

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Тульский государственный университет»**

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра электротехники и электрооборудования

ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

по дисциплине

ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Направление подготовки: *13.03.02 «Электроэнергетика и
электротехника»*

Профиль подготовки: *«Электрооборудование
и электрохозяйства предприятий, организаций и учреждений»*

Квалификация выпускника: *63, академический бакалавриат*

Форма обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 130302-01-19

Тула 2020 г.

Методические указания к лабораторным работам составлены профессором Ловчаковым В.И. и обсуждены на заседании кафедры *электротехники и электрооборудования* Института высокоточных систем им. В.П. Грязева

протокол №__1__ от « 31 » августа 2020 г.

*Зав. кафедрой*_____ *А.Э. Соловьев*

Курсовая работа по дисциплине «Основы оптимального управления электроприводами»

1. Линеаризация

- 1.1. Постройте линеаризованную модель для звена, которое описывается нелинейным дифференциальным уравнением (значения T, q_2, q_1, k определяются из [таблицы](#) по номеру варианта)

$$T \frac{dy}{dt} + q_2 y^2 + q_1 y = kx$$

В номинальном режиме установившееся значение $y = y^0 = 0,5$.

- 1.2. Определите установившееся значение $x = x^0$.
- 1.3. Постройте передаточную функцию линеаризованного звена. Как называется такое звено?
- 1.4. Найдите импульсную характеристику (весовую функцию) этого звена.
- 1.5. Решив полученное линейное дифференциальное уравнение, найдите переходный процесс на выходе линеаризованного звена при ступенчатом входном сигнале $x(t) = 1(t)$. Рекомендуется использовать блок Given и функцию odesolve пакета Mathcad.
- 1.6. Постройте и сравните переходные процессы в линейной и нелинейной системе при ступенчатом входном сигнале $x(t) = 1(t)$. Также рекомендуется использовать средства пакета Mathcad.

2. Разомкнутые системы

- 2.1. Определите, какие простейшие звенья можно выделить в составе звена с передаточной функцией (значения коэффициентов a_i и b_i определяются из [таблицы](#) по номеру варианта)

$$W(s) = \frac{a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}.$$

- 2.2. Чему равен коэффициент усиления этого звена в установившемся режиме?
- 2.3. Является ли звено устойчивым? Почему?
- 2.4. Является ли звено минимально-фазовым?
- 2.5. Постройте ЛАЧХ и ЛФЧХ этого звена с использованием средств пакета Mathcad. Постройте в той же системе координат асимптотическую ЛАЧХ данного звена.
- 2.6. Какой наклон имеет ЛАЧХ на нулевой частоте? на больших частотах?
- 2.7. Запишите модель этого звена в виде дифференциального уравнения.
- 2.8. Запишите модель этого звена в пространстве состояний. Единственно ли такое представление? Используя его и функции rkfixed, Rkadapt или bulstoer пакета Mathcad, постройте график переходного процесса на выходе звена при ступенчатом входном сигнале $x(t) = 1(t)$.
- 2.9. Сделайте обратный переход – от модели в пространстве состояний к передаточной функции.
- 2.10. Используя преобразование Лапласа (вручную или применяя Mathcad) найдите переходную функцию этого звена. Постройте ее график и сравните его с графиком п. 2.8.

3. Замкнутые системы

- 3.1. Пусть объект управления имеет передаточную функцию $W(s)$, регулятор – передаточную функцию $K(s)$, а измерительная система – передаточную функцию

$H(s)$. Нарисуйте типовую блок-схему системы автоматического регулирования, обозначив задающий сигнал $g(t)$, сигнал управления $u(t)$, регулируемый сигнал $y(t)$, внешнее возмущение $w(t)$, сигнал обратной связи $f(t)$, сигнал ошибки $e(t)$.

- 3.2. Предположив, что $K(s) = k = \text{const}$ и $H(s) = h = \text{const}$, постройте передаточные функции (ПФ):

$G(s)$ от входа $g(t)$ к выходу $y(t)$;

$G_u(s)$ от входа $g(t)$ к выходу $u(t)$;

$G_e(s)$ от входа $g(t)$ к выходу $e(t)$;

$G_{fe}(s)$ от входа $w(t)$ к выходу $e(t)$.

- 3.3. Используя критерий Гурвица, определите, при каких значениях k и h замкнутая система устойчива.
- 3.4. Приняв $h = 1$, выберите k так, чтобы запас устойчивости по амплитуде был не менее 6 дБ, а запас по фазе – не менее 30° (используйте ЛАФЧХ разомкнутой системы без регулятора).
- 3.5. Постройте переходный процесс на выходе при выбранном значении k .
- 3.6. Оцените время переходного процесса и перерегулирование, покажите их на графике.
- 3.7. Является ли замкнутая система астатической? Почему?
- 3.8. Используйте пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) с передаточной функцией

$$K(s) = \frac{k(s + \alpha)}{s} \text{ при } \alpha = 1.$$

С помощью критерия Гурвица определите, какие ограничения должны быть наложены на k , чтобы система была устойчивой. Выберите коэффициент k , обеспечивающий устойчивость замкнутой системы.

- 3.9. Постройте переходный процесс на выходе при выбранном регуляторе. Оцените время переходного процесса и перерегулирование, покажите их на графике.
- 3.10. Постройте амплитудную частотную характеристику полученной замкнутой системы и определите показатель колебательности M .
- 3.11. Является ли замкнутая система астатической по возмущению? Почему?
- 3.12. Постройте переходный процесс на выходе при $g(t) \equiv 0$ и ступенчатом возмущении $w(t) = 1(t)$.

4. Оптимальные системы (используется модель объекта управления пункта п. 2.8)

- 4.1. Сформулируйте свойство управляемости объекта и проверьте его для модели п. 2.8.

- 4.2. Сформулируйте свойство наблюдаемости объекта и проверьте его для модели п. 2.8.

4.3. Сформулируйте задачу аналитического конструирования оптимального регулятора (АКОР): для вариантов задания с неустойчивым объектом управления – в постановке Летова-Калмана с квадратичным функционалом качества

$$J = \int_0^{\infty} [x_1^2(t) + q \cdot x_2^2(t) + r \cdot u^2(t)] dt, \quad q, r > 0;$$

а для вариантов с устойчивым объектом – в постановке А.А. Красовского с ФОР на основе указанного квадратичного критерия качества управления.

- 4.4. Решить задачу АКОР известными методами [2 -4] (дать их описание):

- 1) в общем виде относительно параметров критерия q, r ;
- 2) и в частном случае при $q=r=1$.

4.5. Провести моделирование оптимальной системы управления с построением переходных процессов $x_1(t)$, $x_2(t)$, $u(t)$ при начальных условиях $x_1(0) = 2$, $x_2(0) = 0$ и таких значениях параметров критерия q , r , которые обеспечивают перерегулирование системе $\sigma=4\%$ и значения сигнала управления в некоторые моменты времени равные двум и не более 2 в последующие моменты. Определить при указанных значениях параметров критерия время переходных процессов t_{mn} оптимальной системы управления и сравнить его с временем переходных процессов систем с П и ПИ-регуляторами пункта 3.

При моделировании оценить погрешность решения задачи оптимального управления, используя величину $[S(X_0) - J(X_0)] \cdot 100\% / S(X_0)$, где $S(X_0)$ - значение найденной функции Беллмана, $J(X_0)$ - значение квадратичного функционала качества, вычисленное на траектории движения синтезированной системы из начального состояния X_0 до конечного $X = 0$ на интервале времени длительностью не менее чем t_{mn} .

Указание: при подборе в процессе моделирования в математическом пакете Mathcad значений параметров критерия качества управления учитывать, что изменение параметра q в основном влияет на величину перерегулирования системы, а изменения параметра r – на величину сигнала управления.

Вариант	T	q_2	q_1	k	a_1	a_0	b_2	b_1	b_0
1	1.0	0.1	1.0	0.5	-0.1	1.0	1.0	5.0	1.0
2	1.1	0.2	0.9	0.6	-1.1	1.3	1.1	4.5	0.9
3	1.2	0.3	0.8	0.7	-0.2	1.2	1.2	4.2	0.8
4	1.3	0.4	0.7	0.8	-1.2	1.1	1.3	4.0	0.9
5	1.4	0.5	0.6	0.7	-0.3	1.0	1.4	3.5	1.0
6	1.5	0.4	0.5	0.6	-1.3	1.1	1.5	3.0	0.9
7	1.6	0.3	0.6	0.5	-0.4	1.2	1.6	2.5	0.8
8	1.7	0.2	0.7	0.6	-1.4	1.1	1.7	2.2	0.9
9	1.8	0.1	0.8	0.7	-0.5	1.0	1.8	2.0	1.0
10	1.9	0.2	0.9	0.8	-1.5	1.1	1.9	1.8	0.9
11	2.0	0.3	1.0	0.7	-0.6	1.2	1.8	1.6	1.0
12	2.1	0.4	1.1	0.6	-1.6	1.3	1.7	1.4	0.9
13	2.1	0.5	1.2	0.5	-0.7	1.4	1.6	1.3	0.8
14	2.3	0.4	1.3	0.6	-1.7	1.3	1.5	1.1	0.9
15	2.4	0.3	1.4	0.7	-0.8	1.2	1.4	1.0	1.0
16	2.5	0.2	1.5	0.8	-1.8	1.3	1.3	0.9	0.9
17	2.6	0.1	1.4	0.7	-0.9	1.4	1.2	1.0	0.8
18	2.7	0.2	1.3	0.6	-1.9	1.3	1.1	1.1	0.9
19	2.8	0.3	1.2	0.5	-1.0	1.2	1.0	1.2	1.0
20	2.9	0.4	1.1	0.4	-2.0	1.5	1.1	1.3	0.9

Основная литература:

1. **Попов Е.П.** Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989.
2. Основы теории синтеза оптимальных систем управления электротехническими объектами. / В.И. Ловчаков [и др.]: учебное пособие – Тула: Из-во ТулГУ, 2009. – 160с.

3. Александров А.Г. “Оптимальные и адаптивные системы”. - М.: Высшая школа, 1989. - 264 с.
4. Чураков П.В. Оптимальные и адаптивные системы. - М.: Энергоиздат, 1987. - 256 с.

Дополнительная литература:

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2003.
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005.
3. Гудвин Г.К., Греббе С.Ф., Сальгадо М.Э., Проектирование систем управления. М.: Бином, 2004.

Электронные материалы:

1. Поляков К.Ю. Лабораторные работы по теории автоматического управления. Исследование САУ в среде Matlab (<http://kpolyakov.narod.ru/uni/labs.htm>).
2. Клиначёв Н. В. Теория систем автоматического регулирования и управления: Учебно-методический комплекс. - Offline версия 3.6. - Челябинск, 2005. (http://model.exponenta.ru/tau_lec.html).
3. Сенигов П. Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций. - Челябинск: ЮУрГУ, 2001. (http://model.exponenta.ru/tau_lec2.html)
4. Федосов Б.Т. Методическое обеспечение курса ТАУ. Электронные учебные пособия. (http://model.exponenta.ru/bt/bt_contents.html)
5. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф., Харченко В.Ю. Теория автоматического управления: Учебно-методическое пособие. - Тамбов: Издательство ТГТУ, 2006. (http://window.edu.ru/window/library?p_rid=38637&p_rubr=2.2.75.2.17)
6. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления: Учебное пособие. - М.: МГИЭМ., 2005. (http://window.edu.ru/window/library?p_rid=24738&p_rubr=2.2.75.2.17)
7. Туманов М.П. Теория управления. Теория импульсных, дискретных и нелинейных САУ: Учебное пособие. - М.: МГИЭМ., 2005. (http://window.edu.ru/window/library?p_rid=24737&p_rubr=2.2.75.2.17)
8. Клавдиев А.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах. Ч.I: Учебное пособие. - СПб.: СЗТУ, 2005. (http://window.edu.ru/window/library?p_rid=25389&p_rubr=2.2.75.2.17)
9. Золотов О.И., Кухаренко Н.В., Макаров В.Л. Теория управления: Рабочая программа, задания на контрольные работы. - СПб.: СЗТУ, 2003. (http://window.edu.ru/window/library?p_rid=25132&p_rubr=2.2.75.2.17)

Программное обеспечение:

1. Matlab (коммерческая, официальный сайт <http://www.mathworks.com>)
2. SciLab (бесплатная, официальный сайт <http://www.scilab.org/>).
3. VisSim (есть бесплатная версия, официальный сайт <http://www.vissim.com>, описание на русском языке см. http://model.exponenta.ru/bt/bt_cont_2_Vis.html#2).

4. Программный комплекс МВТУ (есть бесплатная версия, официальный сайт <http://mvtu.power.bmstu.ru/>, описание на русском языке см. http://model.exponenta.ru/bt/bt_M2_0101.html)