

## СОДЕРЖАНИЕ

<a href="#">Задание на курсовую работу и исходные данные.....</a>	<a href="#">3</a>
<a href="#">Функциональная схема электропривода по системе ТП-ДПТ с подчиненным регулированием...3</a>	<a href="#">3</a>
<a href="#">Структурная схема электропривода по системе ТП-ДПТ с подчиненным регулированием.....4</a>	<a href="#">4</a>
<a href="#">Передаточные функции звеньев системы автоматического регулирования (САР).....5</a>	<a href="#">5</a>
<a href="#">    Определение передаточной функции ДПТ независимого возбуждения.....5</a>	<a href="#">5</a>
<a href="#">    Передаточная функция тиристорного преобразователя.....8</a>	<a href="#">8</a>
<a href="#">    Коэффициенты передачи датчиков тока и скорости.....8</a>	<a href="#">8</a>
<a href="#">    Передаточные функции регуляторов тока и скорости.....8</a>	<a href="#">8</a>
<a href="#">        Определение передаточной функции регулятора тока .....9</a>	<a href="#">9</a>
<a href="#">        Определение передаточной функции регулятора скорости.....9</a>	<a href="#">9</a>
<a href="#">Моделирование САР ТП-ДПТ в среде MATLAB/Simulink.....10</a>	<a href="#">10</a>
<a href="#">    Анализ результатов моделирования САР.....17</a>	<a href="#">17</a>
<a href="#">Список литературы.....18</a>	<a href="#">18</a>

## Задание на курсовую работу и исходные данные

Для электропривода установки, содержащей двигатель постоянного тока независимого возбуждения, разработать систему автоматического регулирования (САР), выполненную по принципу подчиненного регулирования, обеспечивающую работу привода с постоянной угловой скоростью  $\omega_{\text{зад}}$ . Для этих целей необходимо:

1. составить функциональную схему электропривода по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (параметры двигателя представлены в приложении 1);
2. на основании функциональной схемы разработать структурную схему электропривода;
3. определить передаточные функции всех звеньев САР;
4. осуществить настройку контуров регулирования, обеспечивающую: максимальную точность САР (для нечетных вариантов) и максимальное быстродействие САР (для четных вариантов);
5. построить модель электропривода в среде Matlab (приложение Simulink);
6. получить графики переходных процессов в различных режимах работы электропривода (пуск, наброс нагрузки 20%, изменение задания по скорости);
7. по полученным переходным характеристикам дать оценку качества регулирования.

№ п/п	Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Номинальная частота вращения об/мин	Момент инерции кг·м <sup>2</sup>
5	П-62У4	8	220	43	1000	0,16

КПД машины принимаем равным 0,86, а угловую скорость задания на уровне 80% от номинальной для двигателя.

## Функциональная схема электропривода по системе ТП-ДПТ с подчиненным регулированием

Изображение типовой функциональной схемы системы ТП-ДПТ с подчиненным регулированием представлено на рисунке 1. Основу силовой части схемы составляют тиристорный преобразователь (ТП) и двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ). В состав системы автоматического управления преобразователем и двигателем входят следующие элементы:

КА – командоаппарат, предназначенный для формирования сигнала задания по скорости

ЗИ – задатчик интенсивности, обеспечивающий апериодическое или линейное изменение сигнала задания;

РС – регулятор скорости, обеспечивающий определенный закон влияния на систему скоростного сигнала от двигателя;

РТ – регулятор тока, обеспечивающий определенный закон влияния на систему токового сигнала от двигателя;

ДТ – датчик тока двигателя;

ТГ – тахогенератор, выполняющий роль линейного электромеханического преобразователя скорости вращения вала двигателя в сигнал напряжения;

СИФУ – система импульсно-фазового управления, предназначенная для формирования управляющих импульсов для силовых ключей (тиристоров), входящих в состав ТП.

ДПТ механически нагружен рабочим механизмом (РМ).

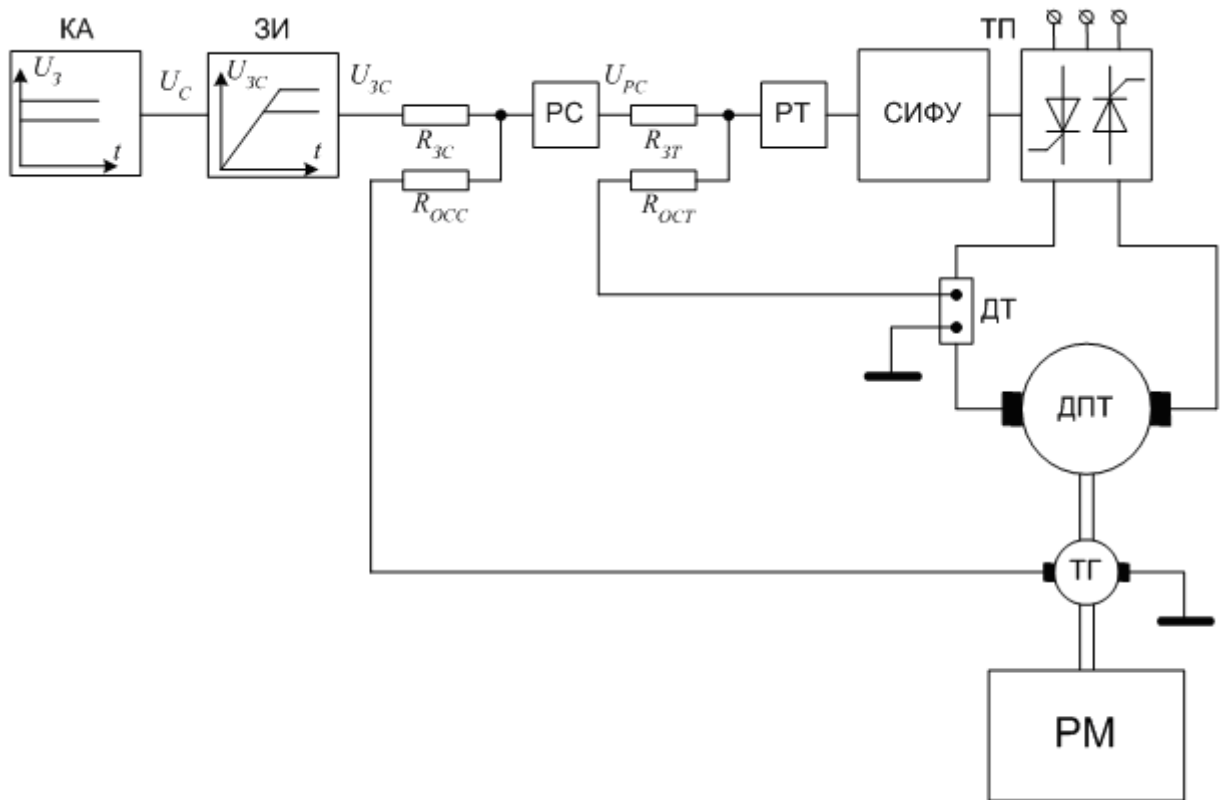


Рисунок 1. Функциональная схема электропривода по системе ТП-ДПТ с подчиненным регулированием.

## Структурная схема электропривода по системе ТП-ДПТ с подчиненным регулированием

На основании представленной на рисунке 1 функциональной схемы электропривода можно построить его структурную схему, отображающую схематически элементы системы в виде связанных блоков, обладающих определенными математическими свойствами. Как правило, структурные схемы предназначены для анализа динамических режимов работы электропривода.

На основании выше сказанного структурная схема электропривода по системы ТП-ДПТ с подчиненным регулированием будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

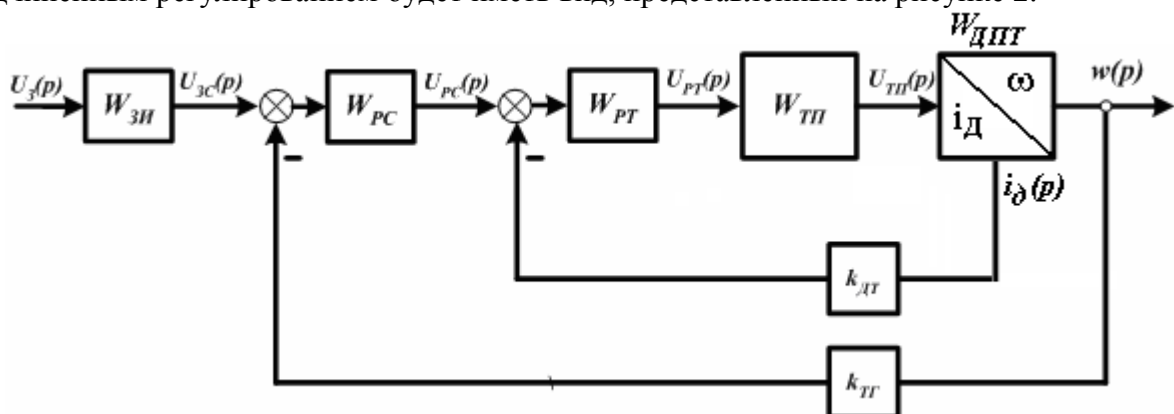


Рисунок 2. Структурная схема электропривода по системе ТП-ДПТ с подчиненным регулированием.

На структурной схеме (рис. 2) изображены следующие звенья, соответствующие элементам функциональной схемы:

- $W_{ЗИ}$  – передаточная функция ЗИ;
- $W_{РС}$  – передаточная функция РС;
- $W_{РТ}$  – передаточная функция РТ;
- $W_{ТП}$  – передаточная функция ТП;
- $W_{ДПТ}$  – передаточная функция ДПТ по угловой скорости;
- $k_{дт}$  – коэффициент передачи датчика тока;
- $k_{дс}$  – коэффициент передачи датчика скорости.

Сигналы, действующие в заданной системе электропривода, представлены в виде операторных функций на структурной схеме:

- $U_3(p)$  – операторная функция сигнала напряжения задания;
- $U_{зс}(p)$  – операторная функция сигнала напряжения на выходе ЗИ;
- $U_{рс}(p)$  – операторная функция сигнала напряжения на выходе РС;
- $U_{рт}(p)$  – операторная функция сигнала напряжения на выходе РТ;
- $U_{тп}(p)$  – операторная функция сигнала напряжения на выходе ТП;
- $i_d(p)$  – операторная функция сигнала тока двигателя;
- $\omega(p)$  – операторная функция сигнала угловой скорости на валу двигателя.

Очевидно, что ДПТ представляет собой в математическом отношении сложную структуру, состоящую из двух звеньев: токового и механического, по этому блок  $W_{ДПТ}$  имеет два выхода.

## Передаточные функции звеньев системы автоматического регулирования (САР)

### Определение передаточной функции ДПТ независимого возбуждения

Двигатель постоянного тока структурно состоит из двух звеньев:

1. токовое звено;
2. механическое звено.

Для определения передаточной функции токового звена ДПТ запишем уравнение второго закона Кирхгофа применительно к цепи якоря двигателя:

$$U_a(t) = I_a(t)R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_a(\omega) \quad (1)$$

где  $U_a$  – напряжение, прикладываемое к якорной цепи;

$I_a$  – ток в цепи якоря;

$R_a$  – активное сопротивление якорной цепи;

$L_a$  – индуктивность якорной цепи;

$E_a$  – внутренняя э.д.с. двигателя, которая возникает в обмотке якоря при его вращении в магнитном поле полюсов.

$$E_a(\omega) = c_e \cdot \omega(t) \quad (2)$$

где  $c_e$  – электромеханическая постоянная ДПТ.

Запишем уравнение (1) в следующем виде:

$$U_a(t) - c_e \cdot \omega(t) = I_a(t)R_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} \quad (3)$$

которое в операторной форме будет иметь вид:

$$U_a(p) - c_e \cdot \omega(p) = R_a I_a(p) + L_a p I_a(p) \quad (4)$$

$$U_a(p) - c_e \cdot \omega(p) = I_a(p) \cdot (R_a + L_a p) \quad (5)$$

Отсюда

$$\frac{I_a(p)}{U_a(p) - c_e \cdot \omega_{\text{об}}(p)} = \frac{1}{(R_a + L_a p)} \quad (6)$$

$$\frac{I_a(p)}{U_a(p) - c_e \cdot \omega_{\text{об}}(p)} = \frac{1/R_a}{(1 + T_a p)} \quad (7)$$

где  $T_a = \frac{L_a}{R_a}$  – постоянная времени якорной обмотки ДПТ.

Таким образом, токовое звено ДПТ представлено апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{T3}(p) = \frac{I_a(p)}{U_a(p) - c_e \cdot \omega_{\text{об}}(p)} = \frac{1/R_a}{(1 + T_a p)} \quad (8)$$

Таким образом, токовое звено ДПТ может быть представлено структурной схемой следующего вида:

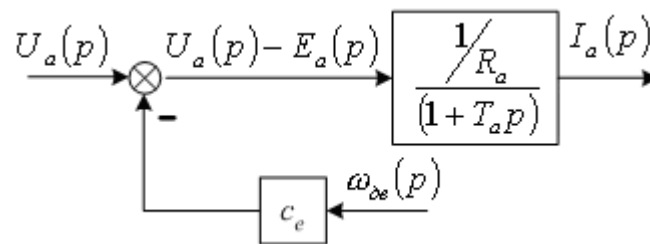


Рисунок 3. Структура токового звена ДПТ

Активное сопротивление якорной обмотки двигателя можно найти исходя из того, что примерно половина всех потерь в номинальном режиме работы двигателя приходится на потери в меди якоря, т.е.:

$$R_a \approx 0.5 \cdot \frac{(1 - \eta_H) \cdot U_H}{I_H} = 0.5 \cdot \frac{(1 - 0,86) \cdot 220}{43} = 0,358 \text{ Ом} \quad .$$

Индуктивность якорной обмотки двигателя постоянного тока можно найти по известной формуле:

$$L_a \approx \gamma \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{p_n \omega_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}} = 0,6 \cdot \frac{220}{2 \cdot 104,72 \cdot 43} = 0,01466 \text{ Гн} \quad ,$$

где  $\gamma = 0,6$  – поправочный коэффициент для некомпенсированных машин постоянного тока малых мощностей [2];

$p_n = 2$  – число пар полюсов двигателей серии П с высотами оси вращения более 100 мм [3];

$$\omega_{\text{НОМ}} = \pi \frac{n_{\text{НОМ}}}{30} = \pi \frac{1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с} \quad - \text{номинальная угловая скорость двигателя.}$$

Постоянная времени токового звена будет равна:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,01466}{0,358} = 0,041 \text{ с} \quad .$$

Таким образом, передаточная функция токового звена будет иметь выражение:

$$W_{T3}(p) = \frac{1/R_a}{(1 + T_a p)} = \frac{1/0,358}{1 + 0,041 p} = \frac{2,793}{1 + 0,041 p} \quad .$$

Для определения передаточной функции механического звена ДПТ воспользуемся основным уравнением движения электропривода:

$$M_{\varepsilon}(t) - M_c(t) = J \frac{d\omega_{\text{в}}(t)}{dt}, \quad (9)$$

где  $M_{\varepsilon}(t)$  – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

$M_c(t)$  – статический момент нагрузки;

$J$  – момент инерции вращающихся частей двигателя.

Уравнение (9) в операторной форме выглядит следующим образом:

$$M_{\varepsilon}(p) - M_c(p) = Jp \omega_{\text{в}}(p), \quad (10)$$

$$\frac{\omega_{\text{в}}(p)}{M_{\varepsilon}(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp}. \quad (11)$$

Таким образом, механическое звено ДПТ представлено интегрирующим звеном с передаточной функцией:

$$W_{M3}(p) = \frac{\omega_{\text{в}}(p)}{M_{\varepsilon}(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp} = \frac{1}{0,192p} = \frac{5,2083}{p}, \quad (12)$$

где  $J = 1,2J_0 = 1,2 \cdot 0,16 = 0,192 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  – приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции вращающихся масс двигателя и рабочего механизма.

Таким образом, механическое звено ДПТ может быть представлено структурной схемой следующего вида:

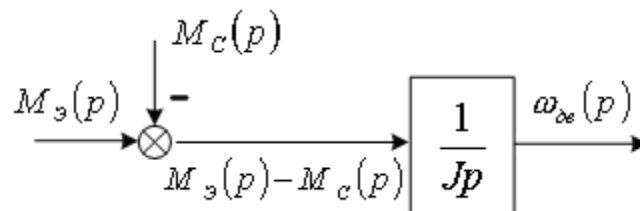


Рисунок 4. Структура механического звена ДПТ

Полная структура ДПТ имеет вид представленный на рисунке 5.

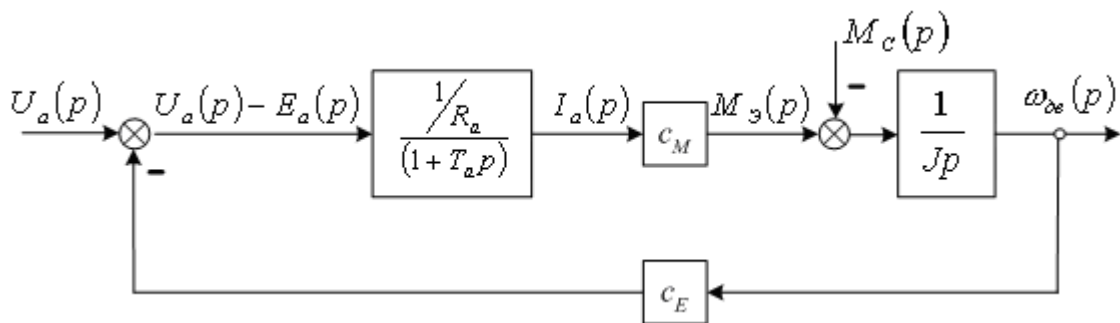


Рисунок 5. Полная структурная схема ДПТ

Кроме известных звеньев в схеме на рисунке 5 присутствуют также блоки с коэффициентами передачи  $c_M$  и  $c_E$ , которые соответственно являются механической и электромеханической постоянными ДПТ и определяются из системы уравнений двигателя, записанных для номинального режима работы:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_n : c_E I_n + I_{a.n} \cdot R_a \\ M_n : c_M I_{a.n} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} c_E : \frac{U_n \cdot I_{a.n} \cdot R_a}{I_n} : \frac{220 \cdot 43 \cdot 0,358}{104,72} : 1,954 \\ c_M : \frac{1}{I_{a.n}} \cdot \frac{P_n}{I_n} : \frac{8000}{43 \cdot 104,72} : 1,777 \end{array} \right.$$

### **Передаточная функция тиристорного преобразователя**

Тиристорный преобразователь структурно можно представить аperiодическим звеном первого порядка с малой постоянной времени  $T_\mu$ .

Передаточная функция тиристорного преобразователя имеет вид:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{1 + T_\mu p} \quad (13)$$

Для инженерных расчетов значение малой постоянной времени  $T_\mu$  можно принять равным 0,01 сек.

Значение коэффициента передачи тиристорного преобразователя можно найти из статического режима работы:

$$k_{ТП} = \frac{U_d}{U_y} = \frac{230}{10} = 23 \quad ,$$

где  $U_d = 230$  – средневыврямленное напряжение тиристорного преобразователя;

$U_y$  – напряжение управления, принимаемое на уровне максимального значения в 10 В.

Подставляя в (13) числовые значения коэффициента передачи и постоянной времени ТП получаем выражение передаточной функции вида:

$$W_{ТП}(p) = \frac{23}{1 + 0,01 p} \quad .$$

### **Коэффициенты передачи датчиков тока и скорости**

Величины коэффициентов передачи датчиков тока и скорости в соответствующих контурах могут быть определены из статического номинального режима при воздействии максимального задания. Таким образом, получим:

$$k_{ДС} = \frac{U_{z.max}}{\omega_n} = \frac{10}{104,72} = 0,0954 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$k_{ДТ} = \frac{U_{z.max}}{I_{a.n}} = \frac{10}{43} = 0,233 \text{ В/А}.$$

### **Передаточные функции регуляторов тока и скорости**

Расширенная структурная схема электропривода по системе ТП-ДПТ изображена на рисунке 6.

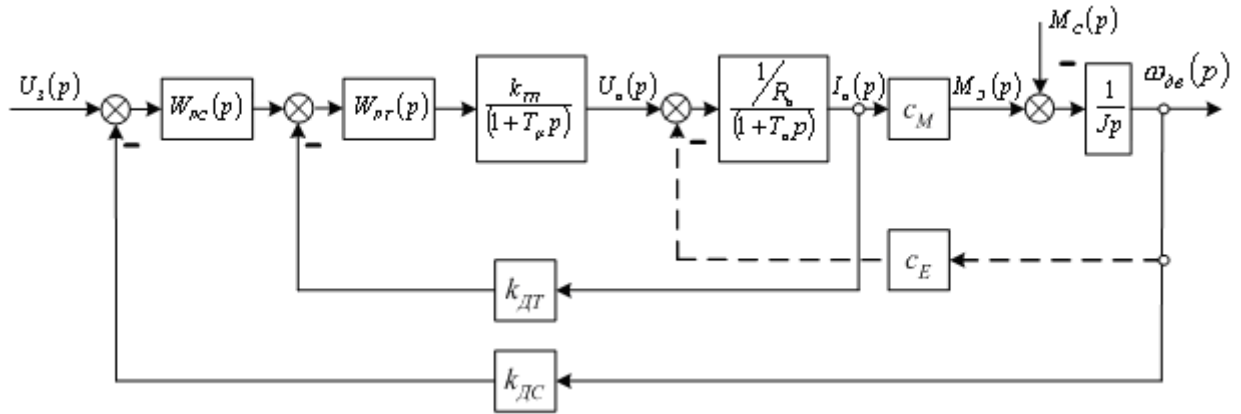


Рисунок 6. Расширенная структура САУ электропривода по системе ТП-ДПТ

Неизменяемыми звеньями системы являются тиристорный преобразователь и двигатель. Таким образом, для получения желаемых характеристик САУ необходимо произвести настройку регуляторов тока и скорости, т.е. определить вид их передаточных функций, согласно соответствующим требованиям.

### Определение передаточной функции регулятора тока

Контур регулирования тока обычно содержит ПИ-регулятор, настроенный по условиям технического оптимума [1,2].

Расчет настроек регулятора тока выполняют по разомкнутой структурной схеме в режиме короткого замыкания для исключения влияния внутренней обратной связи по э.д.с. двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{РАЗ}(p) = W_{РТ}(p) \cdot \frac{k_{ТП}}{T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{k_a}{T_a p + 1} \cdot k_{дт} \quad (14)$$

При настройке контура по условиям технического оптимума необходимо подобрать такие настройки регулятора, чтобы передаточная функция разомкнутого контура имела вид:

$$W_{РАЗ}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)} \quad (15)$$

Приравняв правые части выражений (14) и (15) получим обобщенный вид передаточной функции РТ:

$$W_{РТ}(p) = \frac{1}{\frac{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)}{\frac{k_{ТП}}{T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{k_a}{T_a p + 1} \cdot k_{дт}}} = \frac{T_a p + 1}{2T_{\mu}p \cdot k_{ТП} k_a k_{дт}} = \frac{T_a}{2T_{\mu} \cdot k_{ТП} k_a k_{дт}} + \frac{1}{2T_{\mu} \cdot k_{ТП} k_a k_{дт} p} \quad (16)$$

Таким образом, блок РТ представляет собой ПИ-регулятор с передаточной функцией вида:

$$W_{РТ}(p) = K_1 + \frac{K_2}{p}, \quad (17)$$

где  $K_1 = \frac{T_a}{2T_{\mu} \cdot k_{ТП} k_a k_{дт}} = \frac{0,041}{2 \cdot 0,01 \cdot 23 \cdot 2,793 \cdot 0,233} = 0,137$  ;

$$K_2 = \frac{1}{2T_{\mu} \cdot k_{ТП} k_a k_{дт}} = \frac{1}{2 \cdot 0,01 \cdot 23 \cdot 2,793 \cdot 0,233 \cdot p} = \frac{3,34}{p} .$$

### Определение передаточной функции регулятора скорости



Для получения максимальной точности регулирования выходного сигнала САР, внешний контур настраивается согласно симметричному оптимуму [1,2].

Рассматриваемая САР приводится к одноконтурной (рис. 7), а внутренний контур тока заменяется эквивалентным апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией вида:

$$W_{КТ}(p) = \frac{1}{k_{ДТ} \cdot (2T_{\mu}p + 1)} \quad .$$

Передаточная функция САР, представленной на рисунке 7, в разомкнутом виде имеет вид:

$$W_{РАЗ}(p) = W_{РС}(p) \cdot \frac{k_{КТ}}{T_{КТ}p + 1} \cdot \frac{k_O}{T_O p} \cdot k_{ДС} \quad . \quad (18)$$

Передаточная функция САР, настроенной на симметричный оптимум, будет иметь вид [1,2]:

$$W_{РАЗ}(p) = \frac{4T'_{\mu}p + 1}{8T'^2_{\mu}p^2 \cdot (T'_{\mu}p + 1)} \quad (19)$$

Приравняв правые части выражений (18) и (19), получим передаточную функцию РС вида:

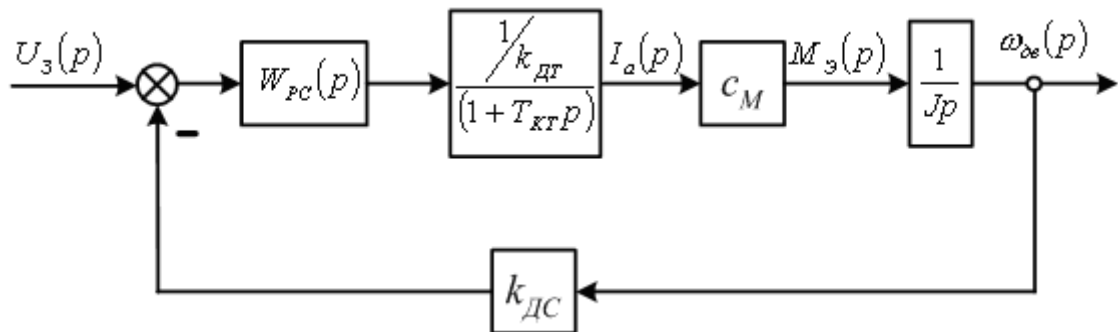


Рисунок 7. Эквивалентная одноконтурная САР системы ТП-ДПТ

$$W_{РС}(p) = \frac{4T'_{\mu}p + 1}{\frac{k_{КТ}}{T'_{\mu}p + 1} \cdot \frac{k_O}{T_O p} \cdot k_{ДС}} = \frac{T_O p (4T'_{\mu}p + 1)}{8T'^2_{\mu}p^2 \cdot k_{КТ} \cdot k_O \cdot k_{ДС}} = \frac{4T_O}{8T'_{\mu} \cdot k_{КТ} \cdot k_O \cdot k_{ДС}} + \frac{T_O}{8T'^2_{\mu} \cdot k_{КТ} \cdot k_O \cdot k_{ДС} \cdot p} =$$

$$= \frac{4 \cdot 0,192}{8 \cdot 0,02 \cdot 10,482 \cdot 1,777 \cdot 0,0954} + \frac{0,192}{8 \cdot 0,02^2 \cdot 10,482 \cdot 1,777 \cdot 0,0954 \cdot p} = 2,701 + \frac{33,765}{p}$$

где  $k_O = c_M$  ;

$$k_{КТ} = 1/k_{ДС} = \frac{1}{0,0954} = 10,482 \quad ;$$

$$T_{КТ} = T'_{\mu} = 2T_{\mu} = 0,02 \quad ;$$

$$T_O = J \quad .$$

Очевидно что РС, настроенный по симметричному оптимуму, представляет собой ПИ-регулятор.

## Моделирование САР ТП-ДПТ в среде MATLAB/Simulink

По полученным параметрам звеньев структурной схемы САР ТП-ДПТ (рис. 6) можно произвести синтез модели системы в среде MATLAB/Simulink и проанализировать ее поведение в различных динамических режимах: пуск в холостой ход, наброс нагрузки, изменение сигнала задания.

На рисунке 8 изображена модельная структура САР ТП-ДПТ без задатчика интенсивности на входе для среды MATLAB/Simulink, а на рисунках 9 и 10 – осциллограммы тока якоря двигателя и его угловой скорости. Рассчитаны переходные режимы пуска в холостой ход в интервале времени 0÷2 секунды и наброс статической нагрузки в 20% от номинальной в интервале времени 2÷4 секунды. В таблицу 2 сведены качественные показатели регулирования САР.

Таблица 2.	
Время регулирования $t_{\text{пр}}$ , с	1,35
Перерегулирование $\sigma$ , %	28,8
Ошибка регулирования $\varepsilon$ , %	0

На рисунках 11 и 12 приведены осциллограммы переходных процессов тока якоря и угловой скорости двигателя соответственно при применении входного задатчика интенсивности с передаточной функцией апериодического звена первого порядка:

$$W_{\text{эл}}(p) = \frac{1}{0,02p + 1} \cdot$$

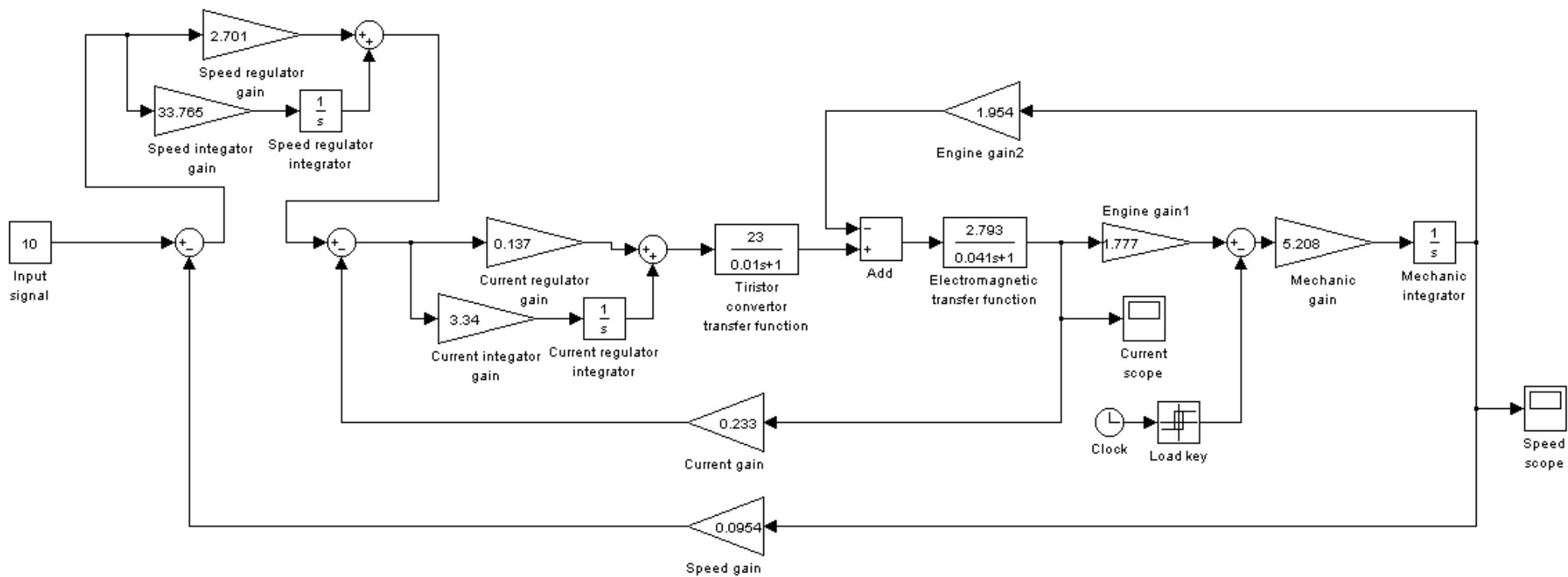


Рисунок 8. Модельная структура астатической САР ТП-ДПТ без входного задатчика интенсивности.

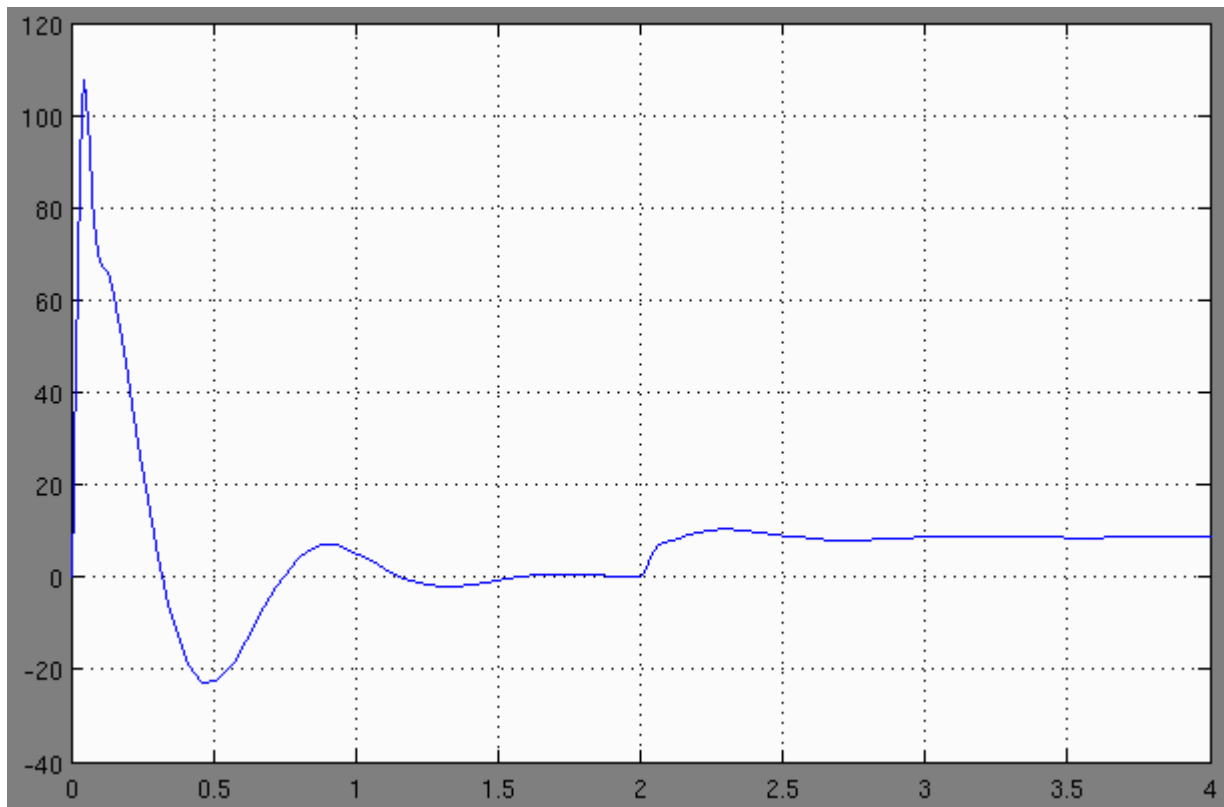


Рисунок 9. Переходный процесс тока якоря в астатической САР ТП-ДПТ с подчиненным регулированием; 0÷2 с – холостой ход; 2÷4 – наброс нагрузки 20% номинала.

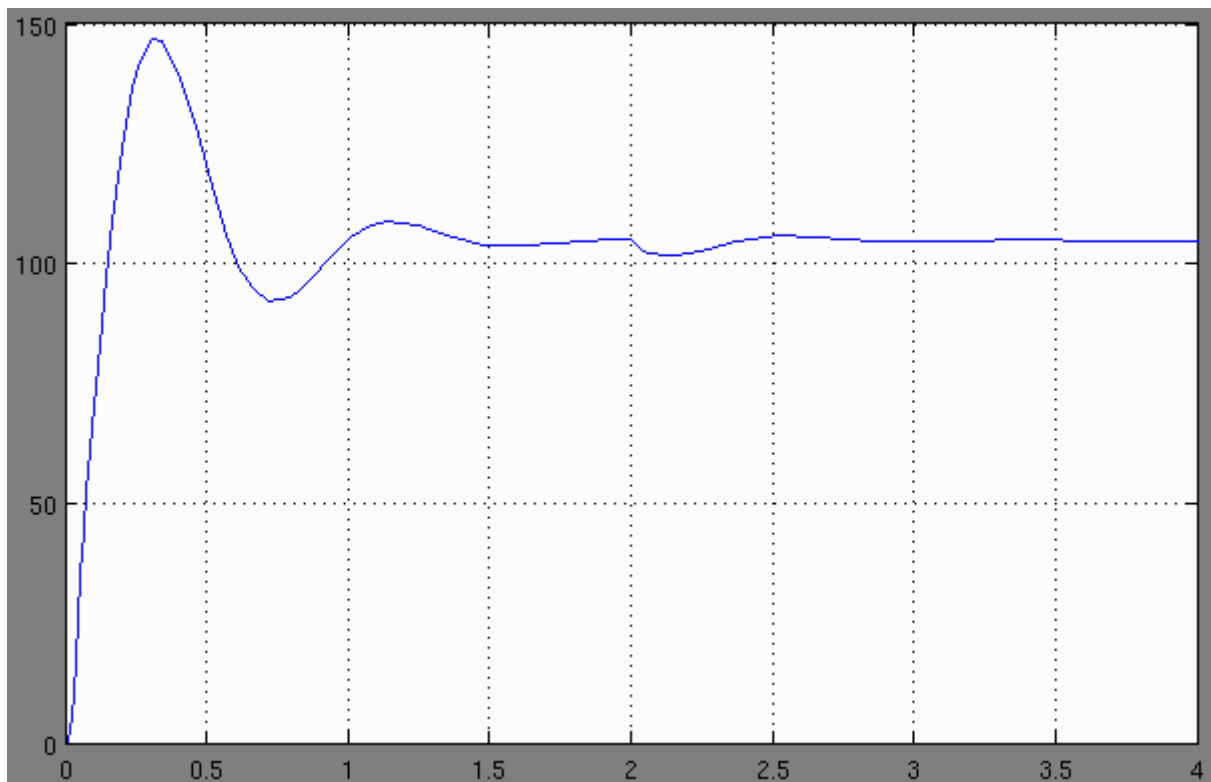


Рисунок 10. Переходный процесс угловой скорости двигателя в астатической САР ТП-ДПТ с подчиненным регулированием; 0÷2 с – холостой ход; 2÷4 – наброс нагрузки 20% номинала.

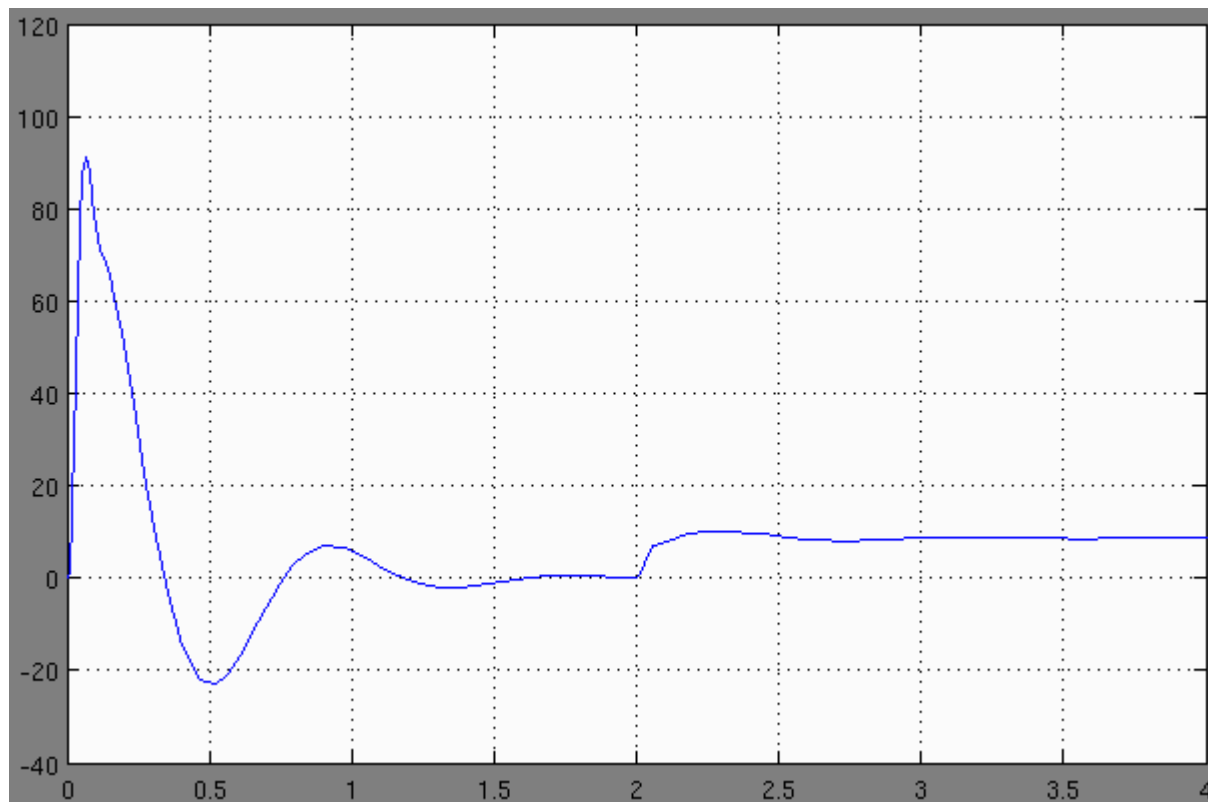


Рисунок 11. Переходный процесс тока якоря в астатической САР ТП-ДПТ с входным задатчиком интенсивности; 0÷2 с – холостой ход; 2÷4 – наброс нагрузки 20% номинала.

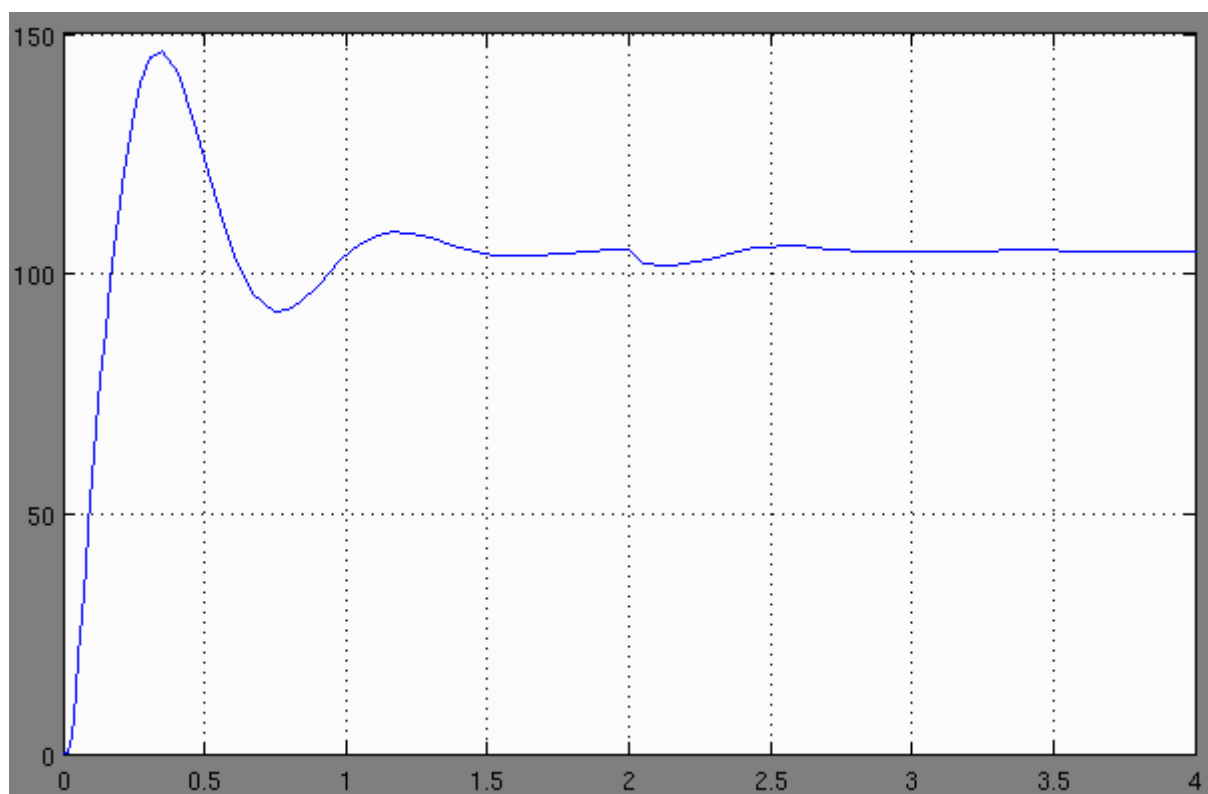


Рисунок 12. Переходный процесс угловой скорости двигателя в астатической САР ТП-ДПТ с входным задатчиком интенсивности; 0÷2 с – холостой ход; 2÷4 – наброс нагрузки 20% номинала.

На рисунке 13 изображена модельная структура астатической САР ТП-ДПТ, предназначенная для моделирования процессов, пуска, наброса нагрузки и изменения задания.

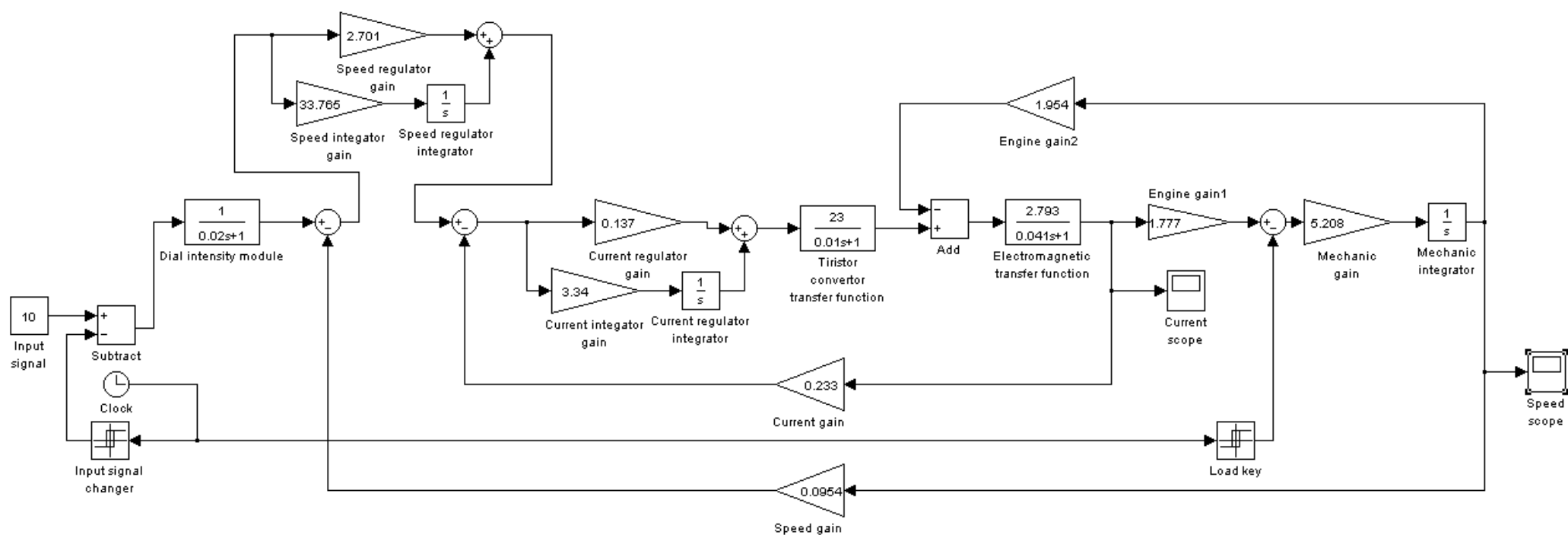


Рисунок 13. Модельная структура астатической САР ТП-ДПТ с входным задатчиком интенсивности и модулями для наброса нагрузки и изменения задания

На рисунках 14 и 15 изображены осциллограммы тока якоря и угловой скорости двигателя для процессов пуска, наброса нагрузки и изменения сигнала задания.

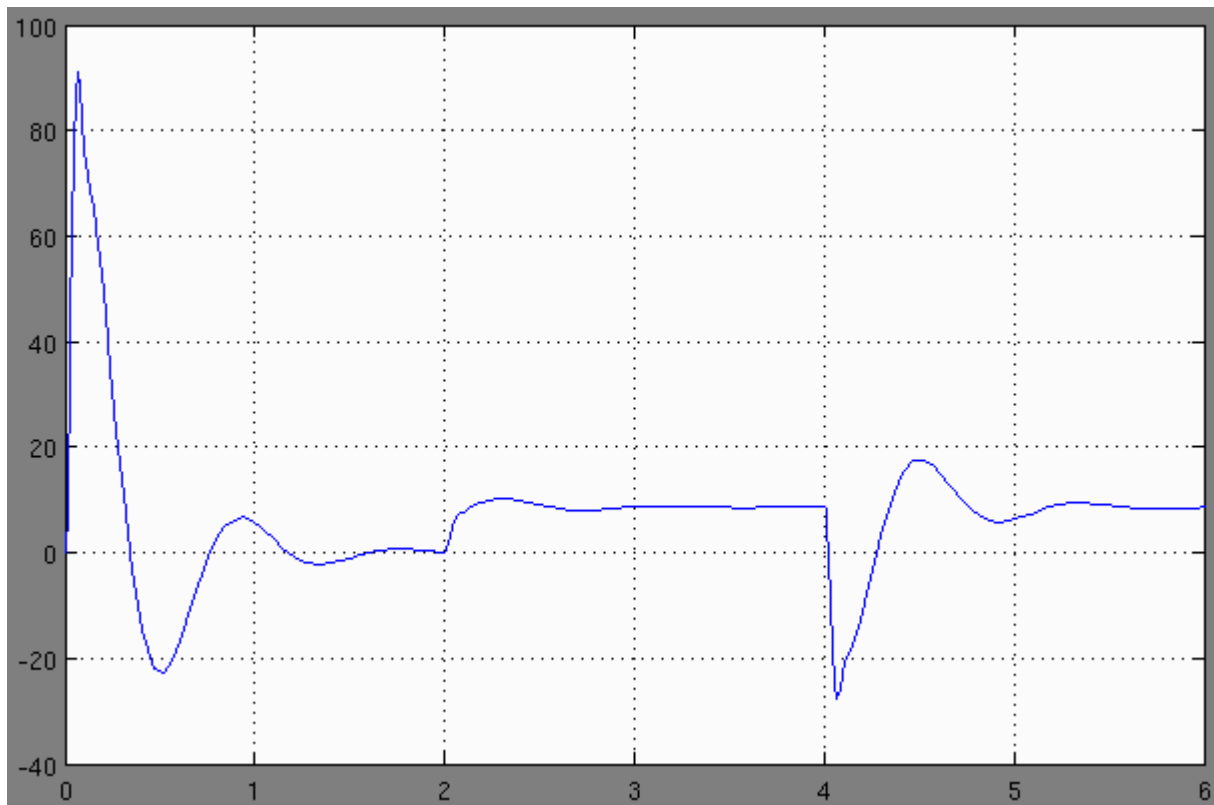


Рисунок 14. Осциллограмма тока якоря двигателя в САР ТП-ДПТ с задатчиком интенсивности; 0÷2 с – пуск в холостой ход; 2÷4 с – наброс нагрузки 20% от номинала; 4÷6 с – уменьшение сигнала задания на 4 В.

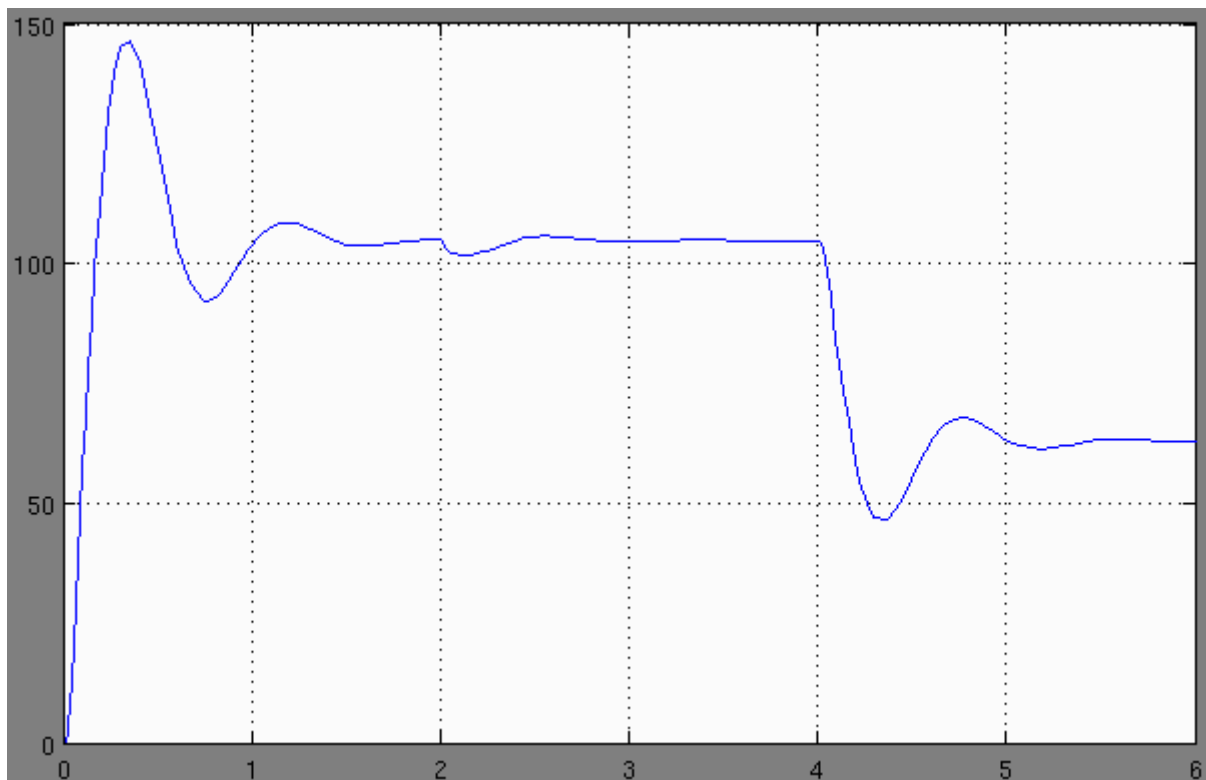


Рисунок 15. Осциллограмма угловой скорости двигателя в САР ТП-ДПТ с задатчиком интенсивности; 0÷2 с – пуск в холостой ход; 2÷4 с – наброс нагрузки 20% от номинала; 4÷6 с – уменьшение сигнала задания на 4 В.

## **Анализ результатов моделирования САР**

Анализируя полученные результаты моделирования САР ТП-ДПТ можно сделать следующие выводы:

1. САР отрабатывает задание с нулевым астатизмом, что означает достижение максимальной точности регулирования.
2. Величина пускового тока двигателя в системе без задатчика интенсивности превышает допустимое 2-х кратное значение для заданного типа двигателя, а в САР с задатчиком это значение находится в допустимых пределах.
3. Применение задатчика интенсивности не оказывает существенного влияния на быстродействие системы.
4. САР обладает существенным переугулированием, что обусловлено применением ПИ-регулятора во внешнем контуре.



## Список литературы

1. Рудаков В.В. Специальные вопросы автоматизированного электропривода. Учебное пособие. Л., изд. ЛГИ, 1986 г., 105 с.
2. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов.– М: Энергоатомиздат. 2005 г. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов.– СПб.: Энергоатомиздат. 1994 г.
3. Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: Учебник для втузов/ Под. Ред. О. Д. Голдберга. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с., ил.