

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I»

Электронный дистанционный курс для обучения
специалистов

Дисциплина
«Теория автоматического управления»

Кафедры Электроснабжение железных дорог
Факультета Автоматизация и интеллектуальные технологии

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Курс разработан для специализации «Электроснабжение железных дорог»
Специальности «Обеспечение движения поездов»

Курс изучается на 3 курсе во 2-м полугодии

Санкт-Петербург
2015

Содержание

| | |
|--|----|
| СОДЕРЖАНИЕ | 2 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 2 |
| 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ..... | 4 |
| 1.1. СХЕМА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ | 4 |
| 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ..... | 5 |
| 2.3. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ | 8 |
| 2. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ | 11 |
| 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ..... | 14 |
| 3.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ | 14 |
| 3.2. ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ | 17 |
| 4. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА..... | 18 |
| 4.1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЬ–НАГРУЗКА..... | 18 |
| 4.2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА КОМПЬЮТЕРЕ | 20 |
| 5.3. МОДЕЛЬ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ..... | 24 |
| 5. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА | 25 |
| 5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ..... | 25 |
| 5.2. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ | 25 |
| 5.3. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ТОКА..... | 26 |
| 6.4. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА | 28 |
| 6.5. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ | 29 |
| 6.4. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ..... | 32 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 36 |

Введение

Целью курсового проекта является освоение приемов анализа и исследования систем управления электротехническими устройствами, работающими в режимах стабилизации выходных параметров.

Исследования проводятся методом вычислительного эксперимента на персональном компьютере (ПК) с применением специализированного программного обеспечения. В качестве инструментальных средств используются программа моделирования динамических систем Simulink входящая в расширенный состав пакета MatLab.

Исходные данные приводятся в задании на курсовой проект, при этом в зависимости от варианта задания требуется рассмотреть одну из систем автоматического регули-

рования (САР). В методических указаниях подробно рассматривается система автоматического регулирования двигателем постоянного тока с независимым возбуждением.

Предлагается следующий порядок работы:

- 1) определение параметров, статических характеристик и ограничений объекта регулирования;
- 2) разработка функциональной схемы САР;
- 3) создание математического описания объектов управления системы;
- 4) разработка структурной схемы и модели объекта управления и проведение численных экспериментов;
- 5) параметрический синтез регулятора тока и его исследование;
- 6) параметрический синтез регулятора скорости и его исследование;
- 7) оценка качества процессов регулирования при заданных внешних возмущениях.

В состав оформленной работы должны входить пояснительная записка, структурная схема САР с параметрами и ограничениями, статические характеристики объекта регулирования, машинограммы (распечатки), иллюстрирующие динамические свойства САР и ее компонентов.

1. Определение параметров и характеристик объекта управления

1.1. Схема объекта управления

На рис. 1 представлена схема объекта управления. Объект представляет собой двигатель постоянного тока Д с независимой обмоткой возбуждения ОВ, с питанием от тиристорного преобразователя ТП, нагруженный на рабочий механизм РМ. Тиристорный преобразователь выполняет функции управляемого выпрямителя. В нем выделена система импульсно-фазового управления СИФУ, трансформатор Т и силовая часть тиристорного преобразователя СЧТП.

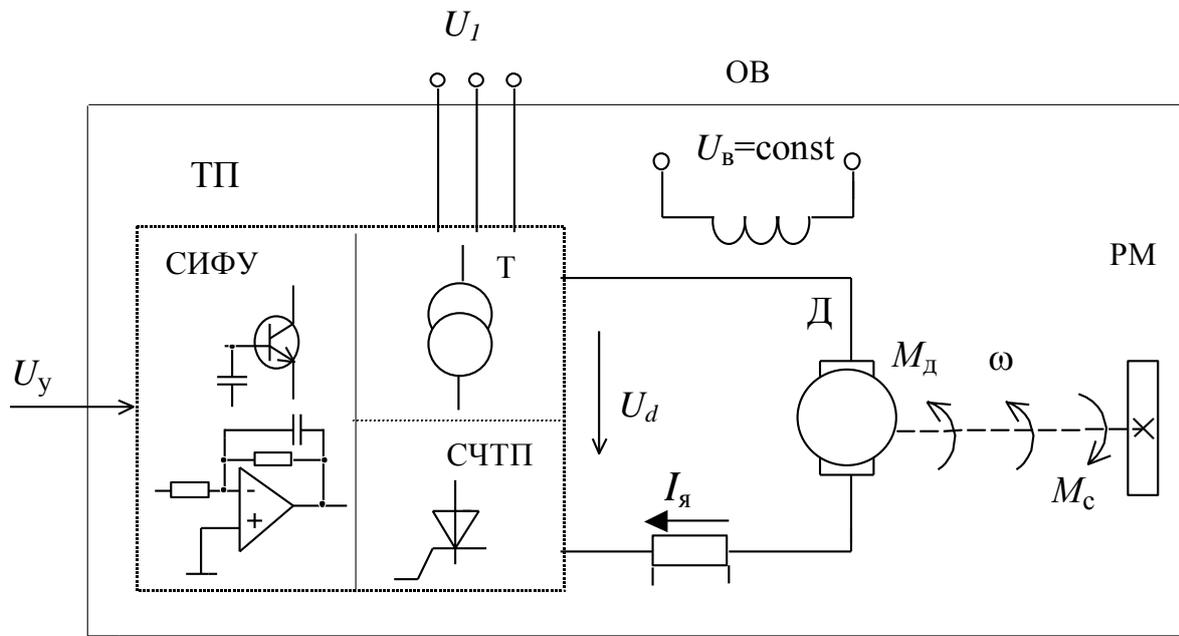


Рис. 1. Объект управления

U_1 – действующее линейное напряжение питания выпрямителя;

U_b – напряжение (постоянное) питания обмотки возбуждения;

$U_d, I_я$ – напряжение на выходе ТП и ток якоря двигателя;

ω – угловая скорость вращения двигателя;

M_d, M_c – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления нагрузки;

U_y – сигнал управления выпрямителем ТП.

Построение модели начнем с определения параметров объекта регулирования.

2.2. Определение параметров объекта управления

Двигатель постоянного тока. В качестве примера рассмотрим двигателя типа 2ПН200М, который имеет следующие значения параметров:

| | |
|---|-------|
| Номинальная мощность P_N , кВт | 60 |
| Номинальное напряжение U_N , В | 440 |
| Номинальная частота вращения n_N , об/мин | 3150 |
| Максимальная частота вращения $n_{\text{макс}}$ об/мин | 3500 |
| Сопротивление якорной обмотки (при 15 °С) $R_{\text{я}}$, Ом | 0,047 |
| Сопротивление добавочных полюсов $R_{\text{д}}$, Ом | 0,029 |
| Индуктивность цепи якоря $L_{\text{я}}$, мГн | 1,6 |
| Момент инерции якоря $J_{\text{я}}$, кг·м ² | 0,25 |
| Число пар полюсов p_n | 2 |
| Коэффициент полезного действия η | 0,905 |

Непосредственно по исходным данным могут быть вычислены номинальные величины: угловая частота вращения двигателя ω_N , момент двигателя M_N , ток якоря I_N и номинальное сопротивление двигателя при неподвижном якоре R_N :

$$\omega_N = \pi \cdot n_N / 30 = 3,14 \cdot 3150 / 30 = 330 \text{ рад/с};$$

$$M_N = P_N / \omega_N = 60 \cdot 10^3 / 330 = 182 \text{ Н·м};$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \cdot \eta} = \frac{60 \cdot 10^3}{440 \cdot 0,905} = 151 \text{ А};$$

$$R_N = U_N / I_N = 440 / 151 = 2,90 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление цепи якоря, включающее в себя сопротивления собственно якорной обмотки $R_я$ и дополнительной обмотки $R_д$:

$$R_{я,\Sigma} = R_я + R_д = 0,047 + 0,029 = 0,076 \text{ Ом.}$$

При отсутствии данных можно принять $R_{я,\Sigma} = \beta \cdot (1 - \eta) \cdot R_N$. Для независимого и параллельного возбуждения $\beta = 0,5$, для смешанного возбуждения $\beta = 0,6$, для последовательного возбуждения $\beta = 0,75$.

Тиристорный преобразователь. Из исходных данных для рассматриваемого варианта известно, что он предназначен для работы в I квадранте [2], т.е. его выходной ток и напряжение неотрицательны. Номинальное вторичное линейное напряжение трансформатора $U_2 = 380 \text{ В}$, сглаживающий реактор в цепи выпрямленного тока отсутствует, его индуктивность $L_{\Pi} = 0$. Суммарное приведенное напряжение короткого замыкания, учитывающее питающую сеть и трансформатор, $u_{\Sigma} = 0,15$.

Номинальные параметры ТП: выпрямленное напряжение $U_{d,N}$ и ток $I_{d,N}$ должны соответствовать параметрам его нагрузки. С учетом рядов номинальных токов и напряжений ближайшие допустимые значения параметров выпрямителя: $U_{d,N} = 460 \text{ В}$; $I_{d,N} = 160 \text{ А}$.

Напряжение холостого хода выпрямителя при $\alpha = 0$ определяет наибольшее напряжение выпрямителя $U_{d,0}$. Это напряжение можно выразить через коэффициент выпрямления K_B и линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора U_2 для трехфазной мостовой схемы:

$$U_{d,0} = K_B \cdot U_2 = (3 \cdot 1,41/\pi) \cdot 400 = 1,35 \cdot 400 = 539 \text{ В.} \quad (1)$$

Выходное сопротивление преобразователя определяется в первом приближении (без учета падения напряжения на активных сопротивлениях цепи переменного тока) по выражению:

$$R_{\Pi} = A \cdot u_{\Sigma} \cdot U_{d,N} / I_{d,N} = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 460 / 160 = 0,216 \text{ Ом.}$$

Динамические свойства силовой части преобразователя СЧТП характеризуются также постоянной чистого запаздывания T_T , поскольку сигналы управления поступают на тиристоры схемы в дискретные моменты времени. При питании от сети с частотой f_c для трехфазной мостовой схемы выпрямления

$$T_T = 1/(6 \cdot f_c) = 1/(6 \cdot 50) = 0,0033 \text{ с.} \quad (2)$$

Постоянную чистого запаздывания принимают равной нулю, если скорость изменения угла управления m -фазного преобразователя не превышает, согласно теореме Котельникова, критической частоты $\omega_{кр}$:

$$d\alpha/dt < \omega_{кр} = m \cdot \pi \cdot f_c.$$

Если выходное сопротивление преобразователя R_{Π} включить в цепь якоря двигателя, то суммарное сопротивление якорь – преобразователь составит:

$$R_{я,\Pi} = R_{я,\Sigma} + R_{\Pi} = 0,076 + 0,216 = 0,292 \text{ Ом.}$$

В суммарную индуктивность якорной цепи следует включить индуктивность цепи якоря двигателя, индуктивности дополнительной $L_{д}$ и компенсационной $L_{к}$ обмоток. Ес-

ли составляющие индуктивностей цепи в справочнике не заданы, то может быть использована формула Уманского–Линвилля [1], [5]: для некомпенсированных двигателей с коэффициентом $K_{л} = 0,6$, для компенсированных – $K_{л} = 0,25$.

$$L_{я,\Sigma} = L_{я} + L_{д} + L_{к} = K_{л} \cdot \frac{U_N}{I_N \cdot p_n \cdot \omega_N} = 0,6 \cdot \frac{440}{151 \cdot 2 \cdot 330} = 0,00264 \text{ Гн.}$$

Если индуктивность сглаживающего реактора тиристорного преобразователя $L_{п}$ включить в цепь якоря двигателя, то суммарная индуктивность якорь – преобразователь составит:

$$L_{я,\Pi} = L_{я,\Sigma} + L_{п} = 0,00264 + 0 = 0,00264 \text{ Гн.} \quad (3)$$

Рабочий механизм. В задании он представлен в виде одномассового тела, все моменты сил и инерции вращающихся и поступательно движущихся масс которого приведены к валу двигателя. Момент инерции рабочего механизма при заданном коэффициенте механической нагрузки $K_{н}$

$$J_{н} = J_{я} \cdot K_{н} = 0,25 \cdot 2 = 0,50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Суммарный момент инерции якоря и рабочего механизма

$$J = J_{я} + J_{н} = 0,25 + 0,50 = 0,75 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

2.3. Статические характеристики объекта управления

Под статическими характеристиками обычно понимаются зависимости между величинами, характеризующими установившийся процесс работы объекта регулирования (для двигателя это момент $M_{д}$, ток якоря $I_{я}$, скорость ω , напряжение $U_{я}$). Для машин

постоянного тока наиболее часто рассматривают электромеханические $M_d(I_d)$, механические $\Omega(M_d)$, скоростные $\Omega(I_d)$ и внешние $U_d(I_d)$ характеристики. Для выпрямителя – внешние $U_d(I_d)$ и регулировочные $U_d(\alpha)$.

Внешняя (нагрузочная) характеристика выпрямителя показывает зависимость выходного напряжения U_d от потребляемого выпрямленного тока I_d при неизменном угле управления α . Ограничимся рассмотрением режимов непрерывного тока [2]. Коэффициент относительного наклона внешней характеристики в ее линейной части для рассматриваемого выпрямителя $A=0,5$. Среднее выпрямленное напряжение в режиме холостого хода $U_{d,0}$ и эквивалентное (выходное) сопротивление R_{Π} полностью определяют внешнюю характеристику для текущего угла управления α :

$$U_N = U(I_N) = U_{d,0} \cdot \cos \alpha - I_N \cdot R_{\Pi} = E_n - I_N \cdot R_{\Pi} \quad (4)$$

Регулировочная характеристика $U_d(\alpha)$ представляет собой также уравнение (4) при неизменном значении выходного тока I_d . Для определения угла управления в функции выходных параметров выпрямителя достаточно уравнение (4) разрешить относительно α

$$\alpha = \arccos \{ (U_N + I_N \cdot R_{\Pi}) / U_{d,0} \}.$$

Подстановкой в полученное выражение значений величин для номинального режима определяется номинальный угол управления:

$$\alpha_{N=} = \arccos \{ (U_N + I_N \cdot R_{\Pi}) / U_{d,0} \} = \arccos \{ (440 + 151 \cdot 0,23) / 539 \} = 29^\circ.$$

Среднее выпрямленное напряжение в режиме холостого хода $U_{d,0,\alpha}$ (ЭДС источника питания E_{Π}) для номинального угла управления определится по формуле (4) при

нулевом значении тока $E_{\Pi} = U_{d,0,\alpha} = U_{d,0} \cdot \cos \alpha_N = 539 \cdot \cos 29^\circ = 473 \text{ В}$.

Выражения, необходимые для построения характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = R_{\text{я},\Sigma} \cdot I_{\text{я}} + E_{\text{д}} , \\ E_{\text{д}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot \omega , \\ M_{\text{д}} = M_{\text{д}}(I_{\text{я}}) = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} , \end{cases} \quad (5)$$

где $C_{\text{м}}$ – конструктивный коэффициент, зависящий от числа активных проводников якоря N , числа параллельных ветвей обмотки якоря a и выбранных единиц измерения; для нашего случая

$$C_{\text{м}} = \frac{p_n \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} .$$

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в первом приближении, пренебрегая насыщением магнитной цепи и реакцией якоря, можно принять поток возбуждения машины постоянным, $\Phi = \text{const}$. В этом случае целесообразно положить

$$C = C_{\text{м}} \cdot \Phi .$$

В справочниках по электрическим машинам не всегда приводятся данные, необходимые для вычисления C . В этом случае ее можно определить для номинального режима через другие справочные данные, например из формул (5):

$$E_d = U_N - I_N \cdot R_{я,\Sigma} = 440 - 151 \cdot 0,076 = 428 \text{ В};$$

$$C = E_d / \omega_N = 428 / 330 = 1,30 \text{ Вб.}$$

Статические характеристики двигателя и выпрямителя, построенные по формулам (5), приведены на рис. 2. На рисунке отмечены номинальные значения параметров и параметры холостого хода, вычисленные в данном разделе. Кроме того, на рис. 2 приведены статические характеристики вентиляторной механической нагрузки и внешняя характеристика выпрямителя (4).

2. Разработка функциональной схемы системы автоматического регулирования

В задании на курсовое проектирование обычно требуется обеспечить стабилизацию скорости вращения двигателя. Наиболее качественно такую задачу в условиях неопределенности внешних воздействий можно решить при использовании регулятора с управлением по отклонению. Вводим в систему контур регулирования по скорости. Для ограничения возможных бросков тока двигателя этот контур дополняется контуром регулирования тока. Для получения на входах регуляторов информации о значениях регулируемых величин потребуются датчики скорости и тока. Таким образом, предложенная двухконтурная система управления может рассматриваться как система автоматического регулирования (САР).

При контроле двух величин наиболее часто используется подчиненное регулирование, при этом подчиненным (внутренним) назначается наиболее быстродействующий контур, в нашем случае это токовый контур. На рис. 3 предложена схема системы автоматического управления для рассматриваемого электропривода.

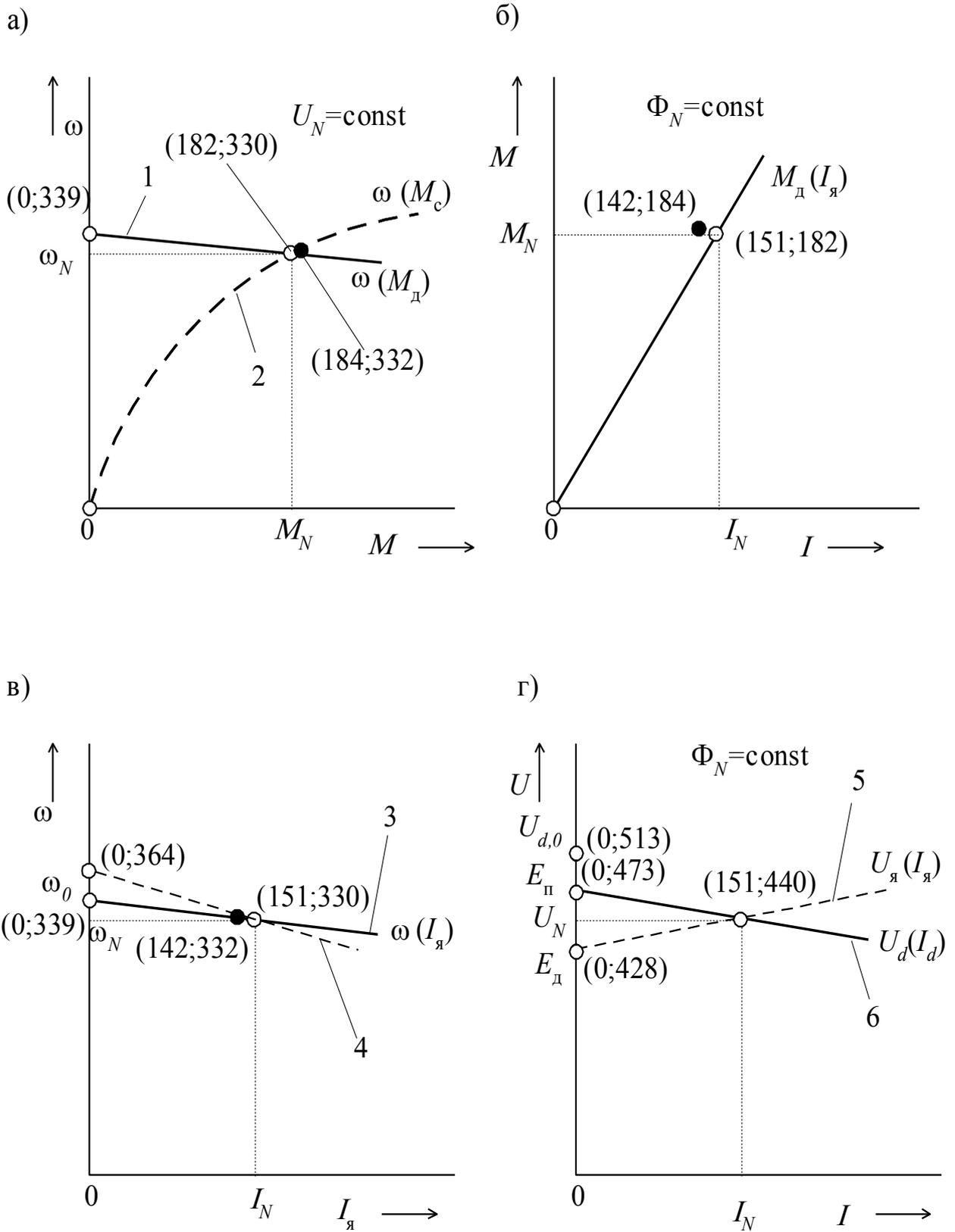


Рис. 2. Статические характеристики объекта регулирования:

а – механическая двигателя (1) и нагрузки (2); б – электромеханическая двигателя; в – скоростная двигателя для $U_N = \text{const}$ (3) и для $E_n = \text{const}$ (4);

г – внешние двигателя (5) и выпрямителя (6); • – точки численного эксперимента

Внутренний контур (АР1, ОР1, ДТ) образован регулятором тока РТ, системой тиристорный преобразователь–двигатель ОР1 и датчиком тока ДТ. Внешний контур (АР2, ОР2, ДС) образуется регулятором скорости РС, объектом регулирования ОР2 и датчиком скорости ДС. В качестве объекта регулирования ОР2 рассматривается внутренний контур и рабочий механизм РМ.

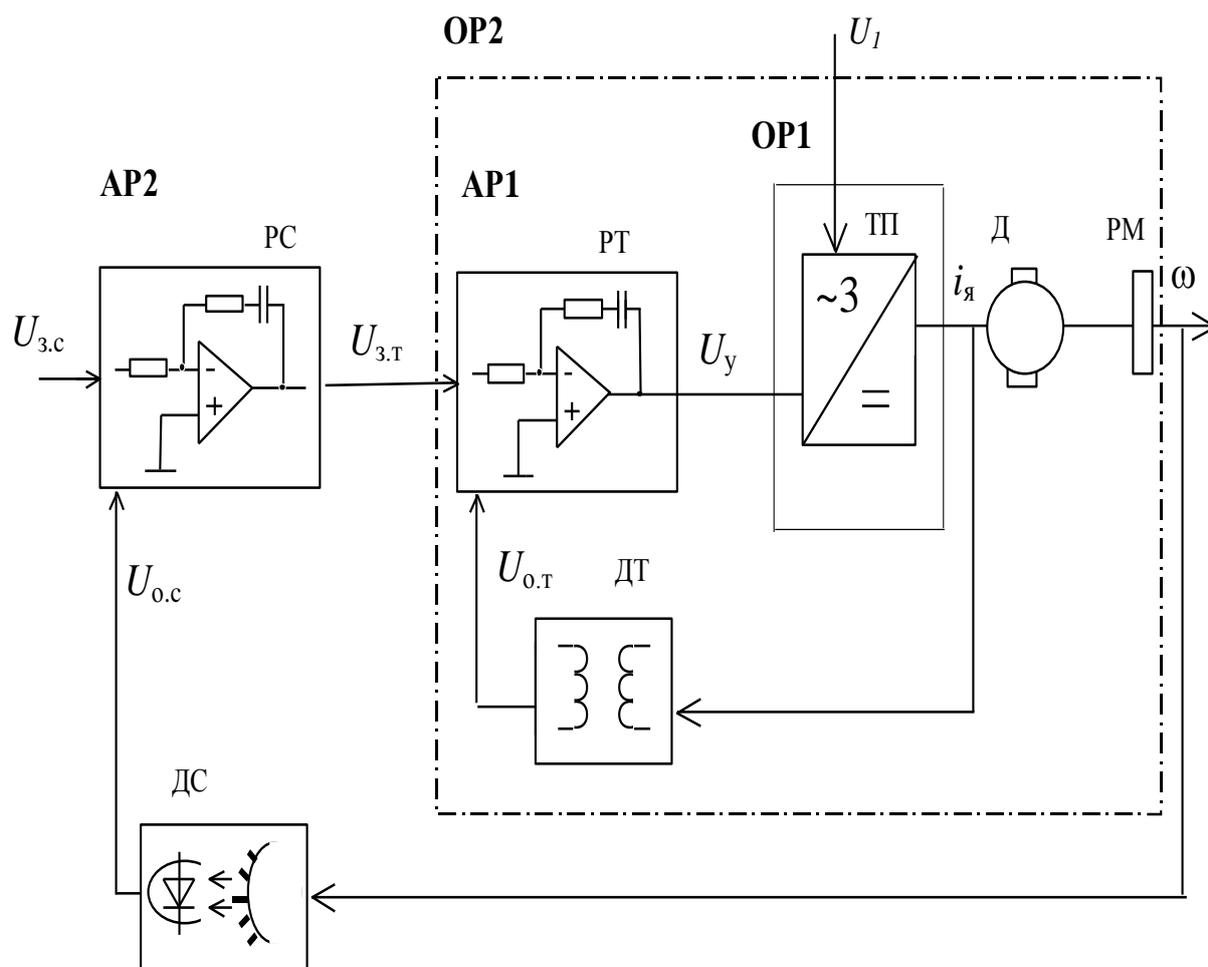


Рис. 3. Схема двухконтурной системы автоматического регулирования:

РТ, РС – регуляторы тока и скорости; ДТ, ДС – датчики тока и скорости; ТП – тиристорный преобразователь; Д – двигатель; РМ – рабочий механизм; ОР1, АР1 – объект и автоматический регулятор внутреннего контура управления; ОР2, АР2 – объект и автоматический регулятор внешнего контура управления; $U_{0,T}, U_{0,c}$ – сигналы обратной связи по току и скорости; $U_{3,T}, U_{3,c}$ – сигналы задания по току и скорости; U_1, U_y – напряжения питания и управления объекта регулирования; $i_{я}, \omega$ – ток якоря и скорость двигателя

3. математическое описание элементов объекта управления

При разработке математического описания необходимо составить систему дифференциальных уравнений, позволяющую рассматривать переходные процессы при наличии управляющих и возмущающих воздействий. Затем эти уравнения преобразуются к виду, удобному для моделирования в заданной инструментальной среде. Рассматривается вариант, когда инструментальная среда использует операторное описание динамических процессов.

3.1. Электромеханический преобразователь

Анализ исходных данных позволяет сделать упрощение и рассмотреть в качестве единого электромеханического преобразователя систему двигатель–рабочий механизм. При построении модели электромеханического преобразователя приняты следующие допущения: параметры машины линейные; ток двигателя непрерывен; реакция якоря не учитывается; внешняя характеристика преобразователя линейная; якорь двигателя и рабочий механизм представлены одной вращающейся массой.

Исходные уравнения для мгновенных величин применительно к двигателю постоянного тока при одной обмотке возбуждения [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_B = i_B \cdot R_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt}, \\ u_{\text{я}} = i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + \omega_{\text{эл}} \cdot L_{12} \cdot i_B, \\ M_{\text{д}} = p_n \cdot L_{12} \cdot i_B \cdot i_{\text{я}}, \\ M_{\text{д}} - M_{\text{с}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где u_B, i_B – напряжение и ток обмотки возбуждения; $u_{я}, i_{я}$ – напряжение и ток якорной обмотки; R_B, L_B – сопротивление и индуктивность обмоток возбуждения; $\omega_{эл} = \omega / p_n$ – электрическая угловая скорость вращения якоря;
 L_{12} – взаимная индуктивность обмоток возбуждения и якоря.

Преобразуем уравнения к удобному для моделирования виду. Введем обозначения постоянных времени обмоток возбуждения $T_B = L_B / R_B$ и якоря $T_{я} = L_{я} / R_{я}$.

Определим постоянные времени якорной цепи $T_{я,п}$ и электромеханическую постоянную двигателя T_M :

$$T_{я,п} = \frac{L_{я,п}}{R_{я,п}} = \frac{0,00264}{0,292} = 0,0091 \text{ с}; \quad T_M = \frac{R_{я,п} \cdot J}{C^2} = \frac{0,292 \cdot 0,75}{1,30^2} = 0,130 \text{ с}.$$

Обозначив оператор дифференцирования $S = d / dt$, записываем для цепи возбуждения:

$$u_B = R_B \cdot (1 + T_B \cdot p) \cdot i_B.$$

С использованием переменных ЭДС двигателя e_d и потока двигателя Φ электромеханическую часть системы (6) можно представить в виде:

$$\begin{cases} u_{я} = i_{я} \cdot R_{я} + L_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + e_d, \\ M_d = C_M \cdot \Phi \cdot i_{я}, \end{cases}$$

где $e_d = \omega_{эл} \cdot L_{12} \cdot i_B = p_n \cdot \omega \cdot L_{12} \cdot i_B = C_M \cdot \Phi \cdot \omega$,

соответственно в операторном виде:

$$\begin{cases} u_{я} = R_{я} \cdot (1 + T_{я} \cdot p) \cdot i_{я} + e_d, \\ M_d = C_M \cdot \Phi \cdot i_{я}. \end{cases}$$

При постоянстве магнитного потока его можно исключить из уравнений:

$$\begin{cases} u_{я} = R_{я} \cdot (1 + T_{я} \cdot p) \cdot i_{я} + e_{д}, \\ M_{д} = C \cdot i_{я}, \\ e_{д} = C \cdot \omega. \end{cases} \quad (7)$$

Напряжение $u_{я}$ на якорной обмотке равно приложенному выходному напряжению питающего тиристорного преобразователя $u_{д}$, а ток якоря $i_{я}$ равен его выходному току $i_{д}$. Внешняя статическая характеристика преобразователя описывается уравнением (4). Обозначив $e_{п} = U_{д,0} \cdot \cos \alpha$, с учетом уравнения (5) получаем для электрической части двигателя:

$$i_{я} = \frac{1/R_{я,п}}{1 + T_{я,п} \cdot p} \cdot (e_{п} - e_{д}). \quad (8)$$

Из уравнения (6) получаем операторную запись для механической части привода:

$$\omega = \frac{1}{J \cdot p} (M_{д} - M_{с}). \quad (9)$$

В рамках проекта момент, создаваемый рабочим механизмом привода (момент сопротивления нагрузки), можно представить как

$$M_{с} = M_0 + M_1 + M_2 = M_0 + K_1 \cdot \omega + K_2 \cdot \omega^2,$$

где M_0, M_1, M_2 – моменты сухого трения, вязкого трения и вентиляторной составляющей нагрузки;

K_1, K_2 – коэффициенты вязкого трения и вентиляторной составляющей нагрузки.

Для рассматриваемого варианта

$$M_c = K_2 \cdot \omega^2 . \quad (10)$$

Коэффициент вентиляторной составляющей нагрузки для рассматриваемого варианта задания определяется из условия равенства в номинальном установившемся режиме моментов двигателя и сил сопротивления:

$$K_2 = \frac{M_N}{\omega_N^2} = \frac{182}{330^2} = 0,00167 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2.$$

Моменту сопротивления с учетом уравнения (5) поставим в соответствие статический ток $i_c = M_c / C$; для номинального режима его значение

$$I_{c,N} = \frac{M_N}{C} = \frac{182}{1,30} = 140 \text{ А} .$$

3.2. Тиристорный преобразователь

Подробно моделирование тиристорных преобразователей изложено в [4]. В упрощенной модели (см. рис. 1) силовая часть тиристорного преобразователя СЧТП рассматривается в виде регулируемой электродвижущей силы источника питания. В операторной форме с учетом (1) и (2)

$$e_{\Pi} = U_{d,0} \cdot \cos \alpha \cdot \exp(-p \cdot T_T) = K_B \cdot U_2 \cdot U_y' \cdot \exp(-p \cdot T_T), \quad (11)$$

где $U_y' = \cos \alpha$ — управляющий сигнал от СИФУ.

Для номинального режима $U_{y,N}' = \cos \alpha_N = \cos 23^\circ = 0,923$.

Система импульсно-фазового управления обеспечивает по заданному сигналу управления U_y формирование, синхронизацию и распределения импульсов управления. С учетом фильтрующих свойств входных цепей (по условию помехоустойчивости) СИФУ может быть представлена как инерционное звено первого порядка с коэффициентом

усиления K_{Π} и постоянной времени T_{Π} . Для СИФУ с вертикальной системой фазового управления постоянная времени находится в пределах $0,001 \dots 0,008$ с. Для рассматриваемого варианта принимается $T_{\Pi} = 0,004$ с.

Коэффициент усиления K_{Π} принимаем исходя из следующего. Предполагаем, что системы управления и регулирования реализованы на операционных усилителях с питанием ± 12 В. Гарантированный диапазон линейной работы операционных усилителей ± 10 В. Задаем номинальные значения управляющих сигналов, приведенных на рис. 3, на уровне ± 8 В:

$$U_{y,N} = U_{\text{э.т},N} = U_{\text{з.с},N} = U_{\text{о.т},N} = U_{\text{о.с},N} = 8,0 \text{ В.} \quad (12)$$

Для номинального режима $K_{\Pi} = U_{y,N}' / U_{y,N} = 0,923 / 8,0 = 0,115$.

Таким образом, СИФУ может быть представлена в операторном виде:

$$U_y' = \frac{K_{\Pi}}{1 + T_{\Pi} \cdot p} \cdot U_y. \quad (13)$$

4. Разработка структурной схемы объекта управления и проведение численного эксперимента

4.1. Структурная схема системы двигатель–нагрузка

Структурная схема представляет собой графическое описание, выполненное в виде соединений типовых динамических звеньев (блоков). Типовое звено изображается в виде прямоугольника, внутри которого записывается передаточная функция. При использовании инструментальных средств и пакетов, кроме типовых, возможно использование и других видов блоков.

Выполним на рис. 4 построение структурной схемы для системы двигатель–рабочий механизм рассматриваемого варианта (модель Д).

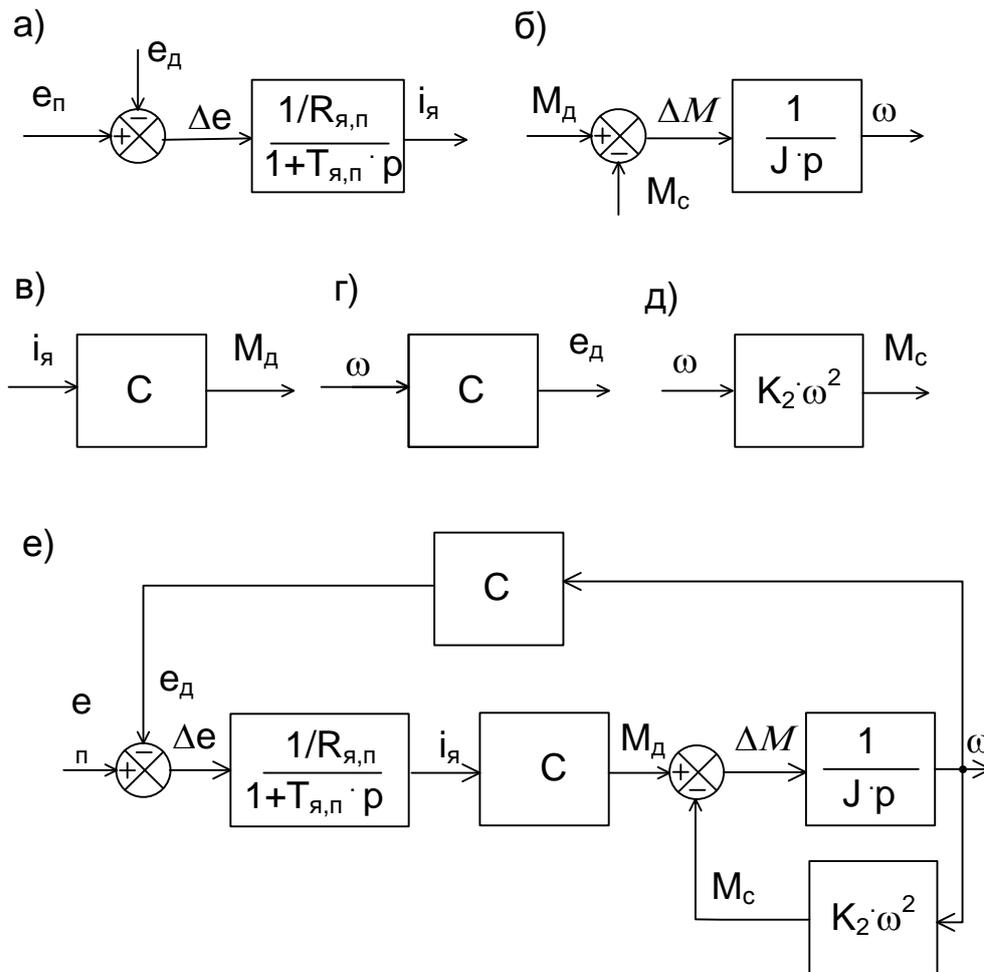


Рис. 4. Структурные схемы элементов объекта управления:

a – электрическая часть; *б* – механическая часть; элементы преобразования: ток – момент двигателя (*в*), скорость – ЭДС двигателя (*г*), скорость – момент сопротивления нагрузки (*д*); *e* – полная схема объекта управления (без тиристорного преобразователя)

Электрическая часть двигателя, согласно (8), представляет собой апериодическое звено, на входе которого выполняется вычитание (рис. 4,*a*). Механическая часть привода по выражению (9) дает интегрирующее звено (рис. 4,*б*). Блоки, вычисляющие по формулам (7) момент двигателя M_d и ЭДС двигателя e_d , представляются в виде безынерционных звеньев (рис. 4,*в* и 4,*г*). Момент сопротивления рабочего механизма (нагрузки), согласно (10), представляется в виде блока, обеспечивающего возведение входной переменной в квадрат (рис. 4,*д*).

Полная схема системы двигатель–рабочий механизм, согласно (6), с учетом упрощений данного варианта задания приведена на рис. 4,*e*. В этой схеме можно выделить два динамических звена: инерционное первого порядка (характеризует электрические процессы в обмотке якоря) и интегральное (характеризует механические процессы привода).

На рис. 5,а приведена схема, полученная путем преобразования исходной. Полученная схема представляет собой модель, которая может быть реализована соответствующими инструментальными средствами.

4.2. Численный эксперимент на компьютере

Под численным экспериментом понимают получение сведений об исследуемом объекте путем изучения поведения его модели, реализованной на персональном компьютере. На рис. 5,б показан пример реализации модели Д (системы двигатель–нагрузка) в пакете Simulink. Для удобства работы все моделирующие блоки имеют позиционные обозначения. Указаны также идентификаторы входных и выходных переменных.

$W_1(p)$ – аperiodический блок первого порядка соответствует электрической части двигателя;

$W_2(p)$ – интегратор – моделирует электромеханическое преобразование энергии двигателем;

$W_3(p)$ – пропорциональный блок – моделирует обратную связь с питанием двигателя по его ЭДС;

$W_4(p)$ – показательная функция – моделирует обратную связь по механической нагрузке с вентиляторной характеристикой.

При моделировании на ЭВМ необходимо задать численные значения параметров моделирующих блоков. Сравнивая обозначения, приведенные на схемах рис. 5, нетрудно определить выражения для вычисления этих параметров. Для блоков, содержащих интегрирующие части, потребуется также ввести начальные условия. Внешние по отношению к модели воздействия моделируются в виде возмущений. Подготовленные данные сводятся в таблицу и приводятся в пояснительной записке.

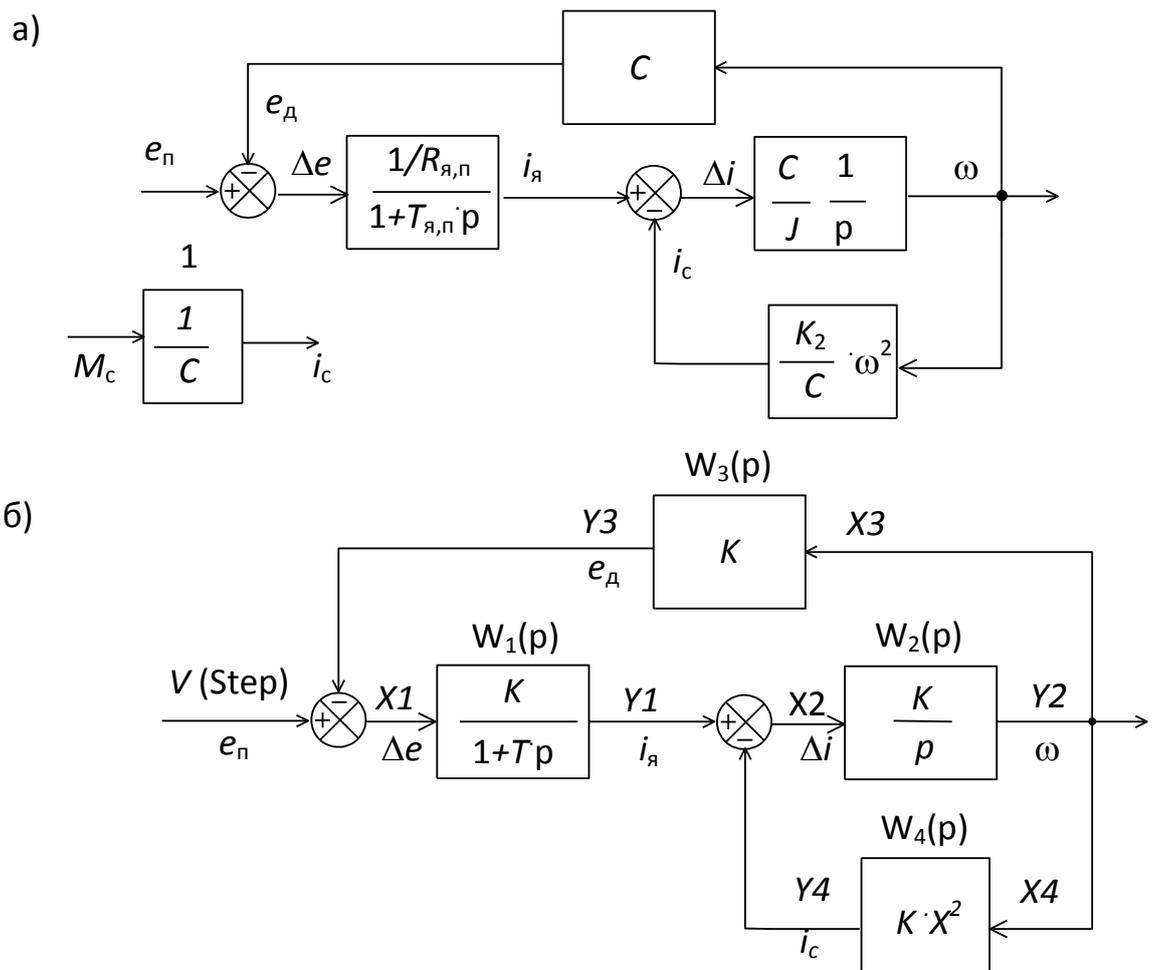


Рис. 5. Структурные схемы электромеханической части объекта управления в терминах динамических звеньев (а) и инструментального средства Simulink (б)

Принимаем для исследования режим пуска двигателя под нагрузкой при включении на полное напряжение. Это соответствует заданию внешнего воздействия V в виде ступенчатой функции и нулевым начальным условиям. Задаем следующие значения ее параметров: величина воздействия $A = E_{п} = 472$ В, время появления $t_0=0$ с. Шаг расчета $H=0,001$ с, время моделирования $T=1$ с. Шаг расчета и время моделирования в ходе экспериментов могут изменяться для получения приемлемого по условию устойчивости численного метода результата. При моделировании сохраняются графики в функции времени для тока $i_{я}(t)$, скорости $\omega(t)$, а также график скорости от тока $i_{я}(\omega)$ и файл с описанием модели.

На рис. 6 показаны результаты численного эксперимента для модели рассматриваемого двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Результаты численного эксперимента должны быть обработаны. При обработке определяются параметры точности моделирования тока i_a и скорости ω . При этом погрешности определяются по результату установившегося значения величины в численном эксперименте и номинальному значению параметра, так для тока якоря получаем:

$$\varepsilon_i = 100 (I_{a,y} - I_N) / I_N . \quad (14)$$

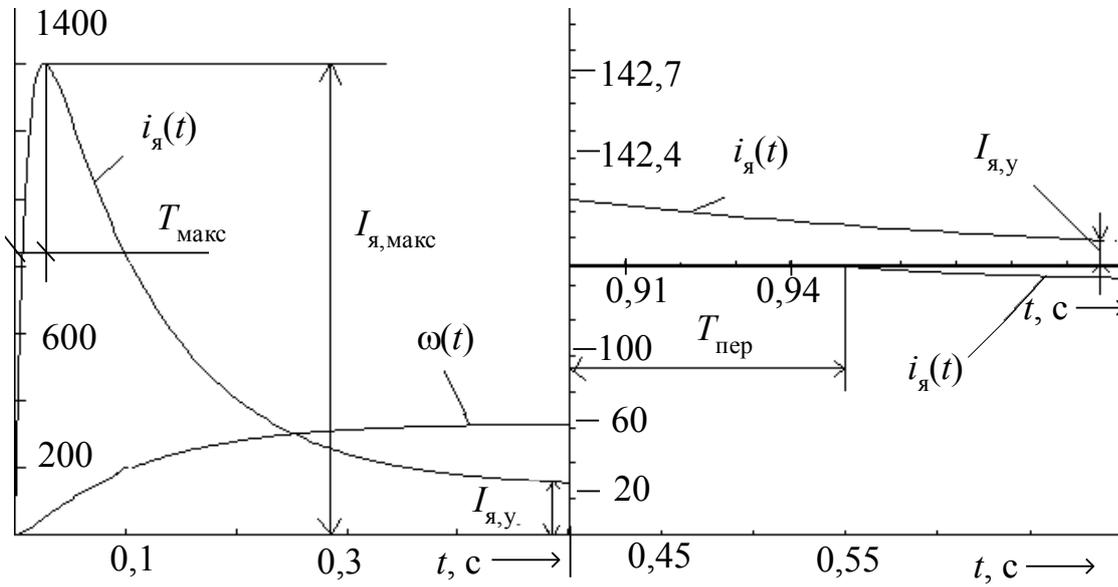
Для погрешностей, больших чем 0,5%, требуется найти источники их возникновения и, после пересчета параметров, повторить численные эксперименты.

Установившиеся значения тока якоря $I_{a,y}$ и скорости двигателя ω_y отмечают на расчетных статических характеристиках (см. рис. 2). По результатам моделирования определяют также время переходного процесса $T_{пер}$, время достижения максимума $T_{макс}$ и перерегулирование

$$\sigma_i = 100 (I_{a,макс} - I_{a,y}) / I_{a,y} . \quad (15)$$

Динамическую характеристику $\omega(M_d)$ рассчитывают по характеристике $i_a(\omega)$, получаемой в ходе численного эксперимента, и также наносят на соответствующую статическую характеристику.

а)



б)

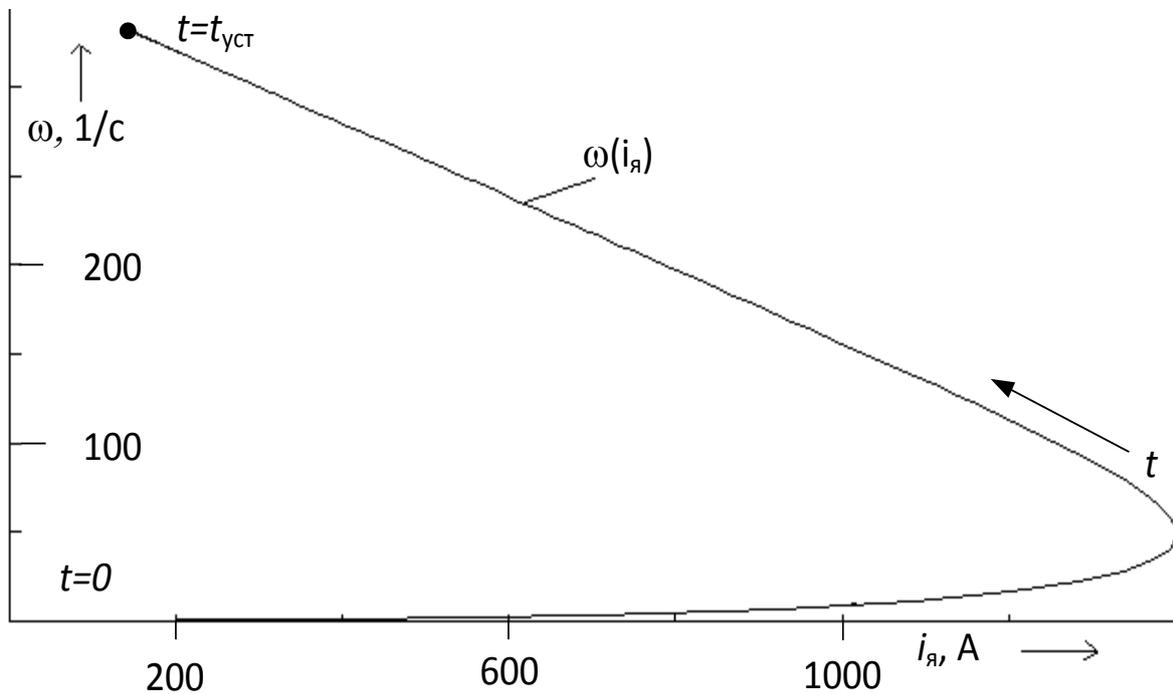


Рис.6. Результаты моделирования включения двигателя на постоянное напряжение:

а – временные диаграммы; б – диаграмма динамики; $I_{я,макс}$ – амплитуда тока якоря; $I_{я,у}$ – установившееся значение тока якоря; $T_{пер}$, $T_{макс}$ – длительность переходного процесса и время достижения максимума для тока якоря

5.3. Модель тиристорного преобразователя

На рис. 7 приведены структурные схемы для двух вариантов модели. Выбор варианта обуславливается соотношениями между параметрами T_{Π} и T_T , а также способом задания возмущения по питанию. На рис. 7 под линиями связи даны обозначения моделируемых величин.

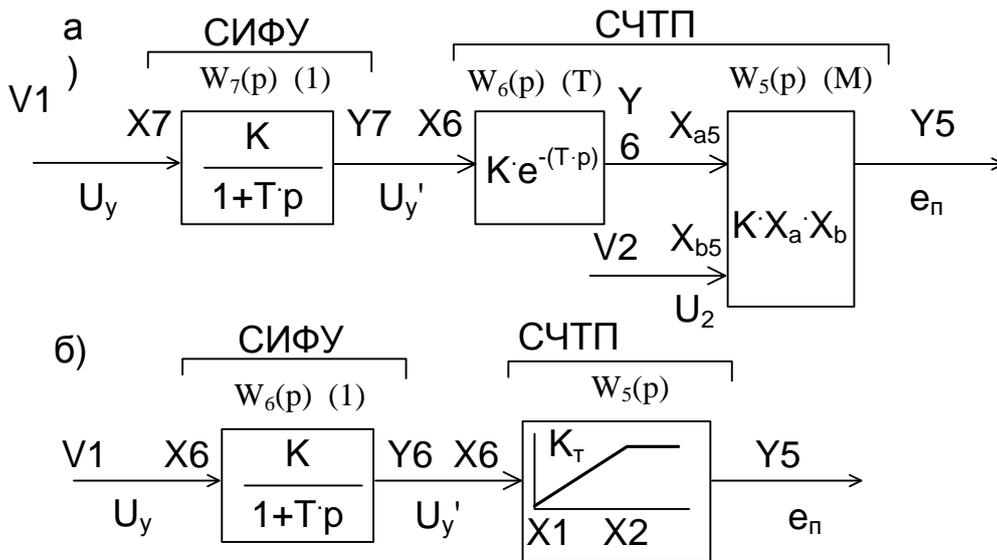


Рис. 7. Модели тиристорного преобразователя в пакете Simulink:

a – вариант с использованием блока перемножения; *b* – вариант с использованием блока ограничения; T , M , Sat – блоки модели СЧТП, I – модель СИФУ

Особенностью варианта рис. 7,*a* является подробное моделирование уравнений (11) и (13). Для блока $W_6(p)$ можно назначить $K=1$. В этом варианте не учтено существующее ограничение на максимальное значение ЭДС источника питания согласно (1). Для его учета достаточно дополнительно ввести блок ограничения. Для блока $W_7(p)$ принимается $K=K_{\Pi}$, $T=T_{\Pi}$.

В варианте на рис. 7,*b* введено ограничение по максимальному значению ЭДС (блок $W_5(p)$); для этого блока можно принять $K_T = K_B \cdot U_2$; $X_1 = 0$, $X_2 = 1$. В блоке $W_6(p)$ принято $K = K_{\Pi}$, $T = T_{T,\Pi} = T_T + T_{\Pi}$, что соответствует моделированию суммарного времени запаздывания тиристорного преобразователя.

После объединения модели тиристорного преобразователя с моделью двигателя необходимо исследовать полученную систему ТП–Д. Исследование проводится при задающем воздействии Vl в виде ступенчатой функции с временем появления $t_0 = 0$ и амплитудой $A = U_{y,N} = 8$. Графики в функции времени для всех величин и файлы с описанием моделей необходимо сохранить.

5. Синтез регуляторов электропривода

5.1. Определение параметров датчиков

Обычно датчики тока и скорости по условию обеспечения устойчивой работы имеют в своих выходных цепях фильтры. Примем, что постоянные времени этих фильтров значительно меньше постоянных времени входных фильтров СИФУ. Это позволяет считать датчики безынерционными. Коэффициенты передачи для датчика тока $K_{д,т}$ и датчика скорости $K_{д,с}$

$$K_{д,т} = U_{о,т,N} / I_N = 8 / 151 = 0,0531;$$

$$K_{д,с} = U_{о,с,N} / \omega_N = 8 / 330 = 0,0242.$$

5.2. Пропорционально-интегральные регуляторы

Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) получается при параллельном соединении пропорционального звена с коэффициентом усиления K и звена чистого интегрирования с постоянной времени $T_{и}$. Этот регулятор соответствует типовому изодромному звену. За счет наличия в этом регуляторе интегрирующего звена контур регулирования обеспечивает астатизм (отсутствие ошибки) по задающему воздействию. Его передаточная функция может быть записана различным образом:

$$W_{\text{пи}}(s) = K + \frac{1}{T_{и} \cdot p} = K \cdot \frac{1 + T_{э} \cdot p}{T_{э} \cdot p} = \frac{1}{T_{и} \cdot p} \cdot (1 + T_{э} \cdot p), \quad (16)$$

где $T_{э} = K \cdot T_{и}$ – эквивалентная постоянная ПИ-регулятора.

Передаточная функция (16) может быть представлена в виде последовательного соединения двух звеньев $1/(T_i \cdot p)$ и $(1 + T_\varepsilon \cdot p)$. Первое из них обеспечивает астатизм, второе компенсирует наиболее медленное аperiodическое звено объекта, позволяя повысить быстродействие контура.

5.3. Синтез регулятора тока

Под синтезом в рамках проекта понимается параметрический синтез, т.е. нахождение параметров регулятора, оптимизированного по какому-либо критерию. Для обеспечения астатизма (отсутствия статических ошибок) по заданию контур регулирования должен иметь хотя бы одно интегрирующее звено. В качестве оптимизирующего критерия выбирается максимальное быстродействие при приемлемом перерегулировании. Для повышения быстродействия регулятор оснащается звеньями, компенсирующими большие постоянные времени объекта.

Для упрощения аналитических выражений при вычислении параметров регулятора используют аппроксимацию объекта регулирования. В нашем случае структуру СИФУ рассматривают в виде одного инерционного звена (см. рис.7) с постоянной времени, учитывающей чистое запаздывание:

$$T = T_{T,\Pi} = T_T + T_\Pi = 0,0033 + 0,004 = 0,0073 \text{ с.}$$

Перемножитель в контуре регулирования будет представлен своим коэффициентом усиления K_B и напряжением сети U_2 . В целом тиристорный преобразователь представляется передаточной функцией $W_{T,\Pi}(p)$. Поскольку токовый контур быстродействующий, то принимается, что за время его отработки скорость двигателя Ω , а значит и его ЭДС e_d существенно не изменяются. Это позволяет при расчете внутреннего регулятора не учитывать обратную связь по ЭДС двигателя и представить двигатель упрощенной передаточной функцией $W_d'(p)$. Звено, представляющее датчик тока $W_{д.т}(p)$, при рассмотрении контура регулирования переносится в прямую цепь, и таким образом получается контур с единичной обратной связью. При указанных допущениях передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока

$$W_T(p) = W_{p,T}(p) \cdot W_{T,\Pi}(p) \cdot W_d'(p) \cdot W_{d,T}(p) = W_{p,T}(p) \cdot \frac{K_{\Pi} \cdot K_B \cdot U_2}{1 + T_{T,\Pi} \cdot p} \cdot \frac{1/R_{я,\Pi}}{1 + T_{я,\Pi} \cdot p} \cdot K_{d,T}, \quad (17)$$

где $W_{p,T}(p)$ – искомая передаточная функция регулятора тока.

ПИ-регулятор может компенсировать наибольшую постоянную времени контура и обеспечить астатизм по задающему воздействию:

$$W_{p,T}(p) = K_{p,T} \cdot \frac{1 + T_{p,T} \cdot p}{T_{p,T} \cdot p} = \frac{1}{T_p \cdot p} \cdot (1 + T_{p,T} \cdot p), \quad (18)$$

где $T_{p,T}$ – эквивалентная постоянная времени регулятора тока;

T_p – постоянная времени интегральной части регулятора тока;

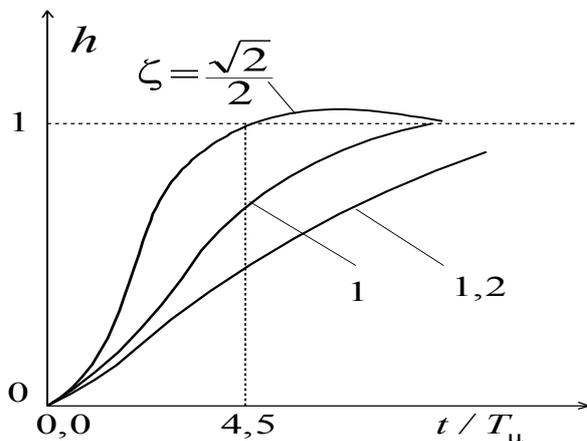
$K_{p,T} = T_{p,T} / T_p$ – коэффициент усиления регулятора тока.

Для компенсации наибольшей постоянной времени следует принять $T_{p,T} = T_{я,\Pi}$.

Наименьшая постоянная времени объекта $T_{T,\Pi}$ остается некомпенсированной и обеспечивает помехоустойчивость системы. Остается определить постоянную времени интегральной части регулятора тока T_p .

Передаточная функция замкнутого аппроксимированного контура регулирования тока при $T_{p,T} = T_{я,\Pi}$ тока представляет собой звено 2-го порядка:

$$\Phi_T(p) = \frac{W_T(p)}{1 + W_T(p)} = \frac{1}{1 + T_1 \cdot p + T_2^2 \cdot p^2} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \zeta \cdot T_2 \cdot p + T_1 \cdot T_{\mu} \cdot p^2}, \quad (19)$$



где T_1 – постоянная интегрирования контурного регулятора;

T_{μ} – эквивалентная малая постоянная времени контура регулирования;

$$T_2^2 = T_1 \cdot T_{\mu};$$

Рис. 8. Переходные характеристики для звена 2-го порядка

$$\zeta = T_1 / (2 \cdot T_2) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_\mu}} - \text{коэффициент демпфирования.}$$

В качестве критерия оптимизации используют характер демпфирования переходного процесса. Различают следующие степени демпфирования звеньев: сильное – $\zeta > 1$, нормальное $0,707 < \zeta < 1$ и слабое $0 < \zeta < 0,707$. Переходные характеристики звеньев приведены на рис. 8. Для настройки регулятора на оптимум по модулю (технический оптимум) [2], [6], [7] выбирают $\zeta = 0,707$. При этом $T_1 = 2 \cdot T_\mu$, $T_2 = \sqrt{2} \cdot T_\mu$, время первого достижения установившегося значения $4,7 T_\mu$, перерегулирование 4,3 %.

Из (19) можно получить передаточную функцию разомкнутого контура регулирования при настройке на технический оптимум:

$$W_T(p) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (1 + T_\mu \cdot p)} \quad (20)$$

В качестве эквивалентной малой постоянной времени для рассматриваемого варианта принимается некомпенсируемая малая постоянная времени объекта регулирования $T_\mu = T_{T,П}$. Из (17), (18) и (20) для настройки ПИ-регулятора на технический оптимум получаем:

$$T_{и} = T_p = 2 \cdot T_{T,П} \cdot K_{П} \cdot K_{В} \cdot U_2 \cdot K_{д.т} / R_{я,п} = 2 \cdot 0,0073 \cdot 0,115 \cdot 1,35 \cdot 380 \cdot 0,0531 / 0,292 = 0,158 \text{ с;}$$

$$T_{э} = T_{p,т} = T_{я,п} = 0,00911 \text{ с;}$$

$$K = K_{p,т} = T_{p,т} / T_p = 0,00911 / 0,158 = 0,0577$$

6.4. Исследование контура регулирования тока

Перед вводом параметров модели в моделирующую программу необходимо подготовить изображение структурной схемы. На схеме указываются типы блоков, обозна-

чения и численные значения их параметров, идентификаторы программных переменных и обозначения моделируемых величин.

При исследовании контура регулирования тока вначале следует провести численные эксперименты отдельно с регулятором тока. В качестве задающего воздействия можно использовать, например, две ступенчатые функции: одну с уровнем 8 В, подаваемую в момент $t_0 = 0,1$ с, другую с уровнем 16 В, подаваемую в момент $t_0 = 0,4$ с. Графики сохраняются.

Затем необходимо построить модель системы РТ–ТП–Д, включающую: регулятор тока, тиристорный преобразователь, двигатель и его нагрузку. Таким образом получается одноконтурная САР (без регулятора скорости). При построении этой модели полезно изучить рис. 9. Вначале проводят исследования на расчетных параметрах при ступенчатом задающем воздействии $U_{з.т.}$, затем при ступенчатом изменении U_2 . Изменением коэффициента усиления регулятора тока находят границу колебательной устойчивости. Фиксируются на бумажный носитель графики управляющих и выходных сигналов в функции времени, зависимость $i_{я}(\omega)$, а также описание модели. По результатам численного эксперимента вновь определяются погрешности моделирования тока $i_{я}$ и скорости ω , время переходного процесса и перерегулирование для тока и скорости. Зависимость $i_{я}(\omega)$ наносят на статическую скоростную характеристику двигателя. Графики с примерами исследования рассматриваемой модели приведены в каталогах demo_sim и demo_ewb.

6.5. Синтез регулятора скорости

Выбор типа регулятора скорости зависит от требований к САР. Если предъявляется требование астатизма только по задающему воздействию (задатчику скорости), то такое регулирование может обеспечить П-регулятор (пропорциональный регулятор). Система будет обладать статизмом (статической ошибкой) по отношению к моменту сопротивления. При проведении оптимизации используется критерий технического оптимума. При требовании обеспечить астатизм момента нагрузки необходимо применить ПИ-регулятор; его настройка производится на симметричный оптимум.

После настройки внутреннего контура тока он может быть аппроксимирован инерционным звеном $W_{T.a}(p)$ с постоянной времени $T_{T.a}$. Для этого необходимо по выражению (20) записать передаточную функцию замкнутого контура и отбросить величины второго порядка малости $2 T_{\mu}^2$:

$$W_{T.a}(p) = \Phi_T(p) = \frac{W_T(p)}{1 + W_T(p)} \cong \frac{1}{1 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot p} = \frac{1}{1 + T_{T.a} \cdot p}. \quad (21)$$

Постоянная времени аппроксимирующего звена для условий примера

$$T_{T.a} = 2 \cdot T_{\mu} = 2 \cdot T_{T,\Pi} = 2 \cdot 0,0073 = 0,0146 \text{ с.}$$

Передаточная функция разомкнутого внешнего контура скорости строится без учета влияния изменения ЭДС двигателя. Тогда передаточную функцию контура тока можно представить в виде:

$$W_c(p) = W_{p.c}(p) \cdot \frac{1}{K_{д.т}} \cdot \frac{1}{(1 + T_{T.a} \cdot p)} \cdot \frac{C}{J \cdot p} \cdot K_{д.с}, \quad (22)$$

где $W_{p.c}(p)$ – искомая передаточная функция регулятора скорости.

Синтез ПИИ-регулятора скорости. Передаточная функция ПИИ-регулятора скорости

$$W_{p.c}(p) = W_{\text{пи,с}}(p) = K_{p.c} \cdot \frac{1 + T_{p.c} \cdot p}{T_{p.c} \cdot p} = \frac{1 + T_{p.c} \cdot p}{T_c \cdot p}, \quad (23)$$

где $K_{p.c} = T_{p.c} / T_c$ – коэффициент усиления ПИИ-регулятора скорости;

$T_{p,c}$ – эквивалентная постоянная времени ПИ-регулятора скорости;

T_c – постоянная времени интегральной части ПИ-регулятора скорости.

При настройке системы регулирования на симметричный оптимум обеспечивается пере-регулирование 55% и, согласно [2], [3], уравнение разомкнутого контура этой системы

$$W_c(s) = \frac{(1 + 4 \cdot T_{\mu}' \cdot p)}{8 \cdot (T_{\mu}' \cdot p)^2 \cdot (1 + T_{\mu}' \cdot p)}, \quad (24)$$

где T_{μ}' – некомпенсируемая малая постоянная времени контура скорости.

Приравнявая (22) и (24) и принимая $T_{\mu}' = T_{т.а} = 0,0146$, получаем параметры ПИ-регулятора, обеспечивающего симметричный оптимум:

$$W_{\text{пи,с}}(p) = \frac{(1 + 4 \cdot T_{\mu}' \cdot p) \cdot K_{д,т} \cdot (1 + T_{т.а} \cdot p) \cdot J \cdot p}{8 \cdot (T_{\mu}' \cdot p)^2 \cdot (1 + T_{\mu}' \cdot p) \cdot C \cdot K_{д,с}} = \frac{1 + T_{p,c} \cdot p}{T_c \cdot p},$$

где $T_{p,c} = 4 \cdot T_{\mu}' = 4 \cdot 0,0146 = 0,0587$ с;

$T_c = 8 \cdot T_{\mu}'^2 \cdot C \cdot K_{д,с} / (K_{д,т} \cdot J) = 8 \cdot 0,0146^2 \cdot 1,3 \cdot 0,0242 / (0,0531 \cdot 0,75) = 0,00136$ с;

$K_{p,c} = T_{p,c} / T_c = 0,0587 / 0,00136 = 43,1$.

Синтез П-регулятора скорости. Передаточная функция П-регулятора

$$W_{p,c}(p) = W_{\text{п,с}}(p) = K_{p,c}.$$

При настройке на ртехнический оптимум аналогично контуру тока (20) можно записать для желаемой передаточной функции разомкнутого контура регулирования скорости:

$$W_c(p) = \frac{1}{\dots}. \quad (25)$$

$$2 \cdot T_{\mu}' \cdot p \cdot (1 + T_{\mu}' \cdot p)$$

Приравнивая (22) и (25), учитывая, что $T_{\mu}' = T_{т.а}$ и разрешая уравнение относительно $W_c(p)$, получаем:

$$W_{p,c}(p) = W_{п,c}(p) = \frac{K_{д.т} \cdot (1 + T_{т.а} \cdot p) \cdot J \cdot p}{2 \cdot T_{т.а} \cdot p \cdot (1 + T_{т.а} \cdot p) \cdot C \cdot K_{д.с}} = \frac{K_{д.т} \cdot J}{2 \cdot T_{т.а} \cdot C \cdot K_{д.с}}$$

Для рассматриваемого примера получаем:

$$K_{p,c} = 0,75 \cdot 0,0531 / (2 \cdot 0,0146 \cdot 1,3 \cdot 0,0242) = 43,1.$$

6.4. Исследование контура регулирования скорости

Формируется модель системы РС–РТ–ТП–Д, включающей регулятор скорости и модель одноконтурной САР с регулятором тока РТ–ТП–Д. Таким образом получаем двухконтурную САР стабилизации скорости. Схемы такой модели в терминах программы Simulink приведены на рис. 9, а в терминах пакета EWB – на рис. 10. На рис. 9,б приведен вариант выполнения регулятора скорости с большей устойчивостью к численным расчетам.

При исследовании двухконтурной САР вначале следует добиться получения номинальных параметров для установившегося процесса при ступенчатом задающем воздействии $U_{з.с}$. Затем проверяется поведение САР при заданных возмущающих воздействиях. Результаты и описание модели фиксируются на бумажном носителе. Примеры графиков приведены на рис. 11.

Необходимо выполнить оценку стабильности установившейся скорости Ω при следующих ступенчатых возмущающих воздействиях:

наброс нагрузки с $0,15 \cdot M_N$ до $0,5 \cdot M_N$;

сброс нагрузки с M_N до $0,5 \cdot M_N$;

наброс питающего напряжения с $U_{2,N}$ до $1,1 \cdot U_{2,N}$;

сброс питающего напряжения с $U_{2,N}$ до $0,9 \cdot U_{2,N}$.

По результатам моделирования вычисляются соответствующие изменения скорости, например для наброса нагрузки:

$$\Delta\omega_M = \frac{\omega_{0,15} - \omega_{0,5}}{\omega_{0,5}} \cdot 100 ,$$

где $\omega_{0,15}$, $\omega_{0,5}$ – установившиеся скорости при моментах сопротивления соответственно 15 и 50 % от номинального.

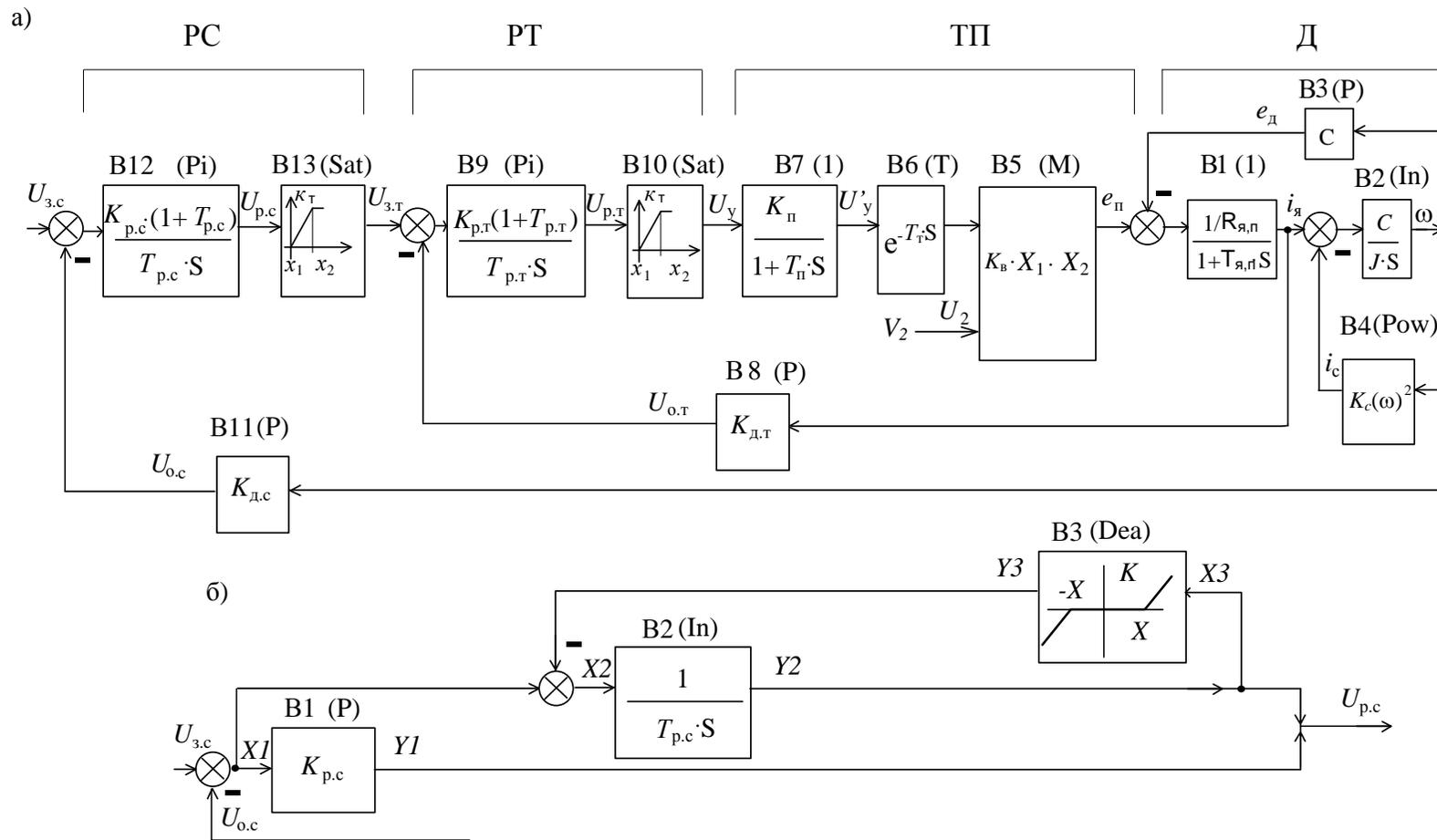


Рис. 9. Двухконтурная САР регулирования скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением:
 а – САР с настройкой на симметричный оптимум; б – вариант ПИ-регулятора с повышенной устойчивостью к расчётам

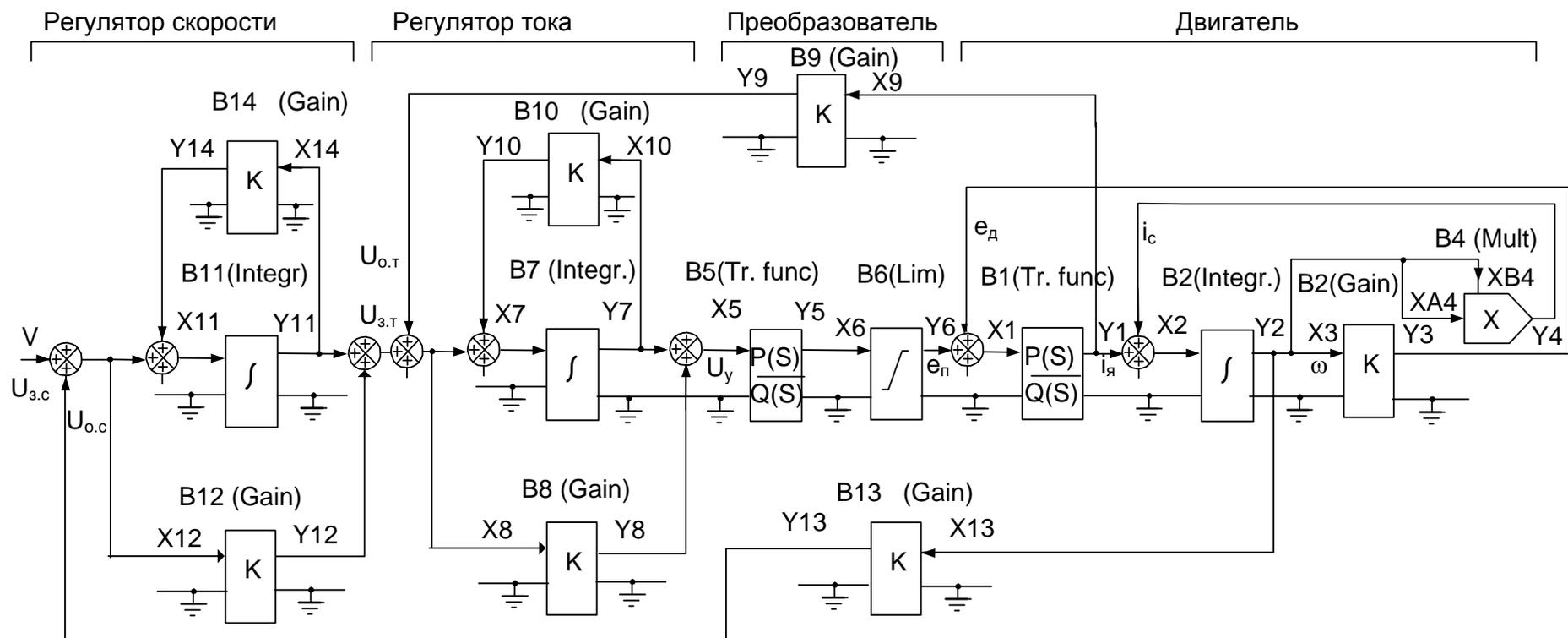


Рис. 10. Модель двухконтурной САР электропривода в пакете EWB

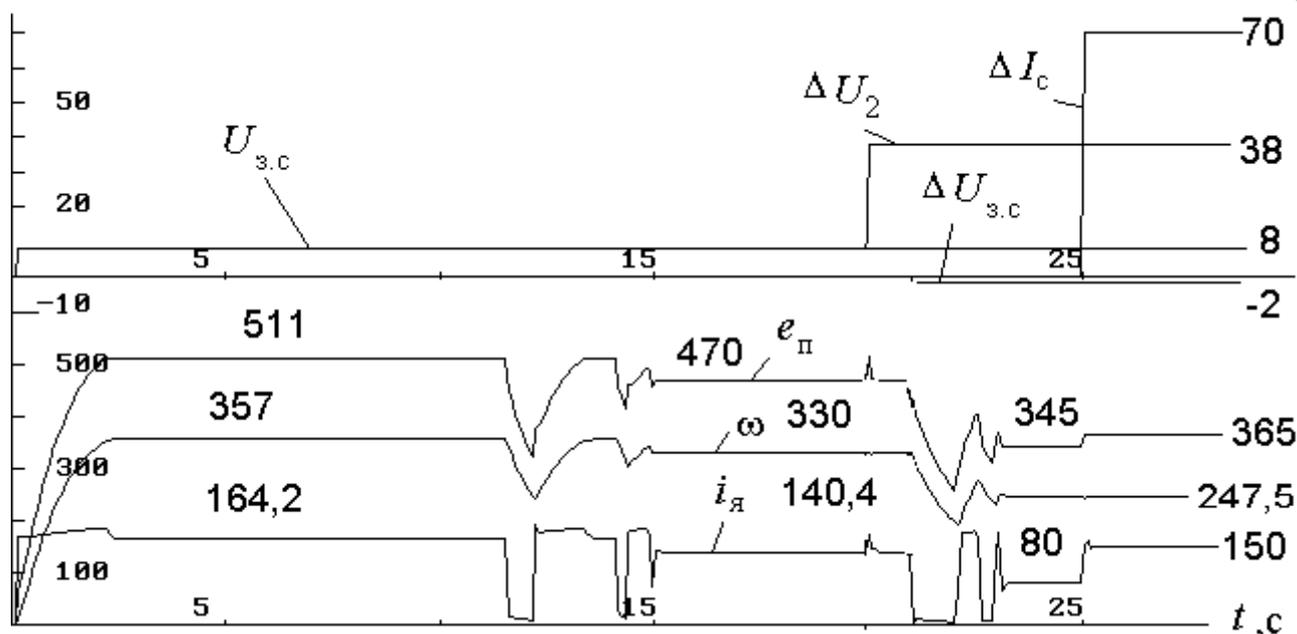


Рис. 11. Пример моделирования двухконтурной САР (пакет Simulink)

В заключительной части проекта необходимо привести результаты обработки всех численных экспериментов. По каждой модели (Д, ТП–Д и т.д.), приводятся погрешности моделирования установившихся величин, значения перерегулирования, времени достижения максимума и длительности переходных процессов для тока и скорости.

Список рекомендуемой литературы

1. **Чиликин М.Г. и др.** Теория автоматизированного электропривода: Учебное пособие для вузов/ М.Г. Чиликин, В.И Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
2. **Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами** / Под ред. В.И.Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.
3. **Решмин Б.И., Ямпольский Д.С.** Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
4. **Шипилло В.П.** Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
5. **Фишбейн В.Г.** Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1972. – 136 с.
6. **Справочник по автоматизированному электроприводу** / Под ред. В.А.Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

[1]. Весьма основательная книга. Подробно изложено описание механических подсистем (двух-трех массовых), дано пояснение формулы Уманского – Линвилля. Приведены структурные схемы механической части, двигателя постоянного тока, (в том числе с последовательным возбуждением), асинхронной и синхронной машины. Рассмотрено подчиненное регулирование, технический и симметричный оптимум, подробности настройки различных систем автоматического регулирования, анализ переходных процессов.

[2]. Классификация электроприводов по квадрантам, их структурная схема. Демпфирование и его выбор, оптимальное демпфирование. Определение некомпенсированной постоянной в сложных случаях.

[3]. Обоснование систем оптимального управления, модульного, симметричного оптимума, и оптимума на минимальную колебательность. Рассмотрены электроприводы прокатных станов, изложение очень близко к нормальному инженерному уровню, предполагает некоторое знакомство с САР

[4]. Формула Уманского-Линвилля, уравнения статики и динамики для двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя. Асинхронная машина сведена к двигателю постоянного тока.

[5] Подробно рассмотрена двухконтурная система управления на базе двигателя постоянного тока. Изложение доступное.

[6] Уравнение Лагранжа. Структурная схема и передаточные функции трехмассовой модели электропривода. Рассмотрены характеристики и структурные схемы двигателей постоянного тока при различных системах возбуждения, характеристики асинхронных и синхронных двигателей. Приведены сведения о преобразователях электрической энергии для электропривода и способах управления электроприводом. Даны структурные схемы автоматизированного управления электроприводом постоянного и переменного тока. Рассмотрены примеры использования электропривода для различных сфер применения.

Задание на проектирование

Бланк задания

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

“Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I”

Кафедра «Электроснабжение железных дорог»

ЗАДАНИЕ

на курсовой проект по дисциплине

"ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ"

на тему

"Исследование динамических процессов в системе автоматического регулиро-
вания (САР)"

Студенту Иванову И.И.

1. Исходные данные

Вариант: 1

Объект регулирования: коллекторный двигатель постоянного тока;

Вид возбуждения двигателя постоянного тока: независимое;

Номинальная мощность двигателя, кВт, $P_N=1,1$;

Номинальное напряжение питания, В, $U_N=110$;

Номинальная частота вращения, об/мин $n_N=1500$

Номинальный коэффициент полезного действия $\eta=72,5$

Сопротивление обмоток при 15°C, Ом:

якоря $R_{\text{я}}=0,52$

дополнительной $R_{\text{д}}=0,54$

возбуждения $R_{\text{в}}=295$

Индуктивность обмоток якоря, мГн $L_{\text{я}}=21$

Момент инерции якоря, кг·м² $J_{\text{я}}=0,012$

Число пар полюсов $p=2$

Параметры нагрузки двигателя ($M_c=K_0+K_1\cdot\omega+K_2\cdot\omega^2$):

момент сухого трения, $K_0=2,33$;

коэффициент вязкого трения, $K_1=0,015$;

коэффициент вентиляторной составляющей, $K_2=9e-005$;

коэффициент механической нагрузки, $K_J=J_H / J_{\text{я}}=0,3$;

Закон регулирования: стабилизация скорости вращения;

Параметры ступенчатых возмущающих воздействий на входе:

задатчика скорости $\pm 0,1 * \omega_H$;

задатчика тока $\pm 0,1 * I_{\text{я,н}}$;

питающего напряжения. $\pm 0,1 * U_n$;

момента сопротивления. $\pm 0,5 * M_n$;

Инструментальное средство исследования САР: MATLAB-Simulink.

2. Содержание работы

- 2.1. Определение параметров, статических характеристик и ограничений объекта регулирования.
- 2.2. Разработка функциональной схемы САР.
- 2.3. Создание математического описания системы.
- 2.4. Разработка структурной схемы САР и определение параметров регуляторов.
- 2.5. Исследование средствами моделирующего пакета динамических свойств:
 - объекта регулирования и его элементов;
 - регулятора;
 - одноконтурной САР;
 - двухконтурной САР.
- 2.6. Оценка устойчивости САР и качества процессов регулирования.

3. Состав оформленной работы

- 3.1. Пояснительная записка
- 3.2. Структурная схема САР с параметрами и ограничениями.
- 3.3. Статические характеристики объекта регулирования.
- 3.4. Машинограммы, иллюстрирующие динамические свойства САР.

4. Список рекомендуемых источников

1. **Теоретические основы управления в электроэнергетике.** Методические указания к курсовому проекту. Разработали: А.Т. Бурков, А.И. Бурьяноватый, С.Н. Полторак, А.П. Самонин, В.Г. Жемчугов. – СПб: ПГУПС, 2000. – 32 с.
 2. **Основы автоматического управления.** Учебное пособие Бурьяноватый А.И., Кузьмин С.В., Саввов В.М., Шатнев О.И. – СПб: ПГУПС, 2011. – 101 с
 3. **Мирошник И.В.** Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.
 4. **Клиначёв Н. В.** Теория систем автоматического регулирования и управления: Учебно-методический комплекс. - Offline версия 1.7. - Челябинск, 2002. - 543 файла, ил. Режим доступа: http://vissim.nm.ru/tau_lec.html http://vissim.nm.ru/tau_knv.zip
http://www.vissim.nm.ru/tau_knv.zip.
 5. **Основы теории управления.** Часть 1 (конспект лекций). Автор: Кривошеев В.П., редактор: Ильин А.А. Владивостокский государственный университет экономики и сервиса. Режим доступа http://abc.vvsu.ru/Books/l_osnteor1/page0008.asp#xex15
 6. **Никульчев Е.В.** Практикум по теории управления в среде MATLAB: Учебное пособие. – М.: МГАПИ, 2002. – 88 с.; Режим доступа: http://window.edu.ru/window/catalog?p_rid=69666
- Задание выдал:

Примечания. 1. Проект должен быть представлен на машинном носителе и в распечатанном виде.

Варианты исходных данных к курсовому проекту

| Вар | P_N | U_N | ωn | Mn | $k0$ | $k1$ | $k2$ | kj | n_N | n_{max} | η | R_α | R_δ | R_σ | L_α | J_α | ρ |
|-----|------------|----------|------------|-------|-------|-----------|---------------|------|---------------|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|-------------------------|----------|
| | <i>кВт</i> | <i>В</i> | рад/с | Н*м | Н*м | Н*м/рад/с | Н*м/(рад/с)^2 | | <i>об/мин</i> | <i>об/мин</i> | | <i>Ом</i> | <i>Ом</i> | <i>Ом</i> | <i>мГн</i> | <i>кг*м²</i> | |
| 1 | 1,1 | 110 | 157 | 7,0 | 2,33 | 0,015 | 0,00009 | 0,3 | 1500 | 4000 | 72,5 | 0,520 | 0,540 | 295 | 21,0 | 0,012 | 2 |
| 2 | 1,1 | 220 | 157 | 7,0 | 2,33 | 0,015 | 0,00009 | 0,6 | 1500 | 4000 | 74,0 | 2,200 | 1,570 | 81 | 83,0 | 0,012 | 2 |
| 3 | 2,2 | 110 | 314 | 7,0 | 2,33 | 0,007 | 0,00002 | 0,9 | 3000 | 4000 | 79,5 | 0,160 | 0,146 | 295 | 5,7 | 0,012 | 2 |
| 4 | 2,2 | 220 | 330 | 6,7 | 2,22 | 0,007 | 0,00002 | 1,2 | 3150 | 4000 | 81,0 | 0,520 | 0,510 | 81 | 21,0 | 0,012 | 2 |
| 5 | 8,5 | 110 | 84 | 101,5 | 33,82 | 0,404 | 0,00482 | 1,5 | 800 | 3000 | 81,0 | 0,047 | 0,029 | 17 | 1,6 | 0,250 | 4 |
| 6 | 8,5 | 220 | 84 | 101,5 | 33,82 | 0,404 | 0,00482 | 1,8 | 800 | 2500 | 82,0 | 0,188 | 0,116 | 61 | 6,4 | 0,250 | 4 |
| 7 | 8,5 | 440 | 84 | 101,5 | 33,82 | 0,404 | 0,00482 | 2,1 | 800 | 1850 | 82,0 | 0,796 | 0,506 | 61 | 25,5 | 0,250 | 4 |
| 8 | 13,0 | 110 | 117 | 110,8 | 36,95 | 0,315 | 0,00269 | 2,4 | 1120 | 3500 | 84,0 | 0,026 | 0,016 | 17 | 0,9 | 0,250 | 4 |
| 9 | 13,0 | 220 | 117 | 110,8 | 36,95 | 0,315 | 0,00269 | 2,7 | 1120 | 3000 | 85,0 | 0,106 | 0,061 | 61 | 3,6 | 0,250 | 4 |
| 10 | 13,0 | 440 | 105 | 124,1 | 41,38 | 0,395 | 0,00377 | 3 | 1000 | 2500 | 84,5 | 0,485 | 0,303 | 61 | 16,8 | 0,250 | 4 |
| 11 | 22,0 | 220 | 157 | 140,1 | 46,69 | 0,297 | 0,00189 | 0,3 | 1500 | 3500 | 87,5 | 0,047 | 0,029 | 53 | 1,6 | 0,250 | 4 |
| 12 | 22,0 | 440 | 157 | 140,1 | 46,69 | 0,297 | 0,00189 | 0,6 | 1500 | 3500 | 87,5 | 0,246 | 0,130 | 61 | 8,1 | 0,250 | 4 |
| 13 | 36,0 | 220 | 230 | 156,3 | 52,09 | 0,226 | 0,00098 | 0,9 | 2200 | 3500 | 88,5 | 0,026 | 0,016 | 46 | 0,9 | 0,250 | 4 |
| 14 | 36,0 | 440 | 230 | 156,3 | 52,09 | 0,226 | 0,00098 | 1,2 | 2200 | 3500 | 89,5 | 0,106 | 0,061 | 46 | 3,6 | 0,250 | 4 |
| 15 | 60,0 | 440 | 330 | 181,9 | 60,63 | 0,184 | 0,00056 | 1,5 | 3150 | 3500 | 90,5 | 0,047 | 0,029 | 35 | 1,6 | 0,250 | 4 |

Приложение

«Пример разработки модели электропривода постоянного тока в пакете MatLab»

Исходные данные, представленные в m-файле, показаны на рис. П.1.

```
% ТАУ. КП. ФЕВРАЛЬ 2013 ПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА. БУРЬЯНОВАТЫЙ А.И.
%-----
% ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ В SIMULINK:
%     ВЫЗВАТЬ БЛОК "ПОДСИСТЕМА"
%     МАСКИРОВАТЬ ЕГО
%     ПРИ РЕДАКТИРОВАНИИ МАСКИ ЗАДАТЬ: Icon & Ports disp('PARAMETRY')
%     ПРИ ЗАДАНИЕ Block Properties: ЗАДАТЬ В Callbacks: OpenFcn aib_.m
%-----
disp('-----begin -----')
clc; date

disp('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')
Pn=60E3      % НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ, ВТ
Un=440      % НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ, В
nn=3150     % НОМИНАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ, ОБ/МИН
nmax=3500   % МАКСИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ, ОБ/МИН
kpd=0.905   % КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ
%kpd=1      % ИДЕАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ
Ra=0.047    % АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ, ОМ
Rd=0.029    % АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ, ОМ
%Rv=61.6    % АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОБМОТКИ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ, ОМ
La=1.6E-3   % ИНДУКТИВНОСТЬ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ, ГН
Ja=0.25     % МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ДВИГАТЕЛЯ, КГ*М*М
pn=2        % ЧИСЛО ПАР ПОЛЮСОВ ОБМОТКИ ДВИГАТЕЛЯ
            % НЕКЛЕПАЕВ
U2=400      % НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ СЕТИ, В: 115, 120, 208, 230, 400, 690
usum=0.15   % НАПРЯЖЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (ПИТАЮЩАЯ СЕТЬ + ТРАНСФОРМАТОР)
Udn=460     % НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ, В: 115, 230, 460, 690
Idn=160     % НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК ВЫПРЯМИТЕЛЯ, А : 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5
            %16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250,
315, 400, 500,
%pause
A=0.5       % КОЭФФИЦИЕНТ НАКЛОНА ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ:
0.5, 0.26
fc=50       % ЧАСТОТА ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ, ГЦ
m=6         % ЧИСЛО ПУЛЬСАЦИЙ ВЫПРЯМИТЕЛЯ
Lp=0        % ИНДУКТИВНОСТЬ СГЛАЖИВАЮЩЕГО РЕАКТОРА, ГН
Kn=2        % КОЭФФИЦИЕНТ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
K0=0        % КОЭФФИЦИЕНТ ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКИ, Н
K1=0        % КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ, Н/(РАД/С)
Kwn2=Mn/wn^2;
K2=Kwn2     % КОЭФФИЦИЕНТ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ НАГРУЗКИ, Н/(РАД/С)^2
Tp =0.004   % ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ СИФУ, С: 0,001...0,008
Uyn=8       % НАПРЯЖЕНИЕ ВЫХОДНОЕ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА, В
Uym=10      % МАКСИМАЛЬНОЕ ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ, В
% pause;
```

Рис. П.1 Исходные данные проекта

Код для расчета параметров системы стабилизации скорости электропривода постоянного тока в среде MATLAB приведен на рис.П.2.

```

disp ('НОМИНАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ДВИГАТЕЛЯ:')
wn=pi*nn/30
Mn=Pn/wn
In=Pn/(Un*kpd)
Rn=Un/In
Rasum=Ra+Rd

disp ('ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ:')
Kv=3*1.41/pi % КОЭФФИЦИЕНТ ВЫПРЯМЛЕНИЯ
Ud0=Kv*U2 % ШЕСТИПУЛЬСОВАЯ МОСТОВАЯ СХЕМА
Rp=0.5*usum*Udn/Idn % ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ, ОМ
Tt=1/(6*fc) % ПОСТОЯННАЯ ЧИСТОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЯ, С
wkr=m*pi*fc % КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ, РАД/С
Rap=Rasum+Rp % СУММАРНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯКОРЬ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ОМ
Lasum=0.6*(Un/(In*pn*wn)); % СУММАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ, ГН
Lap=Lasum+Lp % СУММАРНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ, ГН

disp ('РАБОЧИЙ МЕХАНИЗМ:')
Jn=Ja*Kn % МОМЕНТ ИНЕРЦИИ РАБОЧЕГО МЕХАНИЗМА, КГ*М*М
J=Ja+Jn

disp (' ВЫПРЯМИТЕЛЬ И ЕГО СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ:')
alphan=acos((Un+In*Rp)/Ud0)*180/pi % УГОЛ НОМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ, ГРАД
Uyn1=cos(alphan*pi/180) % КОЭФФИЦИЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ ДЛЯ
НОМИН.РЕЖИМА (Cos(an))
Ep=Ud0*Uyn1 % ЭДС ВЫПРЯМИТЕЛЯ (НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ НУЛЕВОЙ
НАГРУЗКИ, Ep=UD0a), В
Ud0a=Un+In*Rp % ЭДС ВЫПРЯМИТЕЛЯ (НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ НУЛЕВОЙ
НАГРУЗКИ, Ep=UD0a), В
Ed=Un-In*Rasum % ЭДС ДВИГАТЕЛЯ (НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ НУЛЕВОЙ
НАГРУЗКИ, Ed=Ud(I=0) ), В
C=Ed/wn % ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ ДВИГАТЕЛЯ
(ЧЕРЕЗ ЭДС), ВВ
C1=Mn/In % ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ ДВИГАТЕЛЯ
(ЧЕРЕЗ МОМЕНТ), ВВ
%pause

disp ('МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ:')
Ic=Mn/C % ТОК, СООТВЕТСТВУЮЩИЙ НОМИНАЛЬНОМУ МОМЕН-
ТУ, А
Tap=Lap/Rap % ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ, С
Tm=Rap*J/C^2 % ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ
ДВИГАТЕЛЯ, С

disp ('МОДЕЛЬ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С СИФУ:')
Kp=Uyn1/Uyn % КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ СИФУ
Ttp=Tt+Tp_ % ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ СОВМЕСТНО
С СИФУ, С
Kt=Ud0 % КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЯ
(Ud=Ud0*Uy1)
Kdt=Uyn/In % КОЭФФИЦИЕНТ ДАТЧИКА ТОКА
Kdc=Uyn/wn % КОЭФФИЦИЕНТ ДАТЧИКА ТОКА

disp ('МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ТОКА:')
Tp=2*Ttp*Kp*Kv*U2*Kdt/Rap % Тп - ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ИНТЕГРАЛЬНОГО
ЗВЕНА ПИ-РЕГУЛЯТОРА (ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ФОРМА)
Tpt=Tap % Тэ - ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ
ПИ-РЕГУЛЯТОРА (ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ФОРМА)

```

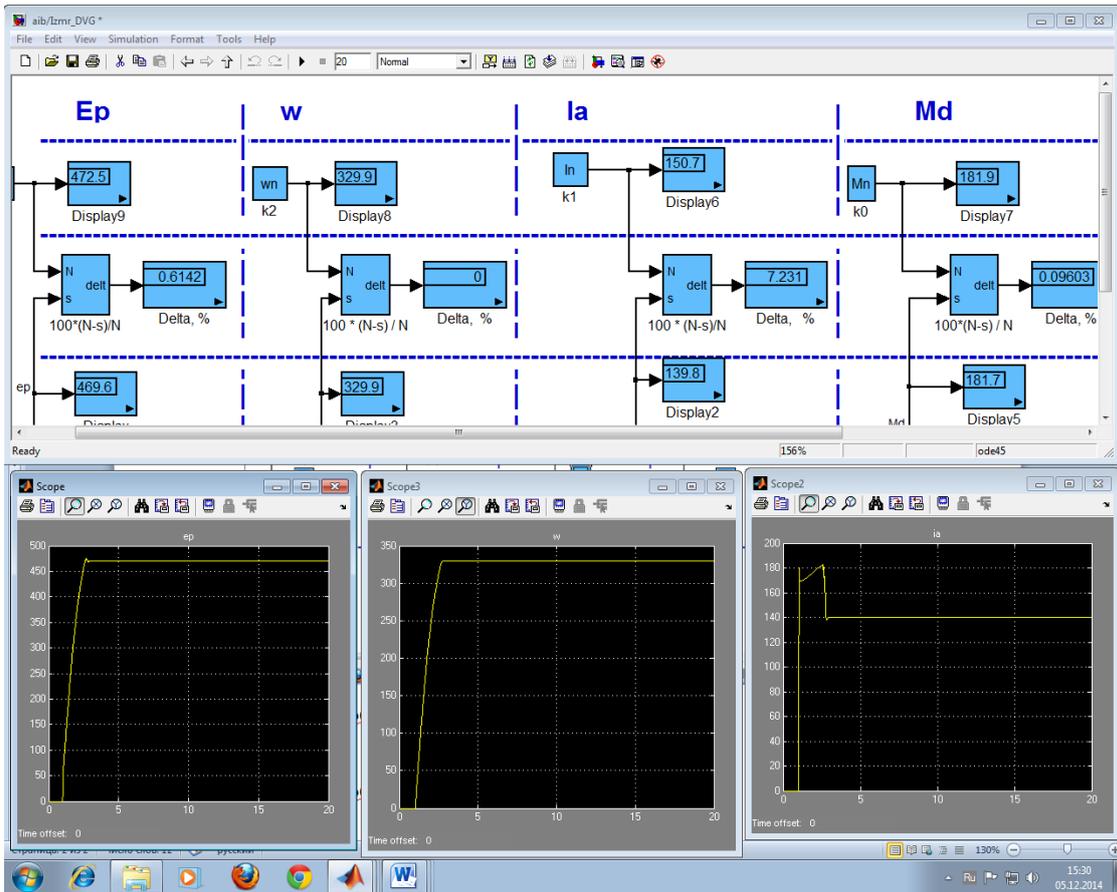



Рис. П.4. Блок измерений модели

Общий вид модели электропривода постоянного тока дан на рис. П.5.

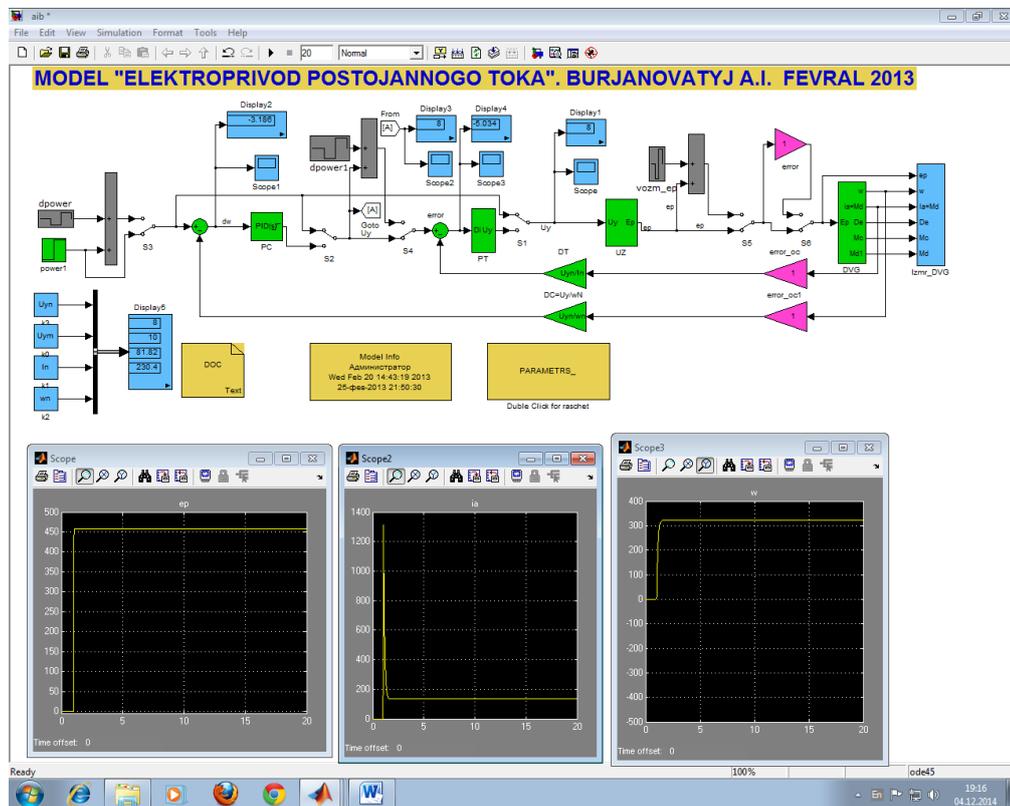


Рис. П.5. Общий вид модели электропривода постоянного тока

