

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ”

Факультет _____ компьютерных технологий и управления

Направление(специальность) _____ управление в технических системах

Квалификация(степень) _____ бакалавр

Специализация _____ 27.03.04 Управление в технических системах

Кафедра _____ систем управления и информатики _____ Группа _____ Р3340

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА к курсовому проекту

Синтез регулятора методом построения желаемой ЛАЧХ

Автор курсового проекта _____ Овчаров А.О. _____ (подпись)
(фамилия, и.о.)

Руководитель _____ Григорьев В.В. _____ (подпись)
(фамилия, и.о.)

"__" _____ 20__17 г.

Санкт-Петербург,

20__17 г.

Курсовой проект выполнен с оценкой _____

Дата защиты "__" _____ 20__17 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ”

КАФЕДРА Систем Управления и Информатики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Бобцов А.А.

З А Д А Н И Е № 67 на курсовую работу по дисциплине «Теория автоматического управления»

Студенту Овчарову Алексею

РУКОВОДИТЕЛЬ Григорьев Валерий Владимирович

1 Тема проекта **Синтез регулятора методом построения
желаемой ЛАЧХ**

2 Техническое задание: спроектировать регулятор, включённый последовательно с неизменяемой частью системы. Исходные данные для проектирования:

| | |
|---|---|
| Вид неизменяемой части системы | $W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$ |
| Коэффициент передачи неизменяемой части | 210 |
| Постоянная времени T_1 | 0.04 с |
| Постоянная времени T_2 | 0.2 с |
| Перерегулирование σ | 27% |
| Время переходного процесса t_n | 0.1с |
| Максимально-допустимое значение скорости \dot{g}_{max} | 5 1/с |
| Максимально-допустимое значение скорости \dot{g}_{0max} | 0.8 1/с |
| Максимально-допустимое значение установившейся ошибки e_{max} | 0.015 |

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| 1 Постановка задачи | 5 |
| 2 Анализ устойчивости неизменяемой части | 6 |
| 3 Синтез регулятора | 8 |
| 3.1 Низкочастотный участок ЛАЧХ | 8 |
| 3.2 Среднечастотный участок ЛАЧХ | 8 |
| 3.3 Высокочастотный участок | 9 |
| 4 Проверочный расчет | 11 |
| 5 Реализация регулятора | 12 |
| 6 Математическое моделирование | 16 |
| Вывод | 18 |
| Список использованных источников | 19 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|-------------------|--------------|--|----------|-------|------|--|------|------|--------|--|--|----|--|--|--|
| Подп. и дата | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Список использованных источников | | | | | | | | | | 19 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Подп. и дата | Подп. и дата | Инв. № подл. | Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | Разраб. | Овчаров А.О. | | | | | | Синтез последовательного регулятора для замкнутой следящей системы методом желаемых ЛАЧХ | Лит. | Лист | Листов | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | Пров. | Григорьев В.В. | | | | | | | | 3 | 19 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | Н. контр. | Петраневский И.В. | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | Утв. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Введение

В данной работе мы синтезируем регулятор методом коррекции ЛАЧХ. Выполняется построение желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы на основе ЛАЧХ неизменяемой части и заданных показателей качества.

Построение желаемой характеристики разбивается на три части: низкочастотную, среднечастотную и высокочастотную. Высокочастотная часть не оказывает никакого влияния на систему. Среднечастотная и низкочастотная части влияют на время пререхоного процесса, запас устойчивости по фазе и амплитуде и соответственно на перерегулирование.

После построения желаемой ЛАЧХ системы, мы можем найти передаточную функцию регулятора, выполняющего "коррекцию" неизменяемой части системы в соответствии с заданными показателями качества.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 4 |
| | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | | | | | |

Копировал

Формат А4

1 Постановка задачи

Задан объект управления, описание которого определяется $W_{нч}(s)$ – передаточной функцией неизменяемой части системы. Структурная схема следящей системы представлена на рисунке 1.

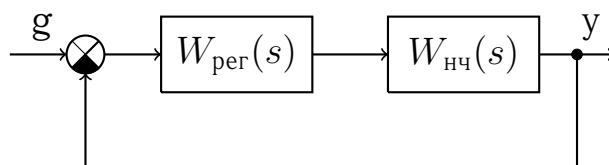


Рисунок 1 – Структурная схема проектируемой следящей системы

Требуется спроектировать регулятор, включенный последовательно с неизменяемой частью (нч) системы в контуре ошибки, с передаточной функцией $W_{рег}(s)$, который обеспечивает в замкнутой следящей системе с единичной обратной связью заданный набор показателей качества. Показатели качества указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Данные

| $W_{нч}(s)$ | K | T_1 | T_2 | $t_{п}$ | σ | \dot{g}_{max} | \dot{g}_{0max} | e_{max} |
|-----------------------------------|-----|-------|-------|---------|----------|-----------------|------------------|-----------|
| $\frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)s}$ | 210 | 0.04 | 0.2 | 0.1 | 27 | 5 | 0.8 | 0.015 |

Здесь K - коэффициент передачи неизменяемой части системы; T_1, T_2 - постоянные времени (с); $t_{п}$ - время переходного процесса (с); σ - перерегулирование (%); \dot{g}_{max} - максимально-допустимое значение скорости (м/с); \dot{g}_{0max} - максимально-допустимое значение амплитуды гармонического сигнала; e_{max} - максимально-допустимое значение установившейся ошибки,

| | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 5 |

2 Анализ устойчивости неизменяемой части

Неизменяемая часть НЧ представлена передаточной функцией:

$$W_{\text{нч}} = \frac{210}{(0.04s + 1)(0.2s + 1)s} = \frac{210}{0.008s^3 + 0.24s^2 + s} \quad (1)$$

Также найдем полюса передаточной функции (1) для оценки устойчивости системы, они представлены ниже:

$$p_1 = 0$$

$$p_2 = -25$$

$$p_3 = -5$$

Соответственно по корневому критерию устойчивости система находится на границе устойчивости. Переходной процесс при нулевом входном воздействии и ненулевых начальных условиях ($y(0) = 1$) представлен на рисунке 2.

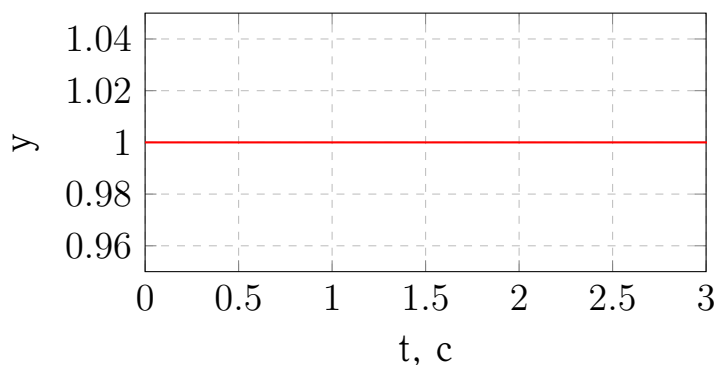


Рисунок 2 – Переходная функция

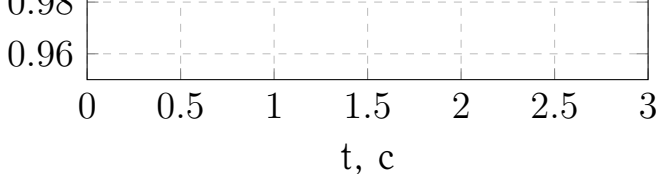
Как видно из рисунка 2 и полюсов системы (1) системы находится на границе устойчивости нейтрального типа. Давайте замкнем единичной отрицательной обратной связью систему и проведен ее анализ.

Передаточная функция замкнутой системы выглядит следующим образом:

$$W(s) = \frac{W_{\text{нч}}}{W_{\text{нч}} + 1} = \frac{210}{(0.04s + 1)(0.2s + 1)s + 210}$$

Раскрыв скобки получим:

$$W(s) = \frac{210}{0.008s^3 + 0.24s^2 + s + 210} \quad (2)$$

| | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|---|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата |  | |
| | | | | | Рисунок 2 – Переходная функция | |
| | | | | | Как видно из рисунка 2 и полюсов системы (1) системы находится на границе устойчивости нейтрального типа. Давайте замкнем единичной отрицательной обратной связью систему и проведен ее анализ. | |
| | | | | | Передаточная функция замкнутой системы выглядит следующим образом: | |
| $W(s) = \frac{W_{нч}}{W_{нч} + 1} = \frac{210}{(0.04s + 1)(0.2s + 1)s + 210}$ | | | | | | |
| Раскрыв скобки получм: | | | | | | |
| $W(s) = \frac{210}{0.008s^3 + 0.24s^2 + s + 210} \tag{2}$ | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | Лист |
| | | | | | | 6 |

Для анализа устойчивости замкнутой системы построим матрицу гурвица на основании характеристического уравнения.

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0.24 & 210 & 0 \\ 0.008 & 1 & 0 \\ 0 & 0.24 & 210 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Найдем главные миноры данной матрицы и воспользуемся критерием Гурвица.

$$\Delta_1 = 0.24 > 0$$

$$\Delta_2 = -1.44 < 0$$

$$\Delta_3 = -302.4 < 0$$

В соответствии с критерием гурвица, поскольку система имеет отрицательные миноры, она не устойчива. Это также можно увидеть, получив переходную характеристику замкнутой системы, которая изображена ниже.

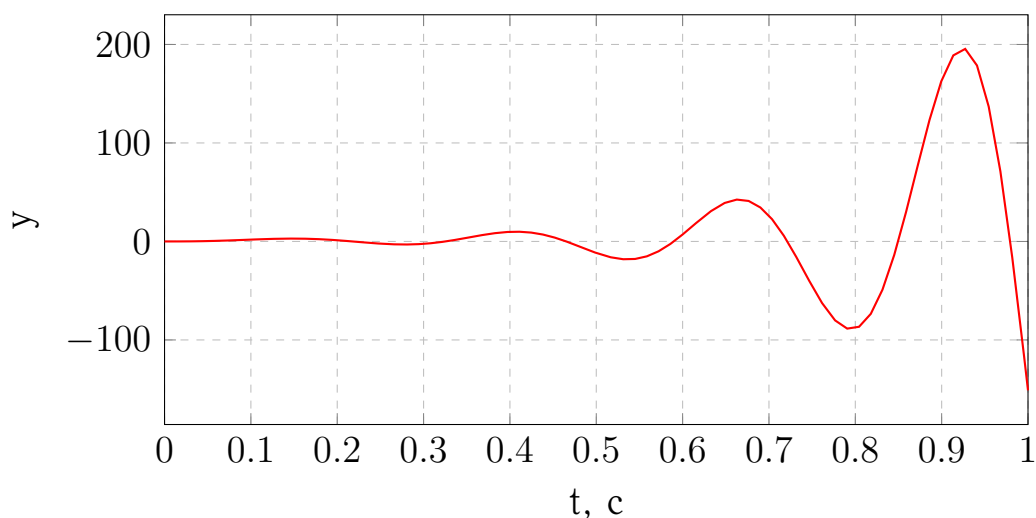


Рисунок 3 – Переходной процесс замкнутой системы

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 7 |

3 Синтез регулятора

Регулятор синтезируется методом коррекции ЛАЧХ, для чего нужно построить желаемую ЛАЧХ $L_{\text{ж}}$ и по ней найти желаемую передаточную функцию $W_{\text{ж}}$. Данная функция ПФ является произведением ПФ регулятора и незименяемой части (выражение (2)). Из него можем выразить выражение для ПФ регулятора (выражение (3)).

$$W_{\text{ж}} = W_{\text{рег}} W_{\text{нч}}$$

$$W_{\text{рег}} = \frac{W_{\text{ж}}}{W_{\text{нч}}}$$

3.1 Низкочастотный участок ЛАЧХ

Для системы с астатизмом первого порядка первая низкочастотная асимптота проводится так, чтобы она имела наклон -20 дБ/дек и пересекала желаемую добротность по скорости K_d . При этом вся низкочастотная часть не должна пересекать запрещенную зону, которая формируется из желаемой добротности по скорости K_v и критической частоты гармонического сигнала ω_k .

Давайте найдем все необходимые параметры запретной зоны:

$$K_v = \frac{\dot{g}_{\text{max}}}{e_{\text{max}}} \approx 333.33$$

$$\omega_k = \frac{\dot{g}_{\text{max}}}{\dot{g}_{0\text{max}}} = 6.25$$

Для упрощения регулятора можно выбрать сопрягающую частоту $\omega_1 = 1/T_2 = 5$, тогда необходимо увеличить желаемую добротность по скорости. Давайте найдем K_d , учитывая ω_1 .

$$K_d = K_v \omega_k T_2 \approx 416.67$$

3.2 Среднечастотный участок ЛАЧХ

Среднечастотный участок желаемой ЛАЧХ образуется асимптотой с наклоном -20 дБ/дек, проводимой так, чтобы она пересекала ось частот при ω_c .

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|---|------|----------|-------|------|--|------|------|----------|-------|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | должна пересекать запрещенную зону, которая формируется из желаемой добротности по скорости K_v и критичксокий частоты гармонического сигнала ω_k . | | | | | | | | | | |
| | | | | | Давайте найдем все необходимые параметры запретной зоны: | | | | | | | | | | |
| | | | | | $K_v = \frac{\dot{g}_{max}}{e_{max}} \approx 333.33$ | | | | | | | | | | |
| | | | | | $\omega_k = \frac{\dot{g}_{max}}{\dot{g}_{0max}} = 6.25$ | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | Для упрощения регулятора можно выбрать сопрягающую частоту $\omega_1 = 1/T_2 = 5$, тогда необходимо увеличить желаемую добротность по скорости. Давайте найдем K_d , учитывая ω_1 . | | | | | | | | | | |
| | | | | | $K_d = K_v \omega_k T_2 \approx 416.67$ | | | | | | | | | | |
| | | | | | 3.2 Среднечастотный участок ЛАЧХ | | | | | | | | | | |
| | | | | | Среднечастотный участок желаемой ЛАЧХ образуется асимптотой с наклоном -20 дБ/дек, проводимой так, чтобы она пересекала ось частот при ω_c . | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Изм.</td><td>Лист</td><td>№ докум.</td><td>Подп.</td><td>Дата</td></tr></table> | | | | | | Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | | | | | |
| <div>КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ</div> <div>Лист 8</div> | | | | | | | | | | | | | | | |

Этот участок проводится влево и вправо до достижения модулей, равных L_1 и L_2 . Затем производится сопряжение среднечастотного участка с низкочастотными асимптотами и высокочастотной частью. Для нахождения частоты среза ω_c необходимо найти частоту положительности $\omega_{\text{п}}$, которую можно найти соответственно из диаграмм в учебнике Бесекерского.

$$\omega_{\text{п}}|_{\sigma=27\%} = \frac{4\pi}{t_{\text{п}}} \approx 125.66 \frac{1}{\text{с}}$$

$$\omega_c = 0.9\omega_{\text{п}} \approx 113.1 \frac{1}{\text{с}}$$

Амплитуды L_1 и L_2 также находятся по диаграммам в учебнике Бесекерского исходя из заданных показателей качества. В нашем случае они имеют следующие значения:

$$L_1 = 18 \text{ дБ} \qquad L_2 = -18 \text{ дБ}$$

Для качественного выполнения заданных показателей качества среднечастотаня асимптота может превышать данные значения по модулю, но не наоборот.

Для сопряжения среднечастотного участка и низкочастотного строится прямая, имеющая наклон 40 - 60 дБ/дек. Эта прямая определяется сопрягающими частотами ω_1, ω_2 . Из пересечения среднечастотной асимптоты и сопрягающей можем найти ω_2 .

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{K_d w_1^2}{w_c}} \approx 9.6$$

3.3 Высокочастотный участок

Данный участок не вносит большого вклада в показатели качества, поэтому его выбирают максимально удобным для составления регулятора. Теперь только осталось найти сопрягающую частоту ω_3 :

$$\omega_3 = \frac{\omega_c}{10^{L_2/20}} \approx 898.36 \frac{1}{\text{с}}$$

| | | | | | | |
|---|--------------|----------|-------|------|-----------------------|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | | |
| | Инв. № дубл. | | | | | |
| | Взам. инв. № | | | | | |
| | Подп. и дата | | | | | |
| Инв. № подл. | Инв. № дубл. | | | | | |
| | Взам. инв. № | | | | | |
| | Подп. и дата | | | | | |
| | Инв. № дубл. | | | | | |
| <p>прямая, имеющая наклон 40 - 60 дБ/дек. Эта прямая определяется сопрягающими частотами ω_1, ω_2. Из пересечения среднечастотной асимптоты и сопрягающей можем найти ω_2.</p> $\omega_2 = \sqrt{\frac{K_d w_1^2}{w_c}} \approx 9.6$ <h3>3.3 Высокочастотный участок</h3> <p>Данный участок не вносит большого вклада в показатели качества, поэтому его выбирают максимально удобным для составления регулятора. Теперь только осталось найти сопрягающую частоту ω_3:</p> $\omega_3 = \frac{\omega_c}{10^{L_2/20}} \approx 898.36 \frac{1}{c}$ | | | | | | |
| | | | | | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | Лист |
| | | | | | | 9 |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | |

По найденным ниже параметрам можем построить желаемую ЛАЧХ, изображенную на рисунке ниже.

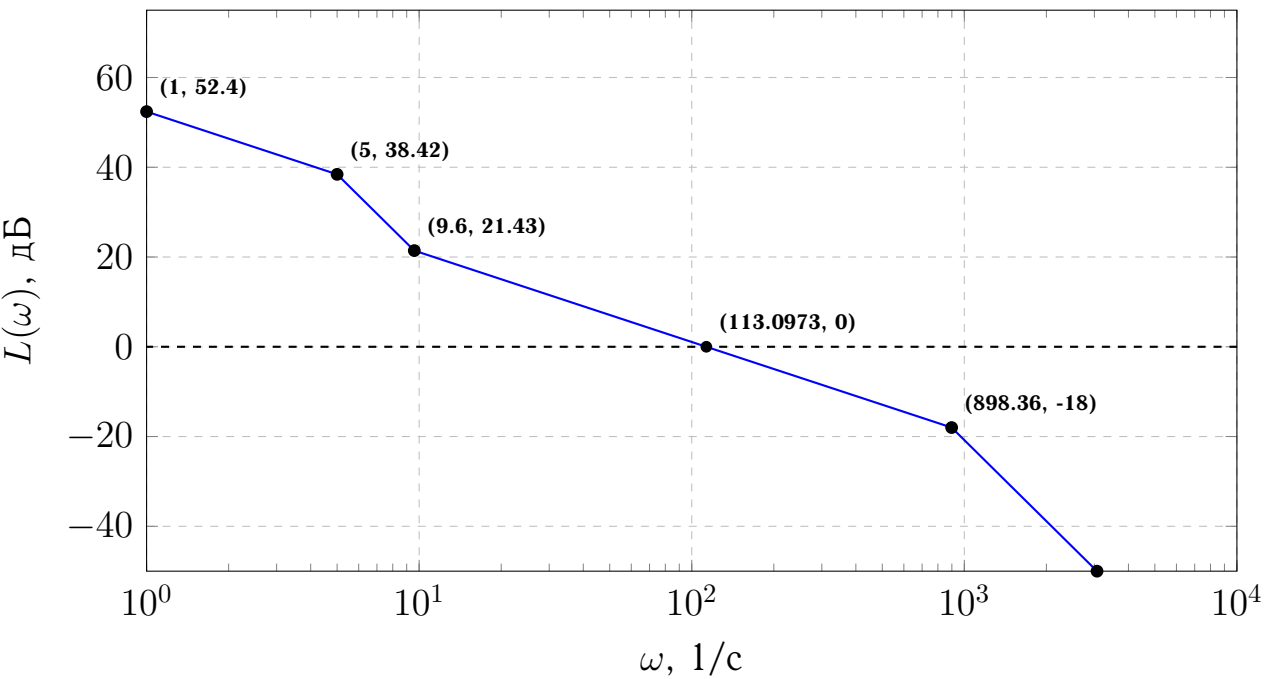


Рисунок 4 – ЛАЧХ

Теперь можем построить передаточную функцию желаемой системы:

$$W_{\text{ж}} = \frac{K_d \left(\frac{1}{\omega_2} s + 1\right)^2}{s(T_2 s + 1)^2 \left(\frac{1}{\omega_3} s + 1\right)^2}$$

И соответственно передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{рег}} = \frac{K_d/K \left(\frac{1}{\omega_2} s + 1\right)^2 (T_1 s + 1)}{\left(\frac{1}{\omega_3} s + 1\right)^2 (T_2 s + 1)}$$

| | | | | | | |
|--------------|--------------|----------|-------|------|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | $W_{\text{ж}} = \frac{K_d \left(\frac{1}{\omega_2} s + 1 \right)^2}{s(T_2 s + 1)^2 \left(\frac{1}{\omega_3} s + 1 \right)^2}$ | |
| | Инв. № дубл. | | | | | |
| | Взам. инв. № | | | | | |
| | Подп. и дата | | | | | |
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | $W_{\text{пер}} = \frac{K_d / K \left(\frac{1}{\omega_2} s + 1 \right)^2 (T_1 s + 1)}{\left(\frac{1}{\omega_3} s + 1 \right)^2 (T_2 s + 1)}$ | |
| | Инв. № дубл. | | | | | |
| | Взам. инв. № | | | | | |
| | Подп. и дата | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | Лист |
| | | | | | | 10 |

4 Проверочный расчет

Выполним проверочный расчет на заданные показатели качества. А именно посчитаем предельное значение ошибки при линейно возрастающем воздействии со скоростью g_{max} .

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{1 + W_{ж}(s)} G(s) \Big|_{s \rightarrow 0} = \\ &= \frac{s(T_2 s + 1)^2 \left(\frac{1}{\omega_3} s + 1\right)^2}{s(T_2 s + 1)^2 \left(\frac{1}{\omega_3} s + 1\right)^2 + K_d \left(\frac{1}{\omega_2} s + 1\right)^2} \frac{g_{max}}{s} \Big|_{s \rightarrow 0} = \frac{g_{max}}{K_d} = 0.012 < e_{max}\end{aligned}$$

Теперь нужно убедиться, что разомкнутая система обладает достаточным запасом устойчивости по фазе и амплитуде.

$$\mu = 180 - 90 - 2 \arctg \frac{\omega_c}{\omega_3} - 2 \arctg \omega_c T_2 + 2 \arctg \frac{\omega_c}{\omega_2} \approx 90^\circ$$

$$L = 23.8 \text{ дБ}$$

где μ - запас по фазе, L - запас по амплитуде при частоте $\omega = 889 \text{ 1/с}$.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 11 |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | | | | | |

5 Реализация регулятора

На рисунке ниже представлена электрическая схема передаточной функции регулятора.

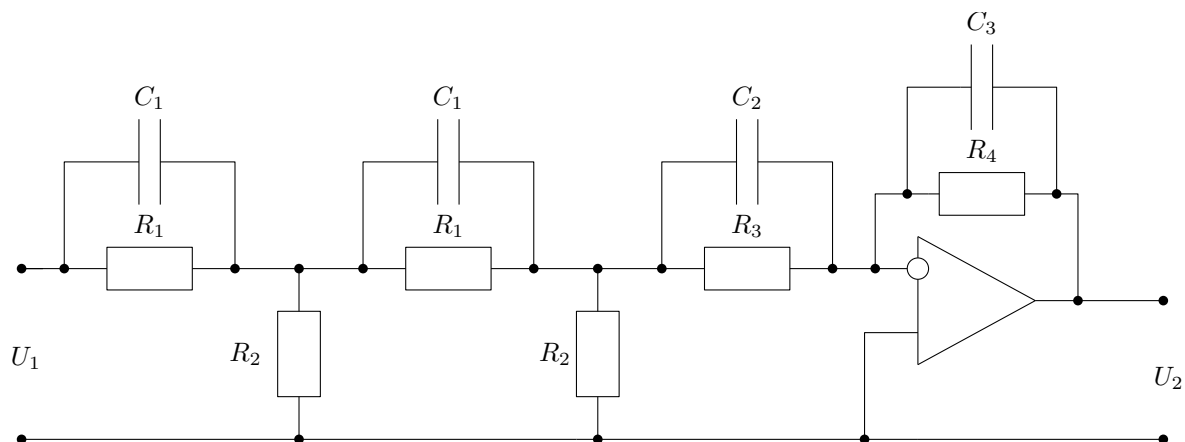


Рисунок 5 – Принципиальная схема регулятора

Давайте покажем, что указанная схема действительно представляет регулятор. Условно схему можно разделить на 3 части. Первые две идентичны. Давайте составим передаточную функцию первой части ($U_1 - R_1 || C_1 - R_2 - U_1$), тогда не сложно будет представить и функцию всей системы. Выпишем первое и второе правила Кирхгофа:

$$\begin{cases} I_{R_2} = I_{R_1} + C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} \\ I_{R_1} R_1 = U_{C_1} \\ U_1 = U_{C_1} + U_{R_2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} I_{R_2} = \frac{U_{C_1}}{R_1} + C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} \\ I_{R_1} = \frac{U_{C_1}}{R_1} \\ U_1 = U_{C_1} + I_{R_2} R_2 \\ U_{R_2} = I_{R_2} R_2 \end{cases}$$

из полученной системы можем выразить отдельно U_1 и U_{R_2} :

$$\begin{cases} U_1 = U_{C_1} + \frac{R_2}{R_1} U_{C_1} + R_2 C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} \\ U_{R_2} = \frac{R_2}{R_1} U_{C_1} + R_2 C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} \end{cases}$$

Полученное выражение теперь представим в операторном виде:

$$\begin{cases} U_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + R_2 C_1 p\right) U_{C_1} \\ U_{R_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} + R_2 C_1 p\right) U_{C_1} \end{cases}$$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------|-----|------|----------|-------|------|-----------------------|--|------|
| Инов. № подл. | Подп. и дата | Инов. № дубл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инов. № | Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | Лист |
| | | | | | | | | | | | | | 12 |
| Копировал | | | | | | | | | | | Формат А4 | | |

Остается только найти саму передаточную функцию:

$$W_1(p) = \frac{U_{R_2}}{U_1} = \frac{\frac{R_2}{R_1} + R_2 C_1 p}{1 + \frac{R_2}{R_1} + R_2 C_1 p} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (R_1 C_1 p + 1)}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1 p + 1 \right)}$$

Передаточная функция $W_2(p)$ аналогична первой. Теперь рассмотрим часть, содержащую операционный усилитель. Запишем выражения для входного U_{R_2} и выходного U_2 напряжения.

$$U_{R_2} = \frac{R_3}{R_3 C_2 p + 1}$$

$$U_2 = -\frac{R_4}{R_4 C_3 p + 1}$$

В итоге получи передаточную функцию:

$$W_3(p) = -\frac{R_4 / R_3 (R_3 C_2 p + 1)}{R_4 C_3 p + 1} \quad (4)$$

Как видно, из выражения (4), последняя часть регулятора инвертирует входной сигнал. Далее вход объекта управления будет подключаться инверсно к выходу регулятора.

Теперь можем записать итоговое выражения для передаточной функции регулятора:

$$W(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K (T_1 p + 1)^2 (T_3 p + 1)}{(T_2 p + 1)^2 (T_4 p + 1)}$$

$$\begin{cases} K = \frac{R_2^2 R_4}{(R_1 + R_2)^2 R_3} \\ T_1 = R_1 C_1 \\ T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1 \\ T_3 = R_3 C_2 \\ T_4 = R_4 C_3 \end{cases} \quad (5)$$

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 13 |

Поскольку в системе (5) 7 неизвестных и 5 уравнений, зададим $C_1 = 10^{-6}$ Ф. Тогда можем найти R_1 и R_2 .

$$R_1 = \frac{T_1}{C_1} \approx 104166 \text{ Ом}$$

$$R_2 = \frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2) C_1} = 1125 \text{ Ом}$$

Теперь выразим R_3 и R_4 , подставив $C_3 = 10^{-9}$ Ф.

$$R_3 = \frac{T_3}{C_2}$$

$$R_4 = \frac{T_4}{C_3} = 2 \cdot 10^8 \text{ Ом}$$

Подставим все в выражение для K системы (5), получим:

$$K = 570967.85 C_2 \Rightarrow C_2 = 3.48 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$R_3 \approx 11510 \text{ Ом}$$

В итоге получим схему в Multisim, представленную ниже на рисунке.

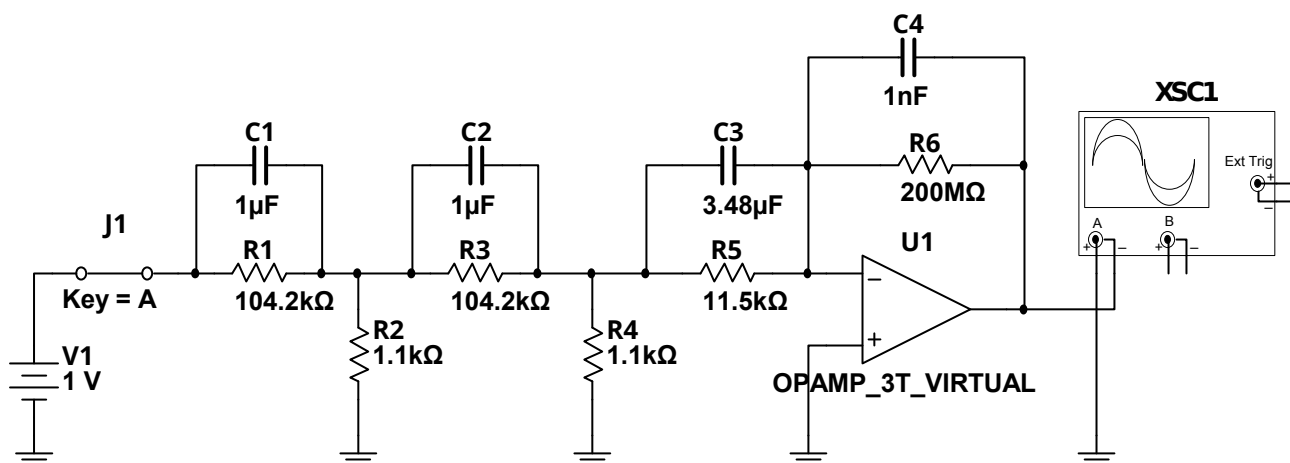


Рисунок 6 – Принципиальная хема регулятора

| | | | | | |
|--------------|--------------|----------|-------|------|-----------------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | Лист 14 |
| | Инв. № дубл. | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ |
| | | | | | |

| | | | | | |
|--------------|--------------|----------|-------|------|-----------------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | Лист 14 |
| | Инв. № дубл. | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ |
| | | | | | |

В итоге получим схему в Multisim, представленную ниже на рисунке.

Рисунок 6 – Принципиальная хема регулятора

Тажке построим передаточную функцию данного регулятора в Matlab.

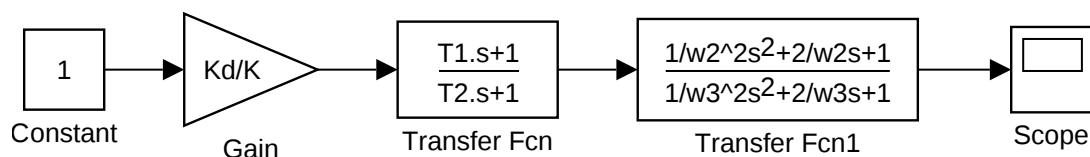
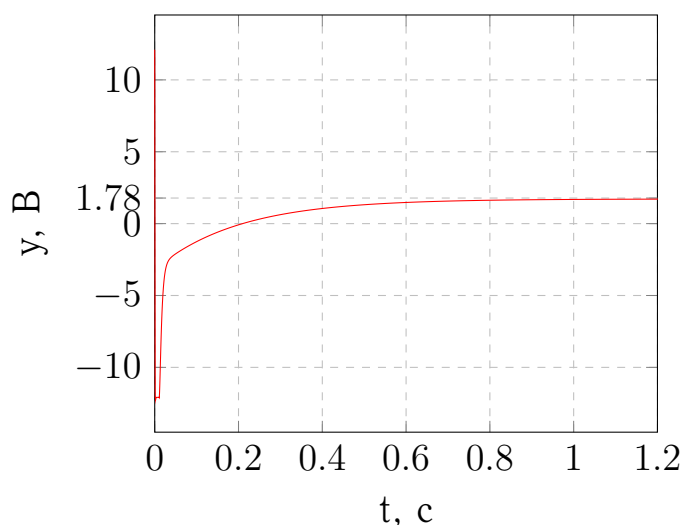
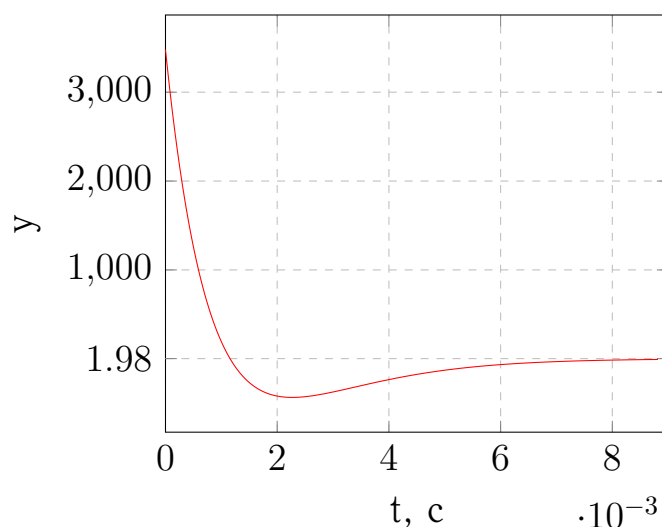


Рисунок 7 – Схема регулятора в Matlab

Теперь для выполнения качественного сравнения представим переходные характеристики системы, построенной в Matlab и системы в Multisim.



(a) Multisim



(b) Matlab

Рисунок 8 – Переходная функция регулятора

Как видно из рисунка 8, переходной процесс в Matlab проходит много быстрее, чем при симуляции электрической схемы. Также сигнал на рисунке 8 (a) ограничен в пределах ± 12 вольт из-за операционного усилителя (ОУ).

Неидеальность элементов в системе Multisim также сыграло роль в расхождении переходных процессов. Не были учтены такие явления как обратные токи ОУ, которые могут оказывать существенное влияния.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | <div><div><div><div><div><div>0</div><div>0.2</div><div>0.4</div><div>0.6</div><div>0.8</div><div>1</div><div>1.2</div></div><div><div><div>t, c</div><div>(a) Multisim</div></div></div></div><div><div><div>0</div><div>2</div><div>4</div><div>6</div><div>8</div></div><div><div><div>t, c</div><div>(b) Matlab</div></div></div></div><div><div><div><div><div><div>0</div><div>0.2</div><div>0.4</div><div>0.6</div><div>0.8</div><div>1</div><div>1.2</div></div><div><div><div>t, c</div><div>(a) Multisim</div></div></div></div><div><div><div>0</div><div>2</div><div>4</div><div>6</div><div>8</div></div><div><div><div>t, c</div><div>(b) Matlab</div></div></div></div></div></div><div>Рисунок 8 – Переходная функция регулятора</div></div></div></div></div> | | | | | | | | | | | |
| | | | | | <p>Как видно из рисунка 8, переходной процесс в Matlab проходит много быстрее, чем при симуляции электрической схемы. Также сигнал на рисунке 8 (a) ограничен в пределах ± 12 вольт из-за операционного усилителя (ОУ).</p> | | | | | | | | | | | |
| | | | | | <p>Неидеальность элементов в системе Multisim также сыграло роль в расхождении переходных процессов. Не были учтены такие явления как обратные токи ОУ, которые могут оказывать существенное влияния.</p> | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | |
|------|------|----------|-------|------|-----------------------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | Лист |
| | | | | | | 15 |
| | | | | | | |

| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | |

Block diagram of a control system:

- Constant** block (value 1) is summed with the feedback signal at the summing junction.
- The output of the summing junction is the input to the **Transfer Fcn** block.
- The **Transfer Fcn** block has the transfer function: $\frac{Kd}{T2 \cdot s^3 + 2 \cdot T2 \cdot s^2 + s}$.
- The output of the **Transfer Fcn** block is the input to the **Transfer Fcn1** block.
- The **Transfer Fcn1** block has the transfer function: $\frac{1/w2^2 \cdot s^2 + 2/w2 \cdot s + 1}{1/w3^2 \cdot s^2 + 2/w3 \cdot s + 1}$.
- The output of the **Transfer Fcn1** block is the system output and is also fed back to the summing junction.

В результате мы получили различные графики при линейно нарастающем входном воздействии и синусоидальном а также переходная функция.


$$t_{\Pi} = 0.06 \text{ c}$$

$$\sigma = 6 \%$$

Далее на рисунке 11 представлен график при линейно нарастающем входном воздействии, здесь $\epsilon = 0.012$, как и получилось при проверочном расчете.

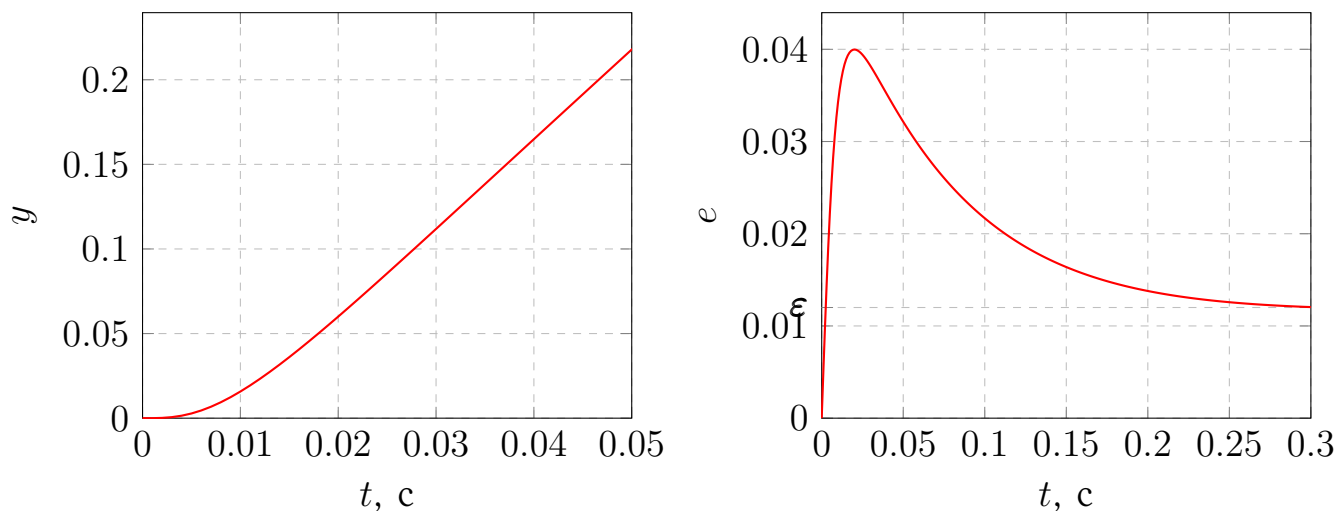


Рисунок 11 – Графики переходных процессов при $g = 5t$

Осталось рассмотреть реакцию системы на синусоидально воздействие $g = 0.8 \sin 3t$. Как видно из рисунка 12, при синусоидально воздействии и $\omega = 3$ ошибка e меньше 0.015.

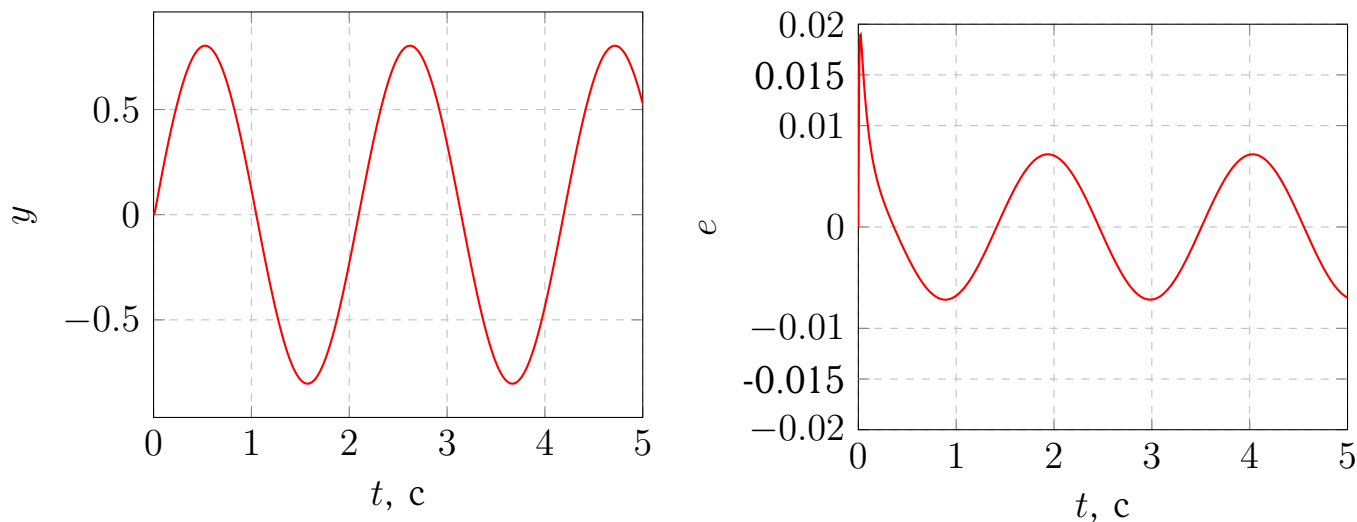


Рисунок 12 – Графики переходных процессов при $g = 0.8 \sin 3t$

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 17 |

Вывод

В данной работе мы синтезировали регулятор, корректирующий характеристики объекта управления. Для синтеза использовался метод коррекции ЛАЧХ, разработанный Солодовниковым В. В.

Удалось добиться следующих параметров переходного процесса: времени переходного процесса $t_n = 0.06$ с, перегулирования $\sigma = 6$ %, максимальной установившейся ошибки $\varepsilon = 0.012$. Эти факты подтверждают указанные выше проверочные расчеты и графики переходных процессов 10, 11 и 12.

При гармоническом входном воздействии $g = g_{0max} \sin(\omega t)$ на замкнутую систему с построкнным регулятором, параметры гармонического сигнала ограничиваются из условия \dot{g}_{0max} и выглядит следующим образом: $g_{0max}\omega < \dot{g}_{0max}$.

Была построена электрическая схема, характеризующая регулятор, выведенная на основе законов Электростатики. Сравнив полученные переходные функции регулятора в Matlab и Multisim, установили их несоответствие. Так происходит из-за неучтенных физических процессов при использовании операционного усилителя, который ограничивает выходное напряжение регулятора. Данные процессы были учтены в модели Multisim, что и создало такое большое расхождение.

| | | | | | | |
|------|------|----------|-------|------|-----------------------|------|
| Изн. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | Лист |
| | | | | | | 18 |
| | | | | | | |

Список использованных источников

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.
2. Блинников А.А, Бойков В.И., Быстров С.В., Николаев Н.А., Нуйя О. С. Правила оформления пояснительной записки и конструкторской документации.—СПб: Университет ИТМО, 2014.—55 с.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|----------|-------|------|-----------------------|--------------|--|--|--|--------------|--------------|--|--|--|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | | | | Подп. и дата |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.167.Р3340.001 ПЗ | | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | | | | | | 19 |