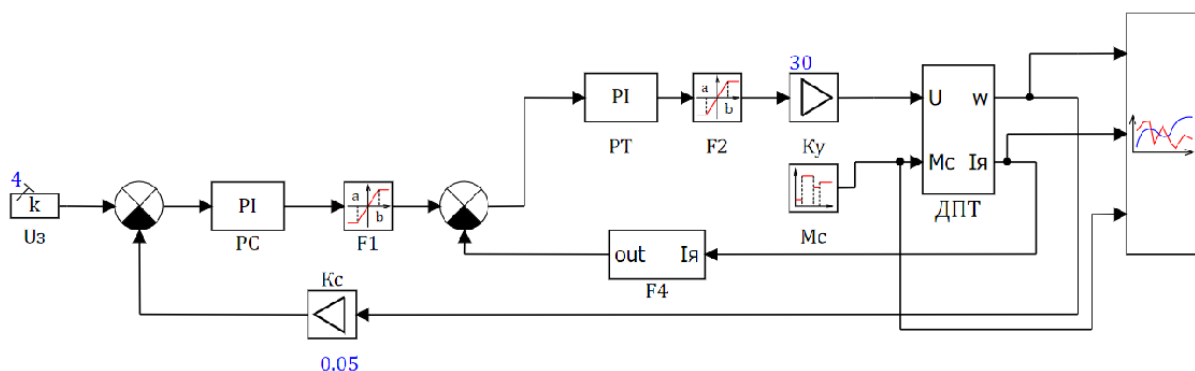


Рис. 15.7. Модель для исследования схемы при переменных величинах момента сопротивления

Результаты расчета даны на рис. 15.8.

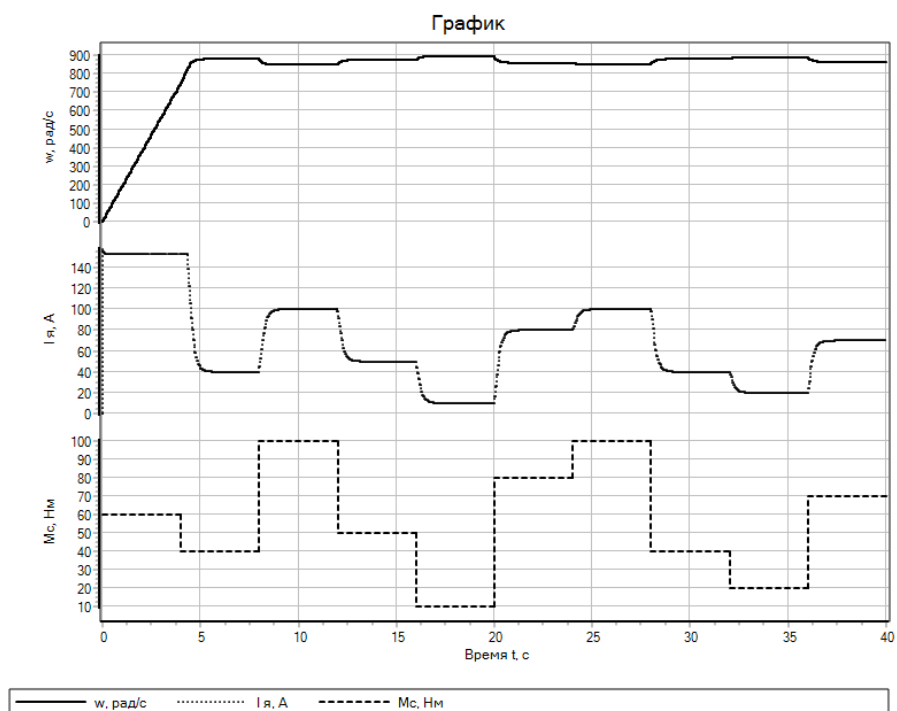


Рис. 15.8. Графики схемы при переменных величинах момента сопротивления

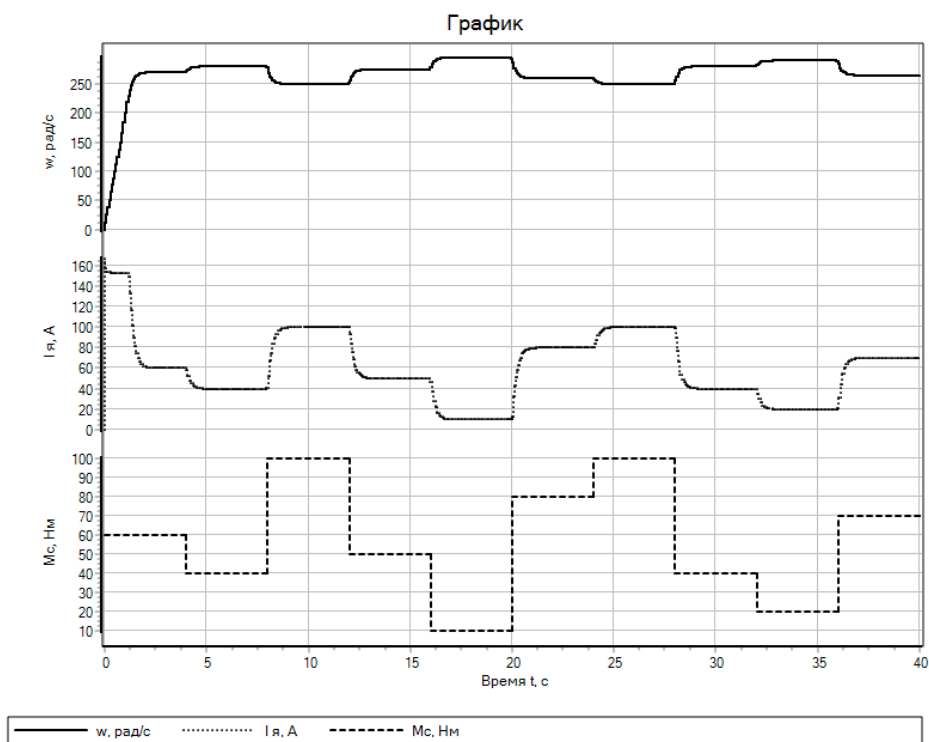


Рис. 15.9. Графики схемы при переменных величинах момента сопротивления и уменьшения величины насыщения F_2 с 30 до 10 вольт

1. Порядок выполнения работы

- Собрать модель, представленную на рис.15.3 и рассчитать пусковые характеристики.
- Исследовать режим пуска и реверса при разных величинах момента инерции.
- Собрать модель, данную на рис. 15.7. Получить характеристики при изменении момента сопротивления от 0 до 100 Нм
- В качестве регулятора скорости вместо ПИ использовать П-регулятор. Рассчитать динамические характеристики и провести сравнение.

2. Содержание отчёта

- Наименование и цель работы.
- Исследуемые схемы в SimInTech.
- Рассчитанные характеристики.
- Выводы по работе.

3. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы двигателя постоянного тока?
2. В чем состоит особенность пуска двигателя?
3. Для чего используются регуляторы скорости и тока?
4. Объясните структурную схему системы, укажите обратные связи и их назначение.
5. Как зависит ток двигателя от момента нагрузки в установившемся режиме и почему?
6. Как изменятся статические и динамические характеристики системы, если использовать в качестве регулятора скорости П-регулятор?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без базовых знаний систем автоматического регулирования и электротехнических систем достаточно сложно обеспечить эффективное использование современного оборудования. Изучение электротехники и электроники и систем автоматического регулирования напрямую связано с экспериментальными исследованиями, а перспективное развитие – с виртуальным моделированием.

Согласно основным разделам курса «Математические модели технических объектов управления», «Электротехника и электроника» и «Системы автоматизации инженерных расчетов» в пособии рассмотрено моделирование процессов, происходящих в электротехнических и электронных устройствах: исследование частотных характеристик систем автоматического управления, анализ устойчивости линейных систем автоматического регулирования, синтез систем автоматического регулирования, исследование качества переходных процессов линейной автоматической системы, моделирование нелинейных систем управления, исследование автоматической системы стабилизации постоянного напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech : практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 424 с.

2. Герман-Галкин, С. Г. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech : практикум по моделированию систем автомат. регулирования / С. Г. Герман-Галкин, Б. А. Карташов, Е. А. С. Н. Литвинов. – М. : ДМК Пресс, 2021. – 494 с. – ISBN-978-5-97060-693-3.

3. Теория автоматического управления : учеб. для студентов вузов / С. Е. Душин [и др.] ; под ред. В. Б. Яковлева. – Изд. 3-е, стер. – М. : Высш. шк., 2009. – 567 с. – ISBN 5-06-004096-8.

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.

5. Малафеев, С. И. Моделирование и расчет автоматических систем : учеб. пособие / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева. – Владимир : Посад, 2003. – 200 с. – ISBN 5-86953-132-2.

Учебное электронное издание

ЛИХОДЕЕВ Сергей Иванович

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУ-
ЛИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В СРЕДЕ SimInTech

Практикум

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Кафедра вычислительной техники и систем управления
slikh@rambler.ru