

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра теоретических основ
электротехники и автоматики

А В Т О М А Т И К А

Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования

Методические рекомендации
по выполнению курсовой работы для студентов 3 курса
направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия»,
профиль «Электрооборудование и электротехнологии»
очной и заочной форм обучения

КАРАБАЕВО
Костромская ГСХА
2015

УДК 621.3.01
ББК 32.965
А 64

Составитель: к.т.н., доцент кафедры ТОО и автоматики Костромской ГСХА *А.В. Рожнов.*

Рецензент: к.т.н., доцент, зав. кафедрой электрификации и автоматизации Нижегородского государственного инженерно-экономического института *В.Л. Осокин.*

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 10 от 02 декабря 2014 года.

А 64 Автоматика. Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования : методические рекомендации по выполнению курсовой работы для студентов 3 курса направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» очной и заочной форм обучения / сост. А.В. Рожнов. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 38 с.

Методические рекомендации по выполнению курсовой работы с использованием программного комплекса МВТУ составлены по методике Б.Т. Федосова. Содержат методические указания и пример выполнения курсовой работы, список рекомендуемых источников, а также приложения.

Издание предназначено для самостоятельной работы студентов 3 курса направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.3.01
ББК 32.965

Учебно-методическое издание

Автоматика. Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования : методические рекомендации по выполнению курсовой работы для студентов 3 курса направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» очной и заочной форм обучения / сост. А.В. Рожнов. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 38 с.

Методические рекомендации выпускаются в авторской редакции.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Цель и задачи курсовой работы	5
2. Задание и исходные данные	5
3. Методические указания по выполнению работы	7
3.1. Анализ исходных данных.....	7
3.2. Описание принципа действия САР	7
3.3. Построение структурной и аналитической моделей САР	9
3.4. Оценка устойчивости разомкнутого контура	9
3.5. Стабилизация разомкнутого контура	10
3.6. Оценка устойчивости замкнутой САР	10
3.7. Коррекция замкнутой САР	12
3.8. Оценка качества САР	14
3.9. Заключение	14
4. Пример выполнения курсовой работы	15
4.1. Анализ исходных данных.....	15
4.2. Описание принципа действия САР	15
4.3. Построение структурной и аналитической моделей САР	17
4.4. Оценка устойчивости разомкнутого контура	18
4.5. Стабилизация разомкнутого контура САР	19
4.6. Оценка устойчивости замкнутой САР	22
4.7. Коррекция замкнутой САР	23
4.8. Оценка качества САР	27
4.9. Заключение	34
Список использованных источников	35
Приложения.....	36

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности труда в сельском хозяйстве и эффективность его производства возможны лишь на основе максимальной механизации и автоматизации технологических процессов при неуклонном сокращении роли ручного труда.

Использование средств и методов автоматизации сельского хозяйства обычно осуществляется после проведения комплексной механизации и электрификации сельскохозяйственного производства.

В зависимости от построения систем автоматического контроля и регулирования, выбора регулирующей аппаратуры и ее настройки определяется производительность и условия труда, надежность работы всех систем автоматики, а также объем и качество выпускаемой продукции.

Методической целью курсовой работы по курсу «Автоматика» является приобретение и закрепление студентами практических навыков использования современного программного обеспечения для анализа и синтеза относительно простых систем на примере исследования замкнутой системы автоматического регулирования.

В издании приведены методические рекомендации по выполнению курсовой работы, которые позволяют освоить на практике основы ТАУ, приобрести и закрепить навыки построения, анализа и синтеза моделей линейных САР в современной программе моделирования МВТУ. Методические указания содержат пример расчета по методике, предложенной к.т.н. Б.Т. Федосовым с применением программного комплекса «Моделирование в технических устройствах» (ПК МВТУ, версия 3.7), предназначенного для детального исследования и анализа динамических процессов в ядерных и тепловых энергетических установках, в системах автоматического управления (САУ), в следящих приводах и роботах, в любых технических системах, описание динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования. Объем проведенного исследования дает студентам базу для самосовершенствования, в том числе дальнейшего самостоятельного освоения методов построения и анализа нелинейных систем и объектов.

Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Автоматика» составлены в соответствии с ФГОС высшего профессионального образования и предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» очной и заочной форм обучения.

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Тема курсовой работы: «Анализ и оптимизация САР частоты вращения вала двигателя постоянного тока (САР ЧВ ДПТ) — САР «ДПТ».

Цель работы: оптимизация типичной линейной системы автоматического регулирования (САР) с использованием программного пакета моделирования систем MBTU.

Задачи работы:

- анализ задания и исходных данных;
- описание принципа действия САР;
- построение структурно-аналитической модели САР;
- оценка устойчивости и стабилизация САР;
- оптимизация модели.

2. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Задание: построить модель САР, исследовать ее, оптимизировать и оценить качество полученной САР.

Исходные данные: функциональная схема САР «ДПТ» и параметры ее элементов.

Функциональная схема САР «ДПТ» приведена на рисунке 1. Объект управления — двигатель постоянного тока, управляемая величина — частота вращения вала ДПТ.

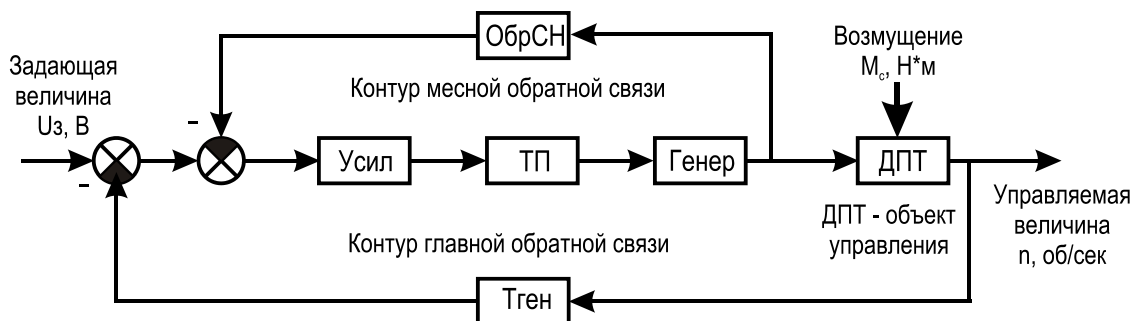


Рис. 1 Типовая функциональная схема САР «ДПТ»

Расшифровка обозначений рисунка 1: Усил — усилитель; ТП — тиристорный преобразователь; Генер — генератор; ТГен — тахогенератор; ОбрСН — гибкая обратная связь по напряжению; ДПТ — двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Объект управления, его выходная величина, частота вращения вала n должна соответствовать заданию; u_z — напряжение задания, в соответствии с которым должна изменяться частота n вращения вала ДПТ; M_c — возмущающий момент силы, приложенный к валу ДПТ от той машины, которую он приводит в действие.

Параметры и передаточные функции элементов

N — номер варианта задания.

U — усилитель моделируется аperiодическим звеном с передаточной функцией [1]:

$$k_y = (20 + N); \quad T_y = (0,06 + 0,001N), [с].$$

Передаточная функция усилителя [1]:

$$W_y(p) = \frac{k_y}{pT_y + 1}. \quad (2.1)$$

$ТП$ — тиристорный преобразователь моделируется аperiодическим звеном с передаточной функцией [1]:

$$W_{тп}(p) = \frac{k_{тп}}{pT_{тп} + 1} \quad (2.2)$$

и параметрами: $k_{тп} = (15 + 2N)$; $T_{тп} = (0,05 + 0,001N)$, [с].

G — генератор, аperiодическое звено [1]:

$$W_G(p) = \frac{k_G}{pT_G + 1} \quad (2.3)$$

с параметрами: $k_z = 0,1(13 + 0,1N)$; $T_z = 0,01(8 + N)$, [с].

$ОСН$ — гибкая обратная связь по напряжению, инерционно-дифференцирующее звено [1]:

$$W_{осн}(p) = \frac{k_{осн} T_{осн}}{pT_{осн} + 1} \quad (2.4)$$

с параметрами: $k_{осн} = 0,1(1,5 + 0,1N)$; $T_{осн} = 0,01(5 + N)$, [с].

$ТГ$ — тахогенератор, усилительное (пропорциональное) звено [1]:

$$W_{тг}(p) = k_{тг}, \quad (2.5)$$

где $k_{тг} = 0,01(2 + 0,3N)$, [В·с/об].

$ДПТ$ — двигатель постоянного тока, колебательное звено. Передаточная функция ДПТ по каналу управления, определяющая влияние напряжения на якоре двигателя на частоту вращения его вала [1]:

$$W_{дв}(p) = \frac{k_{дв}}{T_я T_м p^2 + T_м p + 1}, \quad (2.6)$$

где $k_{дв} = 0,1(12 + N)$, [об/(с·В)]; $k_{дв} = 0,05(15 + N)$, [об/(с·Н·м)];

$$T_я = 0,01(6 + 0,32N), [с]; \quad T_м = 0,1(5 + 0,5N), [с].$$

По каналу возмущения [1]:

$$W_{дв}(p) = \frac{-k_{дв}(pT_я + 1)}{T_я T_м p^2 + T_м p + 1}. \quad (2.7)$$

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Работа, представляемая к защите, должна содержать:

- лист задания на курсовую работу (приложение А);
- титульный лист (приложение Б);
- аннотацию;
- календарный график работы (приложение В);
- содержание;
- введение;
- основную часть, разбитую на разделы;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

3.1. Анализ исходных данных

Выполняется с целью установления достаточности исходных данных для реализации модели и их непротиворечивости.

Примечание: анализ проводится в процессе выполнения всей работы и вносится в пояснительную записку после ее окончания. Если выясняется, что каких-либо данных недостаточно, студент должен обоснованно ввести их. В случае противоречивости исходных данных необходимо найти компромиссное решение и обосновать его.

3.2. Описание принципа действия САР

Принцип действия САР кратко описывается по функциональной схеме (см. рис. 1).

Цель описания принципа действия САР состоит в пояснении назначения и состава САР, а также в качественной иллюстрации ее работоспособности. Следует показать, что рассматриваемая САР осуществляет слежение за величиной сигнала, подаваемого на ее устройство сравнения. Кроме того, необходимо отметить, что САР компенсирует возникающие возмущения, т.е. решает и задачу стабилизации.

Решение задач слежения и стабилизации рассматриваемой системой, возможно, вследствие наличия в ней контура главной обратной связи, реализующего принцип управления по отклонению.

Описание состоит из двух подразделов. В первом рассматривается работа САР в статике. Следует показать, что САР обеспечивает слежение: соответствие (пропорциональность) частоты вращения вала ДПТ задающей величине при постоянных задающем и возмущающем воздействиях.

Во втором подразделе следует показать, что слежение обеспечивается и в динамике: при изменении задания и (или) возмущения САР стремится поддержать значение частоты вращения вала соответствующим заданию. Назначение раздела — показать качественно (т. е. не количественно, словами) преимущество управления двигателем с использованием САР по сравнению с непосредственным управлением. Использование САР позволяет повысить быстродействие управления посредством маломощных сигналов задания и точность поддержания частоты вращения.

3.3. Построение структурной и аналитической моделей САР

Моделирование выполняется с использованием программного пакета «МВТУ».

Цель моделирования: обеспечить возможность анализа, а по его результатам — оптимизации САР.

Построение структурной схемы САР

Вынести на рабочее пространство МВТУ блоки, соответствующие функциональной схеме.

Построить САР ДПТ. На вход подать ступенчатое воздействие. Выход усилителя обратной связи подключить к блоку «Временной график».

Определение передаточных функций элементов САР

Определить значения параметров передаточных функций элементов в соответствии с номером варианта. Ввести эти значения в соответствующие блоки. Рационально разместить блоки диаграммы, предусмотреть место для надписей и комментариев.

3.4. Оценка устойчивости разомкнутого контура

Разомкнутый контур САР состоит из устойчивых элементов, но, в свою очередь, содержит контур местной обратной связи. Следовательно, САР может быть неустойчивой в разомкнутом состоянии.

Оценка устойчивости разомкнутой САР осуществляется с целью проверки выполнения *необходимого условия практического применения критерия Найквиста: разомкнутый контур должен быть устойчивым*. Критерий Найквиста выбран для оценки устойчивости замкнутой САР потому, что *инструменты* этого критерия (логарифмические частотные характеристики) будут применены при *структурно-параметрической оптимизации САР*.

Последнее является определяющим в выборе критерия Найквиста для оценки устойчивости замкнутой САР. *Частотные характеристики разомкнутого контура САР не только позволяют судить о степени устойчивости замкнутой САР и, косвенно, о ее качестве, но и вырабатывать меры и средства оптимизации САР.*

Традиционно устойчивость разомкнутого контура определялась с помощью критериев Михайлова или Гурвица. Однако, имея в своем распоряжении программный комплекс МВТУ, можно непосредственно по виду переходной характеристики определить, устойчива ли система. Более того, по виду переходной характеристики качественно можно оценить и степень устойчивости.

Запустить программу на счет, определить по виду переходной характеристики, устойчив ли разомкнутый контур.

3.5. Стабилизация разомкнутого контура

Стабилизация разомкнутой САР осуществляется с целью обеспечения выполнения *необходимого условия практического применения критерия Найквиста: разомкнутый контур должен быть устойчивым с запасом по амплитуде в диапазоне от 6 до 20 дБ (в 2-10 раз).*

Изменяя параметры элементов контура местной обратной связи: коэффициенты усиления усилителя и тиристорного преобразователя, а возможно, и постоянной времени звена ОСН, добиться, чтобы переходный процесс стал апериодическим, с перерегулированием не более 5-20%.

Возможный способ решения этой задачи: вывести разомкнутый контур на границу устойчивости, а затем уменьшить коэффициент усиления усилителя от 2 до 10 раз. В предлагаемой методике контур выводится на границу устойчивости для того, чтобы иметь точку начала отсчета для обеспечения нужного запаса устойчивости по амплитуде.

Может оказаться целесообразным выполнить стабилизацию в два этапа: на первом изменять только коэффициенты усиления и если результаты окажутся недостаточно качественными, то на втором этапе можно уменьшить и постоянную времени звена ОСН (обратной связи по напряжению).

3.6. Оценка устойчивости замкнутой САР

Оценка степени устойчивости замкнутой САР проводится с целью определения необходимых мер и средств оптимизации САР. Оценка осуществляется с помощью логарифмического варианта критерия Найквиста. Это позволяет не только косвенно, по запасам устойчивости, судить о степени устойчивости САР, но и численно

определить необходимые для предварительной стабилизации изменения значений параметров элементов.

Необходимо выделить элементы разомкнутого контура и вызвать ЛАЧХ и ЛФЧХ. Растянуть и оформить графики. Определить запасы по фазе и амплитуде. Сравнить их значения с допустимыми.

3.7. Коррекция замкнутой САР

Коррекция осуществляется с целью получения работоспособной САР путем оптимизации коэффициента усиления контура управления. Если этого оказывается недостаточно, то в главный контур вводится и настраивается ПИ-регулятор.

Формально подбор наилучшего значения коэффициента усиления следует называть *параметрической оптимизацией* системы, в то время как введение ПИ-регулятора и определение его наилучших настроечных параметров является простым случаем *структурно-параметрической оптимизации* САР, поскольку во втором случае изменяется структурная схема.

По ЛАЧХ и ЛФЧХ *разомкнутого контура* определить необходимую величину изменения коэффициента усиления в дБ, с тем, чтобы запасы устойчивости вошли в требуемые интервалы, предпочтительнее ближе к их верхним границам. По фазе это от 35 до 65° и по амплитуде от 6 до 20 дБ. Изменение усиления контура следует провести путем введения П-регулятора (усилителя) непосредственно за сумматором главного контура управления. Если при этом усиление контура окажется меньше 20 дБ, следует ввести в контур главной обратной связи, сразу после П-регулятора, ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{pT_u}\right) = k_p \frac{pT_u + 1}{pT_u},$$

где k_p — коэффициент усиления ПИ-регулятора;

T_u — постоянная времени интегратора, обратно пропорциональная частоте сопряжения аппроксимаций участков ЛАЧХ с наклонами 0 дБ/дек и –20 дБ/дек соответственно.

Примечание. Усиление П-регулятора можно учесть в ПИ-регуляторе, с тем, чтобы уменьшить количество блоков в схеме.

После корректировки усиления или, может быть, введения ПИ-регулятора, следует заново выделить элементы разомкнутого контура, построить ЛАЧХ и ЛФЧХ и убедиться в том, что запасы по фазе и амплитуде соответствуют требованиям. Коэффициент усиления

контура в астатической системе напрямую не регламентируется, а косвенно он характеризует быстродействие системы.

3.8. Оценка качества САР

Оценка выполняется с целью сравнения показателей качества переходного и установившегося режимов оптимизированной САР с требованиями, предъявляемыми к САР заказчиком.

Оценка качества переходного режима САР осуществляется по переходной функции замкнутой САР.

Замкнуть главный контур управления, переключить блок «Временной график» на выход САР, к выходу ДПТ.

Запустить на счет.

Оценить время регулирования, перерегулирование. Перерегулирование хорошей системы находится в пределах 0...20%. Если полученное перерегулирование превышает величину 40%, следует вернуться к коррекции системы и уменьшить усиление контура.

Знание диапазона изменения некоторого параметра системы управления, в котором система сохраняет устойчивость, позволяет оценить восприимчивость системы к возмущениям, приводящим к отклонению исследуемого параметра от его оптимального значения. На практике здесь потребуются оценить и влияние возмущающих факторов на выбранный, названный выше, параметр.

В данной работе предлагается оценить диапазон изменения коэффициента усиления контура, в котором САР сохраняет устойчивость.

3.9. Заключение

Здесь следует кратко изложить основные результаты работы, сделать выводы и дать рекомендации. Суть выводов — достигнута ли цель работы и решены ли ее задачи. Рекомендации могут быть как по оптимизации методов решения поставленных задач, способам и возможному дальнейшему улучшению системы, так и по ее применению.

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

4.1. Анализ исходных данных

САР ЧВ «ДПТ» — система автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Заданием определена функциональная схема САР (рис. 2): объект управления — двигатель постоянного тока, управляемая величина — частота вращения вала ДПТ. САР представляет собой замкнутый контур главной обратной связи, который осуществляет управление по отклонению. В контуре имеется и гибкая местная обратная связь, которая предназначена для стабилизации САР, способствует тому, чтобы САР была достаточно устойчивой. Наличие обратных связей в САР свидетельствует о том, что система может быть и неустойчивой, поэтому анализ САР должен включать оценку ее устойчивости и, при необходимости, выбор мер и средств по ее стабилизации.

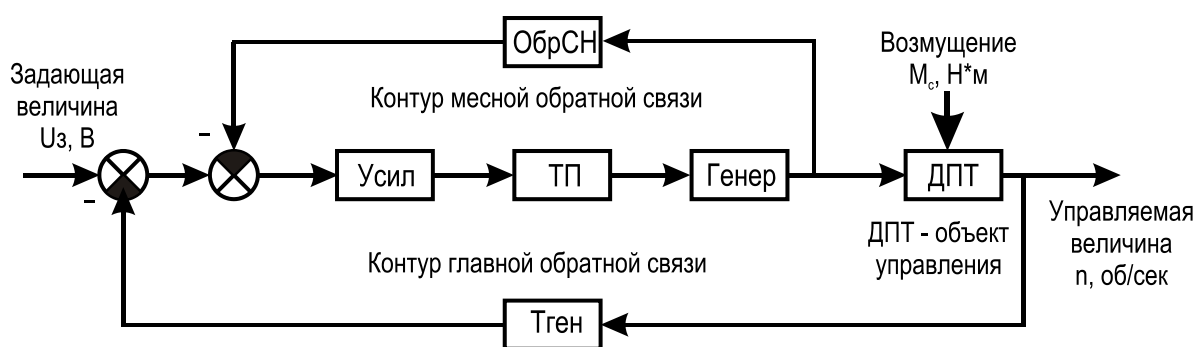


Рис. 2. Исходная функциональная схема САР «ДПТ»

Следует отметить, что в предлагаемой схеме фактически изменять можно только параметры усилителя и звена местной обратной связи. Эти элементы введены в схему как раз для того, чтобы обеспечить возможность ее коррекции. Не исключено, что параметры звена обратной связи по напряжению (ОСН) заданы неудачно и потребуют существенной коррекции.

4.2. Описание принципа действия САР

Работа САР «ДПТ» в статике. В статике входные, а следовательно, и выходные сигналы САР постоянны. На первый, левый сумматор контура главной обратной связи, его сравнивающее устройство, подается задающая величина и

величина с выхода тахогенератора, пропорциональная частоте вращения вала. Разностный сигнал $e = u_z - y_{mz} = u_z - k_{mz}n$, имеющий малую величину, усиливается усилителем, тиристорным преобразователем и генератором, в результате чего получается входной, управляющий сигнал ДПТ (двигателя постоянного тока, объекта управления), т.е. напряжение на якоре. Вследствие наличия этого напряжения вал двигателя вращается. Поскольку произведение коэффициентов усиления усилителя, тиристорного преобразователя и генератора велико, то получить некоторое конкретное управляющее напряжение на якоре двигателя можно только в том случае, если разностный сигнал e — мал. Это значит, что частота n вращения вала с некоторой точностью пропорциональна заданию u_z . Звено обратной связи инерционно-дифференцирующее, поскольку обратная связь по напряжению гибкая, и поэтому оно не влияет на работу САР в статике.

Таким образом, САР выполняет свои функции: обеспечивает слежение в статике, поддерживая частоту вращения вала пропорциональной заданию.

Работа САР «ДПТ» в динамике. Изменение задания в первый момент времени приводит к соответствующему росту отклонения, поскольку звенья перед объектом и сам объект обладают инерционностью и поэтому частота вращения вала не может измениться мгновенно. Изменение отклонения, будучи усиленным усилителем, тиристорным преобразователем и генератором, с учетом их инерционности приводит к постепенному изменению управляющей величины — напряжения на якоре, которое плавно изменяет частоту вращения вала так, что ошибка слежения, т.е. отклонение, устремляется к нулю. Обратная связь по напряжению стабилизирует САР и повышает ее быстродействие, осуществляя процесс слежения.

Изменение возмущения, момента на валу двигателя приводит к изменению частоты вращения, которое, вследствие наличия главной обратной связи, приводит к соответствующему изменению отклонения. Это изменение отклонения усиливается и тем самым изменяет величину напряжения на якоре так, что отклонение частоты, вызванное изменением возмущения, компенсируется. Таким образом, осуществляется стабилизация частоты вращения вала двигателя.

Итак, САР «ДПТ» обеспечивает как стабилизацию, так и слежение.

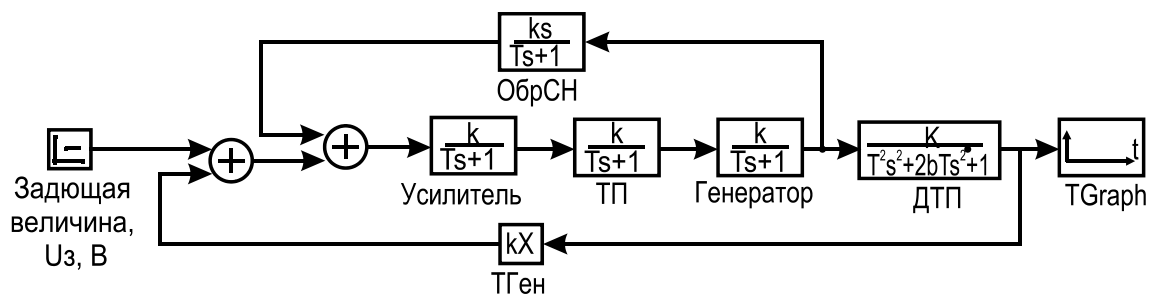
4.3. Построение структурной и аналитической моделей САР

Передаточные функции САР «ДПТ» рассчитываются согласно формулам (2.1-2.7) и номеру варианта задания.

Совокупность передаточных функций элементов и функциональной схемы позволяет построить структурно-алгоритмическую модель САР, а также аналитическую модель, представляющую собой передаточную функцию всей САР.

Построение структурной схемы САР

Производим построение в поле программы МВТУ структурную схему САР «ДПТ». Схема и пример введения коэффициентов передаточных функций представлены на рисунке 3.



$\frac{K}{T \cdot s + 1}$	
Кoeffициент усиления	71
Постоянная времени [с]	0.111
Вектор начальных условий	0

Усилитель

$\frac{K}{T^2 s^2 + 2bTs + 1}$	
Кoeffициент усиления	6.3
Постоянная времени [с]	0.68076
Кoeffициент демпфирования	3.05
Начальные условия $Y(0), Y'(0)$	0 0

Двигатель постоянного тока

$\frac{ks}{Ts + 1}$	
Кoeffициент усиления	0.3696
Постоянная времени [с]	0.56
Начальное условие $Y(0)$	0

Звено обратной связи (ОСН)

$\frac{K}{T \cdot s + 1}$	
Кoeffициент усиления	1.81
Постоянная времени [с]	0.51
Вектор начальных условий	0

Генератор

kx		$\frac{K}{T \cdot s + 1}$	
Коэффициент усиления	0.173	Коэффициент усиления	117
		Постоянная времени [с]	0.101
		Вектор начальных условий	0

Тиристорный преобразователь

Тахогенератор

Рис. 3. Модель исходной САР «ДПТ»

Определение передаточных функций элементов САР

Передаточные функции САР «ДПТ» рассчитываются согласно формулам (2.1-2.7) и номеру варианта задания.

Совокупность передаточных функций элементов и функциональной схемы позволяет построить структурно-алгоритмическую модель САР, а также аналитическую модель, представляющую собой передаточную функцию всей САР.

4.4. Оценка устойчивости разомкнутого контура

Первый запуск модели

Результаты первого запуска модели САР представлены на рисунке 4.



Рис. 4. Переходная характеристика исходной САР

Переходная характеристика исходной САР представляет собой колебательный процесс с увеличивающейся со временем амплитудой. Исходная САР неустойчива.

4.5. Стабилизация разомкнутого контура САР

Разомкнем контур главной обратной связи, подключим его к блоку «Временной график» и запустим моделирование (рис. 5).

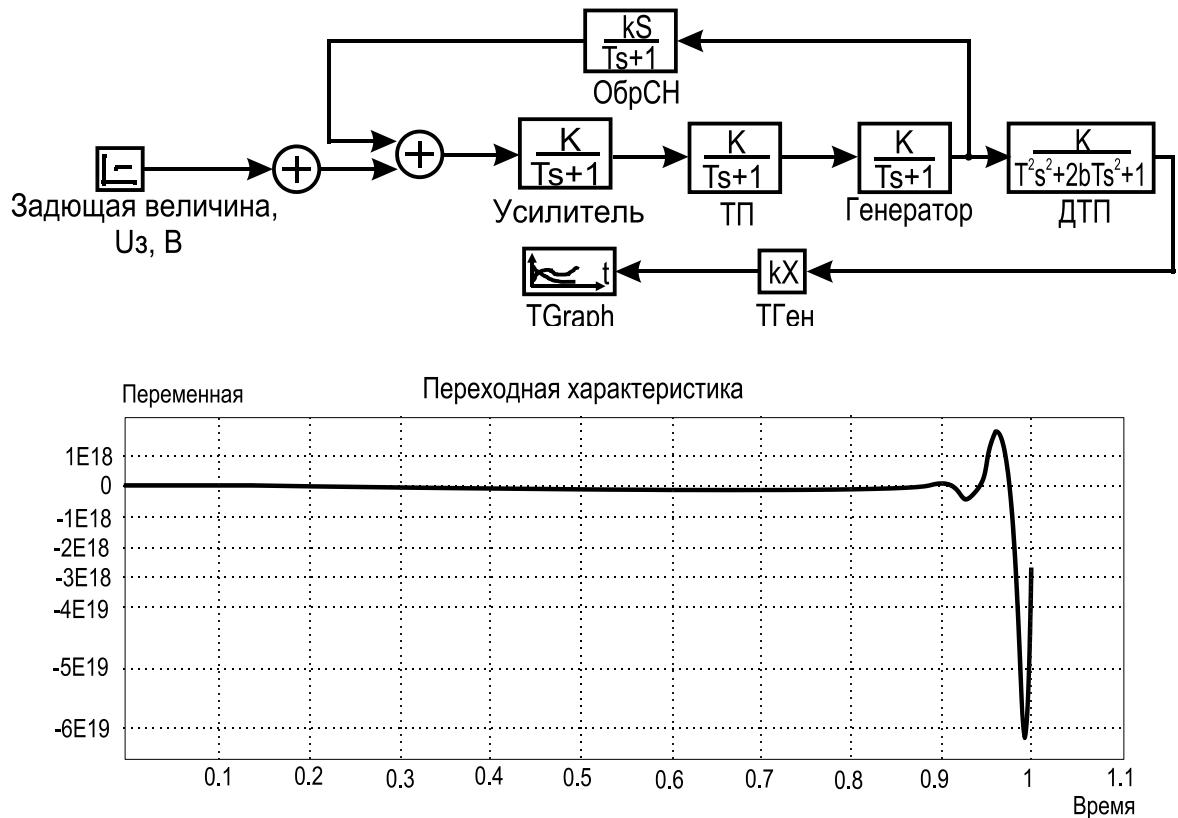


Рис. 5. Проверка устойчивости разомкнутого контура САР «ДПТ»

График переходной функции (см. рис. 5) показывает, что разомкнутая САР неустойчива, поскольку выходной сигнал представляет собой колебания с быстро увеличивающейся амплитудой. Для обеспечения выполнения необходимого условия практического применения критерия Найквиста разомкнутую САР требуется стабилизировать.

Нетрудно увидеть, что потеря устойчивости разомкнутой САР возникает из-за наличия местной обратной связи (системы, составленные из устойчивых звеньев и имеющие обратные связи, могут терять устойчивость). Интересно отметить, что эта связь была введена для того, чтобы обеспечить достаточную устойчивость и качество результирующей САР. Это указывает на то, что параметры звена обратной связи по напряжению заданы неудачно и могут потребовать коррекции.

Стабилизация контура уменьшением коэффициента усиления усилителя. Осуществить стабилизацию разомкнутого контура в данном случае можно, меняя параметры двух элементов: усилителя и звена обратной связи по напряжению (ОСН). Для начала попробуем просто уменьшать (увеличивать) коэффициент усиления усилителя до тех пор, пока разомкнутый контур не будет переведен в состояние, близкое к граничному между устойчивым и неустойчивым режимами (рис. 6).

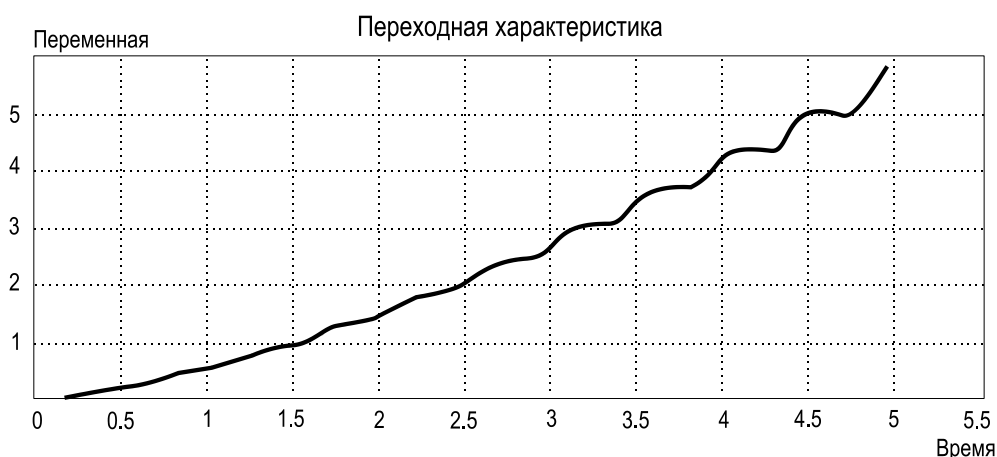


Рис. 6. Переходная характеристика с коэффициентом усиления усилителя, уменьшенным с 71 до 0,17

Переходная характеристика имеет колебательную компоненту, амплитуда которой сравнительно медленно увеличивается со временем. Разомкнутый контур еще неустойчив, но близок к критическому, граничному режиму.

Теперь можно стабилизировать разомкнутую САР (рис. 7), обеспечив хотя бы минимальный, двукратный (т.е. в 6 дБ) запас устойчивости контура местной обратной связи. Для этого уменьшим коэффициент усиления усилителя вдвое.

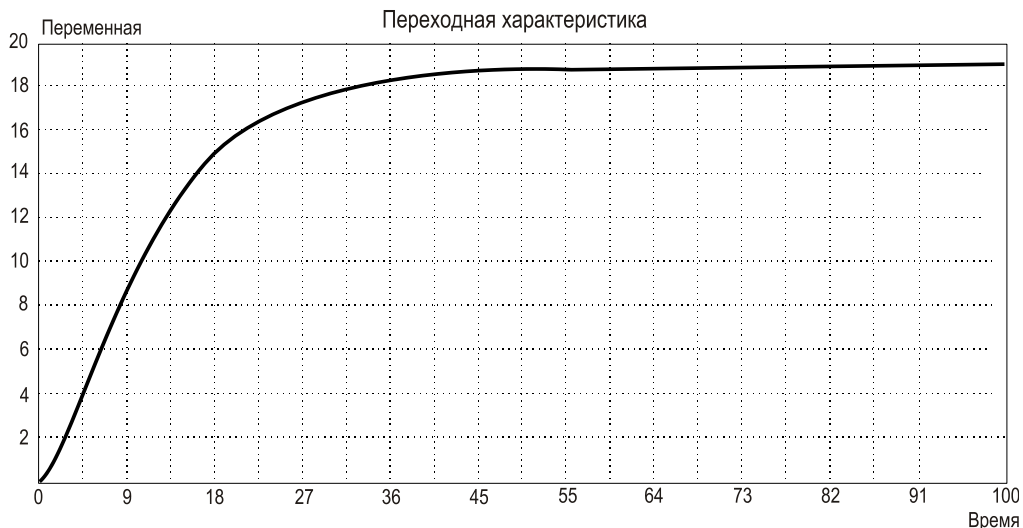


Рис. 7. Стабилизированная разомкнутая САР

Таким образом, изменением только коэффициента усиления усилителя не удастся получить удовлетворительных характеристик разомкнутого контура. Следовательно, требуется более глубокая стабилизация.

Стабилизация изменением параметров усилителя и звена ОСН. В принципе, теперь уже можно переходить к коррекции замкнутой САР, поскольку формально устойчивость разомкнутого контура обеспечена с запасом. Однако запас этот сравнительно мал, как и мало усиление всего разомкнутого контура, это видно по установившемуся значению переходной функции контура на рисунке 7. Поэтому, во избежание возможных трудностей, которые могут возникнуть при окончательной коррекции САР, изменим и параметры звена ОСН. Методом проб и ошибок будем изменять постоянную времени инерционно-дифференцирующего звена ОСН и усиление усилителя.

В результате подбора параметров получим переходную характеристику на рисунке 8.

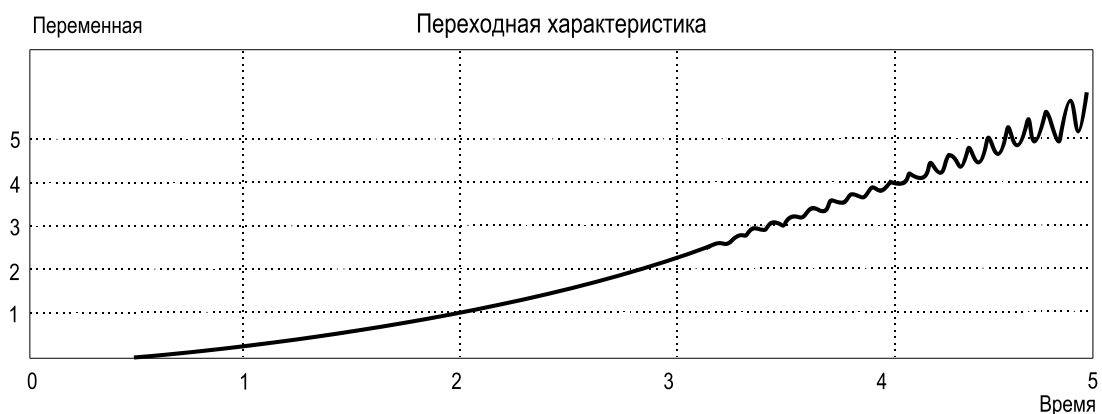


Рис. 8 Переходная характеристика САР «ДПТ»

Медленное увеличение размаха колебаний переходной функции говорит о том, что разомкнутый контур находится вблизи границы устойчивости. Как видно на рисунке 9, после второй коррекции, состоявшей в уменьшении в 100 раз постоянной времени звена ОСН, значение коэффициента усиления усилителя, при котором разомкнутый контур находится вблизи границы устойчивости, повысилось с 0,17 до 0,38. Остается обеспечить запас устойчивости по амплитуде контура местной обратной связи путем уменьшения коэффициента усиления усилителя.

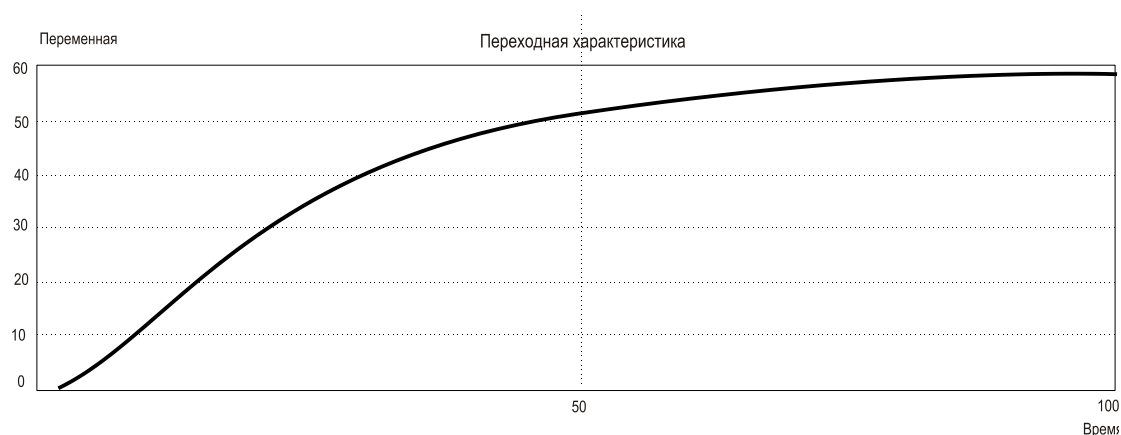


Рис. 9. Окончательно стабилизированный разомкнутый контур САР «ДПТ»

Коэффициент усиления усилителя уменьшен по сравнению с его значением в критическом режиме с 0,38 до 0,12. Результирующее усиление разомкнутого контура всей САР составляет примерно 68 единиц, что видно из установившегося значения переходной функции.

Итак, разомкнутая САР ЧВ «ДПТ» стабилизирована. Поэтому устойчивость замкнутой САР можно анализировать с помощью критерия Найквиста.

4.6. Оценка устойчивости замкнутой САР

Выясним, окажется ли устойчивой замкнутая САР «ДПТ», разомкнутый контур которой только что стабилизирован. Для этого замкнем обратную связь и проверим, как поведет себя переходная характеристика САР (рис. 10, 11).

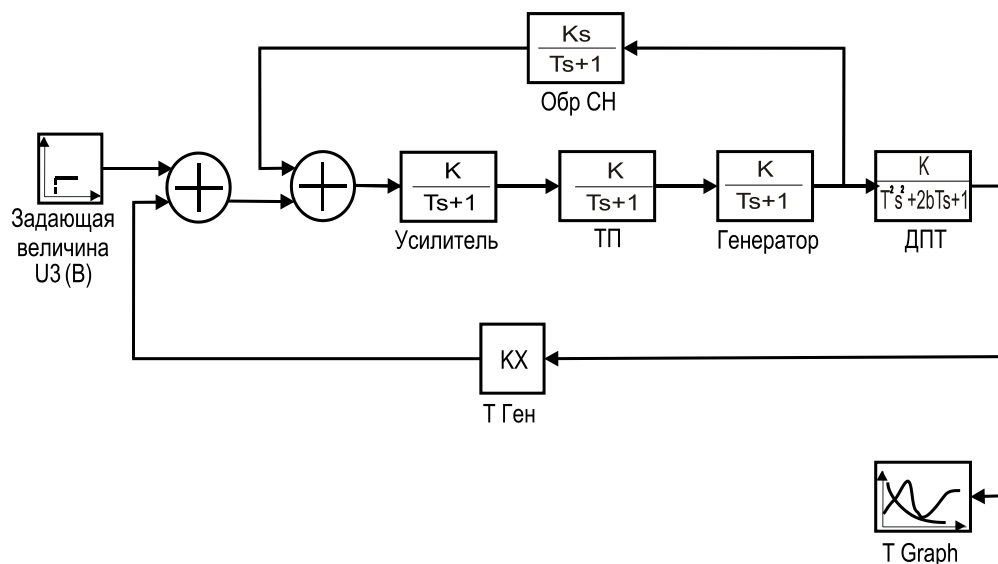


Рис. 10. Схема САР «ДПТ»
с замкнутой обратной связью

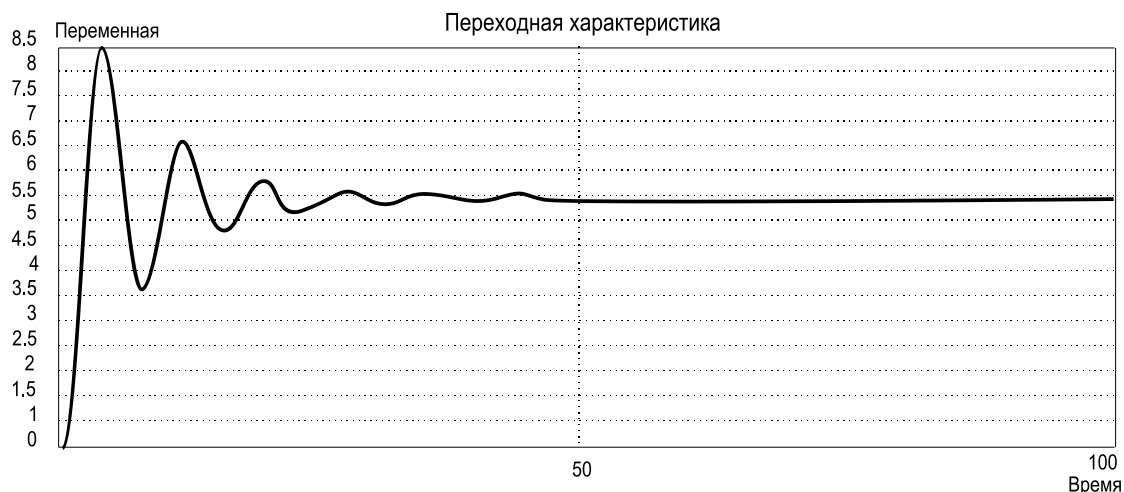


Рис. 11. САР «ДПТ»
после стабилизации разомкнутого контура

Система устойчива, но колебательность переходной характеристики чрезмерна. Замкнутая САР требует коррекции.

Как видно на рисунке 10, установившееся значение переходной функции составляет примерно 5,6 об/с, что на 4% меньше точного значения, равного $1/W_{m2}(p)|_{p=0} = 1/0,173 = 5,78$ об/с. Таким образом, точность полученной системы и в установившемся режиме неудовлетворительна.

4.7. Коррекция замкнутой САР

Вернемся к разомкнутой САР. Частотные характеристики строятся именно для разомкнутого контура, а по ним можно судить

об устойчивости замкнутой САР, пользуясь критерием устойчивости Найквиста (рис. 12).

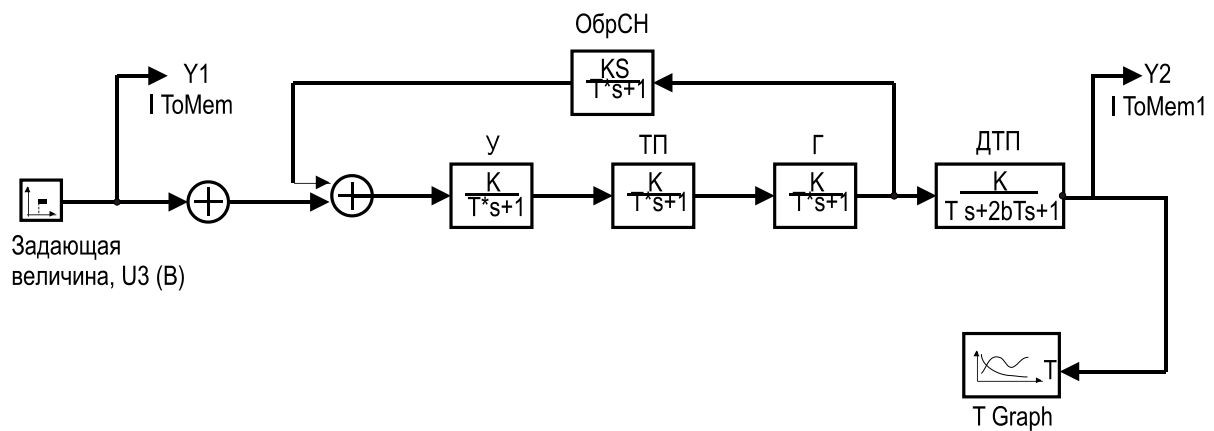


Рис. 12. САР «ДПТ»

Предварительная коррекция замкнутой САР осуществляется посредством изменения и оптимизации значения коэффициента усиления разомкнутого контура. Технически этот коэффициент можно менять, установив в схеме (см. рис. 10). П-регулятор между сумматорами и меняя его усиление, а контролировать его значение — по установившемуся значению переходной функции. Изменение коэффициента усиления контура управления приводит к вертикальным смещениям ЛАЧХ и не влияет на ЛФЧХ.

Построение и анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ. Прежде чем непосредственно строить ЛАЧХ и ЛФЧХ (логарифмические амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики), необходимо задать пределы частотного диапазона, в котором будут построены характеристики (рис. 13).

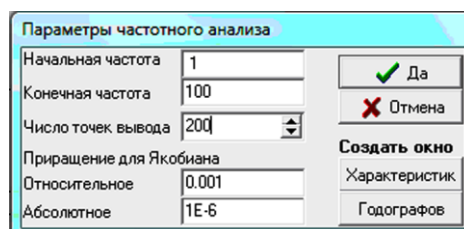


Рис. 13. Задание начала и конца частотного диапазона и числа шагов для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ

Из рисунков 14, 15 следует, что необходимо корректировать САР. Это можно сделать путем уменьшения коэффициента усиления с тем, чтобы обеспечить необходимые запасы устойчивости.

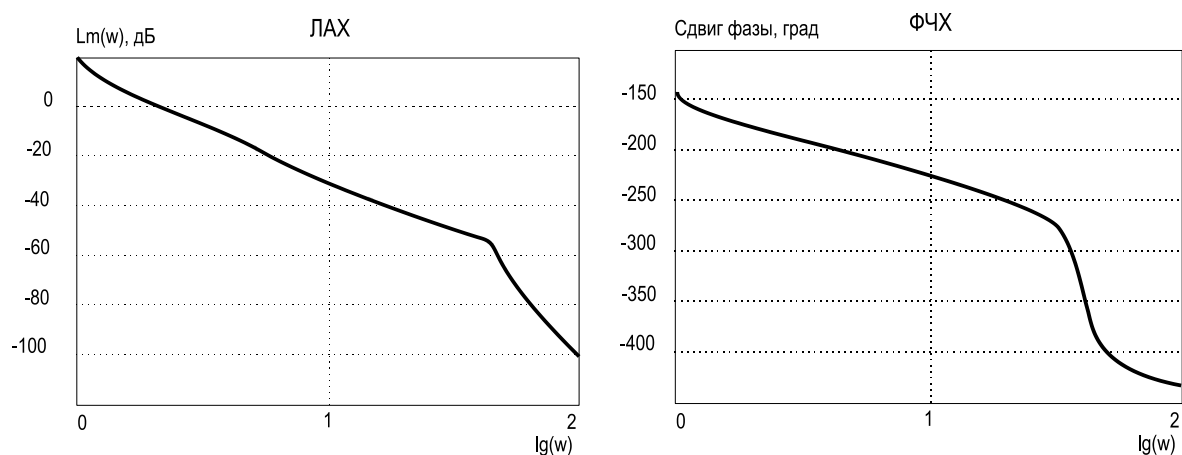


Рис. 14. Логарифмические характеристики САР «ДПТ»:
а — амплитудно-частотная и б — фазо-частотная

lg(w)	ЛАХ	Сдвиг фазы
1.54882	4.02101	-177.922
1.58489	3.62098	-178.451
1.62181	3.22044	-178.98
1.65959	2.81939	-179.508
1.69824	2.41783	-180.036
1.7378	2.01575	-180.563
1.77828	1.61316	-181.091
1.8197	1.21005	-181.618
1.86209	0.806419	-182.146
1.90546	0.402252	-182.674
1.94984	-0.00245255	-183.204
1.99526	-0.407703	-183.734
2.04174	-0.813507	-184.266
2.0893	-1.21987	-184.799
2.13796	-1.62682	-185.334

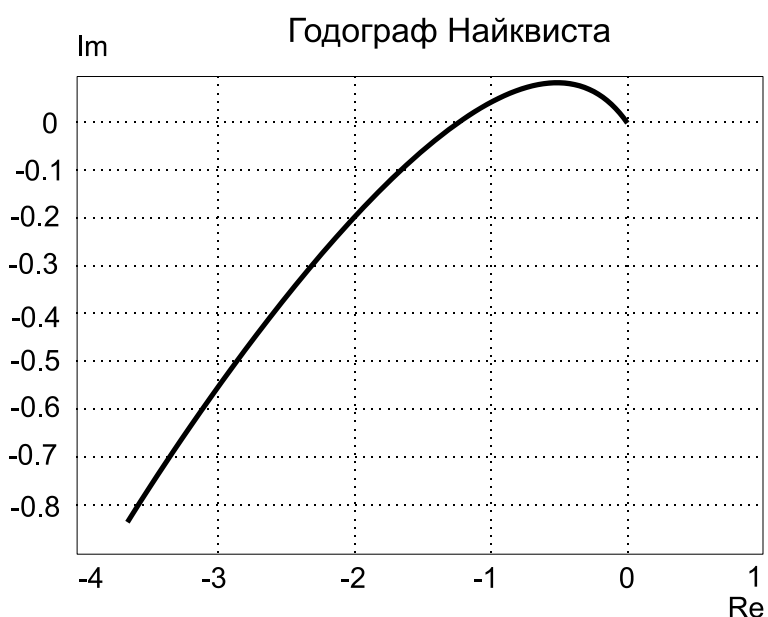


Рис. 15. Построение годографа Найквиста

Как видно на рисунке 16, запасы устойчивости обеспечены, но усиление контура мало (уменьшено в 2,6 раза), что говорит о низком качестве работы полученной САР в установившемся режиме.

$\lg(w)$	ЛАХ	Сдвиг фазы
1.62181	2.22288	-175.72
1.65959	1.82577	-176.392
1.69824	1.42803	-177.063
1.7378	1.02967	-177.731
1.77828	0.630677	-178.398
1.8197	0.23107	-179.065
1.86209	-0.169154	-179.73
1.90546	-0.569993	-180.395
1.94984	-0.971447	-181.06
1.99526	-1.37352	-181.725
2.04174	-1.77621	-182.39
2.0893	-2.17952	-183.056
2.13796	-2.58345	-183.722
2.18776	-2.98802	-184.39
2.23872	-3.39322	-185.06

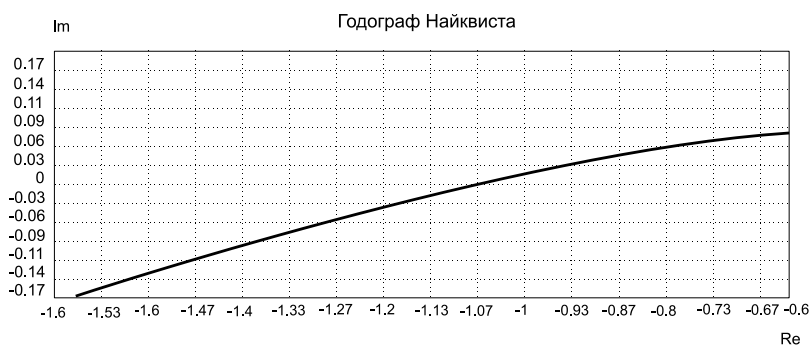


Рис. 16. Обеспечение запасов устойчивости по фазе и амплитуде смещением ЛАЧХ вниз (т.е. уменьшением усиления контура)

Уменьшение усиления контура (рис. 17) обеспечивается в схеме модели введением усилителя с усилением $0,38 = 1/2,6$. Этот усилитель может рассматриваться как П-регулятор.

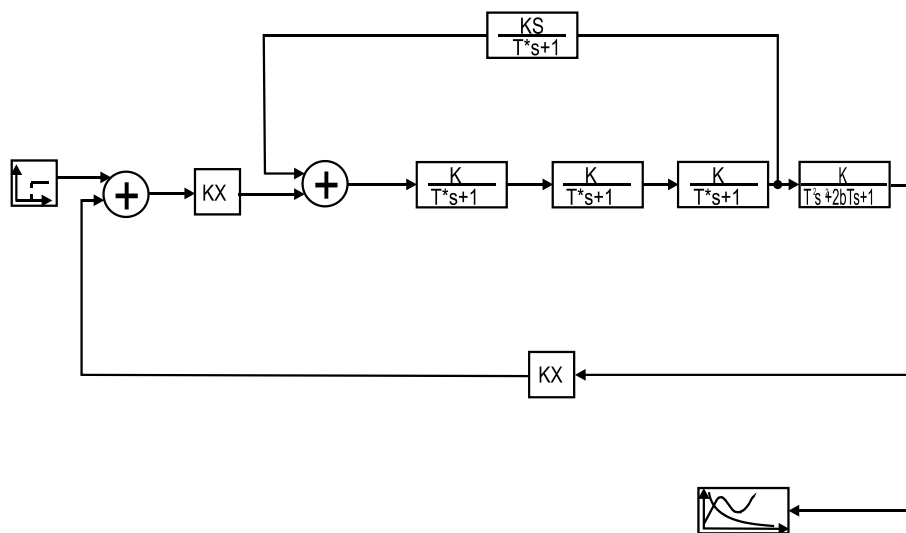


Рис. 17. Схема с введением П-регулятора

Характеристика свидетельствует о сравнительно хорошем качестве переходного режима САР и о неудовлетворительном качестве ее работы в установившемся режиме.

При безошибочной работе в установившемся режиме, отрабатывая единичную ступеньку, САР обеспечивала бы на выходе $1/0,173 = 5,78$ об/с, в то время как полученная САР обеспечивает только

5,3 об/с (рис. 18). 0,173 — коэффициент усиления тахогенератора, установленного в обратной связи главного контура управления. Относительная ошибка регулирования составляет $(5,78 - 5,3) / 5,78 = 0,08 = 8\%$.

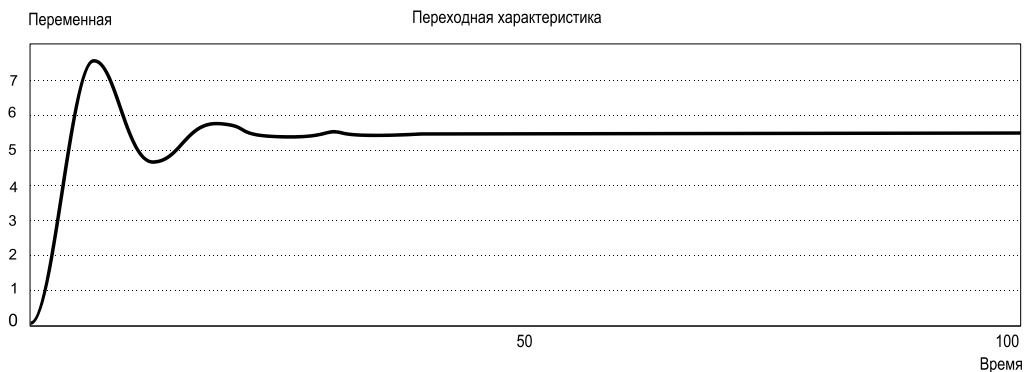


Рис. 18. Переходная характеристика предварительно скорректированной САР

Таким образом, оптимизация усиления контура не позволяет получить САР удовлетворительного качества. Поэтому следует провести более серьезную коррекцию САР на основе структурно-параметрической оптимизации. В данном случае это означает, что нужно ввести ПИ-регулятор в контур управления вместо П-регулятора и оптимизировать его настроечные параметры.

4.8. Оценка качества САР

В относительно простых системах введение ПИ-регулятора, как правило, решает все проблемы.

Структурно-параметрическая оптимизация САР

Задача оптимизации сводится к нахождению настроечных параметров ПИ-регулятора: постоянной времени и коэффициента усиления.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_p(p) = k_p \frac{pT_p + 1}{pT_p},$$

где k_p — коэффициент усиления ПИ-регулятора;

T_p — постоянная времени ПИ-регулятора.

Для определения постоянной времени регулятора следует взять нижнюю ЛАЧХ, для которой выполнены требования к запасам по

фазе и амплитуде, и провести к ней касательные с наклонами 0 дБ/дек и минус 20 дБ/дек.

Для системы на рисунке 19 выполнены требования к запасам устойчивости по фазе и амплитуде. Частота точки сопряжения касательных с наклоном 0 дБ/дек и минус 20 дБ/дек является обратной величиной к искомой постоянной времени ПИ-регулятора. $1/T = 0,13$ рад/с. $T = 77$ с.

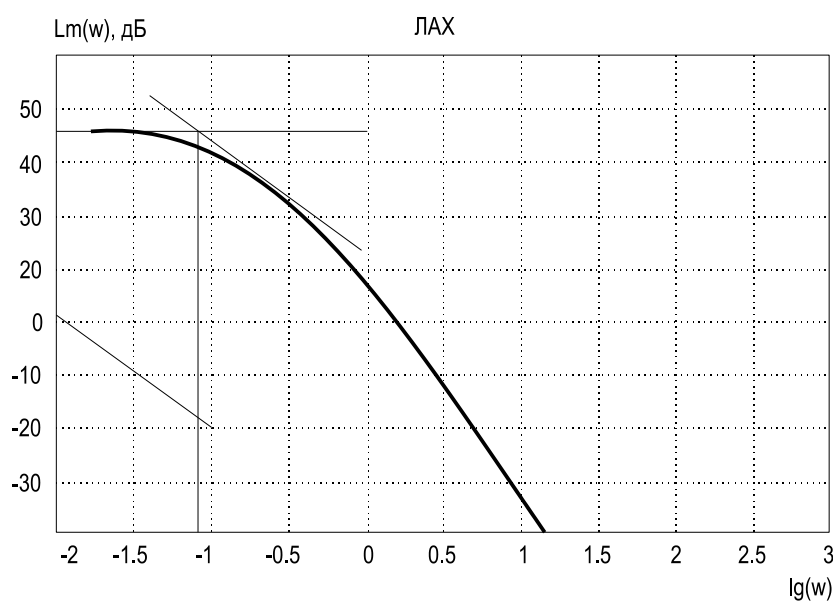


Рис. 19. Определение постоянной времени ПИ-регулятора по ЛАЧХ системы

Для повышения точности определений ЛАЧХ может быть построена в диапазоне двух декад. Значение коэффициента $k_p = 0,5$ является удовлетворительным начальным приближением в случае, если требования к запасам по фазе и амплитуде выполнены. Конечно, в коэффициенте усиления ПИ-регулятора нужно учесть и усиление П-регулятора, равное 0,38. В результате значение коэффициента k_p выбираем равным $k_p = 0,38 \cdot 0,5 = 0,19$ единиц.

Для этого заменяем П-регулятор в схеме (рис. 20) на ПИ-регулятор, используя блок общего вида.

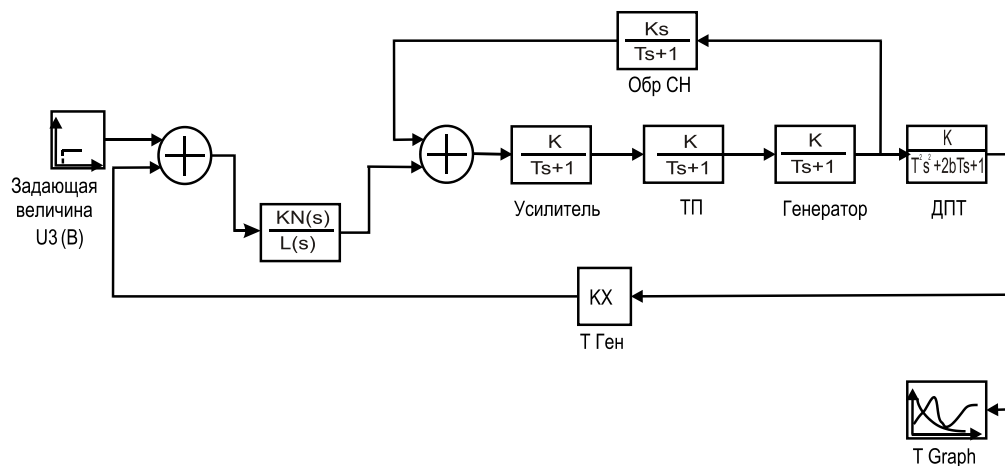


Рис. 20. САР «ДПТ» с ПИ-регулятором

Время регулирования и перерегулирования можно увидеть на укрупненном окне переходной характеристики.

Как видно из рисунка 21, перерегулирование выше 5%. Установившееся значение ошибки регулирования равно нулю. В общем, САР имеет уже неплохое качество.

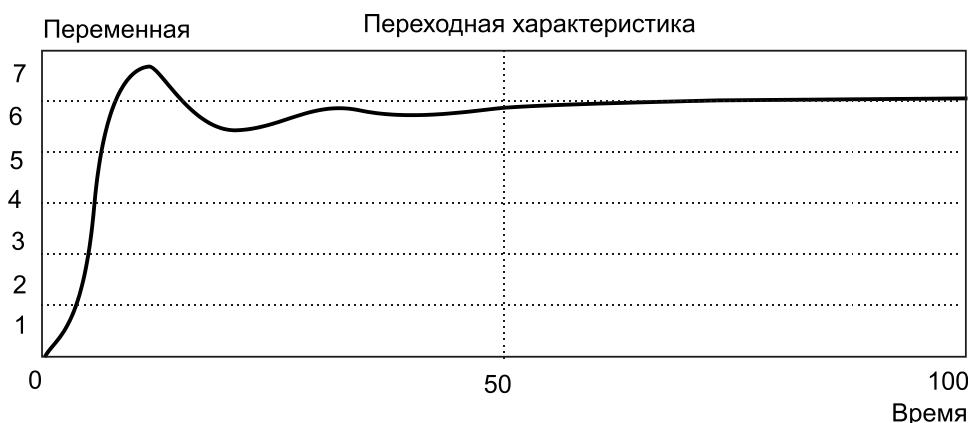


Рис. 21. Переходная характеристика САР «ДПТ» с ПИ-регулятором

Поскольку использованный для коррекции метод определения настроечных параметров ПИ-регулятора приближенный, то несколько улучшить качество САР можно уточнением значений коэффициента усиления регулятора и его постоянной времени в пределах нескольких десятков процентов. Методом проб и ошибок можно установить, что изменение постоянной времени ухудшает переходную характеристику, а уменьшение коэффициента усиления до 0,12 позволяет уменьшить перерегулирование, что положительно сказывается на времени регулирования (рис. 22).

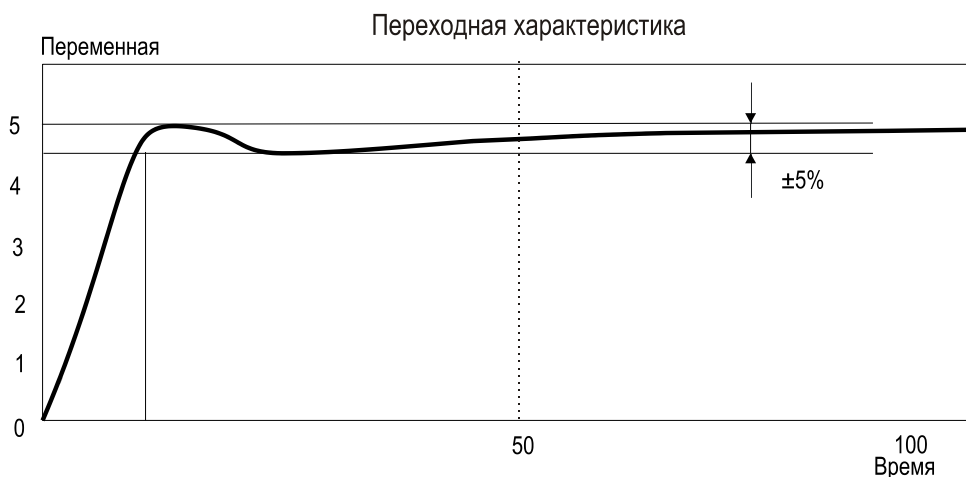
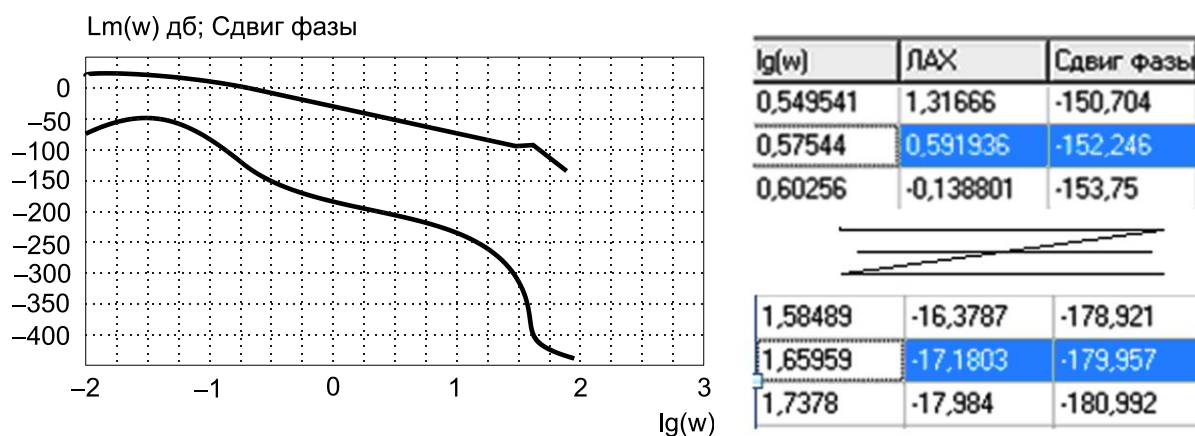


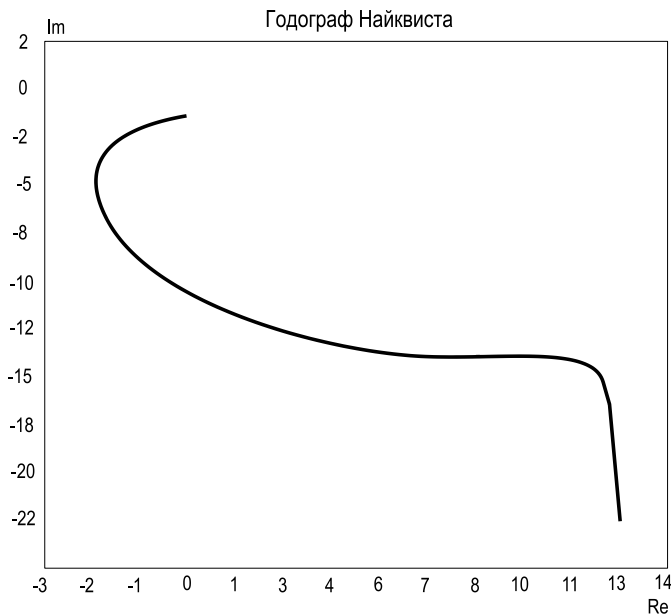
Рис. 22. Переходная функция САР «ДПТ»

Некоторое уменьшение усиления ПИ-регулятора позволило уменьшить перерегулирование, в результате чего переходная функция САР, попав в 10-процентный коридор уже из него не выходит. Формально это позволило уменьшить время регулирования с 20 до 10 с. Отметим, что двигатель под управлением САР начинает изменять частоту более плавно по сравнению с тем, когда на него непосредственно поступает ступенчатое приращение напряжения якоря, а время регулирования САР практически такое же, как и у ДПТ в автономной работе.

В завершение приведем ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура оптимизированной САР «ДПТ» (рис. 23, 24).



1) Рис. 23 Построение графиков ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура оптимизированной САР «ДПТ»



*Рис. 24. Построение годографа Найквиста
разомкнутого контура
оптимизированной САР «ДПТ»*

ЛФЧХ стремится при увеличении частоты к -450° . ЛАЧХ неограниченно линейно растет с уменьшением частоты. Запасы устойчивости и по фазе, и по амплитуде — хорошие. Переходная характеристика разомкнутого контура увеличивается со временем, что объясняется наличием интегратора в контуре, входящего составной частью в ПИ-регулятор.

Понятие *качество линейной САР* объединяет точность ее слежения за задающим сигналом и подавления возмущений, а также быстродействие.

Качество САР оценивается прямыми и (или) косвенными показателями переходного и установившегося режимов.

Косвенные показатели — это запасы устойчивости САР по фазе и амплитуде и порядок астатизма. Для статических систем следует назвать и коэффициент усиления контура. Существует и множество других косвенных показателей качества [1].

Прямые показатели качества разделяются на показатели переходного режима — это время регулирования t_p и перерегулирование $\sigma\%$, и показатели установившегося режима: коэффициенты ошибок по положению c_0 , по скорости c_1 и по ускорению c_2 .

Показатели качества переходного режима определяются по переходной характеристике САР. Для САР «ДПТ» по рисунку 20 определены $t_p = 10$ с и $\sigma = 4\%$ (это относительное превышение

первого максимума переходной функции над ее установившимся значением).

Коэффициенты ошибок характеризуют точность работы САР в установившемся режиме. Для статической САР хорошего качества величина c_0 должна находиться в пределах от 0,01 до 0,1, для астатических САР $c_0 = 0$. Коэффициенты c_1 и c_2 характеризуют скорости изменения сигнала задания, при которых ошибка слежения мала. Другими словами, эти коэффициенты характеризуют быстродействие САР в установившемся режиме работы и поэтому их величины напрямую не регламентируются.

Для определения коэффициента ошибки нужно подключить выход первого сумматора, сумматора главного контура управления, к осциллографу. При ступенчатом воздействии установившееся значение ошибки — это коэффициент c_0 , при линейно растущем воздействии (если $c_0 = 0$) — это коэффициент c_1 .

Поскольку оптимизированная САР «ДПТ» является астатической, то ее коэффициент ошибки $c_0 = 0$. Это косвенно видно по рисункам 23, 24. Для определения коэффициента ошибки по скорости c_1 к входу САР нужно подключить генератор линейно растущего сигнала. Установившееся значение сигнала ошибки равно величине c_1 (рис. 25).

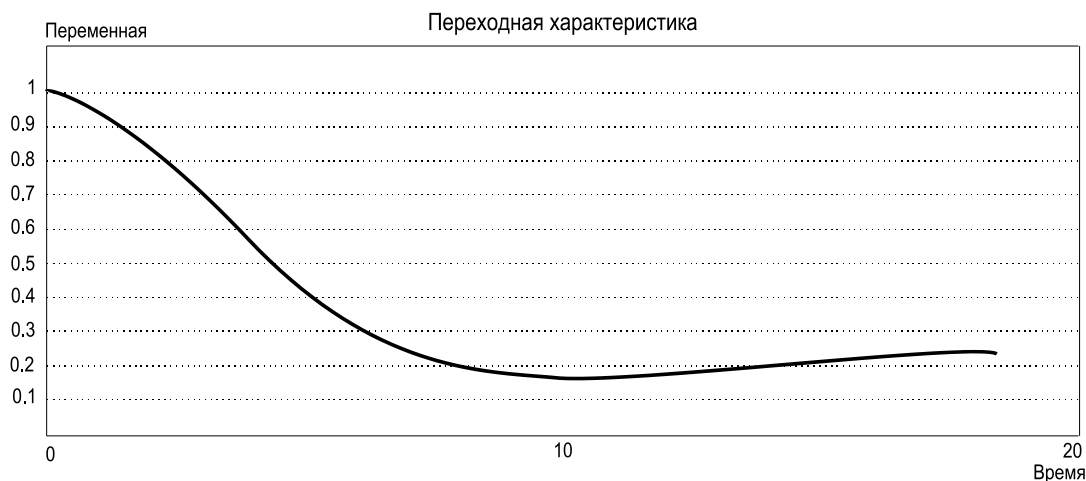


Рис. 25. Диаграмма для определения коэффициента ошибки по скорости астатической САР «ДПТ» $c_1 = 0,2$

САР «ДПТ» в режиме слежения и стабилизации

Для проверки качества САР и в режиме слежения, и в режиме стабилизации следует одновременно подать на нее и ступенчатое задание, и ступенчатое возмущение. Этим воздействиям для

наглядности переходной характеристики следует придать разные задержки (рис. 26, 27).

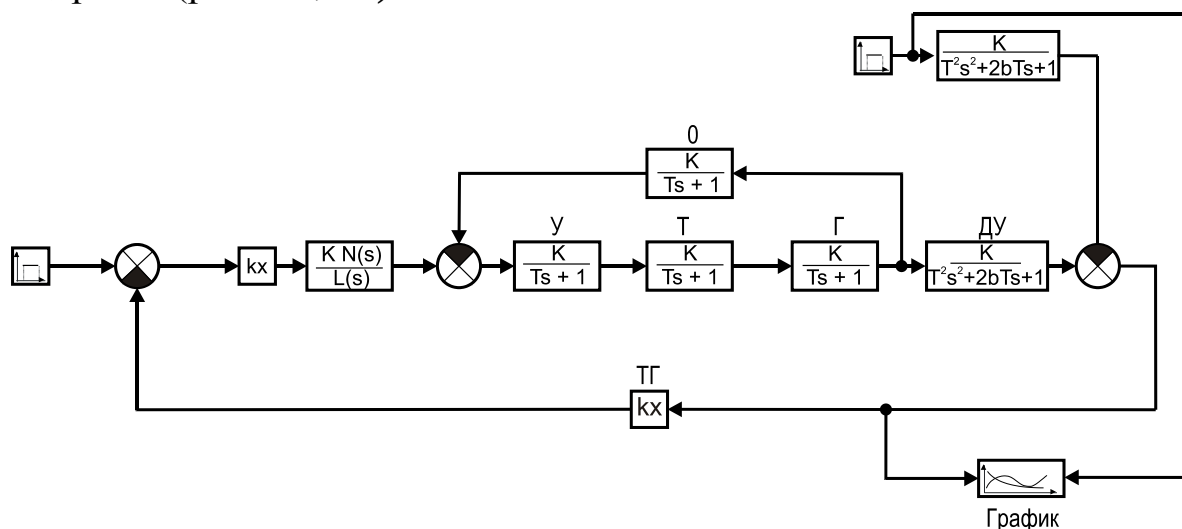


Рис. 26. Схема с совокупным воздействием на САР «ДПТ»

По переходной характеристике видно, что САР компенсирует возмущение примерно за 10 с, с максимальной ошибкой в минус 2 об/с при величине возмущения в 10 Н·м.

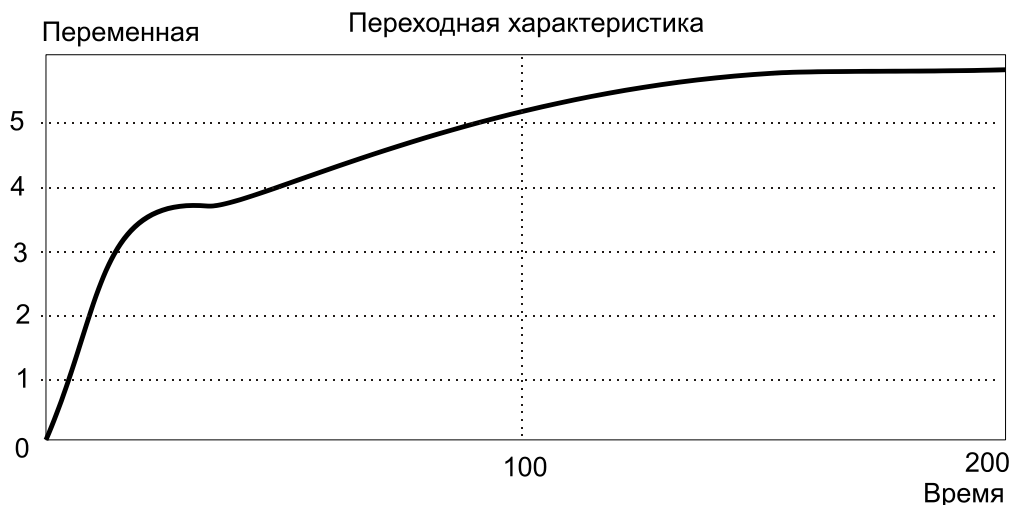


Рис. 27. Совокупное воздействие на САР «ДПТ» ступенчатых задания и возмущения

Поскольку в задании не задается требование к качеству компенсации возмущения, то будем считать полученное качество удовлетворительным. В противном случае потребуется скорректировать схему либо несколько увеличивая коэффициент усиления контура, либо повышая астатизм САР по возмущению, либо вводя компенсирующее устройство.

4.9. Заключение

В курсовой работе произведена оптимизация типичной линейной системы автоматического регулирования (САР) с использованием программного пакета моделирования систем МВТУ. Произведен анализ исходных данных, построена структурная модель САР и определены передаточные функции ее элементов, произведены коррекция замкнутой САР и оценка ее качества, которые показали, что в режиме слежения и в режиме стабилизации САР компенсирует возмущение примерно за 10 с, с максимальной ошибкой в минус 2 об/с при величине возмущения в 10 Н·м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишмарев, В.Ю. Основы автоматического управления [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.Ю. Шишмарев. — М. : Академия, 2008. — 352 с. — (Высшее профессиональное образование. Приборостроение).

2. Малафеев С.И. Основы автоматики и системы автоматического управления [Текст] : учебник для вузов / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева. — М. : Академия, 2010. — 384 с. — (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника).

3. Model.Exponenta.Ru [Электронный ресурс] : сайт о моделировании и исследовании: систем, объектов, технических процессов и физических явлений / Н.В. Клиначёв. — Режим доступа: <http://model.exponenta.ru>, свобод. — Загл. с экрана.

4. Федосов, Б.Т. Задания и методические указания к выполнению курсовой работы по курсу ТАУ. — Рудный, РИИ, 1996, — 32 с.

5. Федосов, Б.Т. Оценка качества установившегося режима САР. 2003 г. // Model.Exponenta.Ru [Электронный ресурс] : сайт о моделировании и исследовании: систем, объектов, технических процессов и физических явлений / Н.В. Клиначёв. — Режим доступа: http://model.exponenta.ru/bt/bt_0004.html, свобод. — Загл. с экрана.

6. Клиначев Н.В. Теория автоматического управления : учебно-методический комплекс // Model.Exponenta.Ru [Электронный ресурс] : сайт о моделировании и исследовании: систем, объектов, технических процессов и физических явлений / Н.В. Клиначёв. — Режим доступа: http://model.exponenta.ru/tau_lec.html, свобод. — Загл. с экрана.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КОСТРОМСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Факультет электрификации и автоматизации
сельского хозяйства

Кафедра ТОЭ и автоматики

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

по дисциплине «АВТОМАТИКА»

Студент _____ группа _____
 фамилия, инициалы

1. Тема «Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования»
2. Срок предоставления работы к защите «_____» _____ 20__ г.
3. Исходные данные для проектирования (научного исследования).
номер варианта согласно методическим указаниям, программный комплекс MBТУ.
4. Содержание пояснительной записки курсовой работы:
 - 4.1. Аннотация
 - 4.2. Календарный график
 - 4.3. Содержание
 - 4.4. Введение
 - 4.5. Анализ исходных данных
 - 4.6. Построение структурной и аналитической моделей САР
 - 4.7. Оценка устойчивости разомкнутого контура
 - 4.8. Стабилизация устойчивости разомкнутого контура
 - 4.9. Коррекция замкнутой САР
 - 4.10. Оценка качества САР
 - 4.11. Заключение
 - 4.12. Список литературы
 - 4.13. Приложения

Руководитель работы _____

подпись, дата инициалы, фамилия

Задание принято к исполнению _____

подпись, дата инициалы, фамилия

Приложение Б

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КОСТРОМСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Факультет электрификации и автоматизации сельского хозяйства

Кафедра ТОЭ и автоматики

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе по дисциплине «Автоматика»

на тему:

«Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования»

Автор работы _____
подпись, дата, инициалы, фамилия

Направление 35.03.06 «Агроинженерия»

Группа _____

Руководитель работы _____
подпись, дата инициалы, фамилия

Работа защищена _____
дата оценка прописью

Караваево 201__

Календарный график выполнения курсовой работы

Неделя	Раздел
1 неделя	
2 неделя	
3 неделя	
4 неделя	
5 неделя	
6 неделя	
7 неделя	
8 неделя	
9 неделя	Анализ исходных данных. Описание принципа действия САР
10 неделя	Построение структурной схемы САР. Определение передаточных функций элементов САР. Оценка устойчивости разомкнутого контура
11 неделя	Построение структурной и аналитической моделей САР
12 неделя	Стабилизация разомкнутого контура. Оценка устойчивости замкнутой САР
13 неделя	Коррекция замкнутой САР
14 неделя	Оценка качества САР
15 неделя	Оформление и защита КР