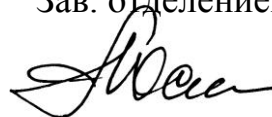


Министерство образования и науки российской федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Утверждаю

Зав. отделением каф. ЮНЕСКО

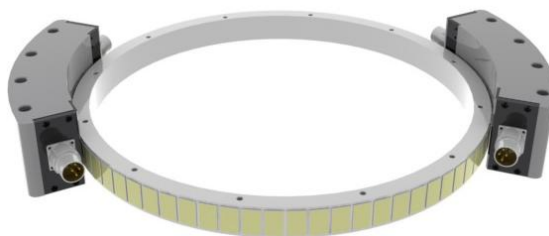


Ю.М. Осипов

" ____ " _____ 2012 г.

МИКРОМЕХАТРОНИКА. НАНОМЕХАТРОНИКА

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: "**Микромехатроника**" и "**Наномехатроника**" для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения"



Томск2012

УДК 621.396.6.671.7

Микромехатроника. Наномехатроника: Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: "**Микро-мехатроника**" и "**Наномехатроника**" для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения" – Томск: Изд-во ТУСУР, 2012. – 19 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения кафедры ЮНЕСКО «27» марта 2012 г.

Составитель к.т.н., доц.


С.В. Щербинин

Зав. кафедрой ОКЮ

доктор техн. наук,

доктор экон. наук,

профессор


Ю.М. Осипов

Рецензент

Кандидат технических наук,
доцент кафедры МИГ ЮТИ ТПУ

И.Ф. Боровиков

1. Математическое описание, структурные схемы и модели двигателя постоянного тока

1.1. Исходные данные

В системах мехатроники преимущественное применение нашли двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или магнитоэлектрические. Управление этими двигателями, как правило, осуществляется по цепи якоря. Уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением имеют вид:

$$\begin{aligned}u_{\text{я}} &= R_{\text{я}} \left(T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}}, \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_{\text{H}}, \\ \omega_m &= \frac{d\theta_m}{dt}, \\ e_{\text{я}} &= k_E \omega_m, M = k_M i_{\text{я}}.\end{aligned}\tag{1}$$

В уравнениях (1) $u_{\text{я}}, i_{\text{я}}, e_{\text{я}}$ - напряжением, ток и противо ЭДС якоря; $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ - индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря; $\omega_m, M, M_{\text{H}}, \theta_m$ - механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки механический угол поворота вала; J - момент инерции ротора; коэффициенты k_E, k_M являются конструктивными постоянными.

Параметры двигателя, входящие в уравнения (1) рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах.

Таблица 1

P_H [кВт]	$U_{\text{я}} = U_{\text{в}}$ [В]	n_H [об/мин]	$I_{\text{я}}$ [А]	$R_{\text{я}}$ [Ом]	$R_{\text{в}}$ [Ом]	J [кг·м ²]
0.12	110	3000	1.53	1.48	642	0.06
0.2	110	3000	2.46	0.762	560	0.08
0.25	110	3000	3.05	0.945	827	0.14
0.37	110	3000	4.4	0.546	934	0.16
0.45	110	3000	5.6	0.585	400	0.36
1.0	110	3000	9.96	0.561	500	0.8

В качестве примера в таблице 1 приведены параметры малоинерционных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением, разработанные для робототехнических комплексов.

В таблице 1 введены следующие обозначения:

- номинальная мощность двигателя P_H [кВт];
- номинальное напряжение питания якоря $U_{\text{я}}$ [В];
- номинальное напряжение возбуждения $U_{\text{в}}$ [В];
- номинальный ток якоря $I_{\text{я}}$ [А];
- номинальная скорость вращения якоря n_H [об/мин];
- сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ [Ом];
- сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$ [Ом].

Номинальный момент двигателя в (Нм), номинальный ток возбуждения в (А), конструктивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$\begin{aligned}
 M_H &= \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H} & I_{\text{в}} &= \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} & k_M &= \frac{M_H}{I_{\text{я}}} \\
 k_E &= \frac{30(U_{\text{я}} - R_{\text{я}}I_{\text{я}})}{\pi n_H} & L_{\text{я}} &\approx \frac{30 U_{\text{я}} c_X}{\pi n_H I_{\text{я}}}, & &
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $c_x = 0,3 \div 0,4$ - эмпирический коэффициент.

Передаточные функции скоростной части ДПТ по управляющему и возмущающему воздействиям могут быть представлены соответственно выражениями:

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{Я}(s)} = \frac{1/k_E}{\frac{T_{Я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1} \quad (3)$$

$$W'(s) = \frac{\omega_m(s)}{M_H(s)} = -\frac{\frac{(T_{Я}s + 1) \cdot k_M}{k_E}}{\frac{T_{Я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1} \quad (4)$$

В выражениях (3), (4) введены обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{R_{Я}}, \quad K_2 = \frac{k_M}{J} \quad (5)$$

Корни характеристического уравнения определяются выражением

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_{Я}} \mp \frac{1}{2T_{Я}} \sqrt{1 - 4T_{Я}K_1K_2k_E} \quad (6)$$

В зависимости от соотношения параметров $K_1, K_2, T_{Я}$ и k_E корни характеристического уравнения могут быть либо вещественными либо комплексно-сопряженными. При выполнении условия $4T_{Я}K_1K_2k_E \leq 1$ корни характеристического уравнения являются вещественными, эквивалентная передаточная функция ДПТ по управляющему воздействию может быть представлена в виде двух последовательно включенных аperiodических звеньев первого порядка с постоянными времени T_1, T_2 и коэффициентом передачи $1/k_E$.

$$W(s) = \frac{x(s)}{u_{Я}(s)} = \frac{1/k_E}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (7)$$

где $T_1 = -1/s_1$, $T_2 = -1/s_2$.

1.2. Пример

В качестве примера рассмотрим двигатель мощностью 0,45 кВт (табл. 1) параметры структурной схемы, рассчитанные по выражениям (2), представлены в таблице 2.

Таблица 2

K_1	K_2	k_M	k_E	T_J	T_1	T_2
1/Ом	1/Амс ²	Нм/А	Вс	с	с	с
1.72	0.72	0.26	0.34	0.043	0.044	2.15

Модель двигателя (файл *DC_Mod*), построенная в соответствии в уравнением(1) представлена на рис. 1, а его динамические характеристики по управлению и по возмущению показаны на рис. 2, рис. 3.

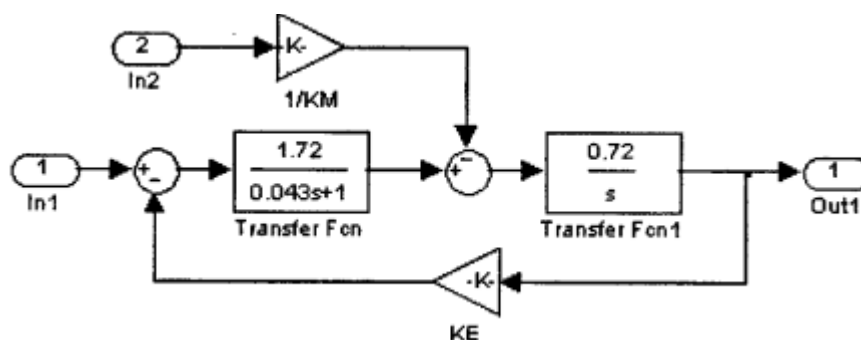


Рис. 1. Модель двигателя постоянного тока

Для получения динамических характеристик здесь используется пакет расширения ControlSystem с его графическим интерфейсом, в котором эталонным сигналом является 1В.

Из характеристик (рис. 2, 3) видно, что по управлению и возмущению ДПТ с данными параметрами представляет собой апериодическое звено.

Причем по возмущению коэффициент передачи более чем в 2 раза больше, чем по управлению.

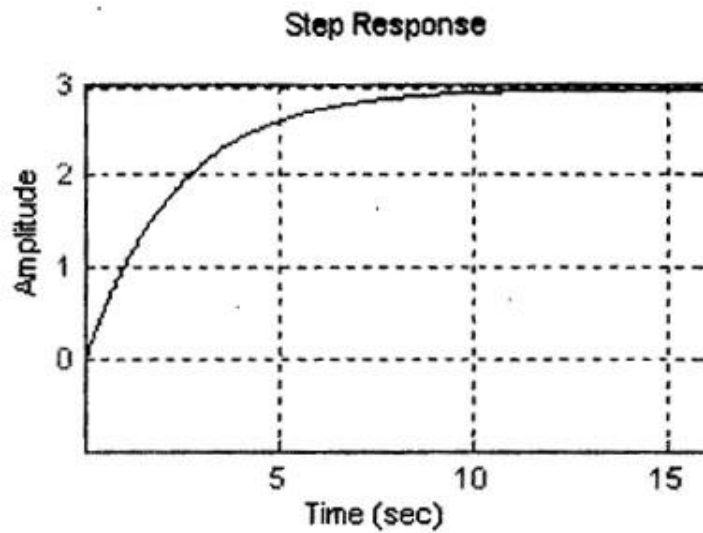


Рис. 2. Динамическая характеристика ДПТ по управлению

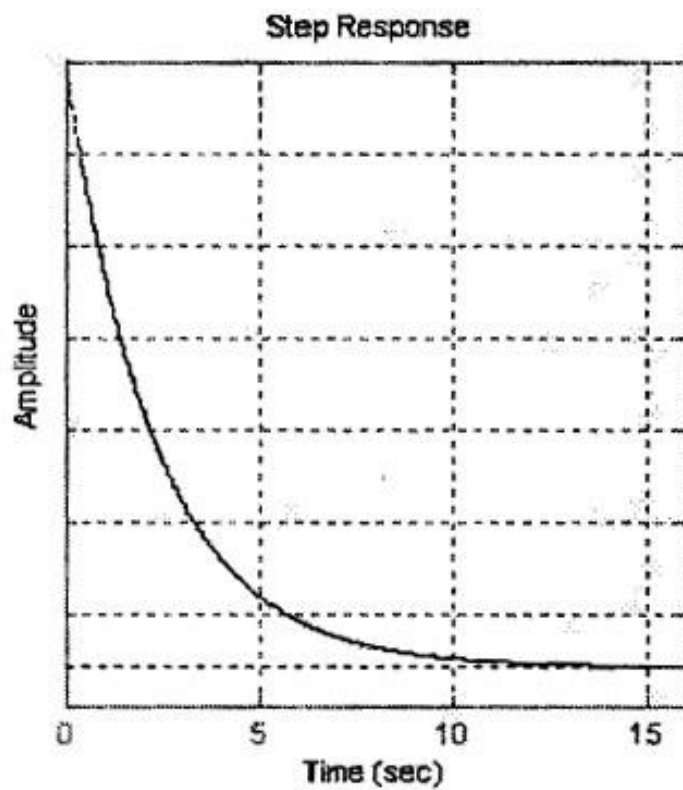


Рис. 3. Динамическая характеристика ДПТ по возмущению

Для придания скоростному контуру требуемых свойств используются регуляторы, структура и параметры которых зависит от параметров ДПТ и требований, предъявляемых к скоростному контуру.

2. Синтез регуляторов в одноконтурной скоростной системе постоянного тока

Структурная схема системы с исполнительным двигателем постоянного тока (ДПТ), управляемого по цепи якоря, представлена на рис. 4. Она включает сам двигатель, представленный последовательно включенными апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном, охваченными обратной связью через безинерционное звено (k_E).

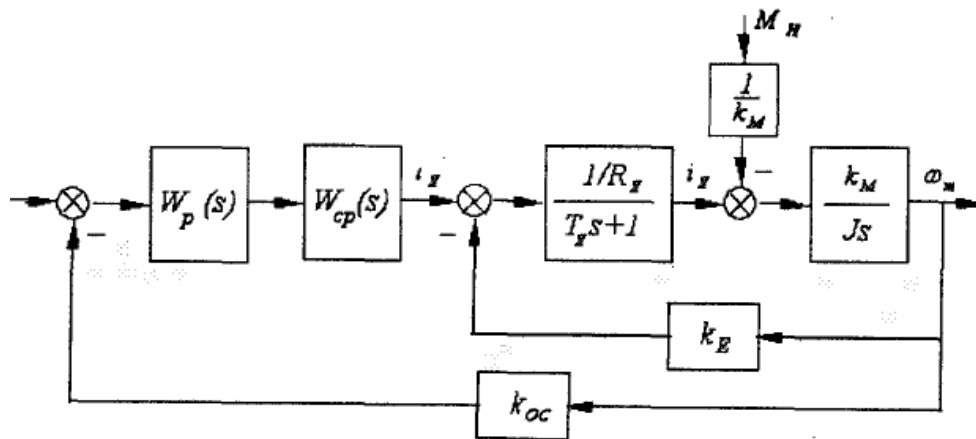


Рис. 4. Структурная схема одноконтурной скоростной системы постоянного тока

Двигатель постоянного тока управляется от силового регулятора, представленного звеном $W_{cp}(s)$. Силовой регулятор (в данном случае реверсивный широтно-импульсный преобразователь) управляется от регулятора с передаточной функцией $W_p(s)$, на вход которого подается разность сигнала управления и обратной связи по скорости.

Первоначально рассмотрим синтез регуляторов скоростной системы, в которой момент нагрузки является независимой от координат системы функцией. В этом случае момент нагрузки является возмущением, которое система должна компенсировать.

Пример 1. Для случая, когда постоянные времени сильно разнятся $T_2 \gg T_1$, целесообразно строить ПИ регулятор, который компенсировал бы большую постоянную времени объекта.

$$W_p(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot k_p}{T_2s} = k_p + \frac{k_p}{T_2s} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s}. \quad (8)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет равна:

$$W_{\text{РАЗ}}(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot k_{\text{CP}} k_p k_{\text{OC}}}{T_2s} \cdot \frac{1/k_E}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} = \frac{k_{\text{CP}} k_p k_{\text{OC}} / k_E}{T_2s \cdot (T_1s + 1)} \quad (9)$$

Оптимум по модулю в такой системе достигается при $\frac{T_2 k_E}{k_{\text{CP}} k_p k_{\text{OC}}} = 2T_1$, откуда находятся коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора.

$$k_{\Pi} = k_p = \frac{T_2 k_E}{2T_1 k_{\text{CP}} k_{\text{OC}}}, \quad k_{\text{И}} = \frac{k_p}{T_2}. \quad (10)$$

Модель одноконтурной скоростной системы (файл *DC_Mod_Reg1*) показана рис. 5. Двигатель в модели представлен тремя звеньями (TransferFen, Transfer (Fcn1, k_T). Момент нагрузки на двигатель моделируется двумя блоками (*Step*, $1/k_M$). Силовой регулятор представлен безинерционным звеном (K_{CP}) с насыщением, которое определяется конечной величиной напряжения питания силового регулятора.

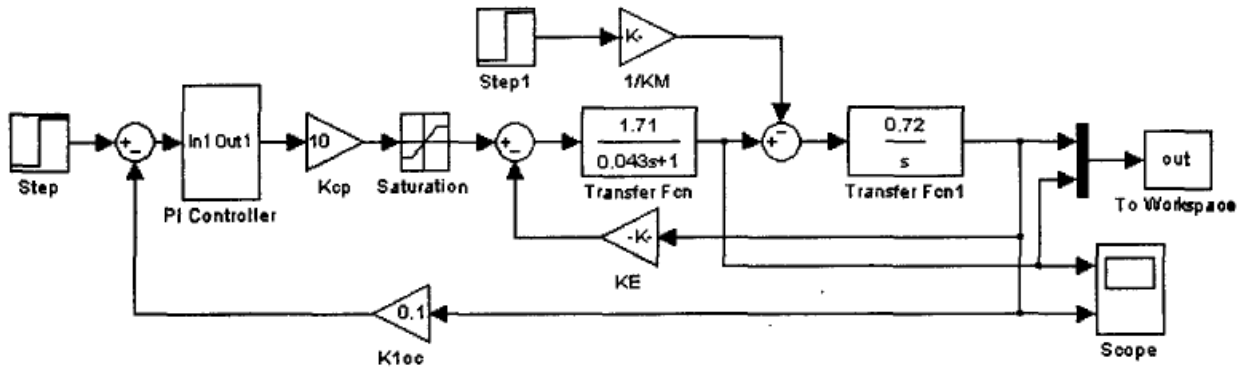


Рис. 5. Модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока

При $k_{cp} = 10$, $k_{oc} = 0,1$ параметры регулятора, рассчитанные по уравнению (10) будут равны $k_{п} = 8,3$, $k_{и} = 3,86$, а переходные процессы в замкнутом скоростном контуре по току (моменту) и скорости при скачке входного сигнала в момент времени $t=0$ и скачке возмущающего сигнала (момента на валу ДПТ) в момент времени $t=0,5$ с представлены характеристиками на рис. 6.

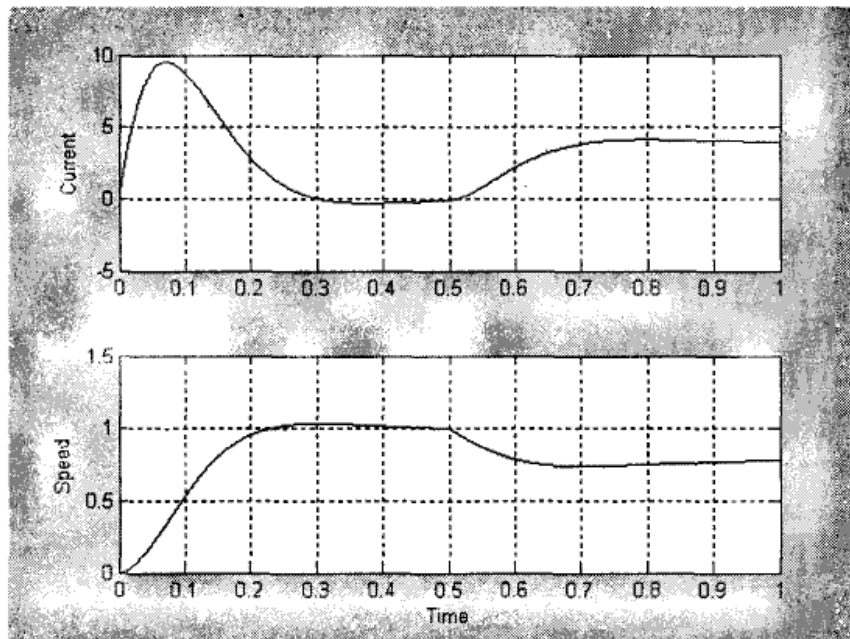


Рис. 6. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока при $T_2 \ll T_1$

В замкнутой системе процесс по возмущению апериодический, при этом постоянная времени компенсации возмущающего сигнала приблизительно равна постоянной T_2 двигателя.

Для проверки правильности расчета параметров регулятора с реальным ШИП следует использовать модели силового регулятора. На рис. 7 показаны переходные процессы по скорости в замкнутой системе с симметричным и несимметричным ШИП, коэффициент усиления которых приняты равными $k_{cp} = 10$, т. е. такими же как в непрерывной модели рис. 6.

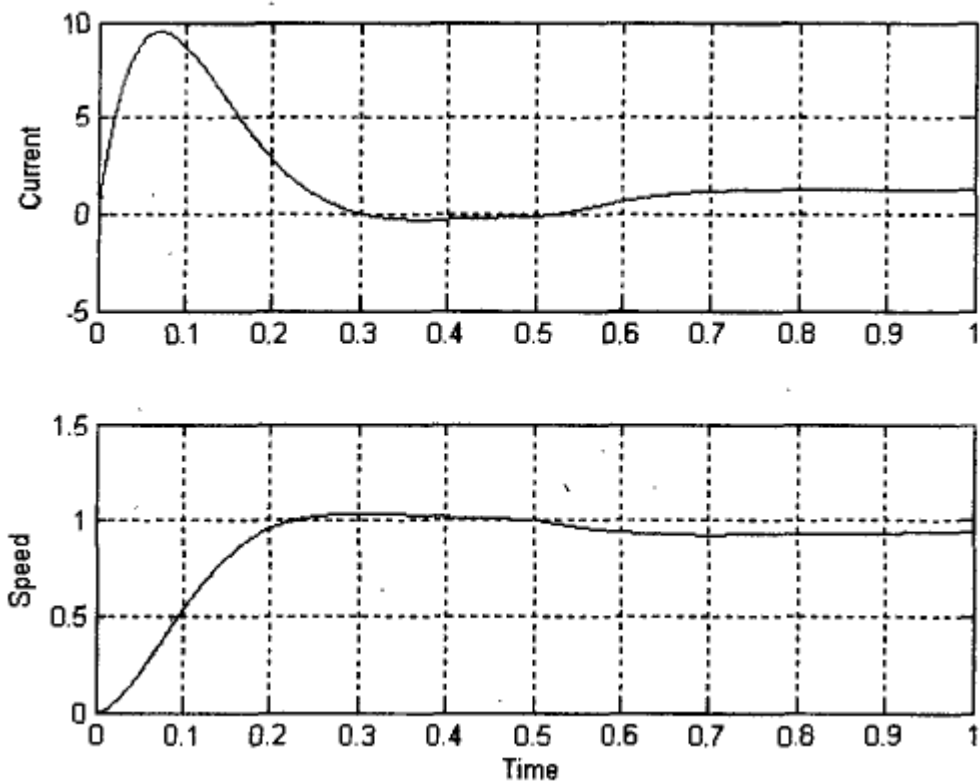


Рис. 7. Переходные процессы в одноконтурной системе постоянного тока с ШИП

Сравнение результатов моделирования непрерывной модели с безинерционным силовым регулятором и модели с «реальным» ШИП свидетельствует о достаточно хорошем совпадении этих результатов. Поэтому во многих практических случаях можно строить одноконтурную систему постоянного тока, считая ШИП безинерционным динамическим звеном.

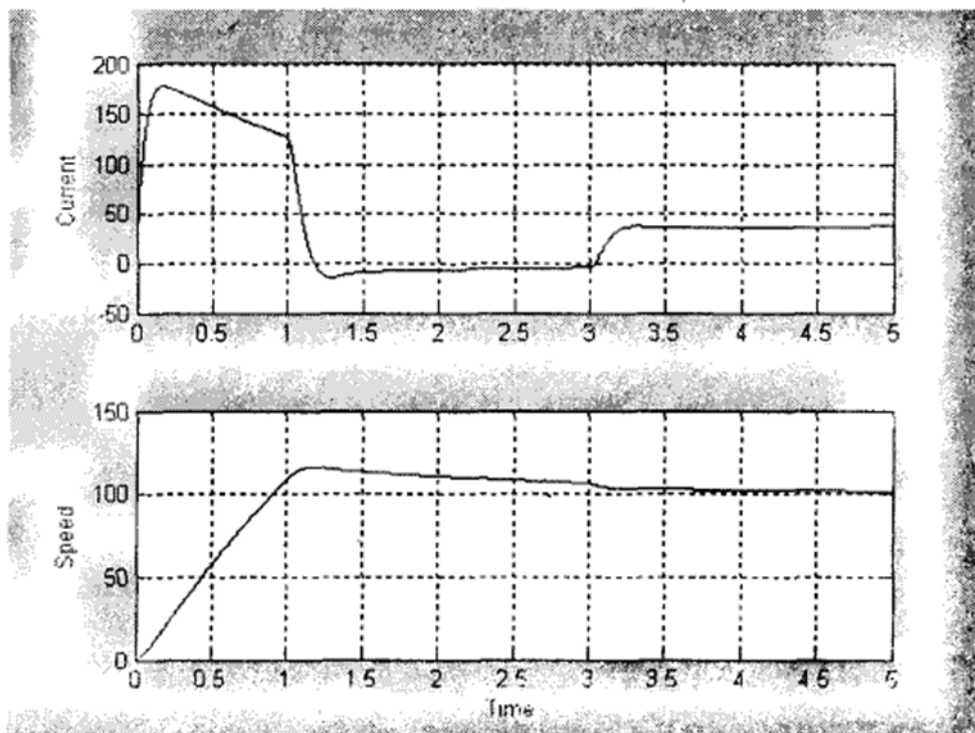


Рис. 8. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока «в большом»

При значительной величине входного сигнала в силовом преобразователе происходит ограничение напряжения, связанное с конечной величиной питания (в данном случае $U_{\text{п}}=110\text{В}$). Переходные процессы по управлению и возмущению (в «большом») для этого режима работы системы показаны на рис. 8.

При анализе нелинейной системы важно убедиться в ее устойчивости. Поэтому вывод о том, что система остается устойчивой в «большом» можно считать достаточным при исследовании. При нарастании скорости на интервале от 0 до 1,0 с в осциллограмме тока явно прослеживается влияние противо ЭДС.

Пример 2. В случае, когда эквивалентные постоянные времени различаются незначительно для придания звену второго порядка, описанного уравнением (3), заданных динамических качеств, необходимо использовать ПИД регулятор с передаточной функцией

$$W_p(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{И}}{s} + \frac{k_D s}{T_D s + 1} = \frac{k_{И}}{s} \times \frac{k_D + T_D \cdot k_{\Pi} s^2 + k_{\Pi} + T_D \cdot k_{И} s + 1}{k_{И} T_D s + 1}. \quad (11)$$

Параметры регулятора, обеспечивающие оптимум по модулю в замкнутой скоростной системе, рассчитываются по уравнениям:

$$T_D < T_1, \quad k_{И} = \frac{k_E}{2T_D k_{cp} k_{oc}}, \quad (12)$$

$$\frac{k_D + T_D \cdot k_{\Pi}}{k_{И}} = T_1 T_2, \quad \frac{k_{\Pi} + T_D \cdot k_{И}}{k_{И}} = T_1 + T_2.$$

Рассмотрим предыдущий пример с электромагнитной постоянной кор-ной цепи $T_a = 0,43$, тогда $T_1 = 0,56$, $T_2 = 1,71$.

Приняв $T_D = 0,01$, $K_{cp} = 10$, $K_{oc} = 0,1$, определим $k_{\Pi} = 17$, $k_{И} = 38,42$, $k_D = 16,2$.

На рис. 9 показаны динамические характеристики замкнутой скоростной системы в «малом» (файл *DC_Mod_Regla*). Следует отметить, что наличие дифференцирующего звена в регуляторе значительно сужает линейную область работы системы по входному сигналу.

Динамические процессы в системе в «большом» представлены на рис. 10.

Здесь так же как и в предыдущем примере выход системы в насыщение не приводит в потере устойчивости.

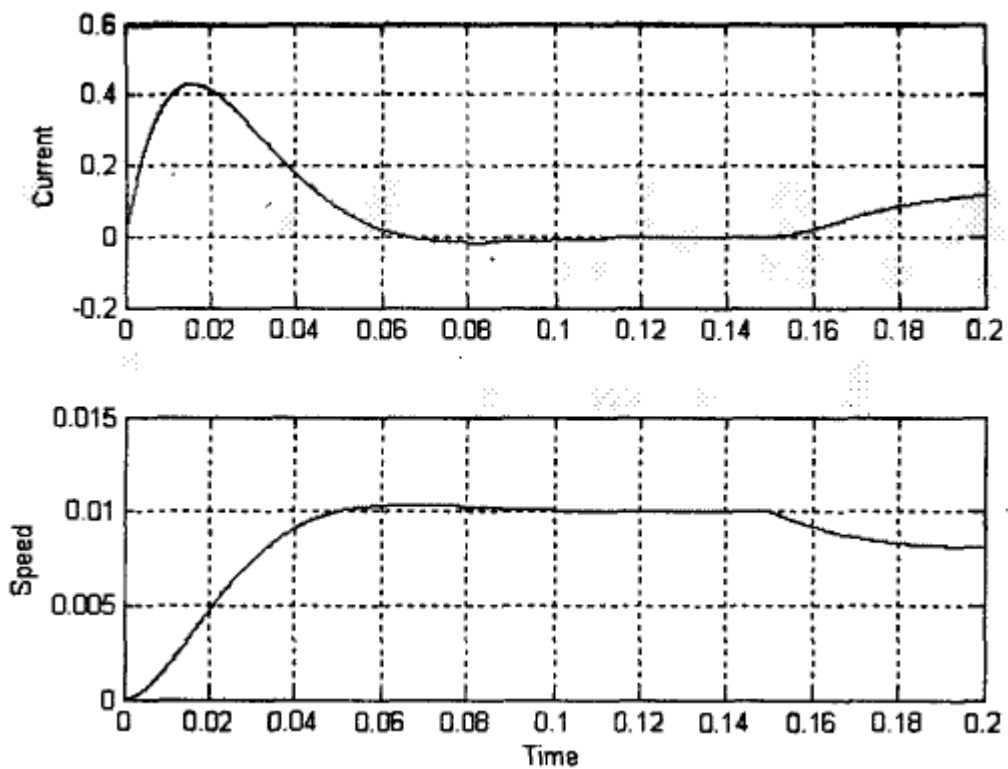


Рис. 9. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока при $T_2 > T_1$

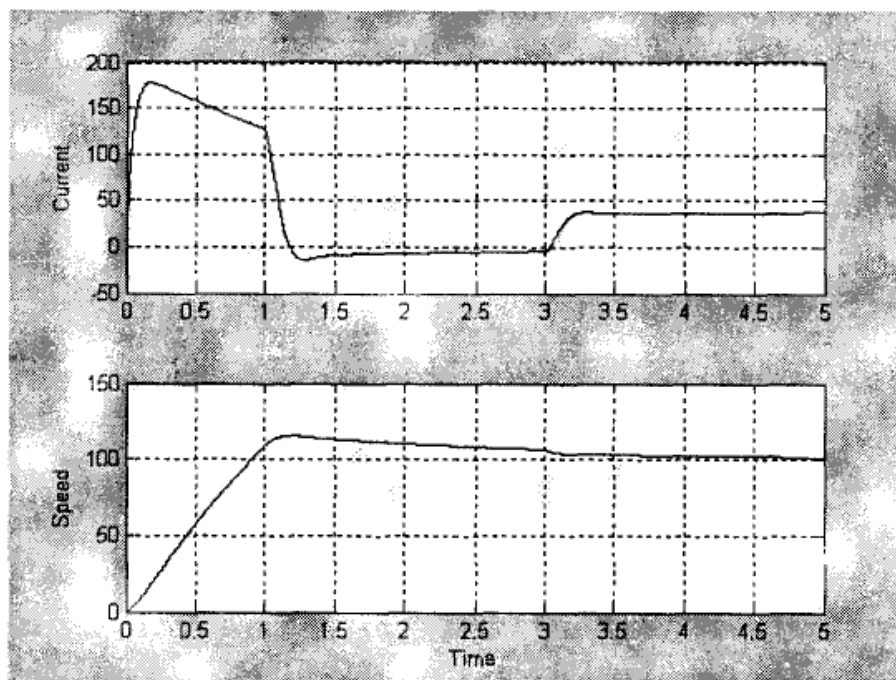


Рис. 10. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока «в большом»

3. Задание

При проектировании системы постоянного тока необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Выбрать тип двигателя постоянного тока, исходя из требований к системе, и определить параметры его структурной схемы.
2. Выбрать тип силового регулятора (УВ, ШИП).
3. Выбрать схему силового регулятора и его алгоритм управления.
4. Определить динамические параметры силового регулятора по «гладкой составляющей».
5. Выбрать структуру замкнутой системы.
6. Синтезировать регуляторы в выбранной структуре с определенными на этапе 4 параметрами силового регулятора.
7. Реализовать структурную модель системы и определить ее динамические характеристики.
8. Сравнить полученные характеристики с заданными в техническом задании и при необходимости вернуться к пункту 1, либо 2, либо 5.
9. Учесть ограничения в системе и повторить пункты 7, 8.
10. Построить цифровую модель регулятора по полученной непрерывной модели и повторить пункты 7, 8.
11. Реализовать систему с функциональной моделью силового регулятора. Определить динамические характеристики этой системы.
12. Реализовать систему с виртуальной моделью силового регулятора и двигателя. Определить динамические характеристики этой системы и сравнить их с характеристиками структурной модели.
13. Исследовать нагрузочные, электромагнитные, энергетические, спектральные и иные требуемые характеристики разработанной мехатронной системы.

Литература

1. Герман-Галкин. С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.:КОРОНА-Век, 2008. - 368 с.
2. Ануфриев И. MATLAB 7. Наиболее полное руководство / И. Ануфриев, А. Смирнов, Е. Смирнова. — СПб.:БХВ-Петербург, 2005.

МИКРОМЕХАТРОНИКА. НАНОМЕХАТРОНИКА

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: "Микромехатроника" и "Наномехатроника" для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 "Мехатроника и робототехника" по магистерской программе "Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения"

Составитель



Сергей Васильевич Щербинин