

Моделирование динамического процесса по передаточным функциям на примере двигателя постоянного тока независимого возбуждения

1. Моделирование динамических процессов двигателя постоянного тока независимого возбуждения

По системе дифференциальных уравнений двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$U_{\text{я}} - E = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI}{dt};$$

$$E = k\Phi\omega;$$

$$M = I_{\text{я}} k\Phi;$$

$$M = J \frac{d\omega}{dt},$$

составить передаточную функцию объекта на базе структурной схемы:

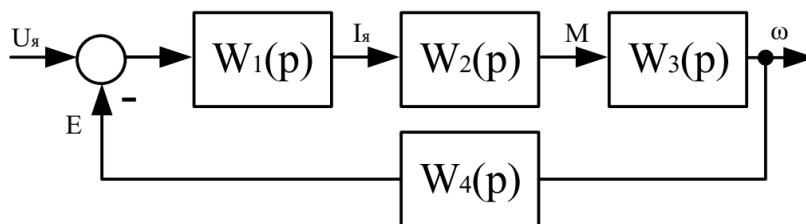


Рисунок 1 – Структурная схема двигателя постоянного тока

При составлении передаточной функции пользоваться допущением, что двигатель предварительно намагничен и $k\Phi = const = 0,9$. Промоделировать в SimInTech полученную передаточную функцию двигателя при следующих параметрах:

$$U_{\text{я}} = 110 \text{ В};$$

$$R_{\text{я}} = 0,72 \text{ мОм};$$

$$L_{\text{я}} = 35 \text{ мкГн};$$

$$k\Phi = 0,9;$$

$$J = 0,675 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

P.S. В качестве шпаргалки можно пользоваться книгой Калачева Ю.Н. «SimInTech: Основы регулируемого электропривода. Антиучебник» (34 - 36 страницы).

Решение:

Выражения для соответствующих передаточных функций -

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{i}{U_{\text{я}} - E} = \frac{1}{R_{\text{я}} + L_{\text{я}} p} = \frac{1/R_{\text{я}}}{T_R p + 1}, \quad T_R = \frac{L}{R} \\ W_2 &= \frac{M}{i_{\text{я}}} = k\Phi \\ W_3 &= \frac{\omega}{M} = \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{p} \\ W_4 &= \frac{E}{\omega} = k\Phi \end{aligned}$$

Схема для моделирования в SimInTech –

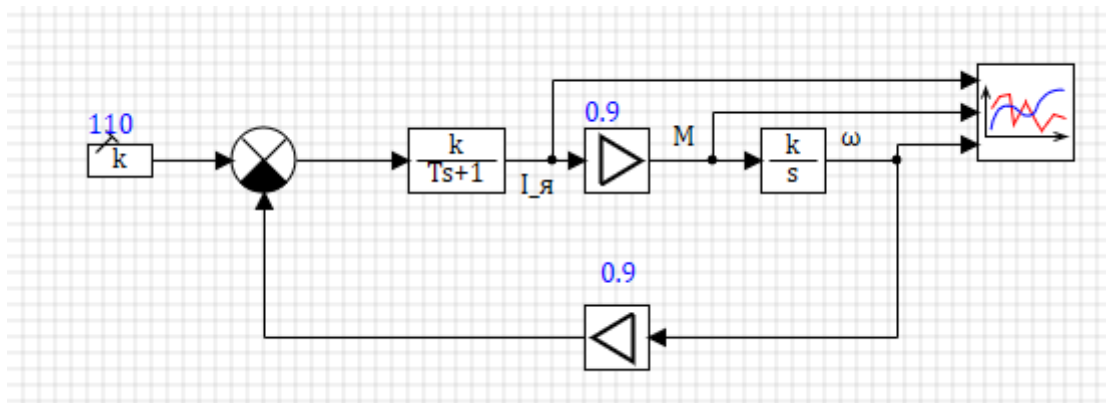
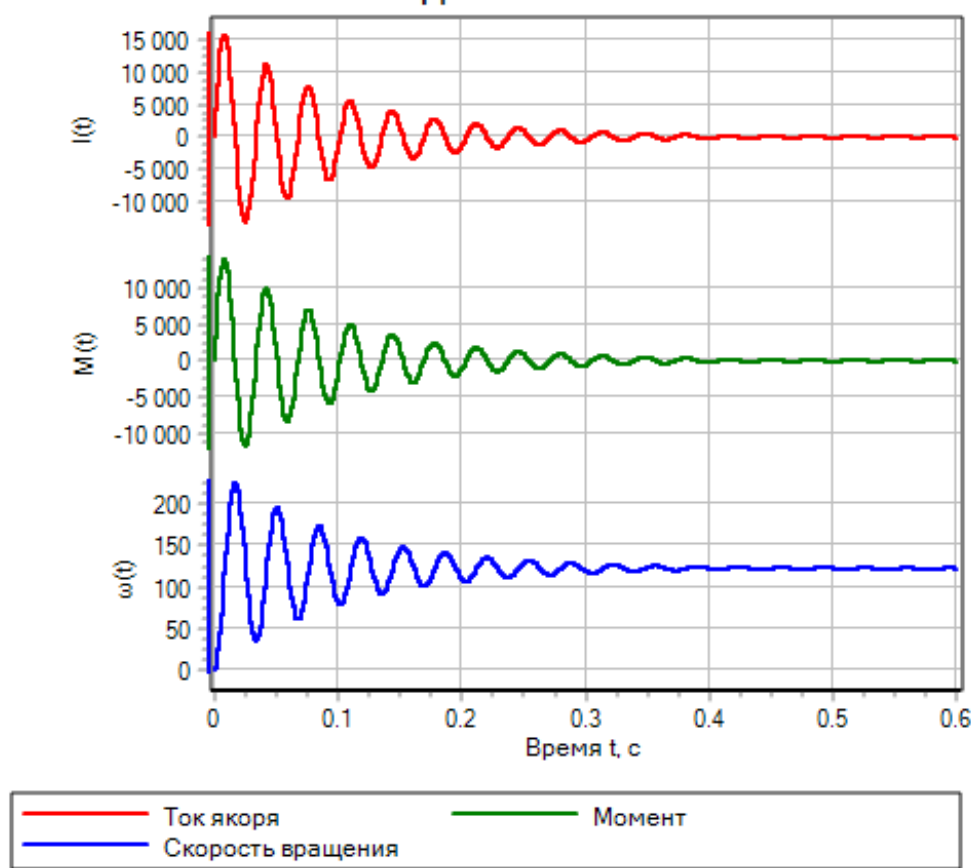


Рисунок 2. Схема электропривода постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

Скрипт проекта –

```
U = 110;           // Нап. якоря, в
R = 0.72E-3;       // Сопрот. якоря, 0.72 мОм
L = 35E-6;         // Индук. якоря, 35 мкГн
K_F = 0.9;         // Перед.функ. M/I_якоря
J = 0.675;         // Момент инер. кг*м^2
T_R = L/R;
```

Характеристики работы двигателя

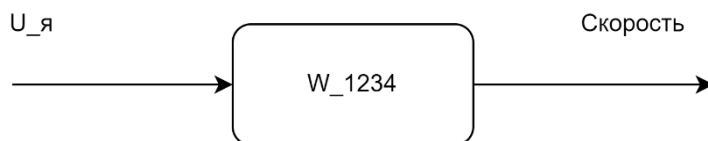


Работая на уровне передаточных функций, получаем все характеристики динамического процесса. Все характеристики динамического процесса функционирования ДПТ стабилизируются при t около 0.4 с. Наша задача добиться более быстрой стабилизации характеристик.

2. Преобразование передаточной функции ДПТ НВ

Для выбора режима стабилизации динамического процесса используют механизм преобразования передаточных функций. Используем правила преобразования структурных схем, представленные в разделе Структурные схемы, части I.

На рис. 2 представлена схема ДПТ НВ, которая в свёрнутом виде представляется -



Где в обозначениях рисунка 1:

$$W_{1234} = \frac{W_{123}}{1 + W_{123} \cdot W_4}$$

$$W_{123} = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$$

$$W_{123} = \left(\frac{\frac{1}{R_{\text{я}}}}{T_R p + 1} \cdot k\Phi \cdot \frac{1}{J} \cdot \frac{1}{p} \right)$$

$$W_{1234} = \frac{W_{123}}{1 + W_{123} \cdot k\Phi}$$

Схему для моделирования в SimInTech представим в виде –

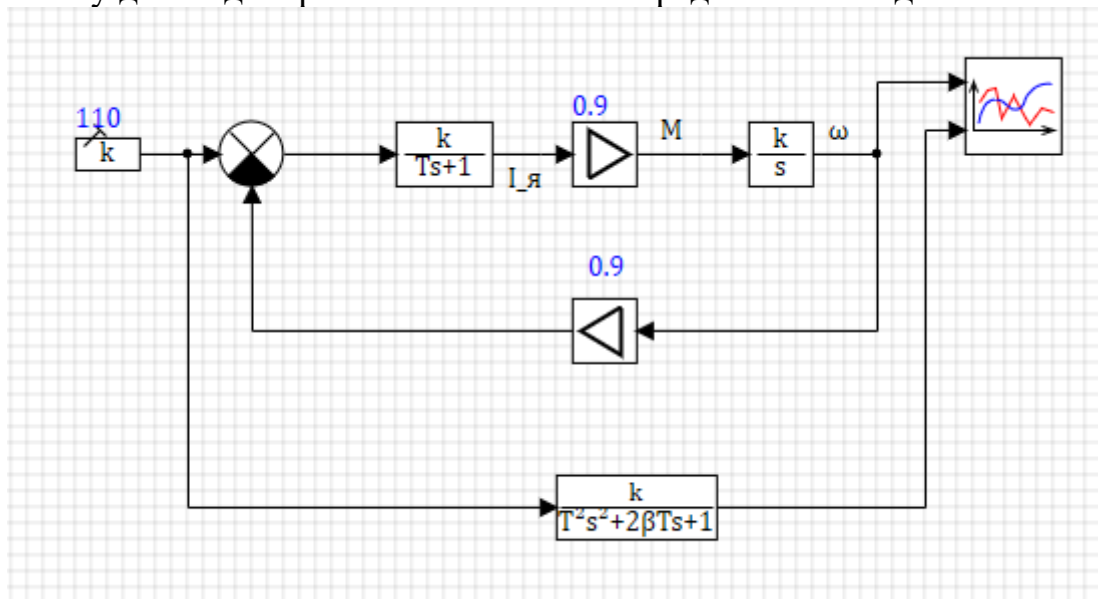
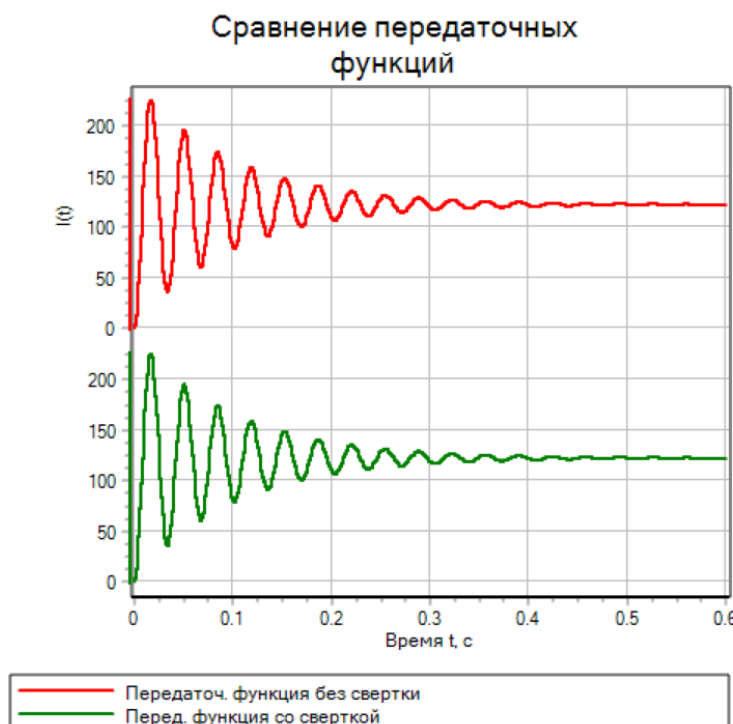


Рисунок 3. Передаточные функции ДПТ НВ



Таким образом, передаточная функция колебательного звена отвечает передаточной функции ДПТ НВ.

3. Синтез систем управления электроприводом постоянного тока независимого возбуждения (технический оптимум).

Под синтезом понимают целенаправленный расчет системы управления приводом или ее элементов с целью получения оптимальных значений регулируемых параметров (оптимальный — наилучший для данных параметров). Для решения задачи синтеза определяют выражения желаемых передаточных функций для контуров управления.

3.1. Управление по току

Рассмотрим внутренний контур управления — управление по току. На входе — напряжение, на выходе — ток якоря.

Схема

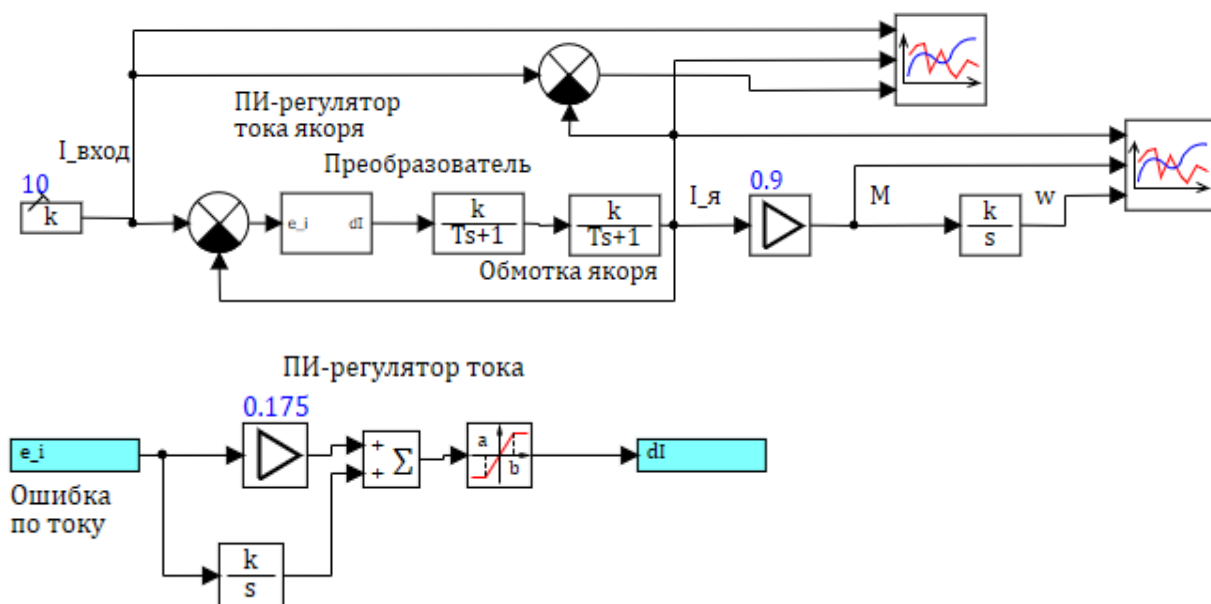


Рисунок 4. Схема управления по току ДПТ НВ

Электропривод постоянного тока (ДПТ) для целей моделирования можно заменить инерционным звеном 1-го порядка. Преобразователь также заменяется инерционным звеном 1-го порядка. Преобразователь (широтно-импульсная модуляция) формирует сигнал на ДПТ (Обмотка якоря).

Передаточная функция регулятора W_p . Декларируем, что Передаточная функция регулятора, отвечающая техническому оптимуму, имеет вид — $W_*(s) = \frac{1}{aT_{pwn}s(T_{pwn}s+1)}$, где $a = 2$ — настройка на технический оптимум (a определяет характер переходного процесса; чем больше a , тем более инерционен процесс). Отметим, что существует несколько понятий и,

соответственно, видов передаточных функций (в данном случае, рассматриваем технический оптимум). Рассмотрим инерциальные звенья 1 порядка для Преобразователя и ДПТ, представленные на рис.4. Характерное время звена Преобразователя (широтно-импульсный модулятор) – T_{pwm} (широтно-импульсная модуляция – pulse-width modulation -pwm). Характерное время звена ДПТ (характерное время звена обмотки якоря) – $T_R = L_a/R_a$. Обычно характерное время звена обмотки якоря $T_R \gg T_{pwm}$. Передаточные функции имеют вид -

$$W_{pwm} = \frac{1}{T_{pwm}s+1}, \quad W_{ДПТ} = \frac{1/R_a}{(L_a/R_a)s+1}$$

Сворачивая две передаточные функции (для Преобразователя и ДПТ) приходим к передаточной функции объекта $W_o = W_{pwm} * W_{ДПТ}$.

Добиваемся технического оптимума, то есть $W_p * W_o = W_*(s)$. (Наша задача подобрать передаточную функцию регулятора W_p так, чтобы был обеспечен технический оптимум). Тогда для передаточной функции регулятора имеем:

$$W_p = W_*(s) / W_o = \frac{1}{aT_{pwm}s(T_{pwm}s+1)} / \left(\frac{1}{T_{pwm}s+1} * \frac{1/R_a}{(L_a/R_a)s+1} \right) = \frac{L_a}{aT_{pwm}} + \frac{R_a}{aT_{pwm}s} = K_{\Pi} + \frac{K_{\text{И}}}{s}, \quad \text{то есть приходим к выражениям для значений коэффициентов ПИ-регулятора, обеспечивающих технический оптимум.}$$

В данном случае скрипт –

// ДПТ НВ -250115 (Регулятор тока)

U = 10; // Напряжение на входе, в

R = 0.72E-3; // Сопротивление якоря 0.72 мОм

L = 35E-6; // Индук. якоря, 35 мкГн

K_F = 0.9; // Перед.функ. M/I_якоря

K_E = 0.9; // Конструктивный элемент ЭДС электропривода

J = 0.675; // Момент инер. кг*м^2

T_R = L/R; // Характерное время обмотки якоря, с

// Параметры преобразователя

T_pwm = 0.0001; // Постоянная времени широтно-импульсного модулятора

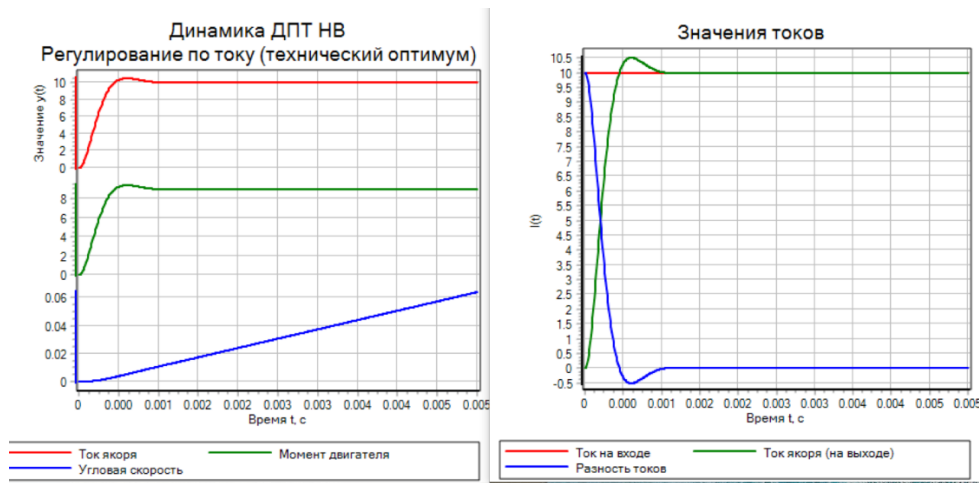
// Параметры регулятора тока

a = 2; // Настройка на технический оптимум

Kp_i = L/(a*T_pwm); // Коэффициент усиления

Ki_i = R/(a*T_pwm); // Коэффициент интегральный

Результаты моделирования –



Переход в регуляторе к техническому оптимуму обеспечил перерегулирование по току около 0.5 ампера и выход на устойчивый режим за время около 0.002 с.

3.2. Управление по скорости

Перепишем схему рисунка 4 в виде:

Схема регулирования по току

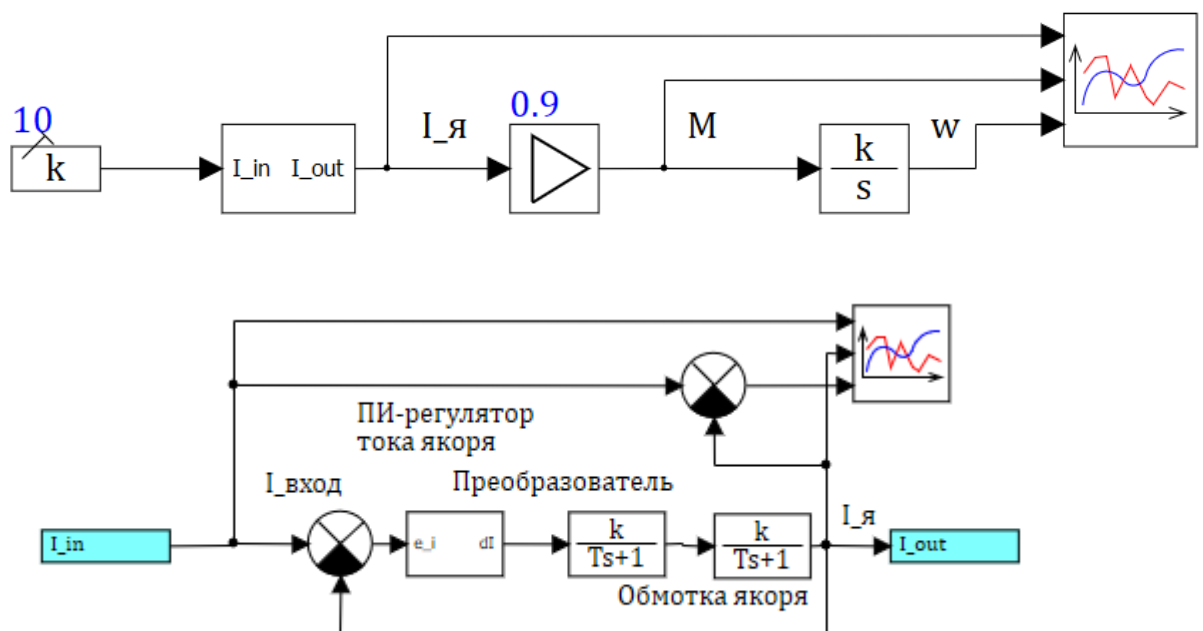


Рисунок 4.1. Схема управления по току ДПТ НВ

Разомкнутая передаточная функция схемы управления по току (по условию технического оптимума) -

$$W_p^p(s) = \frac{1}{aT_{pwn}s(T_{pwn}s+1)}.$$

Свернем функцию (замкнутая передаточная функция ДПТ) -

$$W_p^c(s) = \frac{1}{1 + \frac{aT_{pwn} * s(T_{pwn} * s + 1)}{aT_{pwn} * s(T_{pwn} * s + 1)}} = \frac{1}{aT_{pwn} * s + 1}$$

Создадим внешний контур управления по скорости. Имеем систему подчиненного регулирования. Регуляторы работают не параллельно, а последовательно, влияя друг на друга.

Желаемая передаточная функция, обеспечивающая технический оптимум, - $W_*(s) = \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(2 \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)}$ (коэффициент 2 появился из-за второго контура управления. Каждый последующий контур управления приводит к появлению коэффициента 2 у времени преобразователя);

Схема управления по скорости -

Схема регулирования по скорости

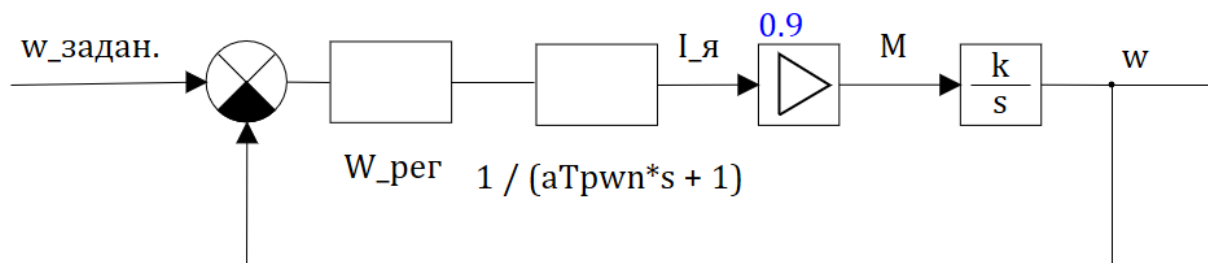


Рисунок 5. Макет схемы управления по скорости ДПТ НВ

- передаточная функция объекта $W_o = \frac{1}{aT_{pwn} * s + 1} * k\Phi * \frac{1}{J * s}$.

Добиваемся технического оптимума, то есть $W_p^* W_o = W_*(s)$. Тогда для передаточной функции регулятора скорости имеем:

$$W_p = W_*(s)/W_o = \frac{1}{\frac{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(T_{pwn} \cdot s + 1)}{\left(\frac{1}{(a \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)} \cdot \frac{k\Phi}{J \cdot s}\right)}} = \frac{J}{k\Phi} \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn}}, \text{ то есть имеем значения}$$

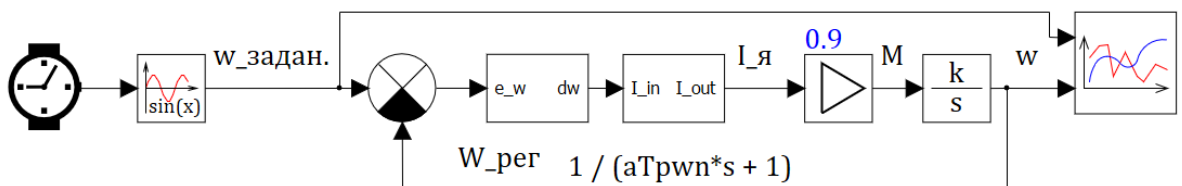
коэффициентов регулятора, обеспечивающих технический оптимум:

$$\text{коэффициент усиления } K_{p_w} = \frac{J}{k\Phi} \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn}};$$

интегральный коэффициент $K_{i_w} = 0$.

Пример схемы с управлением по скорости:

Схема регулирования по скорости



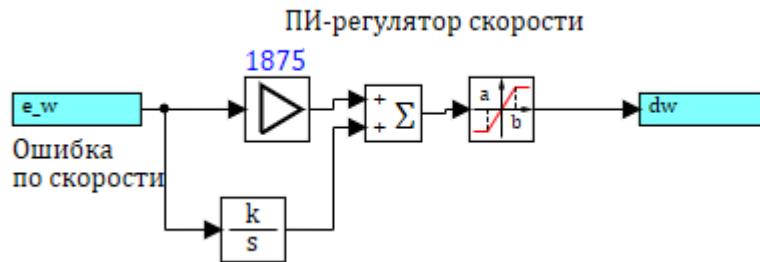


Рисунок 5.1. Схема управления по скорости ДПТ НВ

// Скрипт ДПТ НВ -250116 (Регулятор тока и скорости)

U = 10; // Напряжение на входе, в

R = 0.72E-3; // Сопротивление якоря 0.72 мОм

L = 35E-6; // Индуктивность якоря, 35 мкГн

K_F = 0.9; // Передаточная функция М/И якоря

K_E = 0.9; // Конструктивный элемент ЭДС электропривода

J = 0.675; // Момент инерции, кг*м^2

T_R = L/R; // Характерное время обмотки якоря, с

// Параметры преобразователя

Trwm = 0.0001; // Постоянная времени широтно-импульсного модулятора

// Параметры регулятора тока

a = 2; // Настройка на технический оптимум

Kp_i = L/(a*Trwm);

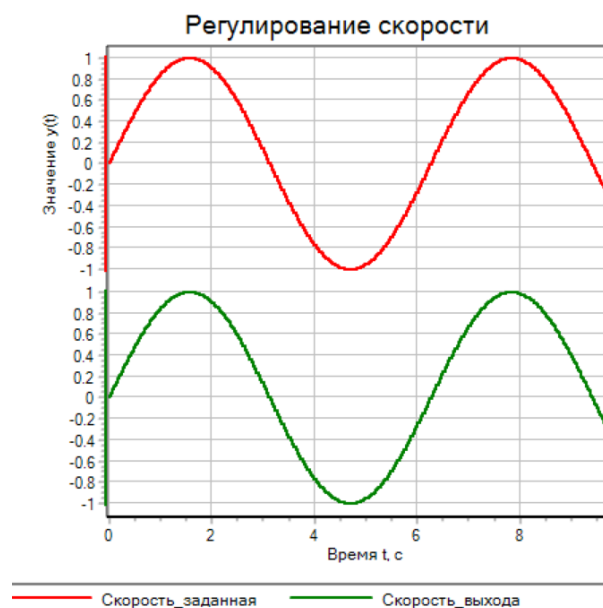
Ki_i = R/(a*Trwm);

// Параметры регулятора скорости

Kp_w = J/(2*a*Trwm*k_F);

Ki_w = 0;

Регулирование скорости



3.3. Управление по положению

Желаемая передаточная функция, обеспечивающая технический оптимум, - $W_*(s) = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(2 \cdot 2 \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)}$ (коэффициент 2 появился из-за третьего контура управления. Каждый последующий контур управления приводит к появлению коэффициента 2 у времени преобразователя);

Разомкнутая передаточная функция блока управления по скорости (по условию технического оптимума) -

$$W_p^p(s) = \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(2 \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)}.$$

Свернем функцию (замкнутая передаточная функция ДПТ с управлением по току и скорости) -

$$W_p^c(s) = \frac{\frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(2 \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)}}{1 + \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(2 \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)}} = \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s + 1}$$

Создадим внешний контур управления по положению. В схеме рисунка 5.1 появится блок интегратора. Переход от скорости к положению – интегрирование скорости по времени.

- передаточная функция объекта $W_o = \frac{1}{2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s}$.

Добиваемся технического оптимума, то есть $W_p^* \cdot W_o = W_*(s)$. Тогда для передаточной функции регулятора положения имеем:

$$W_p = W_*(s) / W_o = \frac{\frac{1}{4 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s(4 \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)}}{\left(\frac{1}{(2 \cdot a \cdot T_{pwn} \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{s}\right)} = \frac{1}{8 \cdot T_{pwn}}, \text{ то есть имеем значения}$$

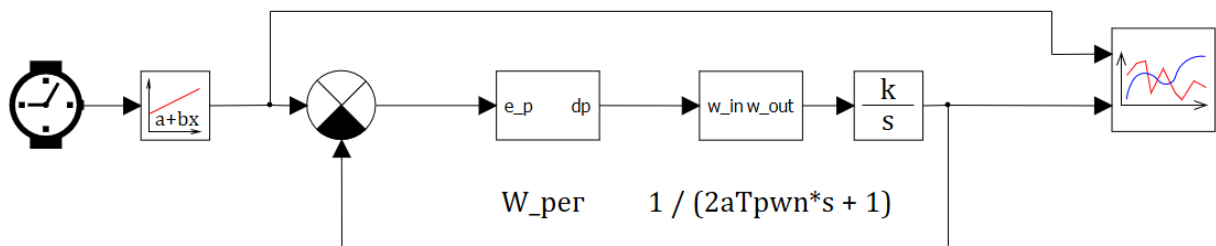
коэффициентов регулятора, обеспечивающих технический оптимум:

коэффициент усиления $K_{p_p} = \frac{1}{8 \cdot T_{pwn}}$;

интегральный коэффициент $Ki_p = 0$.

Итоговая схема –

Схема регулирования по положению




```

K_E = 0.9;           // Конструктивный элемент ЭДС электропривода
J = 0.675;           // Момент инер. кг*м^2
T_R = L/R;           // Характерное время обмотки якоря, с

// Параметры преобразователя
Trwm = 0.0001;       // Постоянная времени широтно-импульсного модулятора

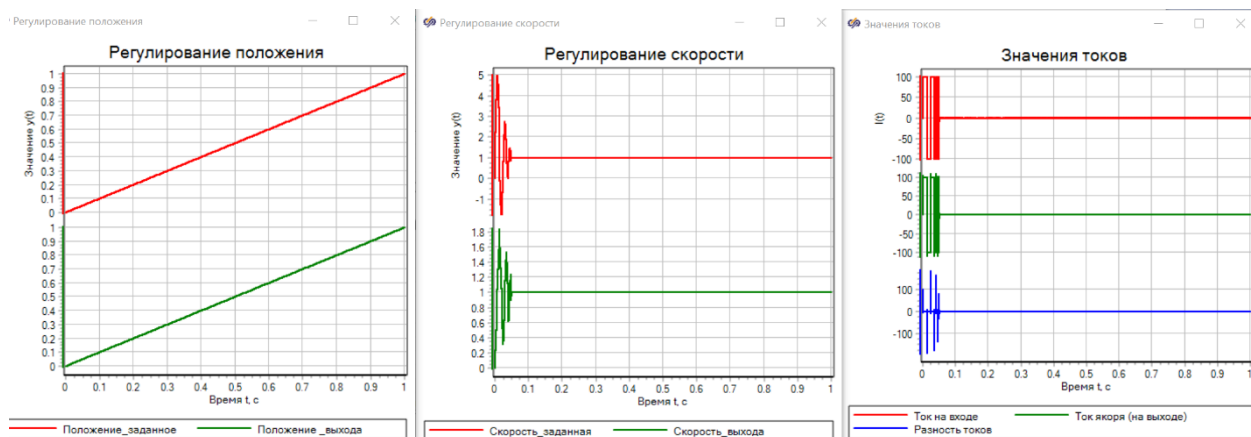
// Параметры регулятора тока
a = 2;               // Настройка на технический оптимум
Kp_i = L/(a*Trwm);
Ki_i = R/(a*Trwm);

// Параметры регулятора скорости
Kp_w = J/(2*a*Trwm*k_F);
Ki_w = 0;

// Параметры регулятора положения
Kp_p = 1/(8*Trwm);
Ki_p = 0;

```

Результаты работы трехконтурной системы управления ДПТ НВ:



4. Синтез систем управления скоростью электропривода постоянного тока независимого возбуждения (симметричный оптимум).

Порядок синтеза регуляторов следующий – сначала синтезируется регулятор внутреннего контура (в данном случае, по току), а затем – внешнего, основного (по скорости). Для внутреннего контура всегда нужно принимать настройку на технический оптимум, а для внешнего – в данном случае на симметричный оптимум.

Желаемая функция управления по току

$$W_{\text{ж-ток}}(s) = \frac{1}{2T_{\mu} * s (T_{\mu} * s + 1)}$$

Желаемая функция управления скоростью на симметричный оптимум –

$$W_{\text{ж-скор}}(s) = \frac{4 \cdot T_{\mu} s + 1}{8T_{\mu}^2 * s^2 (T_{\mu} * s + 1)}$$

4.1. Управление по току

Рассмотрим внутренний контур управления – управление по току. На входе – напряжение, на выходе – ток якоря.

Передаточная функция регулятора W_p . Рассмотрим инерциальные звенья 1 порядка для Преобразователя и ДПТ. Характерное время звена Преобразователя (шиотно-импульсный модулятор) – T_{pwm} (шиотно-импульсная модуляция – pulse-width modulation -pwm). Характерное время звена ДПТ (характерное время звена обмотки якоря) – $T_R = L_a/R_a$. Обычно характерное время звена обмотки якоря $T_R \gg T_{pwn}$. Передаточные функции имеют вид -

$$W_{pwm} = \frac{1}{T_{pwn} * s + 1}. \quad W_{\text{ДПТ}} = \frac{1/R_a}{(L_a/R_a) * s + 1}$$

Сворачивая две передаточные функции (для Преобразователя и ДПТ) приходим к передаточной функции объекта $W_o = W_{pwm} * W_{\text{ДПТ}}$.

Добиваемся технического оптимума, то есть $W_p * W_o = W_{\text{ж-ток}}(s)$. (Наша задача подобрать передаточную функцию регулятора W_p так, чтобы был обеспечен технический оптимум). Тогда для передаточной функции регулятора имеем:

$$W_p = W_{\text{ж-ток}}(s) / W_o = \frac{1}{2T_{\mu} * s (T_{\mu} * s + 1)} / \left(\frac{1}{T_{pwn} * s + 1} * \frac{1/R_a}{(L_a/R_a) * s + 1} \right) = \frac{L_a}{a * T_{pwn}} + \frac{R_a}{a * T_{pwn} * s} = K_{\Pi} + \frac{K_{\Pi}}{s}, \quad \text{то есть приходим к выражениям для значений коэффициентов ПИ-регулятора, обеспечивающих технический оптимум.}$$

4.2. Управление по скорости

Разомкнутая передаточная функция блока управления по току (по условию технического оптимума) -

$$W_p^p(s) = \frac{1}{aT_{pwn} * s (T_{pwn} * s + 1)}.$$

Свернем функцию (замкнутая передаточная функция ДПТ) -

$$W_p^c(s) = \frac{\frac{1}{aT_{pwn} * s (T_{pwn} * s + 1)}}{1 + \frac{1}{aT_{pwn} * s (T_{pwn} * s + 1)}} = \frac{1}{aT_{pwn} * s + 1}$$

Создадим внешний контур управления по скорости. Имеем систему подчиненного регулирования.

Желаемая передаточная функция, обеспечивающая симметричный оптимум, - $W_{\text{ж-скор}}(s) = \frac{4 \cdot T_{\mu} s + 1}{8T_{\mu}^2 * s^2 (T_{\mu} * s + 1)}$;

- передаточная функция объекта $W_o = \frac{1}{aT_{pwn}s+1} * k\Phi * \frac{1}{J*s}$.

Добиваемся симметричного оптимума, то есть $W_p * W_o = W_*(s)$. Тогда для передаточной функции регулятора скорости имеем:

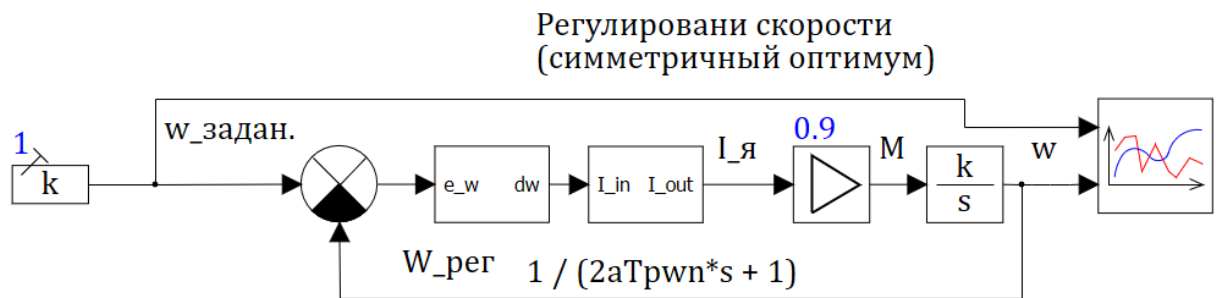
$$W_p = W_*(s)/W_o = \frac{\frac{4 \cdot T_\mu s + 1}{8T_\mu^2 s^2 (T_\mu s + 1)}}{\left(\frac{1}{(aT_{pwn}s+1)} \frac{k\Phi}{J*s}\right)} = \frac{J \cdot s \cdot (6 \cdot T \cdot s + 1)}{8 \cdot T^2 \cdot s^2 k\Phi}, \text{ то есть имеем значения}$$

коэффициентов регулятора, обеспечивающих технический оптимум:

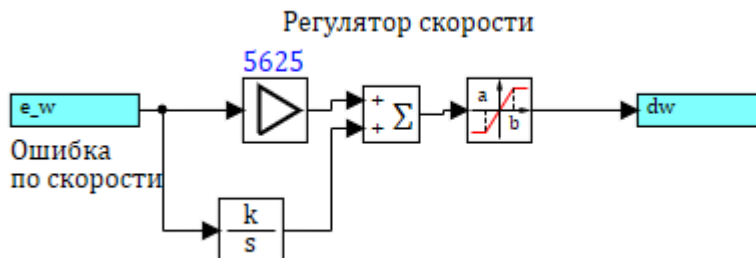
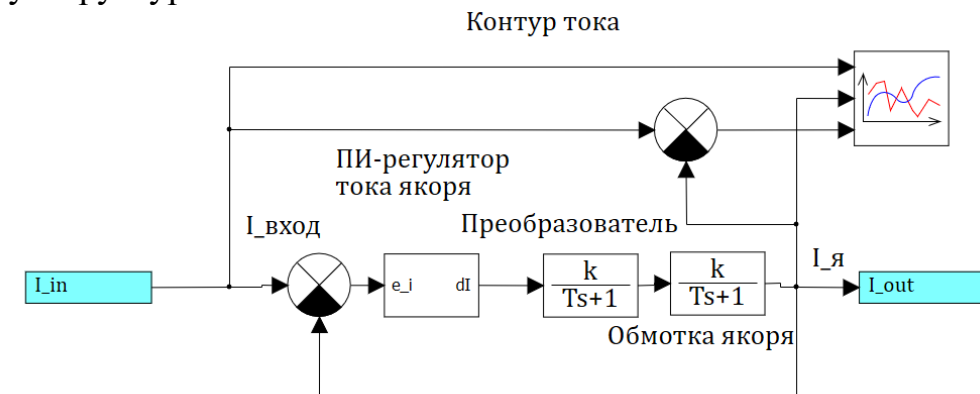
$$\text{коэффициент усиления } K_{p_w} = \frac{J}{k\Phi \cdot 4 \cdot T_{pwn}} \cdot 3;$$

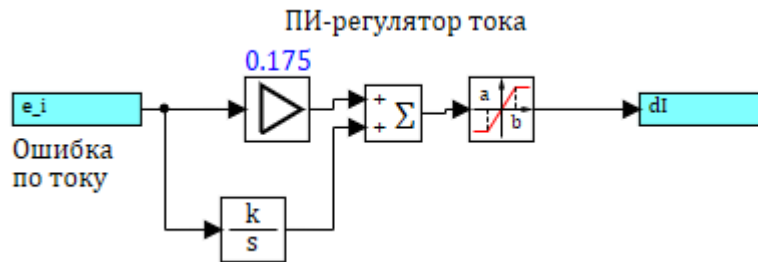
$$\text{интегральный коэффициент } K_{i_w} = \frac{J}{8T_\mu^2 * k\Phi}.$$

Схема с управлением по скорости:



Субструктуры





Скрипт

// ДПТ НВ -250119 (Регулятор тока, скорости)

// (симметричный оптимум по скорости)

U = 10; // Напряжение на входе, в

R = 0.72E-3; // Сопрот якоря 0.72 мОм

L = 35E-6; // Индук. якоря, 35 мкГн

K_F = 0.9; // Перед.функ. M/I_якоря

K_E = 0.9; // Конструктивный элемент ЭДС электропривода

J = 0.675; // Момент инер. кг*м^2

T_R = L/R; // Характерное время обмотки якоря, с

// Параметры преобразователя

Trwm = 0.0001; // Постоянная времени широтно-импульсного модулятора

// Параметры регулятора тока

a = 2; // Настройка на технический оптимум

Kp_i = L/(a*Trwm);

Ki_i = R/(a*Trwm);

// Параметры регулятора скорости

Kp_w = 3*J/(4*Trwm*k_F);

Ki_w = J/(8*Trwm*k_F);

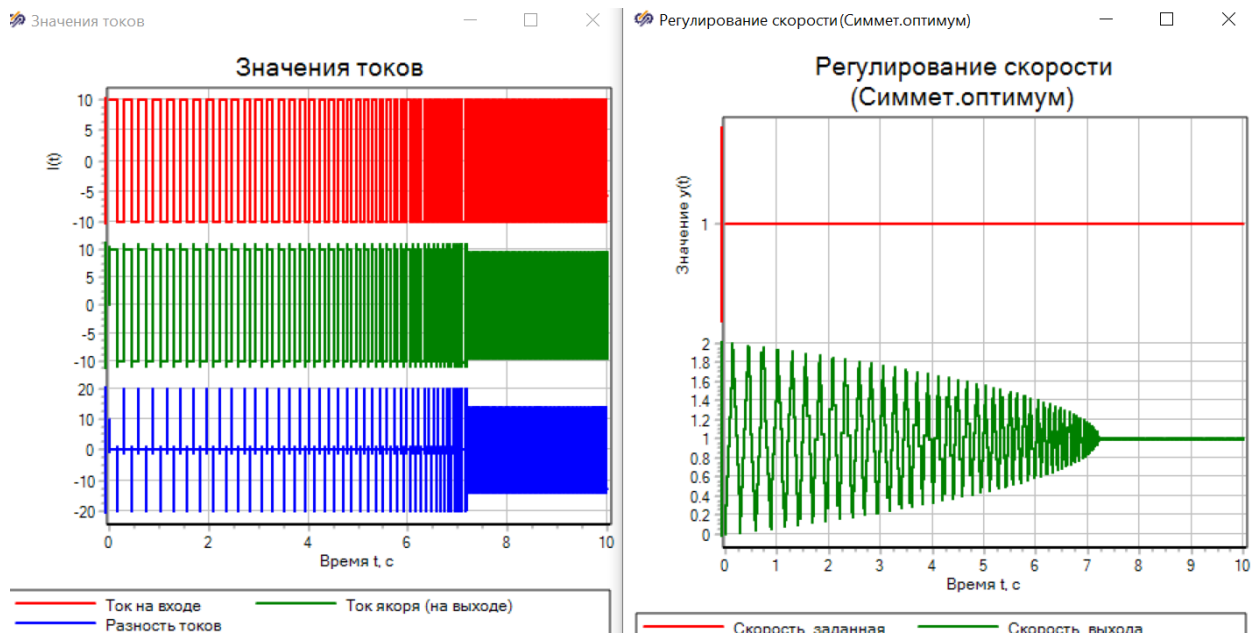
Минимальный шм*Trwm*K_F);

Параметры расчета:

Основные параматг hmin 1E-6

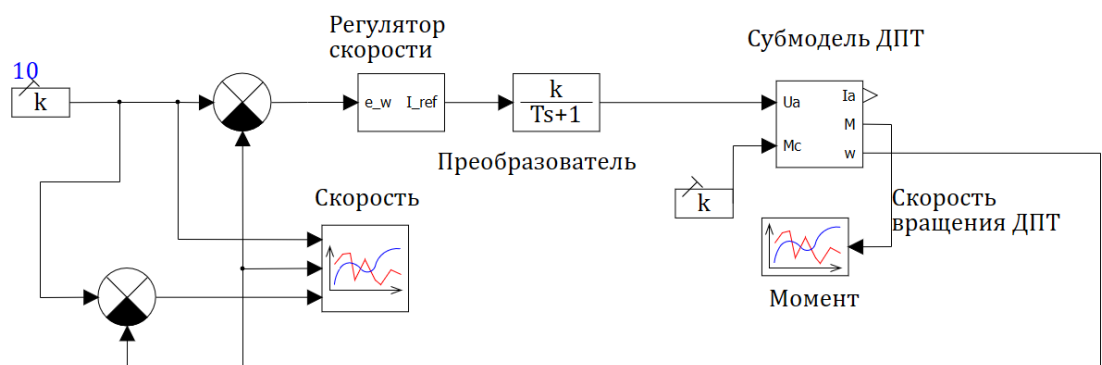
Максимальный шаг hmax 1E-6

Результат:

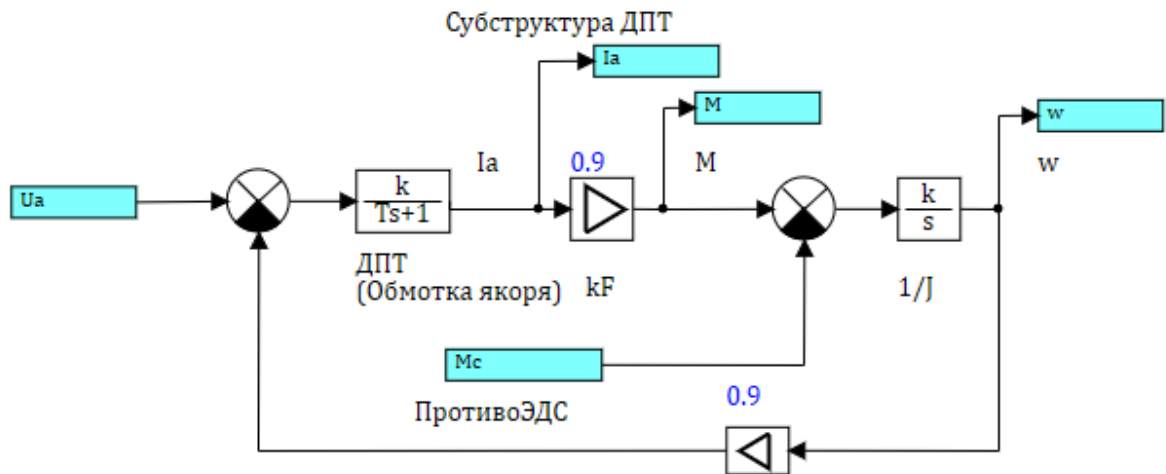


5. Настройка регулятора скорости (без вложенного регулятора тока) на технический оптимум

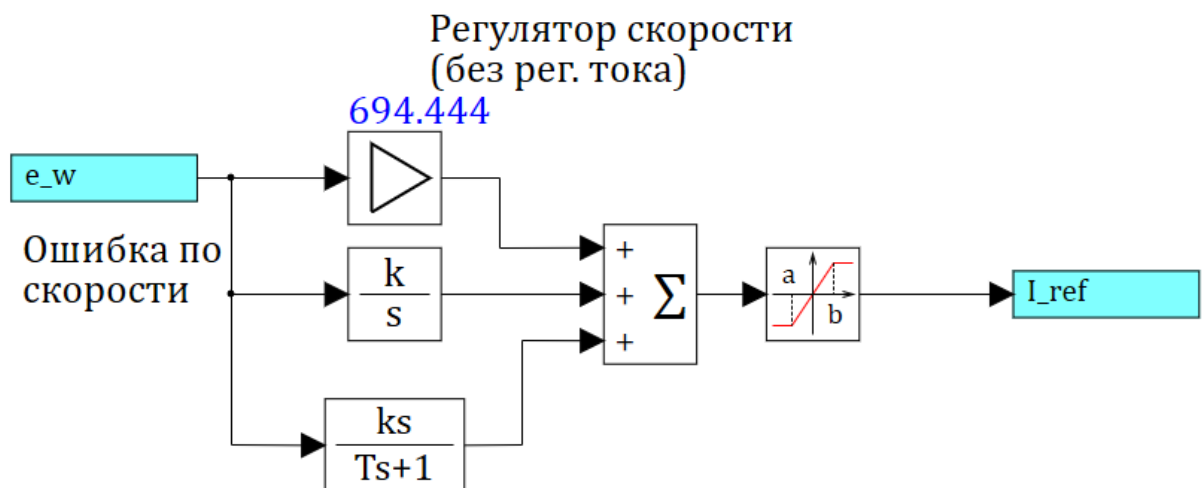
Регулятора скорости (без вложенного регулятора тока) на технический оптимум $W = 1/(2Ts(Ts+1))$



Субмодель ДПТ



Регулятор скорости



Скрипт проекта

```
// Параметры объекта управления (ДПТ НВ без рег. тока) 250119
w0 = 10;      // Заданная скорость
Ra = 1;       // Сопротивление обмотки якоря, Ом
La = 0.001;   // Индуктивность обмотки якоря,
kF_nom = 0.9; // Номинальный поток * конструктивную постоянную двигателя
J = 0.125;    // Момент инерции, кг*м^2
k_M = 1/Ra;   // К передаточной функции обмотки якоря
k_w = 0.9;    // Коэф. обратной связи по скорости
T_R = La/Ra;  // Постоянная времени обмотки якоря
```

```
// Параметры преобразователя
Trwm = 0.0001; // Постоянная времени широтно-импульсного модулятора
```

```
// Параметры регулятора тока
//a = 2; // Настройка на технический оптимум
```

//Kp_i = La/(a*Tpwm);

//Ki_i = Ra/(a*Tpwm);

// Параметры регулятора скорости (без рег. тока)

Kp_w = J/(2*Tpwm*k_M*kF_nom);

Ki_w = k_w/(2*Tpwm);

Kd_w = J*T_R/(2*Tpwm*k_M*kF_nom);

Td = 1e-7;

Разомкнутая передаточная функция ДПТ -

$$W_{\text{ДПТ}}^{\text{раз}} = \frac{k_a * k_f}{(T_a * s + 1) * J * s} \quad k_a = \frac{1}{Ra}, \quad T_a = \left(\frac{La}{Ra} \right).$$

Замкнутая передаточная функция ДПТ (передаточная функция объекта Wo) -

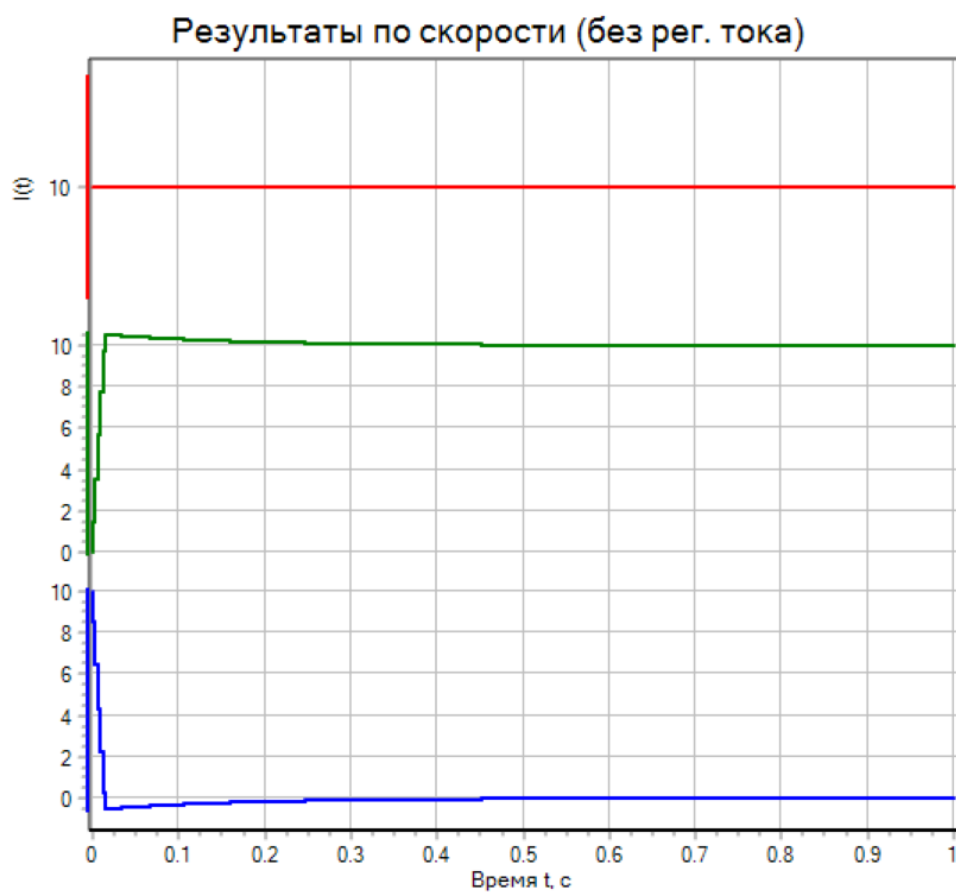
$$W_{\text{ДПТ}}^{\text{з}} = \frac{k_a * k_f * (T_a * s + 1) * J * s}{(T_a * s + 1) * J * s * ((T_a * s + 1) * J * s + k_a * k_f * k_w)}$$

Желаемая передаточная функция управления скоростью, обеспечивающая технический оптимум, - $W_*(s) = \frac{1}{2 \cdot Tpwn * s (Tpwn * s + 1)}$;

Добиваемся технического оптимума, то есть $W_p * W_o = W_*(s)$. Передаточная функция регулятора –

$W_p = W_*(s) / W_o = \frac{1}{2T_\mu * s (T_\mu * s + 1)} / \left(\frac{k_a * k_f}{((T_a * s + 1) * J * s + k_a * k_f * k_w)} \right) =$
 $= \frac{J}{2 \cdot T_\mu k_a * k_f} + \frac{k_w}{2 \cdot T_\mu} * \frac{1}{s} + \frac{J * T_a * s}{2 \cdot T_\mu k_a * k_f} = k_p + k_i * \frac{1}{s} + k_d * \frac{s}{T_d s + 1}$ то есть приходим к выражениям для значений коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающих технический оптимум:

$$k_p = \frac{J}{2 \cdot T_\mu k_a * k_f}, \quad k_i = \frac{J}{2 \cdot T_\mu k_a * k_f}, \quad k_d = \frac{J * T_a}{2 \cdot T_\mu k_a * k_f}, \quad T_d \approx 10^{-8}.$$



— Скорость на входе	— Скорость по обратной связи
— Ошибка регулирования	