

## Введение

Под следящими системами, применяемыми в современных промышленных автоматизированных электроприводах, понимаются такие электромеханические системы автоматического управления, которые, получая произвольные сигналы, повторяют их с заданной точностью. Эти сигналы могут изменяться в широком диапазоне по произвольному закону. Чаще всего входной сигнал представляет собой скорость или угол поворота оси или вала задающего устройства.

Следящий электропривод может использоваться в спутниковой связи, в металлообрабатывающих станках, а также в робототехнике. В следящем электроприводе могут использоваться электродвигатели как постоянного, так и переменного тока. В данной выпускной квалификационной работе рассматривается следящий асинхронный электропривод механизма горизонтального перемещения груза.

Подъемные краны — это грузоподъемные устройства для вертикального и горизонтального перемещения грузов на небольшие расстояния. Наибольшее распространение на промышленных предприятиях получили мостовые краны.

Основные узлы подъемного крана, приводимые в движение электроприводами:

- механизм передвижения моста,
- механизм передвижения тележки,
- механизм подъема и опускания груза.

К механизмам горизонтального перемещения относят механизмы передвижения кранов и грузовых тележек, а также механизмы поворота. Все эти механизмы имеют реактивный (т.е. независимый от направления движения) момент нагрузки.

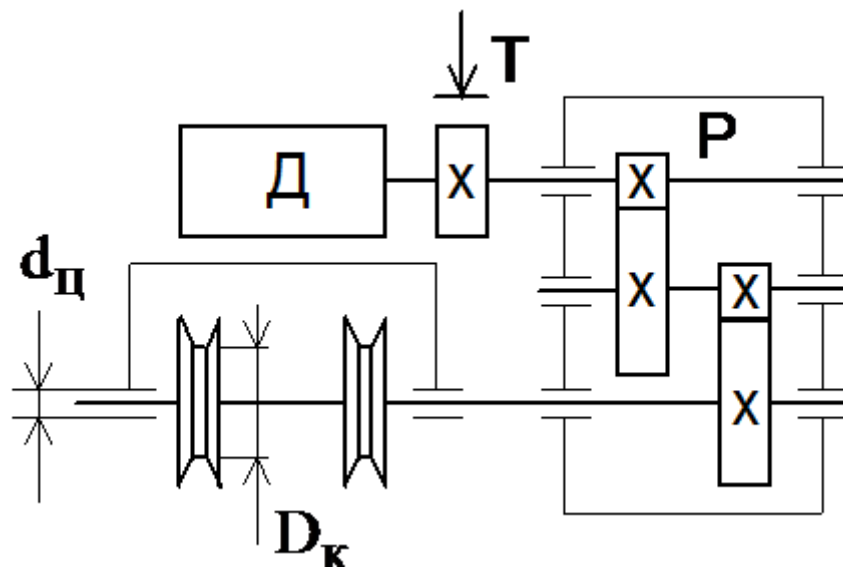


Рисунок 1 – Кинематическая схема механизма передвижения

## 2 Механическая система электропривода

Кинематическая схема СЭП представлена на рисунке 2.

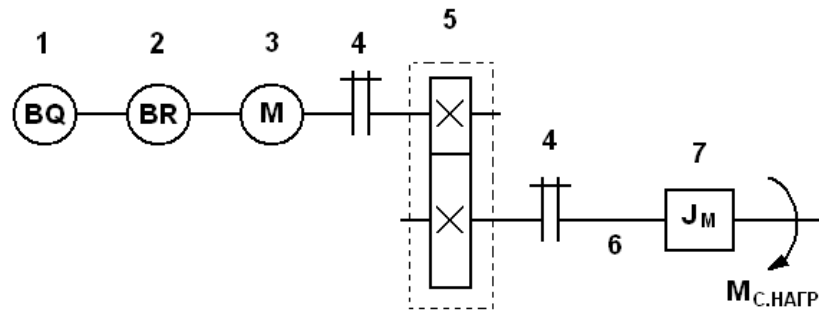


Рисунок 2 – Кинематическая схема механизма СЭП

На схеме рисунка 2 приняты следующие обозначения:

- 1 – датчик положения BQ;
- 2 – датчик скорости BR;
- 3 – двигатель M;
- 4 – муфта;
- 5 – редуктор;
- 6 – вал механизма;
- 7 – момент инерции механизма  $J_M$ .

Упрощенную расчетную схему замещения электропривода можно представить в виде схемы рисунка 3.

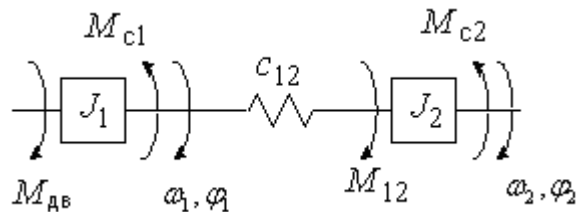


Рисунок 3 – Расчетная схема замещения

На схеме рисунка 3 приняты следующие обозначения:

- $M_{дв}$  - момент двигателя;
- $J_1, J_2$  - моменты инерции первой и второй масс;
- $M_{c1}, M_{c2}$  - нагрузка на валу первой и второй масс;
- $c_{12}$  - коэффициент угловой жесткости.

### 3 Выбор электрооборудования, расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи

#### 3.1 Выбор электродвигателя и расчет его параметров

Расчетные формулы для определения требуемых скоростей электродвигателя и диапазона регулирования:

$$n_{\text{дв.быстр.перем.}} = n_{\text{макс.}} \cdot i_{\text{ред}} = 400 \cdot 3,24 = 1296 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$n_{\text{дв.раб.макс.}} = n_{\text{раб.макс.}} \cdot i_{\text{ред}} = 400 \cdot 3,24 = 1296 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$n_{\text{дв.раб.мин.}} = n_{\text{раб.мин.}} \cdot i_{\text{ред}} = 4 \cdot 3,24 = 12,96 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$\omega_{\text{дв.быстр.перем.}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.быстр.перем.}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1296}{30} = 135,648 \frac{\text{рад}}{\text{сек}};$$

$$\omega_{\text{дв.раб.макс.}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.раб.макс.}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1296}{30} = 135,648 \frac{\text{рад}}{\text{сек}};$$

$$\omega_{\text{дв.раб.мин.}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.раб.мин.}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 12,96}{30} = 1,356 \frac{\text{рад}}{\text{сек}};$$

$$D_{\omega} = \frac{n_{\text{дв.быстр.перем.}}}{n_{\text{дв.раб.мин.}}} = \frac{1296}{12,96} = 100.$$

Расчетные формулы для определения приведенных к валу двигателя моментов нагрузки:

$$M_{\text{С.ПРИВ.}} = (1 + a + b) \cdot \frac{M_{\text{С.НАГР.}}}{i_{\text{РЕД}}}, \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{общее выражение};$$

$$M_{\text{С.ПРИВ.МАХ}} = (1 + a + b) \cdot \frac{M_{\text{С.НАГР.МАКС}}}{i_{\text{РЕД}}} = (1 + 0,119 + 0,119) \cdot \frac{73}{3,24} = 27,902 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{С.ПРИВ.МИН}} = M_{\text{С.ПРИВ.ХХ}} = a \cdot \frac{M_{\text{С.НАГР.МАКС}}}{i_{\text{РЕД}}} = 0,119 \cdot \frac{73}{3,24} = 2,686 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где принять

$$a = b = \frac{(1 - \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}})}{2 \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}} = \frac{(1 - 0,85 \cdot 0,95)}{2 \cdot 0,85 \cdot 0,95} = 0,119 - \text{коэффициенты постоянных } (a)$$

и переменных  $(b)$  потерь механизма.

Условия выбора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$n_{\text{дв.ном.}} \geq n_{\text{дв.быстр.перем.}}, \quad n_{\text{дв.ном.}} \geq 1296 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$M_{\text{ДВ.НОМ}} \geq \frac{M_{\text{С.ПРИВ.МАХ}}}{0,5 + \frac{n_{\text{ДВ.РАБ.МИН}}}{n_{\text{ДВ.НОМ}}^*}} \geq \frac{27,902}{0,5 + \frac{12,96}{1500}} \geq 54,856 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$P_{\text{ДВ.НОМ}} \geq \frac{M_{\text{С.ПРИВ.МАХ}} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n_{\text{ДВ.НОМ}}^*}{0,5 + \frac{n_{\text{ДВ.РАБ.МИН}}}{n_{\text{ДВ.НОМ}}^*}} \geq \frac{27,902 \cdot \frac{3,14}{30} \cdot 1500}{0,5 + \frac{12,96}{1500}} \geq 8,612 \text{ кВт}.$$

Выбираем электродвигатель АИР132М4 со следующими паспортными данными:

$P_H = 11$  кВт – номинальная мощность двигателя;

$U_{1H} = 380$  В – номинальное линейное напряжение;

$n_0 = 1500$  об/мин – синхронная частота вращения;

$s_H = 3,5$  % – номинальное скольжение двигателя;

$\eta_H = 0,875$  – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos \varphi_H = 0,87$  – коэффициент мощности;

$k_i = \frac{I_{II}}{I_H} = 7,5$  о.е. – кратность пускового тока;

$k_{II} = \frac{M_{II}}{M_H} = 2$  о.е. – кратность пускового момента;

$k_{max} = \frac{M_K}{M_H} = 2,7$  о.е. – кратность максимального момента;

$J_{дв} = 0,04$  кг·м<sup>2</sup> – динамический момент инерции.

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \frac{рад}{с}.$$

Номинальная частота вращения двигателя:

$$n_{дв.ном} = (1 - s_H) \cdot n_0 = (1 - 0,035) \cdot 1500 = 1447 \frac{об}{мин}$$

или

$$\omega_{дв.ном} = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,035) \cdot 157 = 151,505 \frac{рад}{с}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{дв.ном} = \frac{P_{дв.ном} \cdot 10^3}{\omega_{дв.ном}} = \frac{11 \cdot 10^3}{151,505} = 72,605 \text{ Нм}.$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток статора (действующее значение) при схеме соединения обмоток звездой:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В};$$

$$I_{1фн} = I_{1лн} = \frac{P_{дв.ном}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,875} = 21,894 \text{ А}.$$

Максимально потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1max} = k_{iдв} \cdot I_{1лн} = 7,5 \cdot 21,894 = 164,204 \text{ А}.$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике:

$$M_K = m_K \cdot M_{дв.ном} = 2,7 \cdot 72,605 = 196,033 \text{ Нм}.$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{II}} \cdot M_{\text{дв.ном}} = 2 \cdot 72,605 = 145,21 \text{ Нм}.$$

T-образная схема замещения асинхронного двигателя для одной фазы приведена на рисунке 4.

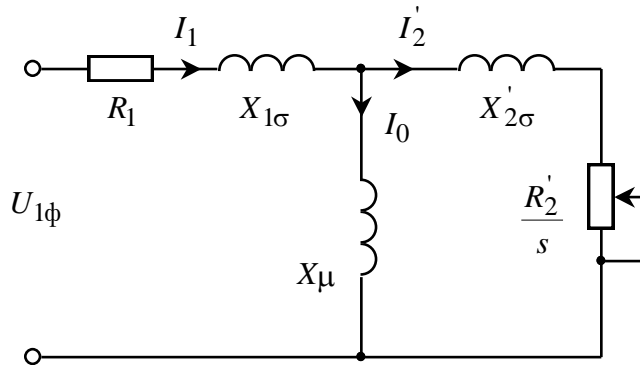


Рисунок 4 – Схема замещения асинхронного двигателя

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{16,755^2 - (0,75 \cdot 21,894 \cdot (1 - 0,035) / (1 - 0,75 \cdot 0,035))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,035) / (1 - 0,75 \cdot 0,035))^2}} = 5,968 \text{ А},$$

где  $I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,853 \cdot 0,875} = 16,755 \text{ А}$  – ток статора двигателя

при частичной нагрузке;

$\eta_{p_*} = \eta_n = 0,875$  – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p_*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_n = 0,98 \cdot 0,87 = 0,853$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$p_* = \frac{P}{P_H} = 0,75$  – коэффициент загрузки двигателя.

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем  $\beta=1$  (коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора):

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,035 \cdot \frac{2,7 + \sqrt{2,7^2 - (1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1 \cdot (2,7 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1 \cdot (2,7 - 1)} = 0,208 \text{ о.е.}$$

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{5,968}{2 \cdot 7,5 \cdot 21,894} = 1,018;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,035)}{2 \cdot 1,018 \cdot 2,7 \cdot 11000} = 2,317.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{2,317}{\left(1 + \frac{1}{0,208}\right) \cdot 1,018} = 0,392 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,018 \cdot 0,392 \cdot 1 = 0,399 \text{ Ом.}$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,208^2} - 1^2} = 4,706.$$

Тогда сопротивление короткого замыкания:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 4,706 \cdot 1,018 \cdot 0,392 = 1,876 \text{ Ом.}$$

Для того, чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания сопротивление рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2H} = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 1,876}{1,018} = 1,069 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 1,876 = 0,788 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_m = \sqrt{\left(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H - R_1 \cdot I_{1H}\right)^2 + \left(U_{1\phi} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - X_{1H} \cdot I_{1H}\right)^2} = \\ = \sqrt{\left(220 \cdot 0,87 - 0,399 \cdot 21,894\right)^2 + \left(220 \cdot \sqrt{1 - 0,87^2} - 0,788 \cdot 21,894\right)^2} = 204,181 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как:

$$X_{\mu H} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{204,181}{5,968} = 34,212 \text{ Ом.}$$

По найденным значениям  $C_1$ ,  $R'_2$  и  $X_{KH}$  определим критическое скольжение:

$$s_{kl} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,018 \cdot 0,392}{\sqrt{0,399^2 + 1,876^2}} = 0,208.$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,788}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,508 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенной к статорной:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,069}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,402 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu n} = \frac{X_{\mu n}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{34,212}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,109 \text{ Гн.}$$

Значение номинального потокосцепления двигателя

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 5,968 \cdot 0,109 = 0,919 \text{ Вб.}$$

Параметры схемы замещения сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1, Ом$	$X_{1\sigma}, Ом$	$L_{1\sigma}, Гн$	$X_{\mu}, Ом$	$L_{\mu}, Гн$	$R_2', Ом$	$X'_{2\sigma}, Ом$	$L'_{2\sigma}, Гн$	$X_{KH}, Ом$
0,399	0,788	$2,508 \cdot 10^{-3}$	34,212	0,109	0,392	1,069	$3,402 \cdot 10^{-3}$	1,876

*Проверка адекватности расчетных параметров двигателя*

Значения номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{эм.н}(s_H) = M_{эм.н} = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[ (X_{KH})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,392}{157 \cdot 0,035 \cdot \left[ 1,876^2 + \left( 0,399 + \frac{0,392}{0,035} \right)^2 + \left( \frac{0,399 \cdot 0,392}{0,035 \cdot 34,212} \right)^2 \right]} = 75,1 \text{ Нм};$$

$$M_{эм.н}^* = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_m + L'_{2\sigma}} \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,109}{0,109 + 0,003402} \cdot 0,919 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{21,894^2 - 5,968^2} = 79,655 \text{ Нм.}$$

$$\frac{M_{эм.н}^*}{M_{об.ном}} = \frac{79,655}{72,605} = 1,097 - \text{условие } M_{эм.н}^* = (1,05 \div 1,1) \cdot M_{об.ном} \text{ выполняется.}$$

### 3.2 Структурная схема механической системы и ее параметры

Структурная схема двухмассовой механической системы представлена на рисунке 5.

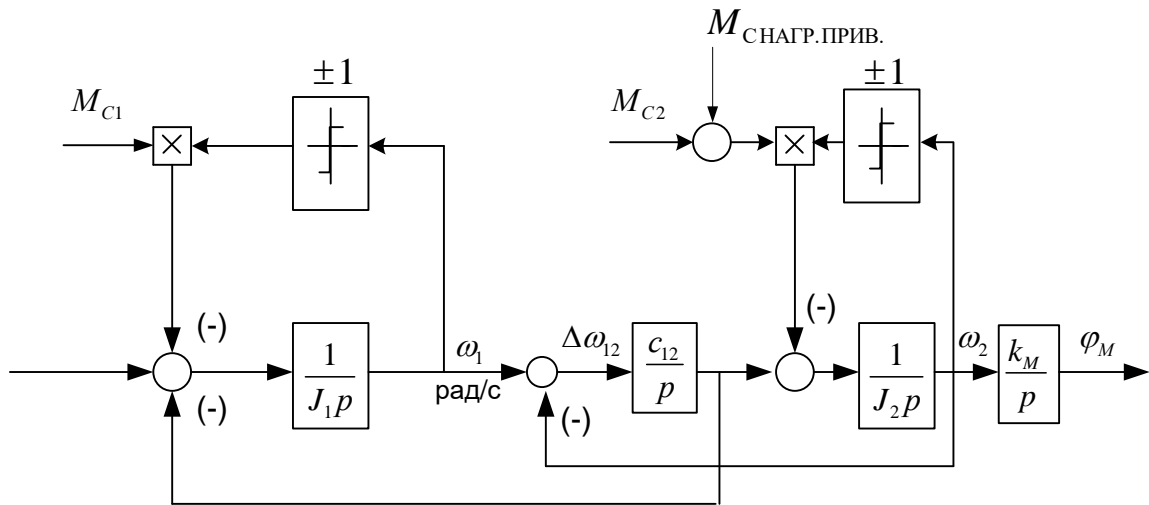


Рисунок 5 – Структурная схема двухмассовой механической системы

Параметры первой и второй массы.

- Момент сопротивления от сил трения на валу первой массы:

$$M_{C1} = M_{эм.н} - M_{об.н} = 75,1 - 72,605 = 2,495 \text{ Нм}.$$

- Момент инерции первой массы:

$$J_1 = 1,1J_{об} = 1,1 \cdot 0,04 = 0,044 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

- Момент инерции второй массы:

$$J_2 = 1,1 \frac{J_M}{i_{ред}^2} = 1,1 \cdot \frac{0,12}{3,24^2} = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

- Момент сопротивления от сил трения на валу второй массы:

$$M_{C2} = a \cdot \frac{M_{С.НАГР.МАКС}}{i_{РЕД}} = 0,119 \cdot \frac{73}{3,24} = 2,686 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- Приведенный коэффициент угловой жесткости:

$$c_{12} = \frac{c_{\varphi_M}}{i_{ред}^2} = \frac{12500}{3,24^2} = 1191 \frac{\text{Нм}}{\text{рад}};$$

- Коэффициент передачи механизма:

$$k_M = \frac{360 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot i_{ред}} = \frac{360 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,24} = 1062 \frac{\text{угл.мин}}{\text{рад}};$$

- Угловая частота собственных колебаний двухмассовой механической системы:

$$\omega_{12} = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2} \cdot c_{12}} = \sqrt{\frac{0,044 + 0,013}{0,044 \cdot 0,013} \cdot 1191} = 348,94 \text{ с}^{-1}.$$

$$f_{12} = \frac{\omega_{12}}{2 \cdot \pi} = \frac{348,94}{6,28} = 55,564 \text{ Гц}.$$



Структурная схема одномассовой механической системы представлена на рисунке 6.

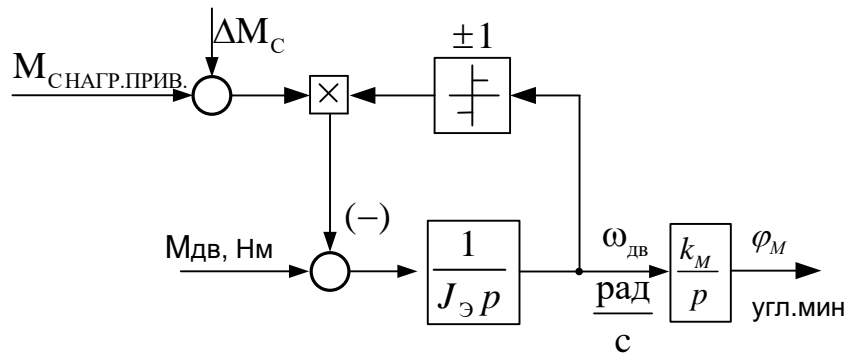


Рисунок 6 – Структурная схема одномассовой механической системы

Эквивалентный момент инерции привода:

$$J_{\text{Э}} = J_1 + J_2 = 0,044 + 0,013 = 0,057 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент сопротивления от сил трения:

$$\Delta M_{\text{с}} = M_{\text{с1}} + M_{\text{с2}} = 2,495 + 2,686 = 5,181 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

### 3.3 Построение области работы электропривода

Область работы электропривода задана в четырех квадрантах плоскости координат:

- область длительной работы ограничена максимальной скоростью электропривода  $\omega_{\text{ЭП max}}$ , рад/с и интервалом изменения момента полезной нагрузки в длительном режиме  $M_{\text{С.МАХ}} \div M_{\text{С.МИН}}$ , Нм;
- область кратковременной работы ограничена максимальной скоростью электропривода  $\omega_{\text{ЭП max}}$ , рад/с и значением максимального момента электропривода в пуско-тормозных режимах  $M_{\text{ЭП max}}$ , Нм.

Максимальная скорость электропривода:

$$\omega_{\text{ЭП max}} = \omega_{\text{дв.быстр.перем.}} = 135,648 \frac{\text{рад}}{\text{сек}};$$

Максимальный момент нагрузки электропривода:

$$M_{\text{С.МАХ}} = M_{\text{с1}} + M_{\text{с2}} + (1+b) \cdot \frac{M_{\text{С.НАГР.МАКС}}}{i_{\text{РЕД}}} = 2,495 + 2,686 + (1+0,119) \cdot \frac{73}{3,24} = 30,397 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Минимальный момент нагрузки электропривода:

$$M_{\text{С.МИН}} = \Delta M_{\text{с}} = 5,181 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент электропривода:

$$M_{\text{ЭП max}} = 1,6 \cdot M_{\text{С.МАХ}} = 1,6 \cdot 30,397 = 48,636 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

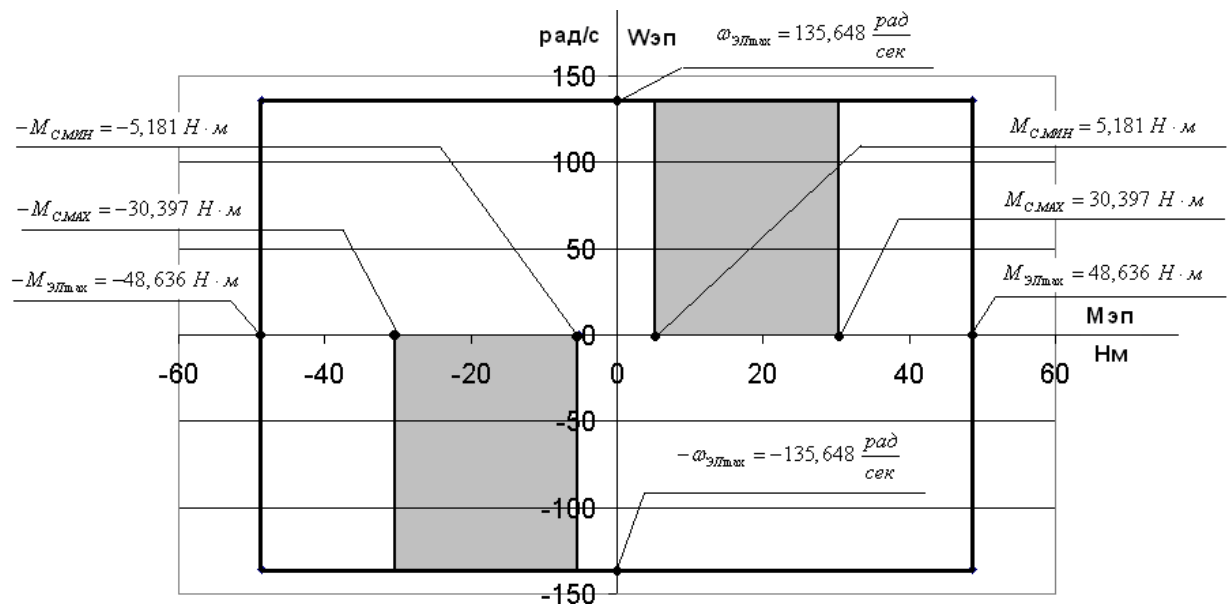


Рисунок 7 – Нагрузочная диаграмма производственного механизма

### 3.4 Выбор преобразователя

Выбор преобразователя частоты производим по следующим рекомендациям:

1. Параметры питающей сети: 3-х фазная сеть 380/220В, 50 Гц.
2. Выходные параметры преобразователя частоты:
  - 3 фазы;
  - максимальное выходное (линейное) напряжение 380В;
  - максимальная выходная частота преобразователя

$$f_{п.макс} > 50 \cdot \frac{\omega_{дв.быстр.перем.}}{\omega_0 \cdot (1 - s_K)} = 50 \cdot \frac{135,648}{157 \cdot (1 - 0,208)} = 54,534 \text{ Гц};$$

- минимальная выходная частота преобразователя

$$f_{п.мин} < 50 \cdot \frac{\omega_{ЭП.мин}}{\omega_0} = 50 \cdot \frac{1,356}{157} = 0,432 \text{ Гц};$$

3. Преобразователь выбирается по номинальному (длительно допустимому) току  $I_{ин}$  и максимальному (кратковременно допустимому) току  $I_{и.макс}$  по следующим условиям:

$$I_{ин} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{с.макс}}{M_{дв.ном}} = 21,894 \cdot \frac{30,397}{72,605} = 9,166 \text{ А};$$

$$I_{и.макс} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{ЭП.макс}}{M_{дв.ном}} = 21,894 \cdot \frac{48,636}{72,605} = 14,666 \text{ А}.$$

Параметры выбранного преобразователя частоты приведены в таблице

4.

Таблица 4 – Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходное напряжение $U_H, В$	Выходная частота $f_H, Гц$	Выходной ток		Рекомендуемая мощность двигателя $P_2, кВт$
	$U_{1л}, В$	$f_C, Гц$			$I_{ин}, А$	$I_{и.макс}, А$	
VLT5006 «Danfoss»	3x380	50	380	0÷132	10	16	4

Принимаем несущую частоту инвертора  $f_{ШИМ} = 8 \text{ кГц}$ .

### 3.5 Расчет механических и электромеханических характеристик системы преобразователь-двигатель

*Расчет естественной механической характеристики*

Механическая характеристика  $M(s)$  системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель рассчитывается для частоты  $f_H = f_{1H} = 50 \text{ Гц}$  по выражению:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phiн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{кн})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}$$

По результатам расчета строится механическая характеристика  $\omega(M)$  (рисунок 8), где  $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ .

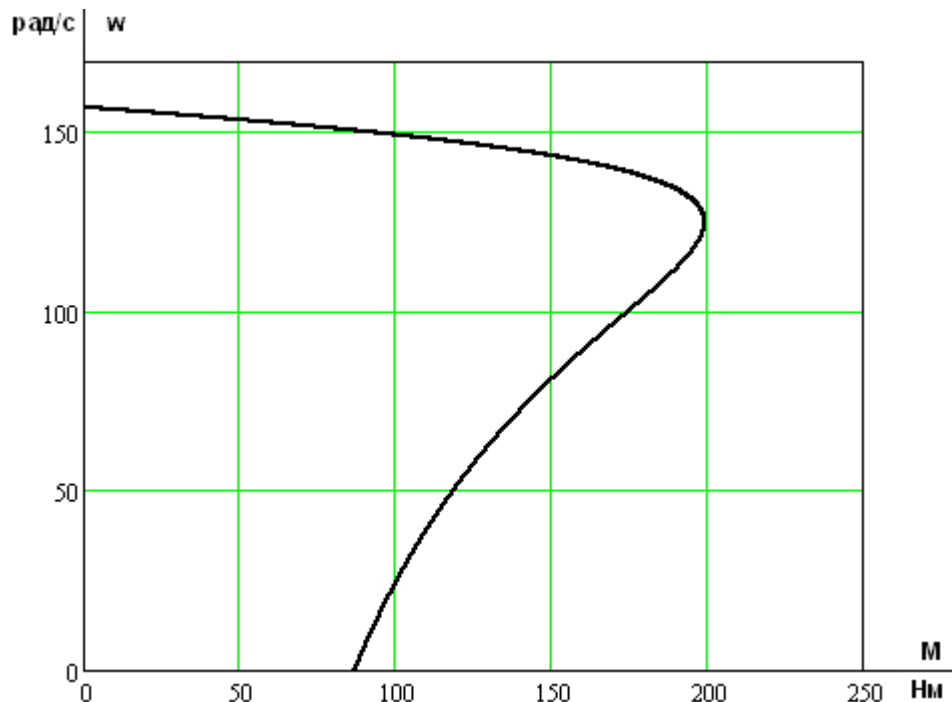


Рисунок 8 – Механическая характеристика электродвигателя  $\omega(M)$

### Расчет естественной электромеханической характеристики

Электромеханическая характеристика  $I_1(s)$  разомкнутой системы преобразователя частоты – асинхронный двигатель рассчитывается для значений частоты  $f_H = f_{1H} = 50 \text{ Гц}$  по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}};$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}}.$$

По результатам расчета строим электромеханическую характеристику  $\omega(I_1)$  (рисунок 9).

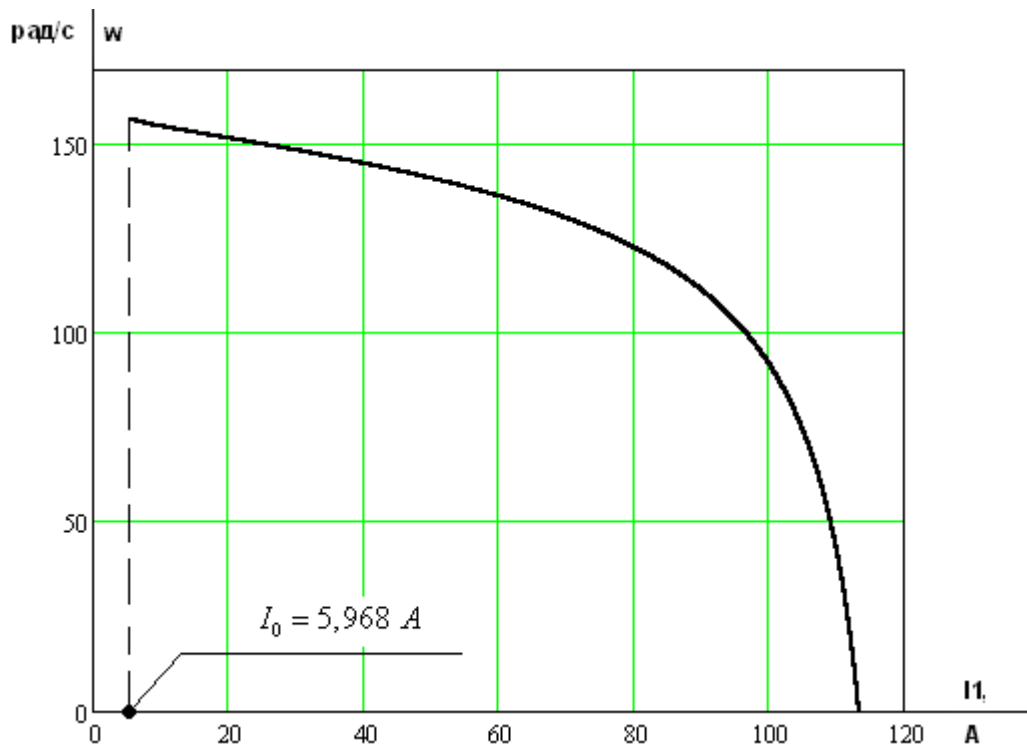


Рисунок 9 – Электромеханическая характеристика  $\omega(I_1)$

Сведем основные расчетные и паспортные значения момента и тока статора в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчетные и паспортные значения момента и тока статора

Паспортные данные	Расчетные значения
$M_{\text{ДВ.Н}} = 72,605 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{ЭМ.Н}} = 75,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$M_{\text{К}} = 196,033 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{ЭМ.К}} = 199,558 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$M_{\text{ДВ.ПУСК}} = 145,21 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{ЭМ.ПУСК}} = 87,368 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$I_{1\text{ФН}} = 21,894 \text{ А}$	$I_1(s_{\text{Н}}) = 20,56 \text{ А}$
$I_{1\text{МАКС}} = 164,204 \text{ А}$	$I_1(0) = 113,586 \text{ А}$

Исходя из полученных значений момента и тока статора, можно сказать, что они практически совпадают с паспортными данными двигателя только на рабочем участке. На остальном участке значения электромагнитного момента и тока фазы статора получились меньше, чем паспортные данные. Однако, так как электропривод работает только на рабочем участке характеристик, данным фактором можно пренебречь.

### Определение заданной области работы

1. В плоскости механических характеристик  $\omega(M)$  (рисунок 10) строим граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{\text{С.мин}}(\omega) = 5,181 \text{ Нм} = \text{const}(m.1-2-3);$$

$$M_{\text{С.макс}}(\omega) = 30,397 \text{ Нм} = \text{const}(m.4-5-6);$$

$$M_{\text{ЭП.макс}}(\omega) = 48,636 \text{ Нм} = \text{const}(m.13-14-15).$$

2. Рассчитываем и строим зависимость длительно-допустимого момента электродвигателя  $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$  (m.8-9-10-11) для частоты  $f_{\text{H}} = f_{1\text{H}} = 50 \text{ Гц}$ :

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left( 0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}.$$

Результаты расчета сводим в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты расчета зависимости  $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$

$\omega, \text{ рад/с}$	0	$\omega_{\text{ЭП.мин}}$	$0,5\omega_{\text{дв.н}}$	$\omega_{\text{ЭП.макс}}$	$\omega_{\text{дв.н}}$
$M_{\text{дв.длит.доп}}, \text{ Нм}$	36,302	36,952	72,605	72,605	72,605

3. Рассчитываем и строим зависимость максимально допустимого момента  $M_{\text{дв.макс}}(\omega)$  для частоты  $f_{\text{H}} = f_{1\text{H}} = 50 \text{ Гц}$ :

$$M_{\text{дв.макс}}(\omega) = M_{\text{К}} = \text{const},$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \left[ 1 + \left( \frac{R_1'}{X_{\mu}} \right)^2 \right]} \right\}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot \left\{ 0,399 + \sqrt{(0,399^2 + 1,876^2) \left[ 1 + \left( \frac{0,399}{34,212} \right)^2 \right]} \right\}} = 199,584 \text{ Нм.}$$

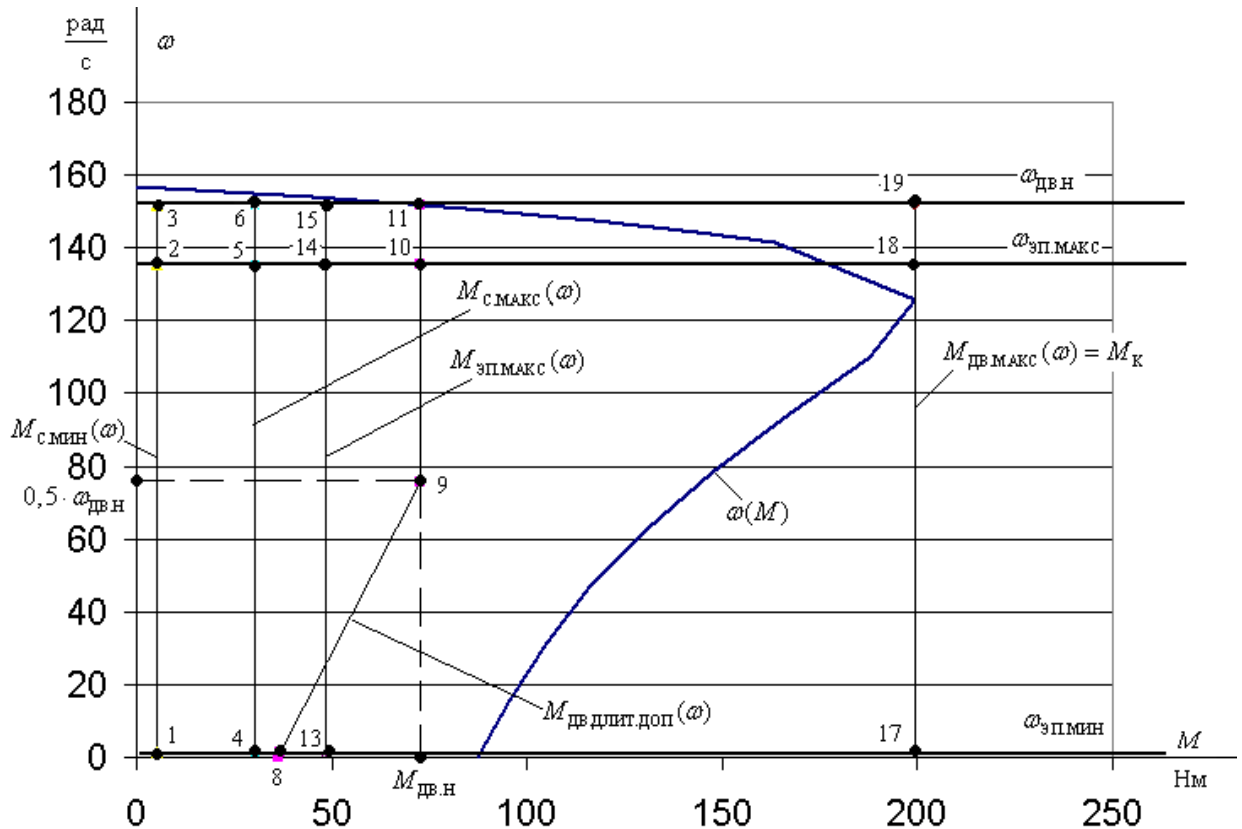


Рисунок 10 – Механические характеристики электропривода и нагрузки

4. В плоскости электромеханических характеристик  $\omega(I_1)$  (рисунок 11) рассчитываем и строим зависимость длительно-допустимого тока электродвигателя  $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$  (т.8–9–10–11):

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \cdot \left( 0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}.$$

Результаты расчета сводим в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты расчета зависимости  $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$

$\omega, \text{ рад/с}$	0	$\omega_{\text{ЭП.мин}}$	$0,5\omega_{\text{дв.н}}$	$\omega_{\text{ЭП.макс}}$	$\omega_{\text{дв.н}}$
$I_{\text{дв.длит.доп}}, \text{ А}$	10,947	11,143	21,894	21,894	21,894

5. Рассчитываем и строим зависимость  $I_{C.макс}(\omega)$  (м.4–5–6), соответствующая длительной максимальной нагрузке  $M_{C.макс}(\omega) = const$ . Для этого на естественной характеристике  $M(\omega)$  определяем соответствующее  $M_{C.макс}$  значение скольжения  $s_{m.6}$ , решив относительно  $s$  уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_{1\phiн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{кн})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = M_{C.макс}.$$

Решив данное уравнение с помощью Mathcad, получаем  $s_{m.6} = 0,0133$ .

Далее рассчитываем значение тока  $I_{C.макс}$  (табл.6) и значение скорости  $\omega_{m.6} = \omega_0 \cdot (1 - s_{m.6}) = 157 \cdot (1 - 0,0133) = 154,916 \frac{рад}{с}$ .

$$I_{C.макс}(\omega) = I_{C.макс} = 9,749 \text{ A}.$$

6. Рассчитываем и строим зависимость  $I_{ЭП.макс}(\omega)$  (м.13–14–15), соответствующую кратковременной максимальной нагрузке  $M_{ЭП.макс}(\omega) = const$ . Для этого на естественной характеристике  $M(\omega)$  определяем соответствующее  $M_{ЭП.макс}$  значение скольжения  $s_{m.15}$ , решив относительно  $s$  уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_{1\phiн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{кн})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = M_{ЭП.макс}.$$

Решив данное уравнение с помощью Mathcad, получаем  $s_{m.15} = 0,0217$ .

Далее рассчитываем значение тока  $I_{ЭП.макс}$  (табл.6) и значение скорости  $\omega_{m.15} = \omega_0 \cdot (1 - s_{m.15}) = 157 \cdot (1 - 0,0217) = 153,587 \frac{рад}{с}$ .

$$I_{ЭП.макс}(\omega) = I_{ЭП.макс} = 13,832 \text{ A}.$$

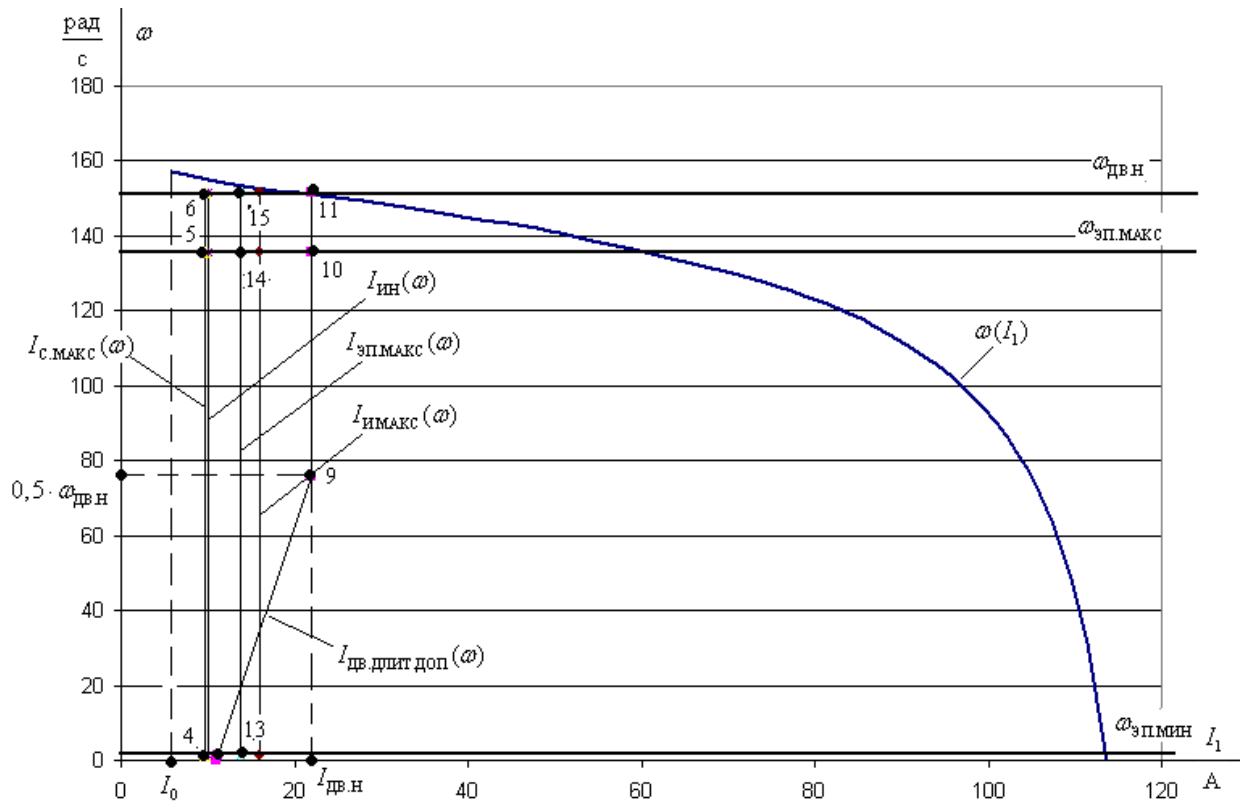


Рисунок 11 – Электромеханические характеристики электропривода и нагрузки

### Проверка правильности выбора двигателя

По результатам построения механических характеристик электропривода и нагрузки проверяем правильность выбора двигателя по моменту. Во всем диапазоне регулирования должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ДВ.ДЛИТ.ДОП}}(\omega) &\geq M_{\text{С.МАКС}} \\ M_{\text{ДВ.МАКС}}(\omega) &\geq M_{\text{ЭП.МАКС}} \end{aligned} \right\}$$

ИЛИ

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{Т.8}} &\geq M_{\text{С.МАКС}} \\ M_{\text{Т.9}} &\geq M_{\text{С.МАКС}} \\ M_{\text{Т.10}} &\geq M_{\text{С.МАКС}} \\ M_{\text{Т.11}} &\geq M_{\text{С.МАКС}} \\ M_{\text{К}} &\geq M_{\text{ЭП.МАКС}} \end{aligned} \right\}$$

Из графика получаем:

$$\left. \begin{aligned} 36,952 \text{ Н} \cdot \text{м} &> 30,397 \text{ Н} \cdot \text{м} \\ 72,605 \text{ Н} \cdot \text{м} &> 30,397 \text{ Н} \cdot \text{м} \\ 72,605 \text{ Н} \cdot \text{м} &> 30,397 \text{ Н} \cdot \text{м} \\ 72,605 \text{ Н} \cdot \text{м} &> 30,397 \text{ Н} \cdot \text{м} \\ 199,584 \text{ Н} \cdot \text{м} &> 48,636 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \right\}$$

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода и нагрузки проверяется правильность выбора двигателя по



току. Во всем диапазоне регулирования скорости должно выполняться условие:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}}$$

или

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{т.8}} \geq I_{\text{с.макс}} \\ I_{\text{т.9}} \geq I_{\text{с.макс}} \\ I_{\text{т.10}} \geq I_{\text{с.макс}} \\ I_{\text{т.11}} \geq I_{\text{с.макс}} \end{array} \right\}.$$

Из графика получаем:

$$\left. \begin{array}{l} 11,143 \text{ A} > 9,749 \text{ A} \\ 21,894 \text{ A} > 9,749 \text{ A} \\ 21,894 \text{ A} > 9,749 \text{ A} \\ 21,894 \text{ A} > 9,749 \text{ A} \end{array} \right\}.$$

Следовательно, двигатель по току и моменту выбран правильно.

### ***Проверка правильности выбора преобразователя***

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода и нагрузки проверяется правильность выбора преобразователя. Во всем диапазоне регулирования должны выполняться условия:

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{с.макс}}(\omega) \leq I_{\text{ин}} \\ I_{\text{эл.макс}}(\omega) \leq I_{\text{имакс}} \end{array} \right\}.$$

Получаем:

$$\left. \begin{array}{l} 9,749 \text{ A} < 10 \text{ A} \\ 13,832 \text{ A} < 16 \text{ A} \end{array} \right\}.$$

Следовательно, преобразователь выбран правильно.

Вывод по анализу полученных характеристик (рисунки 10 и 11): система преобразователь частоты – асинхронный двигатель с векторным управлением может обеспечить длительную работу в интервале изменения нагрузки от  $M_{\text{с.мин}} = 5,181 \text{ Н}\cdot\text{м}$  до  $M_{\text{с.макс}} = 30,397 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и заданный кратковременный максимальный момент  $M_{\text{эл.макс}} = 48,636 \text{ Н}\cdot\text{м}$  во всем диапазоне регулирования скорости от  $\omega_{\text{эл.мин}} = 1,356 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  до

$$\omega_{\text{эл.макс}} = 135,648 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

### 3.6 Структурная схема силового канала электропривода и расчет ее параметров

В силовой канал электропривода входят:

- преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, выполняющий функцию электромеханического преобразователя;
- механическая система, выполняющая функцию механического преобразователя.

При решении задач анализа и синтеза регулируемых асинхронных электроприводов обычно применяются модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной электрической машины и выполненные в неподвижной или во вращающейся двухфазной системе координат.

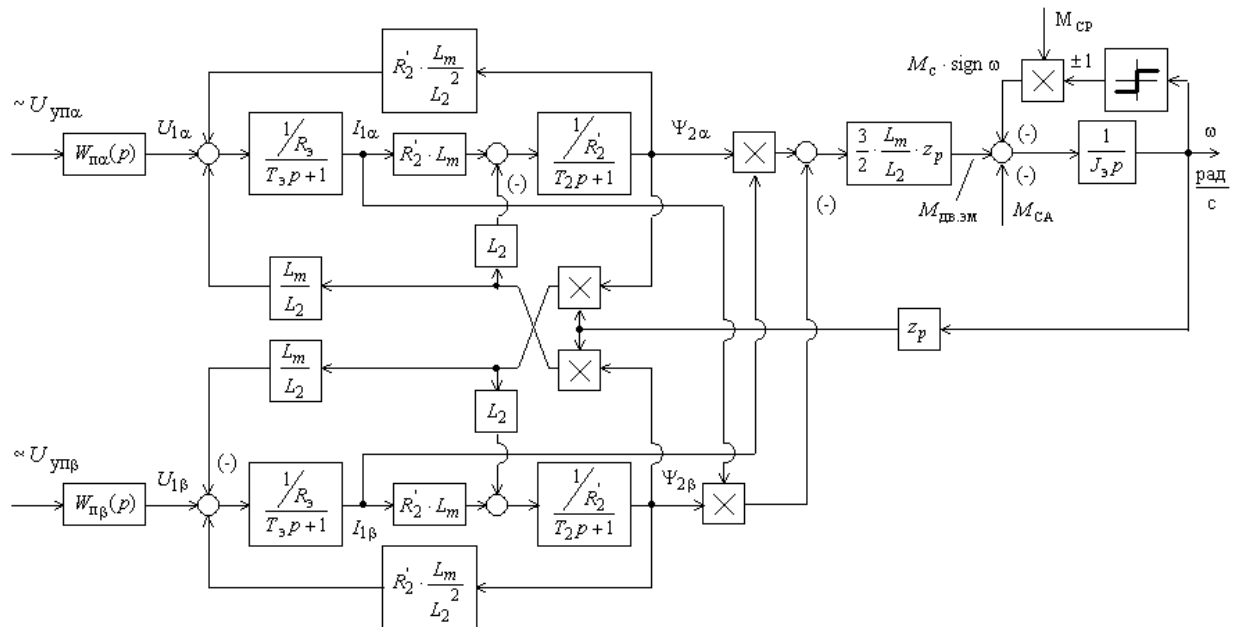


Рисунок 12 – Структурная схема силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной двухфазной системе координат

#### Расчет параметров преобразователя

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя:

$$k_{II} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\phiи}}{U_{уп.макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,113,$$

где  $U_{уп.макс}$  – максимальное значение напряжения управления.

Принимаем  $U_{уп.макс} = 10В$ .

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_H = \frac{0,5}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{0,5}{8000} = 62,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

### **Расчет параметров двигателя**

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 2,508 \cdot 10^{-3} + 0,109 = 0,111 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\sigma}' + L_\mu = 3,402 \cdot 10^{-3} + 0,109 = 0,112 \text{ Гн}.$$

Коэффициент рассеяния магнитного потока:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,109^2}{0,111 \cdot 0,112} = 0,052.$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора:

$$R_\sigma = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 0,399 + 0,392 \cdot \frac{0,109^2}{0,112^2} = 0,767 \text{ Ом}.$$

Электромагнитные постоянные времени статора и ротора:

$$T_\sigma = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_\sigma} = \frac{0,052 \cdot 0,112}{0,767} = 0,007573 \text{ с};$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,112}{0,392} = 0,287 \text{ с}.$$

## **4 Линеаризованная САУ СЭП**

### **4.1 Структурная схема линеаризованной САУ РЭП**

Следящий электропривод реализуется на базе регулируемого электропривода с использованием встроенного технологического регулятора привода или подключением технологического модуля дополнительного внешнего контура регулирования технологического параметра.

Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 13. Электропривод реализован по схеме с независимым управлением потокосцеплением.

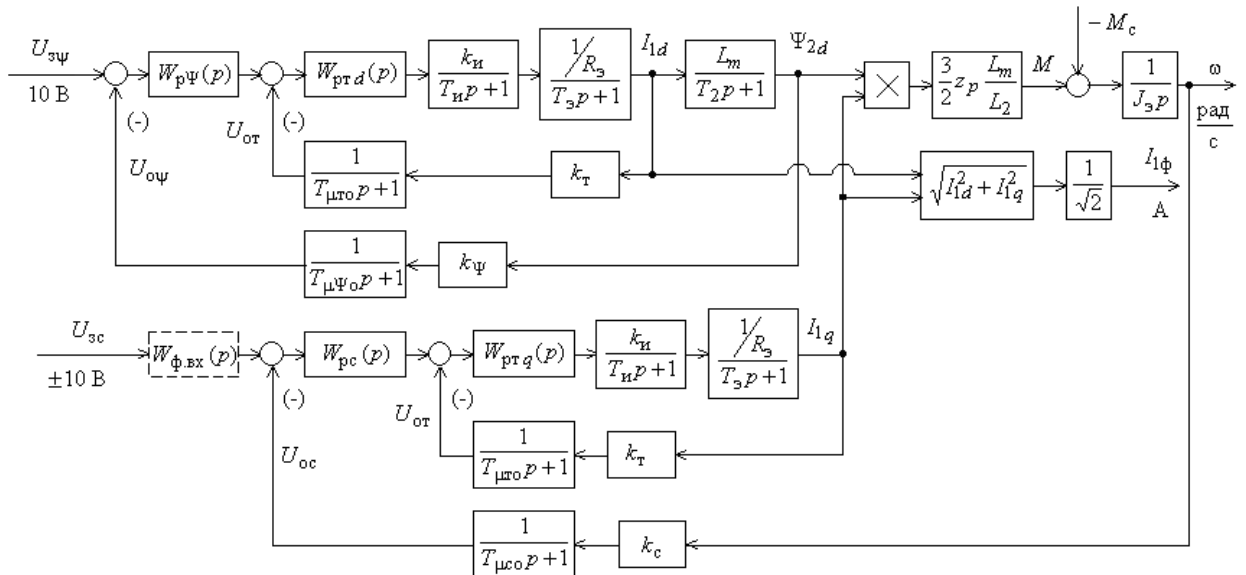


Рисунок 13 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

На схеме приняты следующие обозначения:

$W(p)_{\text{пр}}, W(p)_{\text{р}\psi}, W(p)_{\text{р}\text{с}}$  – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости;

$k_{\text{т}}$  – коэффициент обратной связи по току, В/А;

$k_{\psi}$  – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора, В/Вб;

$k_{\text{с}}$  – коэффициент обратной связи по скорости,  $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$ ;

$T_{\text{ст}} = \frac{1}{f_{\text{шмм}}} \cdot n_{\text{т}} = \frac{1}{8000} \cdot 8 = 0,001 \text{ с}$  – период сглаживания результатов

измерения тока, где  $n_{\text{т}}=8$  – принятое число измерений;

$T_{\mu\text{то}} = \frac{T_{\text{ст}}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,00034 \text{ с}$  – малая постоянная времени цепи обратной

связи по току;

$T_{\text{с}\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{\text{шмм}}}\right) \cdot n_{\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 3 = 0,006 \text{ с}$  – период расчета

потокосцепления, где  $n_{\psi}=3$  – принятое число измерений;

$T_{\mu\psi\text{o}} = \frac{T_{\text{с}\psi}}{3} = \frac{0,006}{3} = 0,002 \text{ с}$  – малая постоянная времени цепи обратной

связи по потокосцеплению;

$T_{\text{с}\text{с}} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{\text{шмм}}}\right) \cdot n_{\text{с}} = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 3 = 0,006 \text{ с}$  – период расчета (измерения)

скорости, где  $n_{\text{с}}=3$  – принятое число измерений;

$T_{\mu\text{с}\text{o}} = \frac{T_{\text{с}\text{с}}}{3} = \frac{0,006}{3} = 0,002 \text{ с}$  – малая постоянная времени цепи обратной

связи по скорости.

Максимально допустимое значение тока при постоянном токоограничении  $I_{ЭП.макс} = 13,832 \text{ A} = const$

$$I_{1умакс} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{ЭПмакс}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{13,832^2 - 5,968^2} = 17,647 \text{ A}.$$

В однозонном электроприводе с векторным управлением  $U_{зТмакс} = U_{зЧмакс} = U_{зСмакс} = 10 \text{ В} = const$ .

## 4.2 Оптимизация контура тока

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью и полной компенсацией внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя приведена на рисунке 14. Контуров токов  $I_{1x}$  и  $I_{1y}$  идентичные.

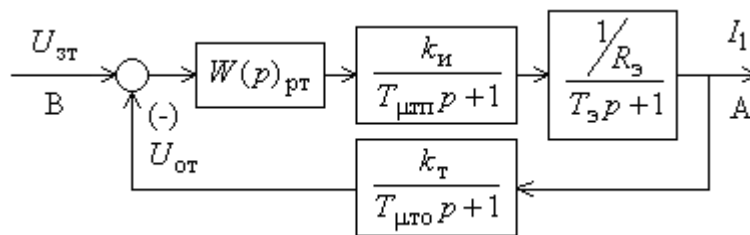


Рисунок 14 – Структурная схема контура тока

На схеме приняты обозначения:

$U_{зТ}$  – напряжение задания на ток, В;

$T_{μтп}$  – малая постоянная времени в прямом канале; принимаем

$$T_{μтп} = T_{и} = 62,5 \text{ мкс};$$

$T_{μтo}$  – малая постоянная времени в цепи обратной связи.

Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

$$W_{рТ}(p) = k_{рТ} \cdot \frac{T_{рТ} \cdot p + 1}{T_{рТ} \cdot p}.$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{рТ} = \frac{T_{э} \cdot R_{э}}{k_{и} \cdot k_{т} \cdot a_{т} \cdot T_{μтэ}} = \frac{0,007573 \cdot 0,767}{31,113 \cdot 0,567 \cdot 2 \cdot 0,0004025} = 0,409,$$

где

$T_{μтэ} = T_{μтп} + T_{μтo} = 0,0000625 + 0,00034 = 0,0004025 \text{ с}$  – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура;

$$k_{т} = \frac{U_{зТмакс}}{I_{1умакс}} = \frac{10}{17,647} = 0,567 \frac{\text{В}}{\text{А}} \text{ – коэффициент обратной связи по току,}$$

принимаем  $U_{зТмакс} = 10 \text{ В}$ ;

$a_{т} = 2$  – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{рТ} = T_{э} = 0,007573 \text{ с}.$$

Контур тока имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз.т}} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu\text{тп}} \cdot T_{\mu\text{то}} \cdot T_{\mu\text{тэ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}} \cdot p} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 0,0000625 \cdot 0,00034 \cdot 0,0004025 \cdot p^3 + 2 \cdot 0,0004025^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,0004025 \cdot p} =$$

$$= \frac{1}{0,01711 \cdot 10^{-9} \cdot p^3 + 0,324 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0,805 \cdot 10^{-3} \cdot p};$$

– замкнутого контура

$$W(p)_{\text{зам.т}} = \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{то}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{тп}} \cdot T_{\mu\text{то}} \cdot T_{\mu\text{тэ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}} \cdot p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{то}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}} \cdot p + 1} = \frac{\frac{1}{0,567} \cdot (0,00034 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,0004025^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,0004025 \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{0,0006 \cdot p + 1,765}{0,324 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0,805 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}.$$

Ожидаемые показатели качества работы контура тока:

– установившаяся ошибка  $\Delta I_{\text{уст}} = 0$ ;

– полоса пропускания по модулю  $\omega_n^{(м)} = \infty \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

– полоса пропускания по фазе

$$\omega_n^{(ф)} = \frac{0,9}{T_{\mu\text{тп}} + T_{\mu\text{то}}} = \frac{0,9}{0,0000625 + 0,00034} = 2236 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– перерегулирование  $\sigma \approx 6,7\%$ ;

– время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{\text{пу1}}^{(5)} \approx 2,75 \cdot (T_{\mu\text{тп}} + T_{\mu\text{то}}) = 2,75 \cdot (0,0000625 + 0,00034) = 0,001107 \text{ с};$$

$$t_{\text{пу2}}^{(5)} \approx 6 \cdot (T_{\mu\text{тп}} + T_{\mu\text{то}}) = 6 \cdot (0,0000625 + 0,00034) = 0,002415 \text{ с}.$$

### 4.3 Оптимизация контура потокосцепления

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка:

$$W(p)_{\text{зам.т}} = \frac{\frac{1}{k_T}}{T_T \cdot p + 1} = \frac{\frac{1}{0,567}}{0,805 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1} = \frac{1,765}{0,805 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1},$$

где  $T_T = a_T \cdot T_{\mu\text{тэ}} = 2 \cdot 0,0004025 = 0,805 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 15.

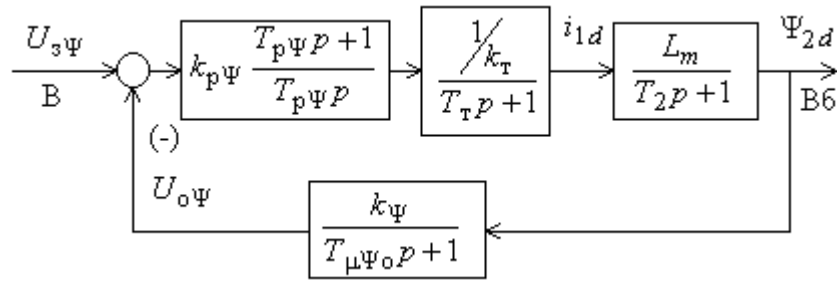


Рисунок 15 – Структурная схема контура потокоцепления с ПИ-регулятором

Коэффициент усиления регулятора потокоцепления:

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi} \cdot \frac{1}{a_\Psi \cdot (T_T + T_{\mu\Psi_0})} = \frac{0,287 \cdot 0,567}{0,109 \cdot 10,88} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000805 + 0,002)} = 24,453,$$

где

$$k_\Psi = \frac{U_{з\Psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{нн}}} = \frac{10}{0,919} = 10,88 \frac{\text{В}}{\text{Вб}} \quad \text{— коэффициент обратной связи по}$$

потокоцеплению, принимаем  $U_{з\Psi \text{ макс}} = 10 \text{ В}$ ;

$a_\Psi = 2$  — коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора потокоцепления:

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0,287 \text{ с.}$$

Контур потокоцепления, настроенный таким образом имеет следующие передаточные функции:

— разомкнутого контура

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{раз.}\Psi} &= \frac{1}{a_\Psi \cdot T_T \cdot T_{\mu\Psi_0} \cdot T_{\mu\Psi_3} \cdot p^3 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3}^2 \cdot p^2 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3} \cdot p} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 0,000805 \cdot 0,002 \cdot 0,0028 \cdot p^3 + 2 \cdot 0,0028^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,0028 \cdot p} = \\ &= \frac{1}{9,016 \cdot 10^{-9} \cdot p^3 + 15,68 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot p}; \end{aligned}$$

— замкнутого контура по управлению

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{зам.}\Psi} &= \frac{\frac{1}{k_\Psi} \cdot (T_{\mu\Psi_0} \cdot p + 1)}{a_\Psi \cdot T_T \cdot T_{\mu\Psi_0} \cdot T_{\mu\Psi_3} \cdot p^3 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3}^2 \cdot p^2 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3} \cdot p + 1} \approx \\ &\approx \frac{\frac{1}{k_\Psi} \cdot (T_{\mu\Psi_0} \cdot p + 1)}{a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3}^2 \cdot p^2 + a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3} \cdot p + 1} = \frac{\frac{1}{10,88} \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,0028^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,0028 \cdot p + 1} = \\ &= \frac{0,1838 \cdot 10^{-3} \cdot p + 0,092}{15,68 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}, \end{aligned}$$

где  $T_{\mu\Psi_3} = T_T + T_{\mu\Psi_0} = 0,000805 + 0,002 = 0,0028 \text{ с}$  — эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

В зависимости от соотношения малых постоянных времени  $T_T$  и  $T_{\mu\Psi_0}$  контур имеет следующие динамические показатели качества работы:

– установившаяся ошибка  $\Delta\psi_{уст} = 0$ ;

– полоса пропускания по модулю

$$\omega_{п}^{(м)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{T_{\tau} + T_{\mu\psi_0}} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{0,000805 + 0,002} = 253,571 \div 321,429 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– показатели отработки ступенчатого управляющего воздействия:

– перерегулирование

$$\sigma \approx (4,3 \div 6,7) \%;$$

– время первого вхождения в 5 % зону

$$t_{\text{пу1}}^{(5)} \approx (4,1 \div 2,75) \cdot (T_{\tau} + T_{\mu\psi_0}) = (4,1 \div 2,75) \cdot (T_{\tau} + T_{\mu\psi_0}) = 0,011 \div 0,0077 \text{ с.}$$

#### 4.4 Оптимизация контура скорости

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка:

$$W(p)_{\text{зам.т}} = \frac{1}{k_{\tau} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,805 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1} = \frac{1,765}{0,805 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1},$$

где  $T_{\tau} = a_{\tau} \cdot T_{\mu\tau} = 2 \cdot 0,0004025 = 0,805 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 16.

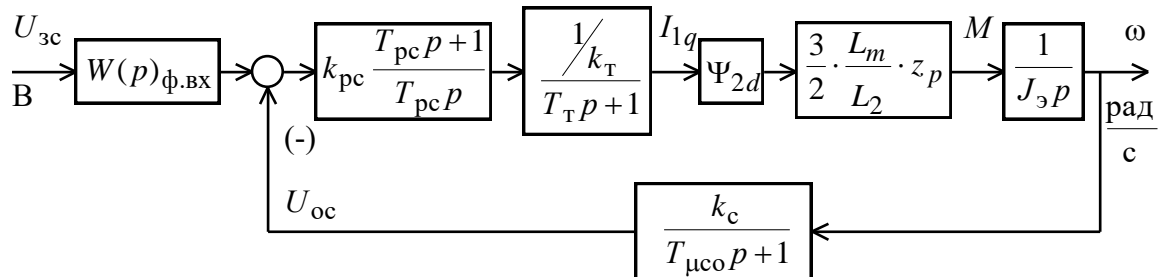


Рисунок 16 – Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W_{\text{рc}}(p) = k_{\text{рc}} \cdot \frac{T_{\text{рc}} \cdot p + 1}{T_{\text{рc}} \cdot p}.$$

Коэффициент усиления регулятора скорости:

$$k_{\text{рc}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot k_{\tau}}{\Psi_{2x} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot (T_{\tau} + T_{\mu\text{сo}})} =$$

$$= \frac{0,057 \cdot 0,567}{0,919 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,109}{0,112} \cdot 2 \cdot 0,074} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000805 + 0,002)} = 28,991,$$

где



$$k_c = \frac{U_{зс\max}}{\omega_{эп\max}} = \frac{10}{135,648} = 0,074 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \quad - \text{коэффициент обратной связи по}$$

потокосцеплению, принимаем  $U_{зс\max} = 10 \text{ В}$ ;

$a_c = 2$  – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot (T_T + T_{\mu\text{co}}) = 2 \cdot 2 \cdot (0,000805 + 0,002) = 0,011 \text{ с},$$

где  $b_c = a_c = 2$  – коэффициенты оптимизации.

Оптимизированный контур скорости с ПИ-регулятором имеет следующие передаточные функции

– разомкнутого контура

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{раз.с}} &= \frac{b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{co}} \cdot p + 1}{b_c \cdot a_c^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{co}} \cdot T_{\mu\text{сз}}^2 \cdot p^4 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{сз}}^3 \cdot p^3 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{сз}}^2 \cdot p^2} = \\ &= \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,002 \cdot p + 1}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000805 \cdot 0,002 \cdot 0,0028^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,0028^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,0028^2 \cdot p^2} = \\ &= \frac{0,011 \cdot p + 1}{0,101 \cdot 10^{-9} \cdot p^4 + 0,175 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 0,0627 \cdot 10^{-3} \cdot p^2}; \end{aligned}$$

– замкнутого контура по управлению

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{зам.}\omega} &= \frac{1}{k_c} \cdot \frac{(b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{сз}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu\text{co}} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{co}} \cdot T_{\mu\text{сз}}^2 \cdot p^4 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{сз}}^3 \cdot p^3 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{сз}}^2 \cdot p^2 + b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{сз}} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1}{0,074} \times \\ &\quad (2 \cdot 2 \cdot 0,0028 \cdot p + 1) \cdot (0,002 \cdot p + 1) \\ &\times \frac{1}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000805 \cdot 0,002 \cdot 0,0028^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,0028^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,0028^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,0028 \cdot p + 1} \end{aligned}$$

где  $T_{\mu\text{сз}} = T_T + T_{\mu\text{co}} = 0,000805 + 0,002 = 0,0028 \text{ с}$  – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

При обработке ступенчатого управляющего воздействия контуром скорости с ПИ-регулятором переходный процесс скорости имеет перерегулирование, превышающее 43%. Для ограничения перерегулирования на уровне не более 8,1% на входе контура скорости необходимо установить два апериодических фильтра 1-го порядка со следующими передаточными функциями:

$$W_{\text{ф.вх1}}(p) = \frac{1}{b_c \cdot a_c \cdot (T_T + T_{\mu\text{co}}) \cdot p + 1} = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot (0,000805 + 0,002) \cdot p + 1} = \frac{1}{0,011 \cdot p + 1};$$

$$W_{\text{ф.вх2}}(p) = \frac{1}{T_{\mu\text{co}} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,002 \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению с двумя фильтрами на входе имеет вид:

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{зам.}\omega} &= \frac{1}{k_c} \cdot \frac{1}{b_c \cdot a_c^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{co}} \cdot T_{\mu\text{сз}}^2 \cdot p^4 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{сз}}^3 \cdot p^3 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{сз}}^2 \cdot p^2 + b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{сз}} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1}{0,074} \times \end{aligned}$$

$$\times \frac{1}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000805 \cdot 0,002 \cdot 0,0028^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,0028^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,0028^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,0028 \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{13,565}{0,101 \cdot 10^{-9} \cdot p^4 + 0,175 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 0,0627 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 0,011 \cdot p + 1}$$

Ожидаемые показатели качества работы контура скорости с ПИ-регулятором и фильтрами на входе:

– установившаяся ошибка  $\Delta\omega_{уст} = 0$ ;

– полоса пропускания по модулю

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{T_{\Gamma} + T_{\mu со}} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{0,000805 + 0,002} = 178,571 \div 192,857 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– полоса пропускания по фазе

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{T_{\Gamma} + T_{\mu со}} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{0,000805 + 0,002} = 128,571 \div 150 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– перерегулирование  $\sigma = (8,1 \div 10) \%$ ;

– время первого и окончательного вхождения в 5% зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{\text{py1}}^{(5)} = (7 \div 5,8) \cdot (T_{\Gamma} + T_{\mu со}) = (7 \div 5,8) \cdot (0,000805 + 0,002) = 0,02 \div 0,016 \text{ с};$$

$$t_{\text{py2}}^{(5)} = (12 \div 9,5) \cdot (T_{\Gamma} + T_{\mu со}) = (12 \div 9,5) \cdot (0,000805 + 0,002) = 0,034 \div 0,027 \text{ с}.$$

#### 4.5 Оптимизация контура положения

Если для измерения положения (или другой технологической координаты) исполнительного органа механизма, оснащенного следящим электроприводом, используется специализированный дискретный или аналоговый датчик положения, то сигнал обратной связи может быть получен практически без запаздывания во времени. В этом случае цепь обратной связи по положению можно принять безынерционной, а малую постоянную времени в цепи обратной связи контура положения

$$T_{\mu по} = 0.$$

Структурная схема контура положения с безынерционной обратной связью приведена на рисунке 17.

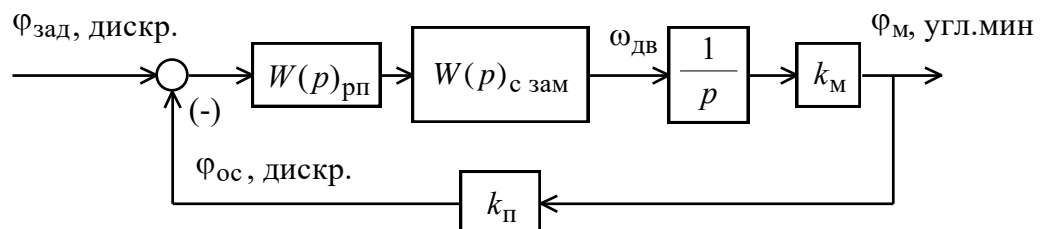


Рисунок 17 – Структурная схема контура положения с безынерционной обратной связью

Передаточная функция П-регулятора положения

$$W_{\text{рп}}(p) = k_{\text{рп}} = 0,003342.$$

Коэффициент усиления регулятора положения находится по выражению

$$k_{\text{рп}} = \frac{k_c}{k_m \cdot k_{\text{п}} \cdot a_{\text{п}} \cdot T_{\text{мэ}}} = \frac{0,074}{1062 \cdot 0,926 \cdot 2 \cdot 0,011} = 0,003342,$$

где

$T_{\text{мэ}} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\text{мсэ}} = 2 \cdot 2 \cdot 0,002805 = 0,011 \text{ с}$  – эквивалентная малая постоянная времени контура положения при настройке контура скорости с ПИ-регулятором;

$a_{\text{п}} = 2$  – коэффициент оптимизации контура положения;

$k_{\text{п}} = k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{дп}} = 1 \cdot 0,926 = 0,926$  – коэффициент обратной связи контура по положению;

$k_{\text{дп}} = \frac{n_{\text{он}}}{360 \cdot 60} = \frac{20000}{360 \cdot 60} = 0,926 \frac{\text{дискрет}}{\text{угл.мин.}}$  – коэффициент передачи импульсного датчика положения;

$k_{\text{оп}} = 1$  – коэффициент преобразования периода выходных сигналов датчика в код угла поворота.

Оптимизированный контур положения с П-регулятором положения и внутренним контуром скорости с ПИ-регулятором скорости в общем случае имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{п раз}} = \frac{1}{a_{\text{п}} b_c^2 a_c^3 T_{\text{мсэ}}^4 p^4 + a_{\text{п}} b_c^2 a_c^3 T_{\text{мсэ}}^3 p^3 + a_{\text{п}} b_c^2 a_c^2 T_{\text{мсэ}}^2 p^2 + a_{\text{п}} b_c a_c T_{\text{мсэ}} p};$$

– замкнутого контура

$$W(p)_{\text{п зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{п}}}}{a_{\text{п}} b_c^2 a_c^3 T_{\text{мсэ}}^4 \cdot p^4 + a_{\text{п}} b_c^2 a_c^3 T_{\text{мсэ}}^3 \cdot p^3 + a_{\text{п}} b_c^2 a_c^2 T_{\text{мсэ}}^2 \cdot p^2 + \rightarrow \rightarrow + a_{\text{п}} b_c a_c T_{\text{мсэ}} \cdot p + 1}.$$

Настройка контура положения при коэффициенте оптимизации  $a_{\text{п}} = 2$  точно соответствует настройке на МО системы 4-го порядка. Замкнутый контур положения представляет собой астатическую систему 1-го порядка по управлению. Показатели качества работы замкнутого контура положения по управлению определяются следующими значениями:

– статическая ошибка по управлению при постоянном значении задающего сигнала  $\varphi_{\text{зад}} = 0$

$$\Delta\varphi_{y \text{ ст}} = 0;$$

– добротность контура по скорости

$$D_{\omega} = k_{\text{п}} \cdot \frac{1}{k_{\text{с}}} \cdot k_{\text{рп}} \cdot k_{\text{м}} = 0,926 \cdot \frac{1}{0,074} \cdot 0,003342 \cdot 1062 = 44,563 \text{ с}^{-1};$$

– полоса пропускания контура по модулю и по фазе

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{(0,282 \div 0,289)}{T_{\text{мс}}} = \frac{(0,282 \div 0,289)}{0,002805} = 100,535 \div 103,03 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{(0,182 \div 0,204)}{T_{\text{мс}}} = \frac{(0,182 \div 0,204)}{0,002805} = 64,884 \div 72,727 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5 % зону при отработке скачка задания

$$\sigma = 6,24 \%;$$

$$t_{\text{py1}}^{(5)} = (12,1 \div 13,2) \cdot T_{\text{мс}} = (12,1 \div 13,2) \cdot 0,002805 = 0,034 \div 0,037 \text{ с};$$

$$t_{\text{py2}}^{(5)} = (19,5 \div 20,3) \cdot T_{\text{мс}} = (19,5 \div 20,3) \cdot 0,002805 = 0,055 \div 0,057 \text{ с}.$$

## 5 Нелинейная САУ СЭП

### 5.1 Структурная схема нелинейной САУ СЭП. Анализ основных нелинейностей

Структурная схема нелинейной САУ следящего электропривода приведена на рисунке 18. Основные нелинейности элементов системы управления электропривода:

- насыщение регуляторов тока, потокосцепления, скорости и положения  $U_{рт.макс} = \pm 10B$ ,  $U_{р\psi.макс} = \pm 10B$ ,  $U_{рс.макс} = \pm 10B$ ,  $U_{рп.макс} = \pm 10B$ ;

- ограничение выходного напряжения инвертора

$$E_{II} = \sqrt{2} \cdot U_{1\phiн} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В};$$

- реактивный характер нагрузки  $M_c(\omega) = M_c \cdot \text{sign} \omega$ .

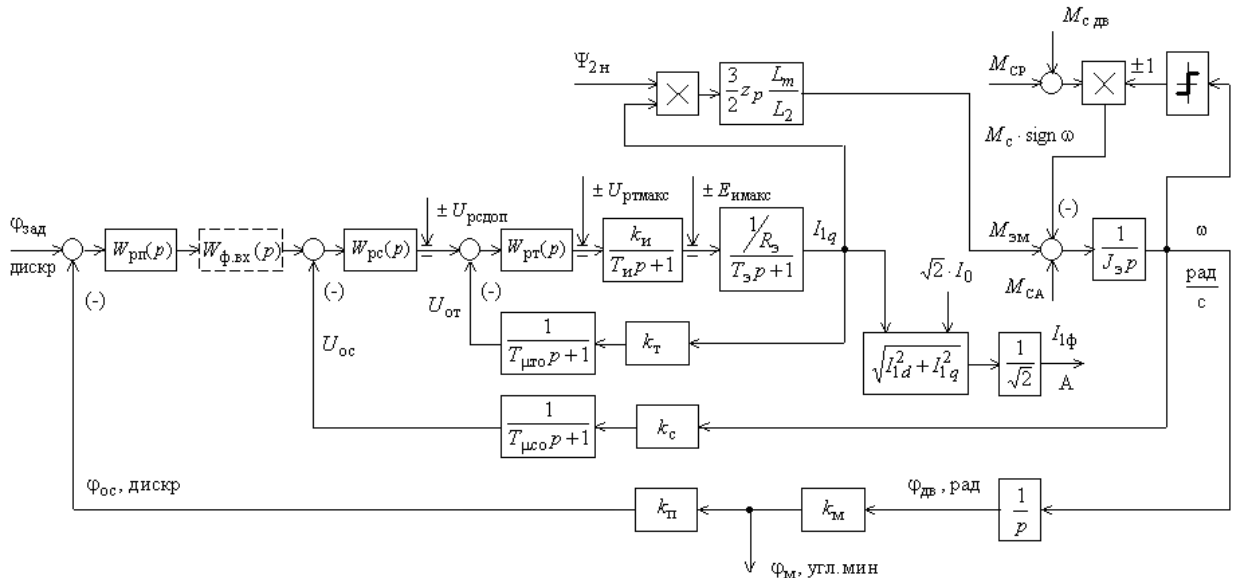


Рисунок 18 – Структурная схема нелинейной непрерывной САУ СЭП

## 5.2 Имитационная модель нелинейной САУ СЭП. Параметры блоков

Имитационная модель нелинейной САУ СЭП в программной среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 19.

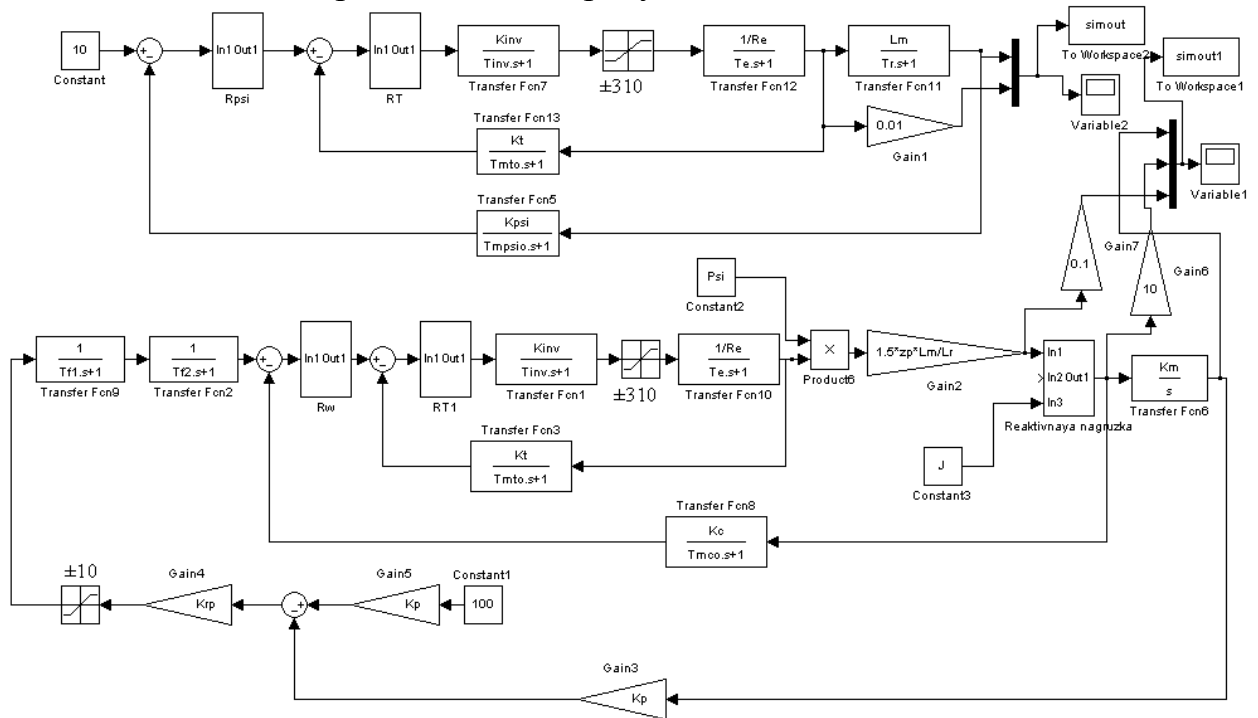


Рисунок 19 – Имитационная модель нелинейной САУ СЭП

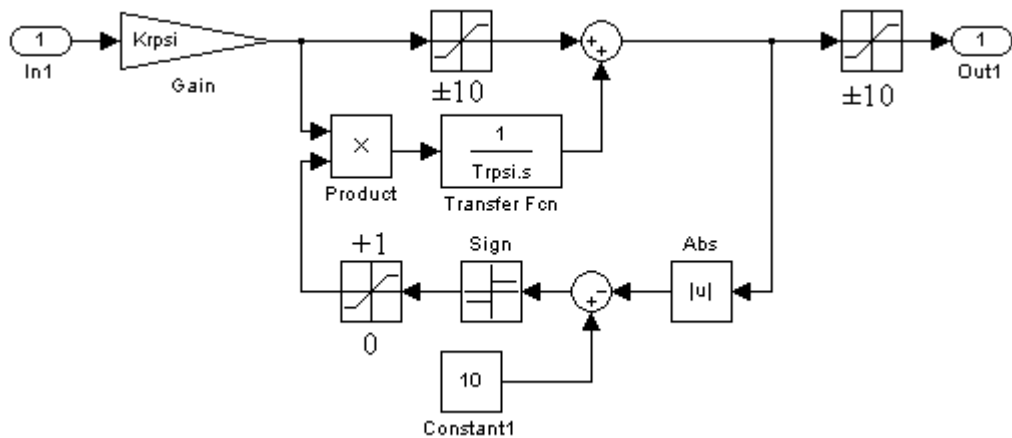


Рисунок 20 – Имитационная модель ПИ-регулятора потокосцепления

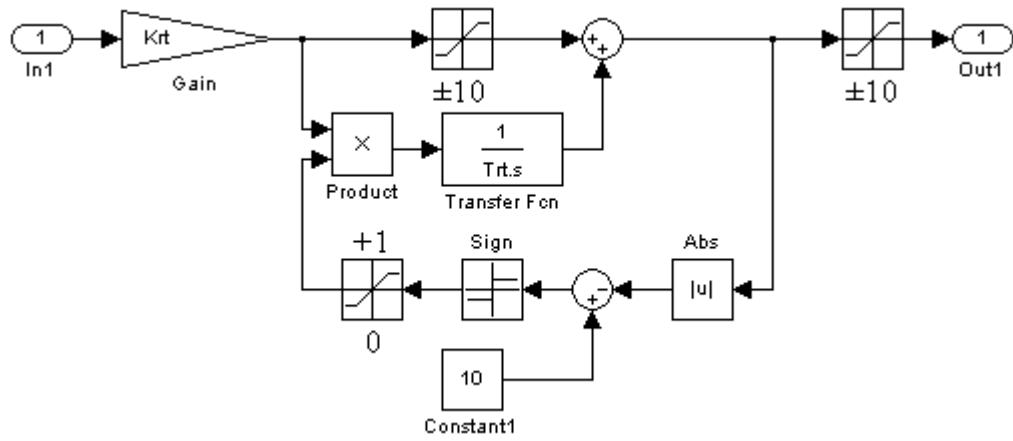


Рисунок 21 – Имитационная модель ПИ-регулятора тока

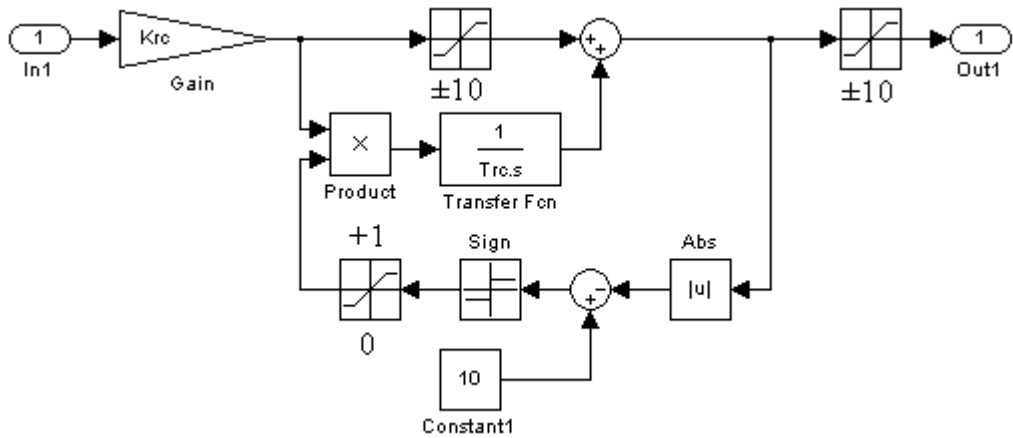


Рисунок 22 – Имитационная модель ПИ-регулятора скорости

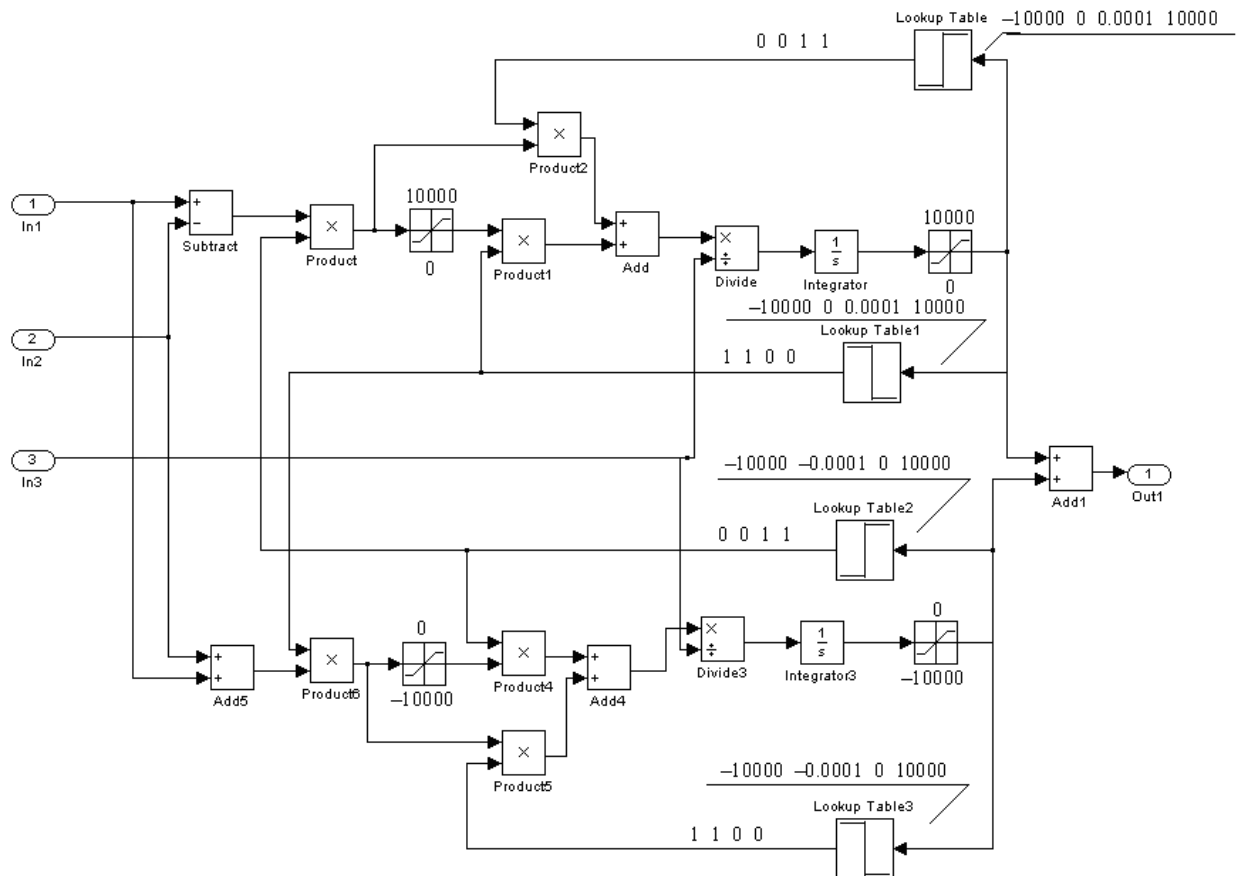


Рисунок 23 – Имитационная модель реактивной нагрузки

**Протокол вводимых параметров:**

```

f=50;
Rs=0.399;
Rr=0.392;
Ls_=0.788/(2*pi*f);
Lr_=1.069/(2*pi*f);
Lm=34.212/(2*pi*f);
p=4;
J=0.057;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=(Lr_+Lm);
G=1-Lm^2/(Ls*Lr);
Re=Rs+Rr*Lm^2/Lr^2;
Te=G*Ls/Re;
Tr=Lr/Rr;
zp=p/2;
Psi=0.919;
%Параметры системы управления
Kinv=31.113;
finv=8000;
Tinv=0.5/finv;
Tmto=0.00034;
Tmpsio=0.002;
Tmco=0.002;
Kt=10/17.647;
Krt=(Te*Re)/(Kinv*Kt*2*(Tinv+Tmto));
Trt=Te;
Tt=2*(Tinv+Tmto);
Kpsi=10/Psi;
Krpai=(Tr*Kt)/(Lm*Kpsi*2*(Tt+Tmpsio));
Trpsi=Tr;

```



```

Kc=10/135.648;
Krc=(J*Kt)/(Psi*1.5*Lm/Lr*zp*Kc*2*(Tt+Tmco));
Trc=2*2*(Tt+Tmco);
Tf1=Trc;
Tf2=Tmco;
Tmpe=2*2*(Tt+Tmco);
Km=1062;
Kp=0.926;
Krp=Kc/(Km*Kp*2*Tmpe);

```

### 5.3 Исследование нелинейной САУ СЭП в заданных режимах работы

#### Моделирование работы контура потокосцепления

Процессы предварительного намагничивания асинхронного двигателя представлены на рисунке 24.

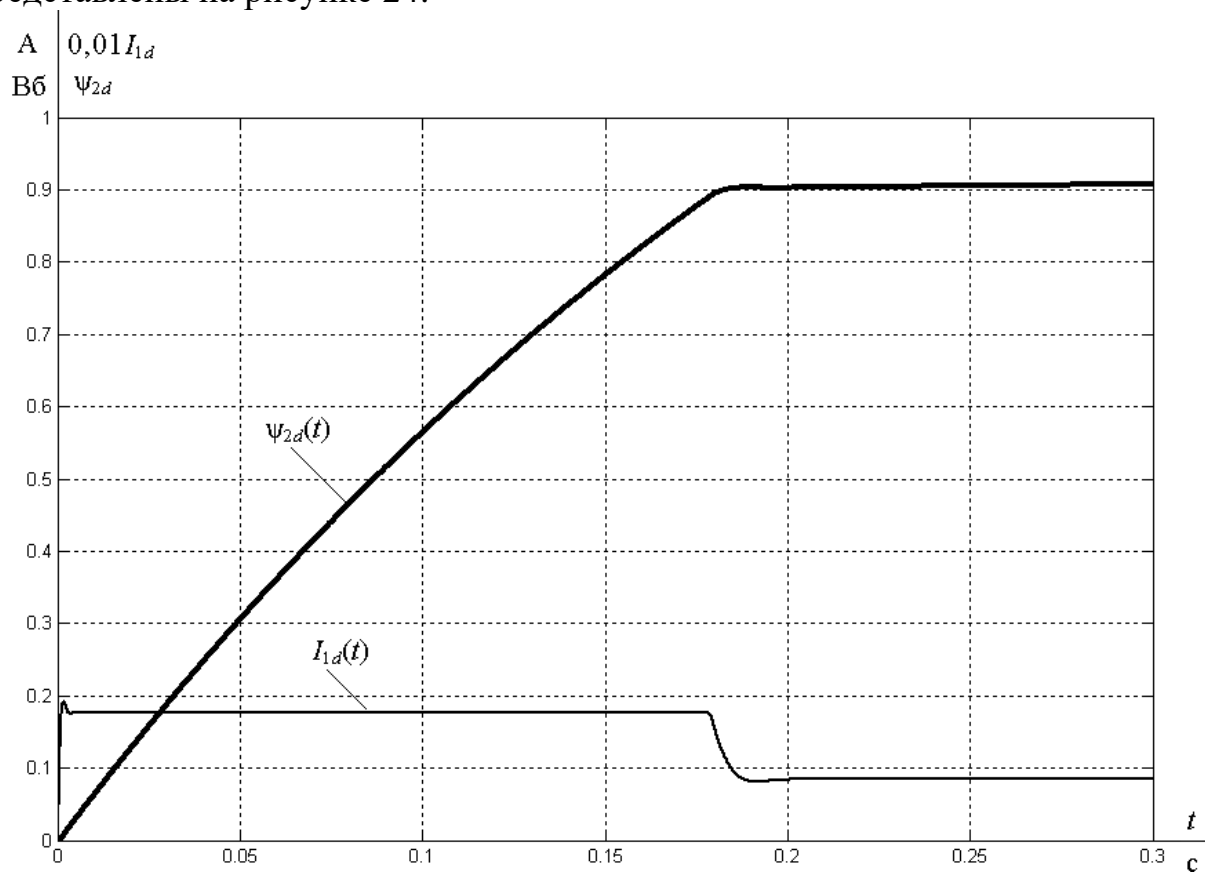


Рисунок 24 – Переходные процессы в контуре потокосцепления при напряжении задания  $U_{3П}=10$  В

### Отработка малых перемещений

На вход электропривода подаем скачок управляющего воздействия  $\varphi_{\text{зад}} = 100$  дискрет при нагрузке  $M_c = 0$  Н·м. Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП малых перемещений представлены на рисунке 25.

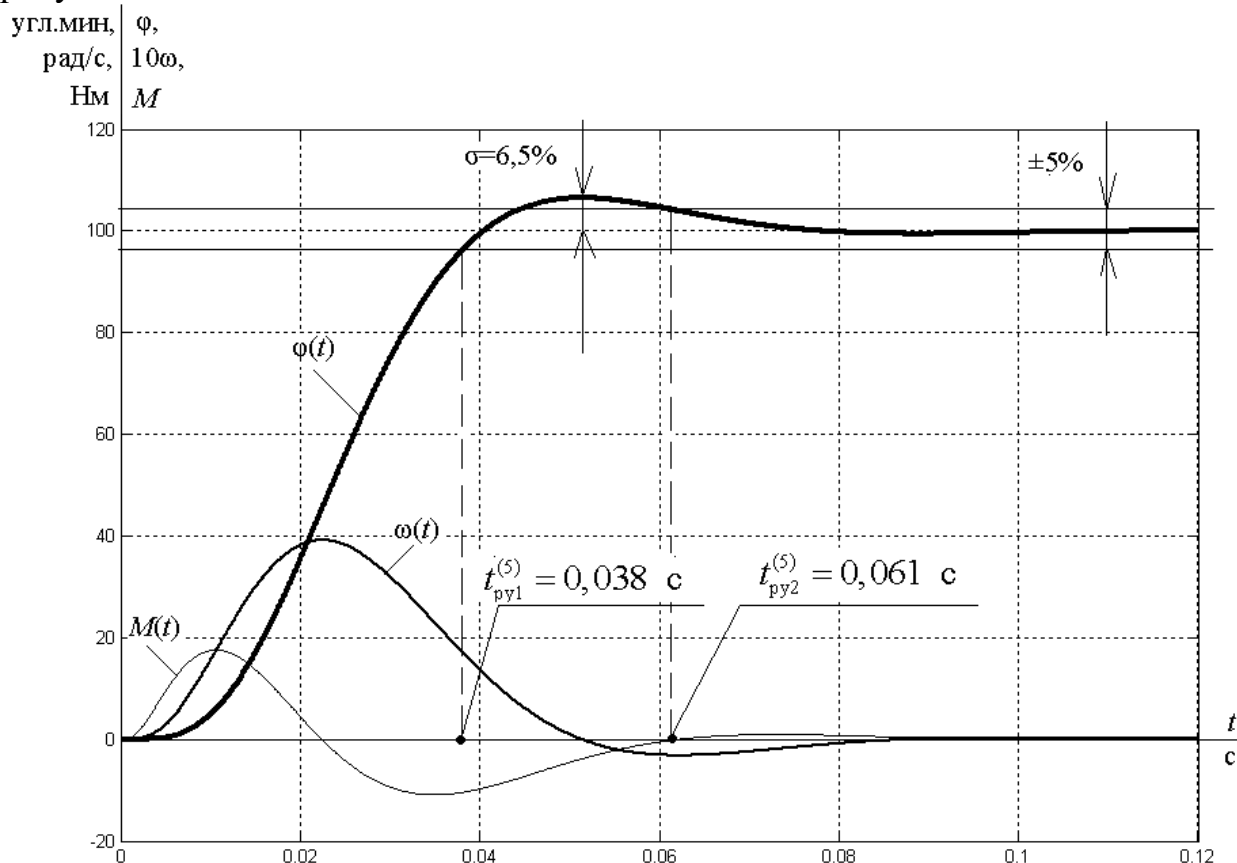


Рисунок 25 – Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП малых перемещений

Как видно из рисунка, переходные процессы по своему виду аналогичны процессам в линейной системе. Скорость и момент электропривода не достигают своих максимальных значений, что свидетельствует о том, что звенья модели не входят в насыщение.

### Отработка средних перемещений

На вход электропривода подаем скачок управляющего воздействия  $\varphi_{\text{зад}} = 1000$  дискрет при нагрузке  $M_c = 0$  Н·м. Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП средних перемещений представлены на рисунке 26.

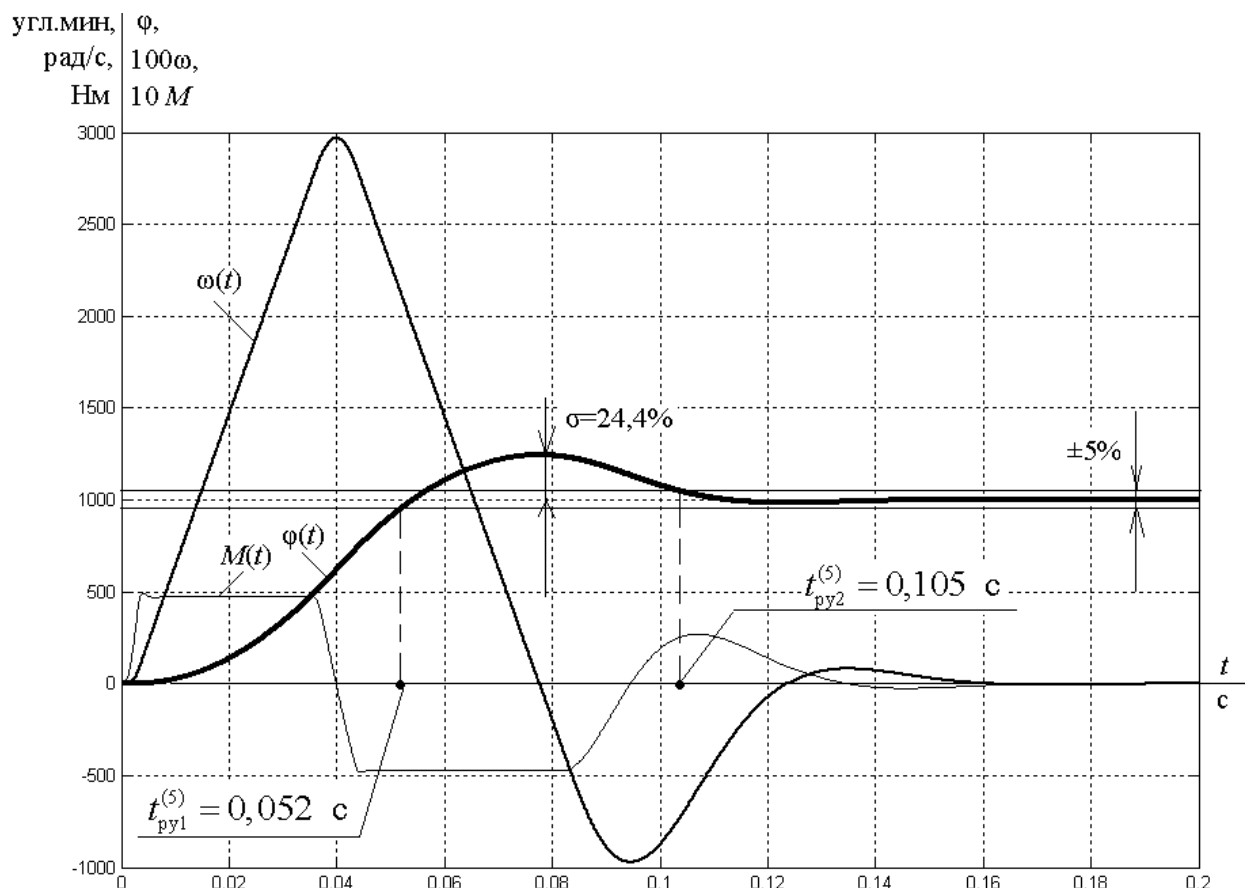


Рисунок 26 – Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП средних перемещений

Из графиков видно, что процессы в системе начинают приобретать нелинейный характер. Момент электропривода достигает своего максимального значения, а скорость еще нет. Перерегулирование и время переходного процесса возросли по сравнению со случаем отработки САУ СЭП малых перемещений.

### *Отработка больших перемещений*

На вход электропривода подаем скачок управляющего воздействия  $\varphi_{зад} = 50000$  дискрет при нагрузке  $M_c = 0$  Н·м. Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП больших перемещений представлены на рисунке 27.

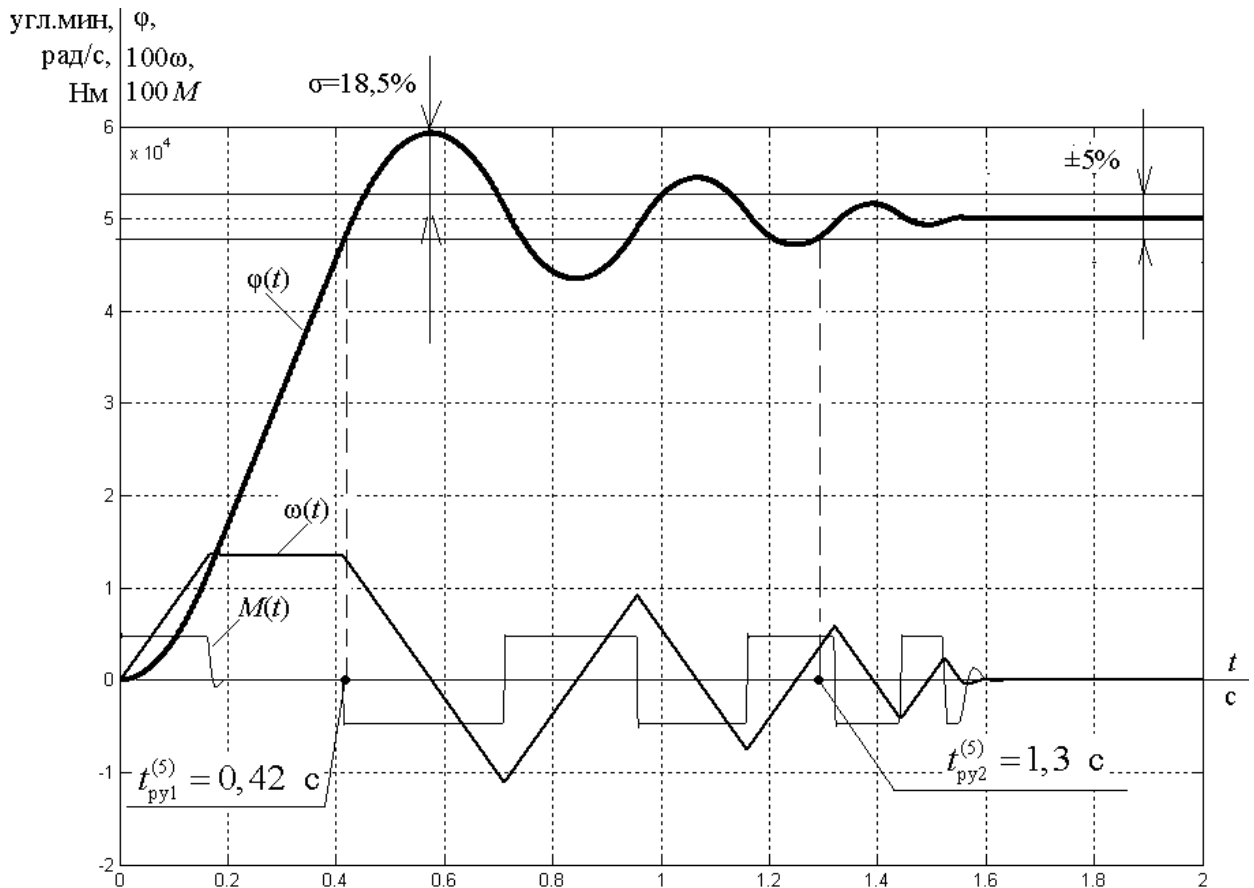


Рисунок 27 – Переходные процессы при обработке нелинейной САУ СЭП больших перемещений

В случае обработки САУ СЭП больших перемещений и момент, и скорость достигают своих максимальных значений. Время переходного процесса больше, чем в случае обработки малых и средних перемещений.

#### 5.4 Исследование нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения

Для улучшения показателей качества в позиционных электроприводах, обрабатывающих как малые, так и средние и большие перемещения, применяют регулятор с нелинейной параболической характеристикой, описываемой следующим уравнением:

$$\Delta\varphi_r = \frac{k_m \cdot n}{2 \cdot k_c^2 \cdot \frac{d\omega}{dt}} \cdot U_{pn}^2, \text{ угл. мин.}$$

где

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{ЭП.макс} + M_{нагр}}{J_\varphi} = \frac{48,636 + 0}{0,057} = 859,683 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2},$$

$n = 2$ .

Задаемся значениями  $U_{pn}$ , и рассчитываем характеристику параболического регулятора. Параметры расчетов сводим в таблицу 8.

Контур положения с параболическим регулятором положения настраиваем на линейный оптимум. Точки линейного участка характеристики  $U_{\text{рп}} = f(\Delta\varphi)$  принимаем равными  $\pm U_{\text{рп}} = \pm 200$ .

Таблица 8 – Характеристика параболического регулятора

$U_{\text{рп}}, \text{В}$	-10	-10	-8	-6	-4	-2	-0,334
$\Delta\varphi_{\text{Т}},$ УГЛ.МИН	-200000	-22720	-14540	-8180	-3635	-908,86	-200
$U_{\text{рп}}, \text{В}$	0,334	2	4	6	8	10	10
$\Delta\varphi_{\text{Т}},$ УГЛ.МИН	200	908,861	3635	8180	14540	22720	200000

Имитационная модель нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения представлена на рисунке 28.

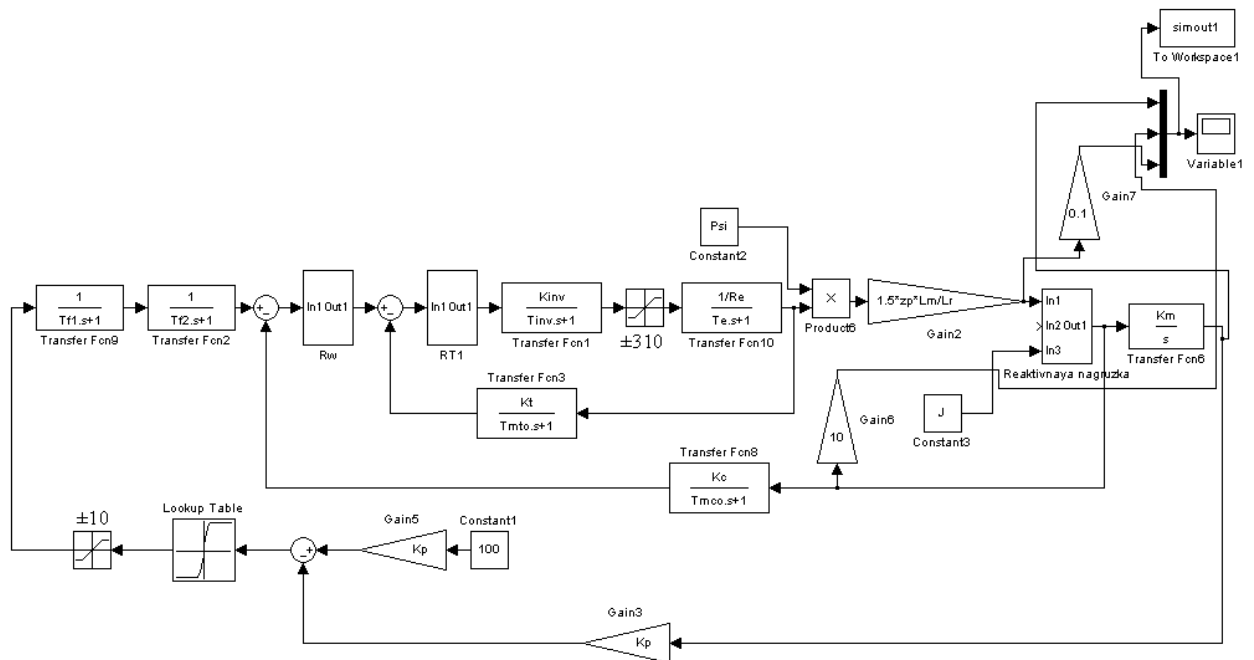


Рисунок 28 – Имитационная модель нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения

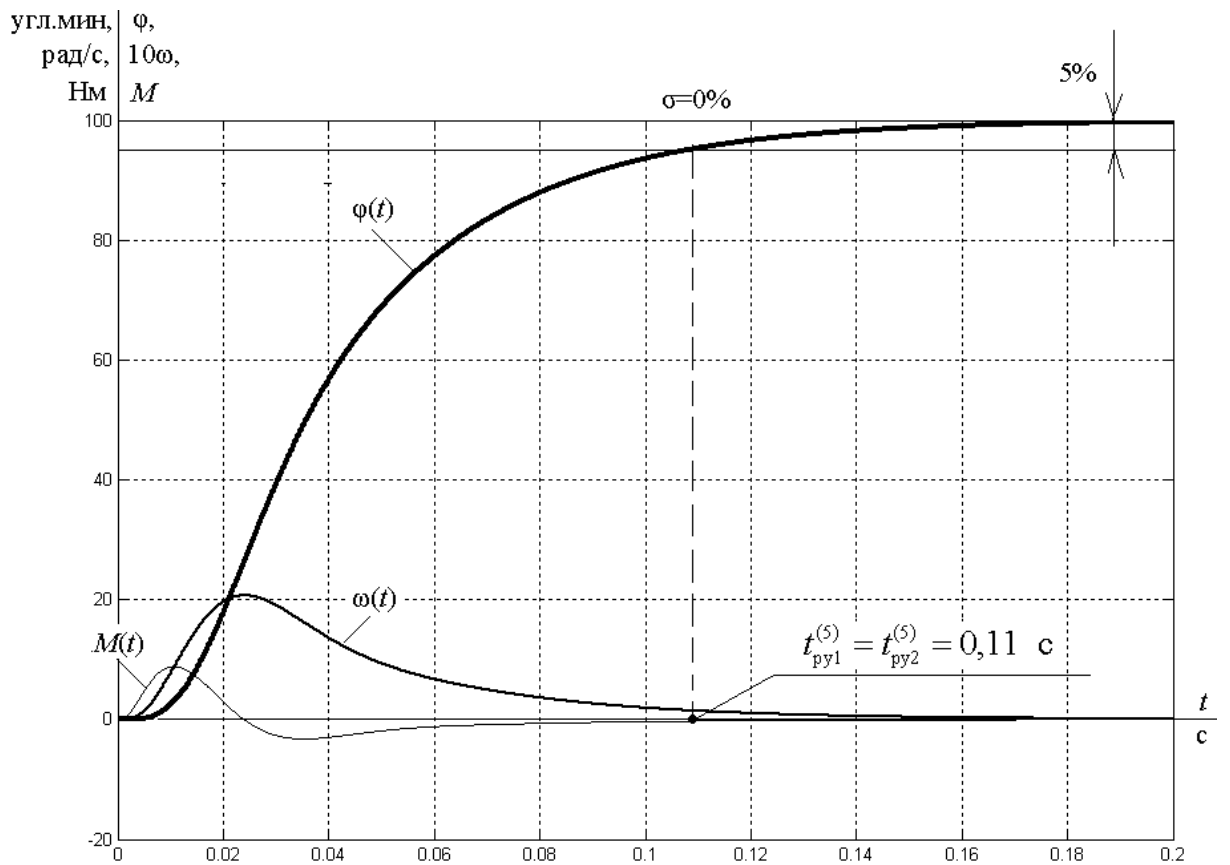


Рисунок 29 – Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения малых перемещений

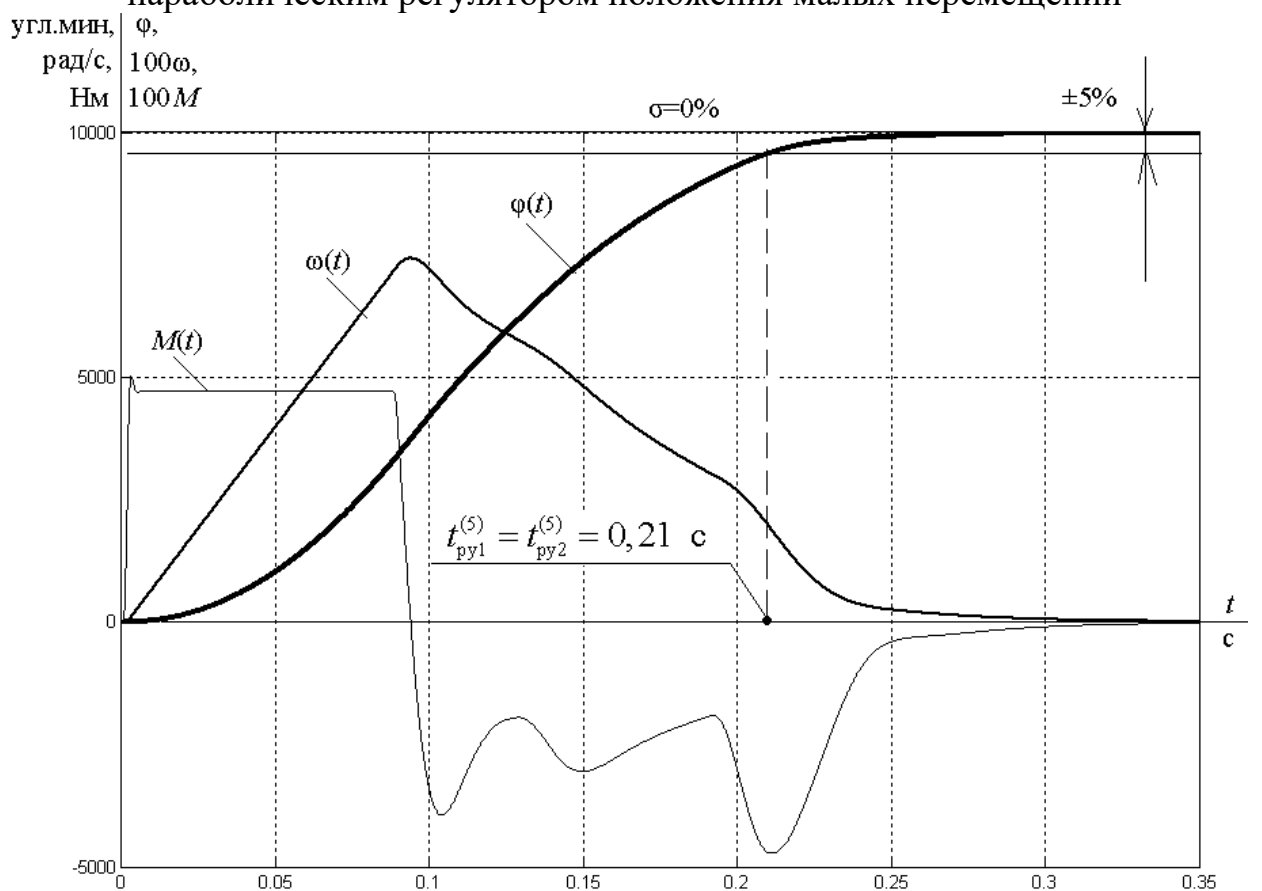


Рисунок 30 – Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения средних перемещений

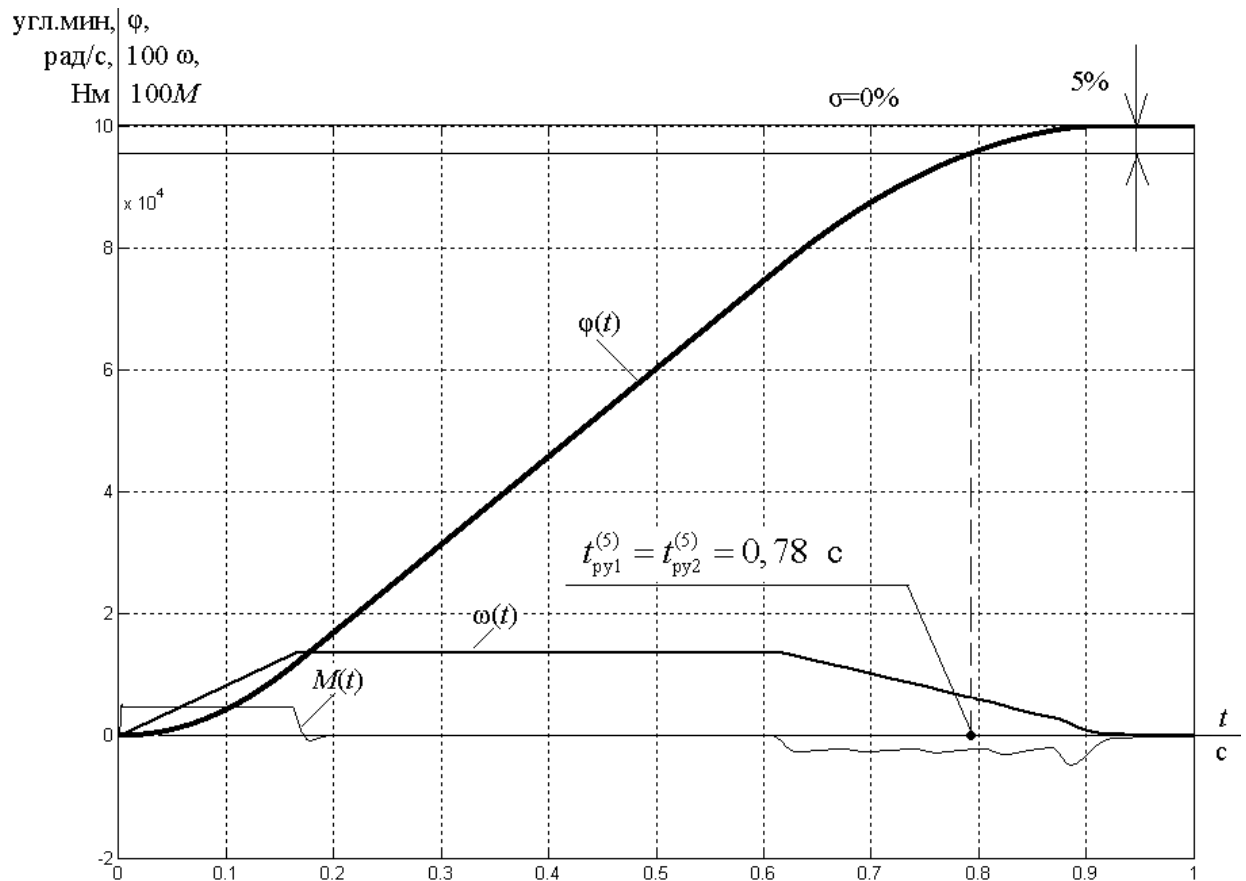


Рисунок 31 – Переходные процессы при отработке нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения больших перемещений

### 5.5 Исследование нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения с учетом реактивного характера нагрузки

Графики переходных процессов в нелинейной САУ СЭП с параболическим регулятором положения при  $M_c \neq 0$  и  $\varphi_{зад} = 100$  дискрет представлены на рисунках 32–33.

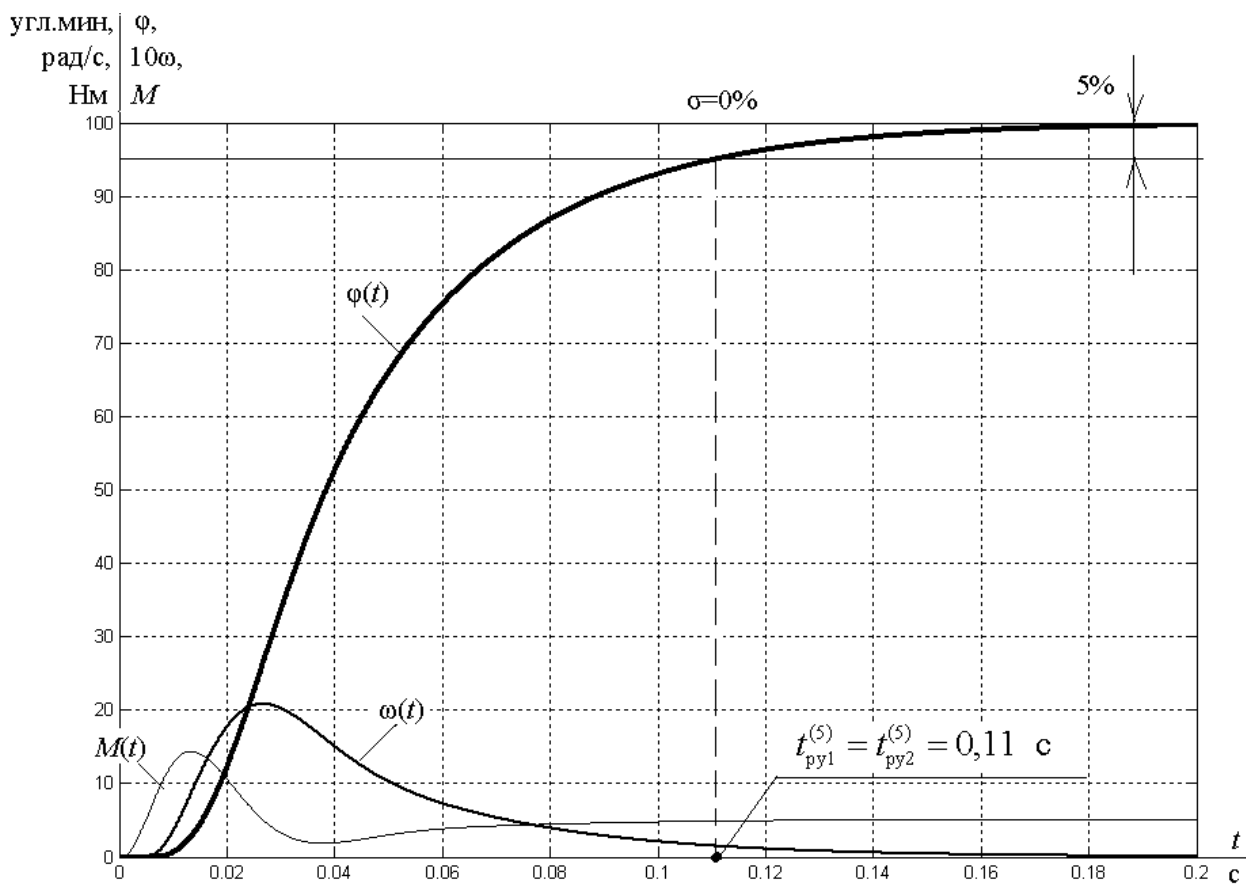


Рисунок 32 – Переходные процессы в нелинейной САУ СЭП при  $M_{с.мин}=5,181 \text{ Н}\cdot\text{м}$

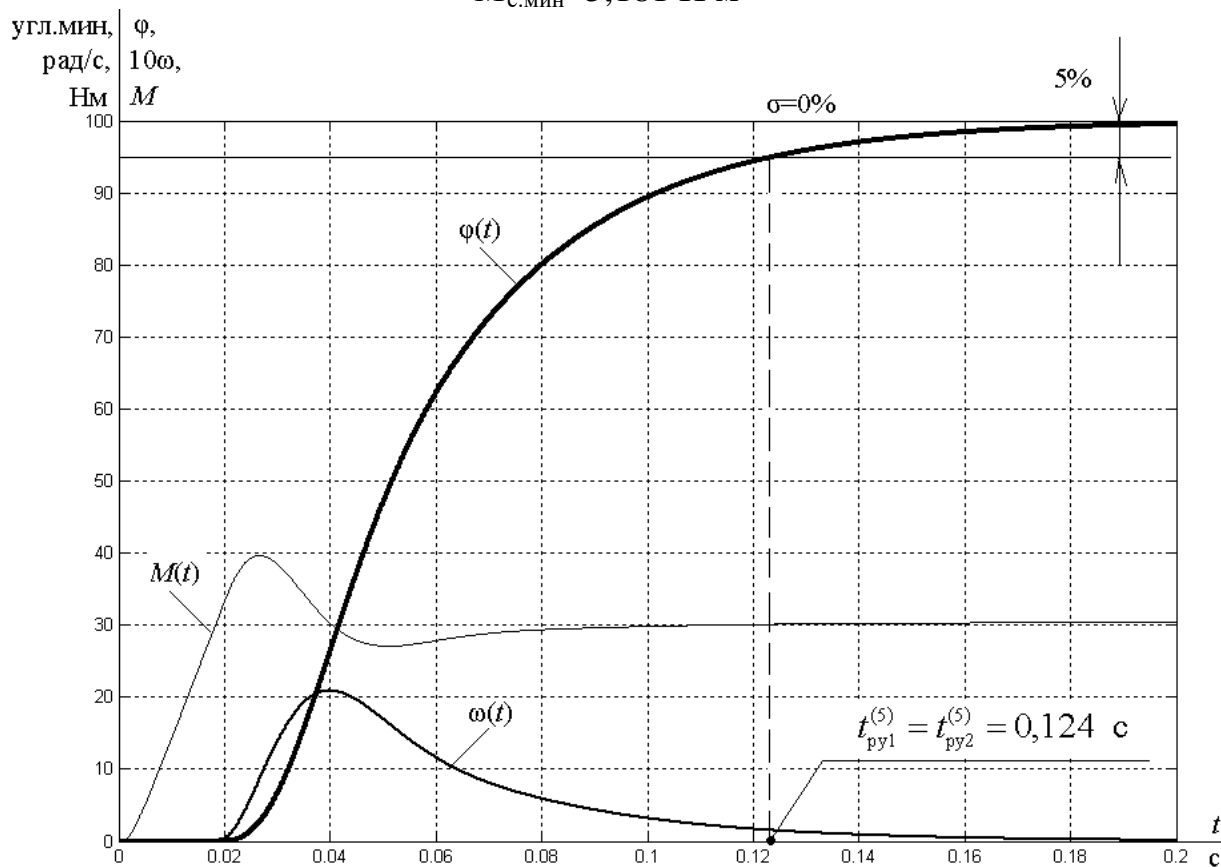


Рисунок 33 – Переходные процессы в нелинейной САУ СЭП при  $M_{с.макс}=30,397 \text{ Н}\cdot\text{м}$



## 5.6 Исследование нелинейной САУ СЭП с учетом ДМС

### 5.6.1 Датчик положения на валу механизма

Имитационная модель нелинейной САУ СЭП с двухмассовой механической системой в случае установки датчика положения на валу механизма представлена на рисунке 34.

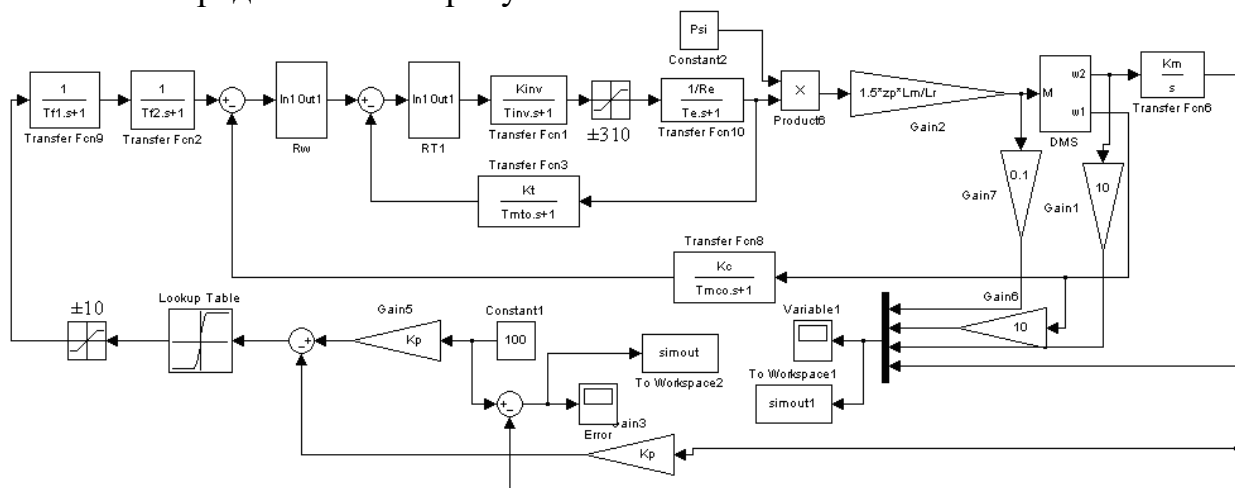


Рисунок 34 – Имитационная модель нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу механизма

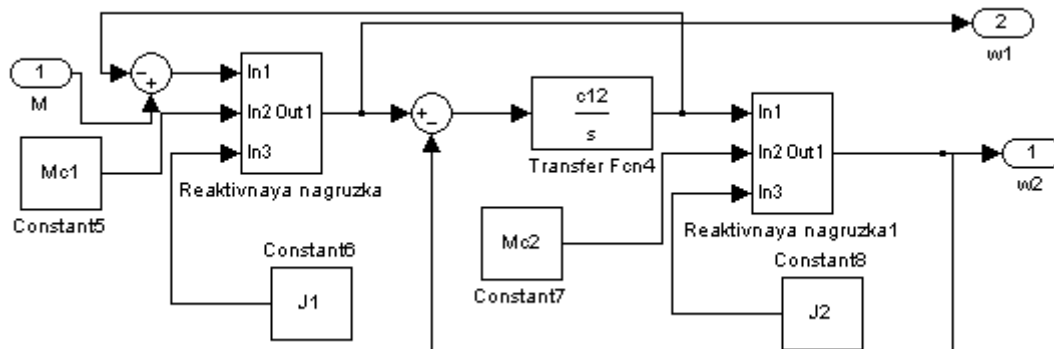


Рисунок 35 – Имитационная модель двухмассовой механической системы

Протокол вводимых параметров:

%Параметры ДМС

Mc1=2.495;

Mc2=2.686;

J1=0.044;

J2=0.013;

c12=1191;

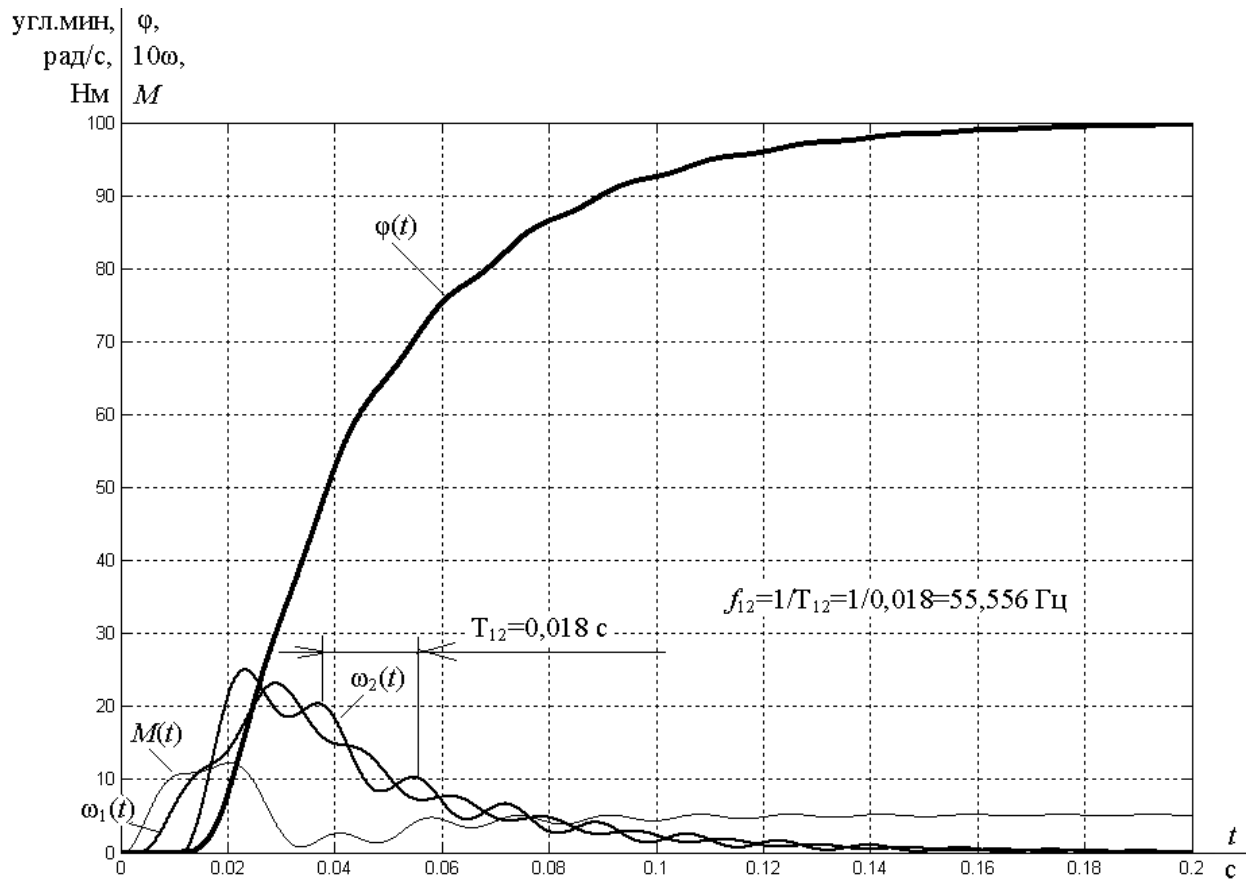


Рисунок 36 – Переходные процессы в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу механизма при  $M_{с.мин}=5,181 \text{ Н}\cdot\text{м}$

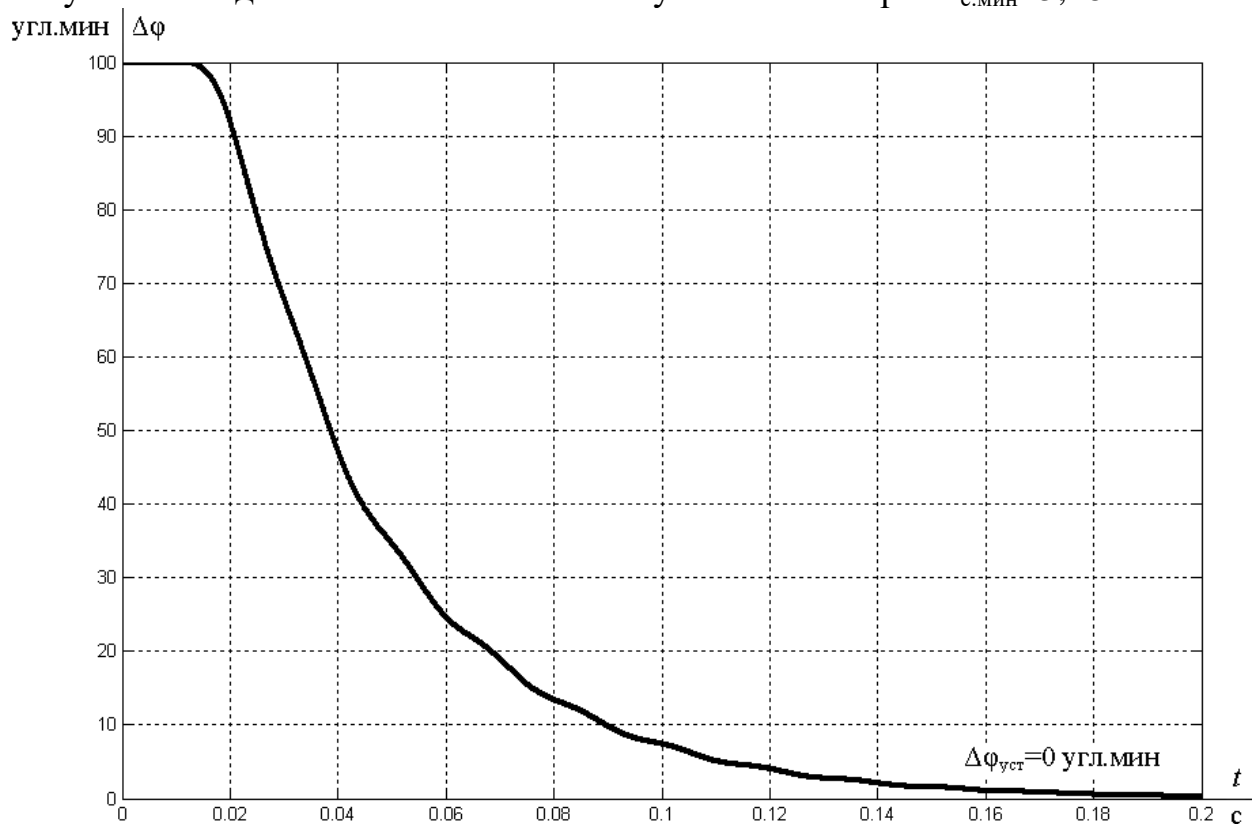


Рисунок 37 – Переходный процесс ошибки по положению в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу механизма при  $M_{с.мин}=5,181 \text{ Н}\cdot\text{м}$

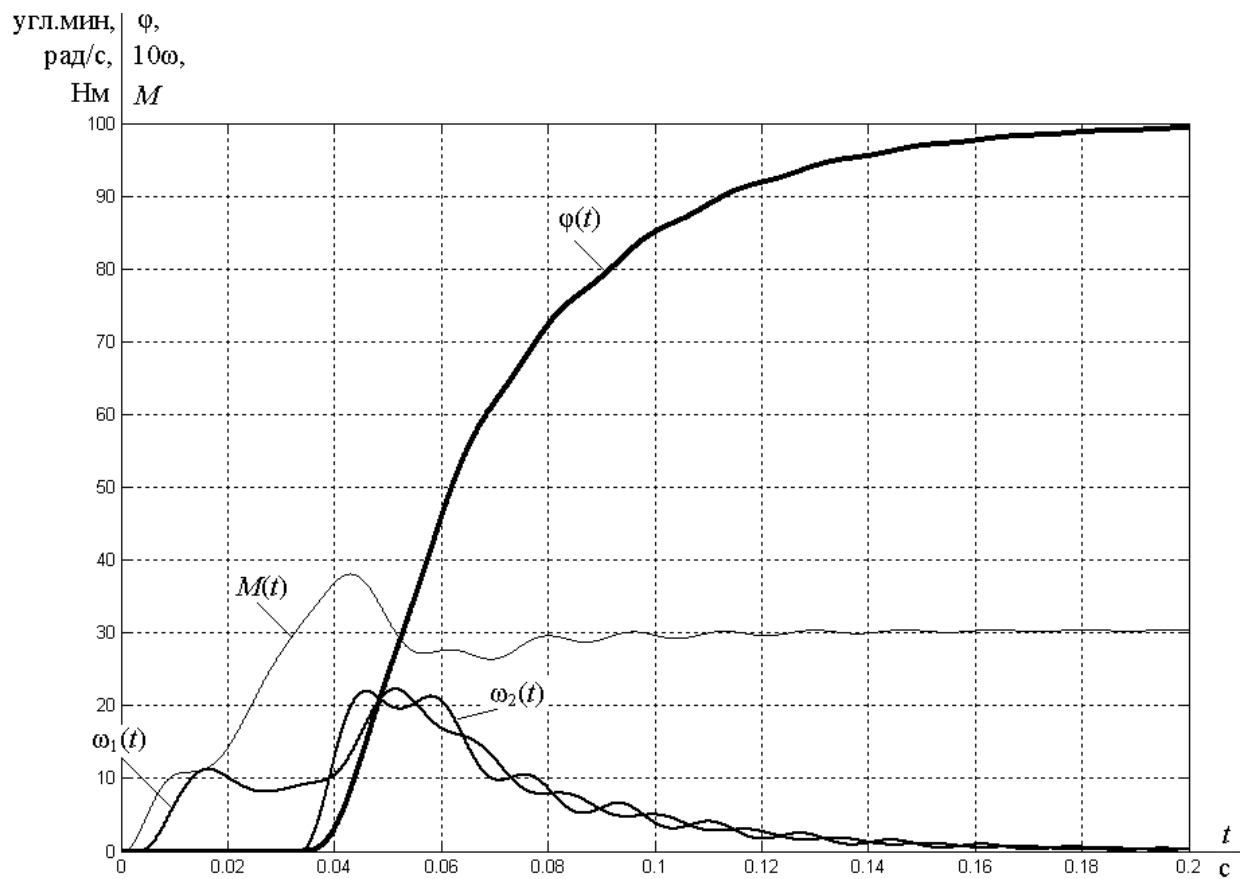


Рисунок 38 – Переходные процессы в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу механизма при  $M_{с.макс}=30,397$  Н·м

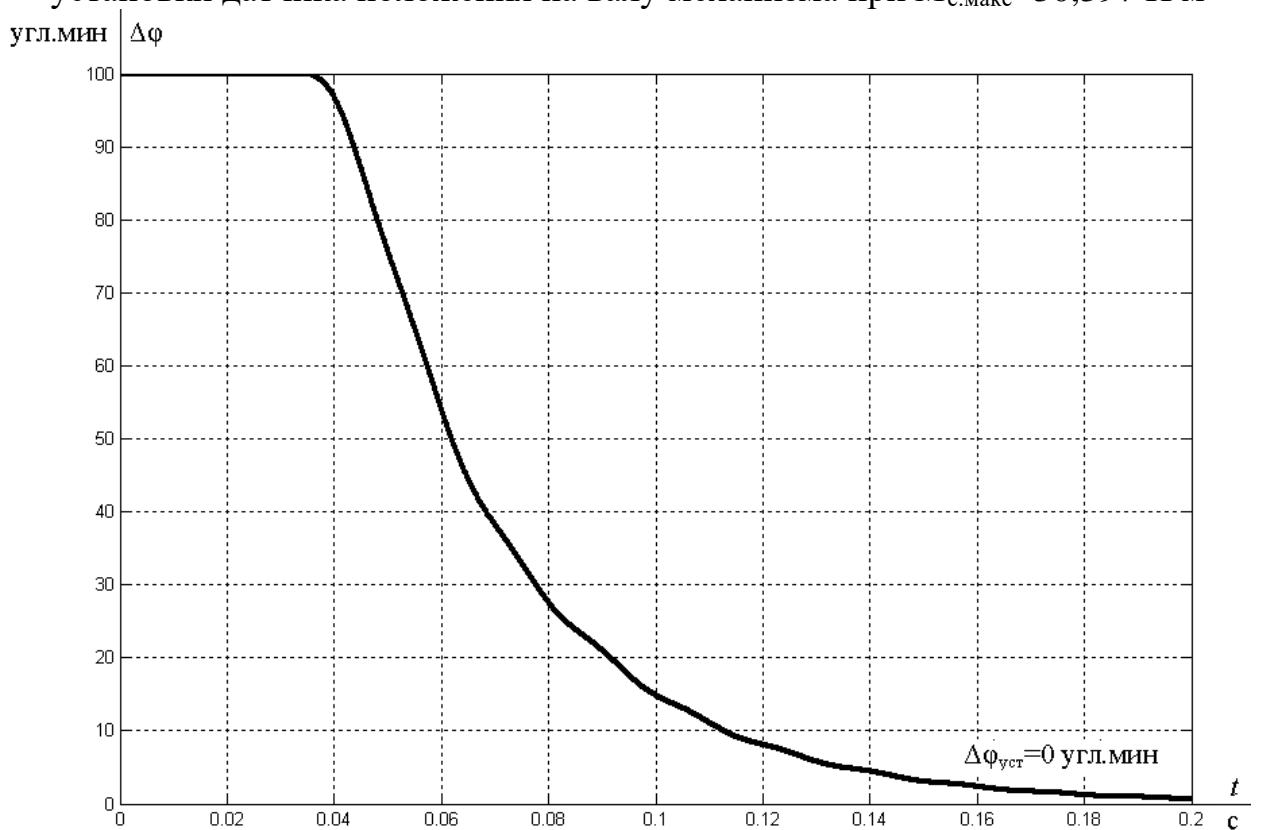


Рисунок 39 – Переходный процесс ошибки по положению в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу механизма при  $M_{с.макс}=30,397$  Н·м

### 5.6.2 Датчик положения на валу двигателя

Имитационная модель нелинейной САУ СЭП с двухмассовой механической системой в случае установки датчика положения на валу двигателя представлена на рисунке 40.

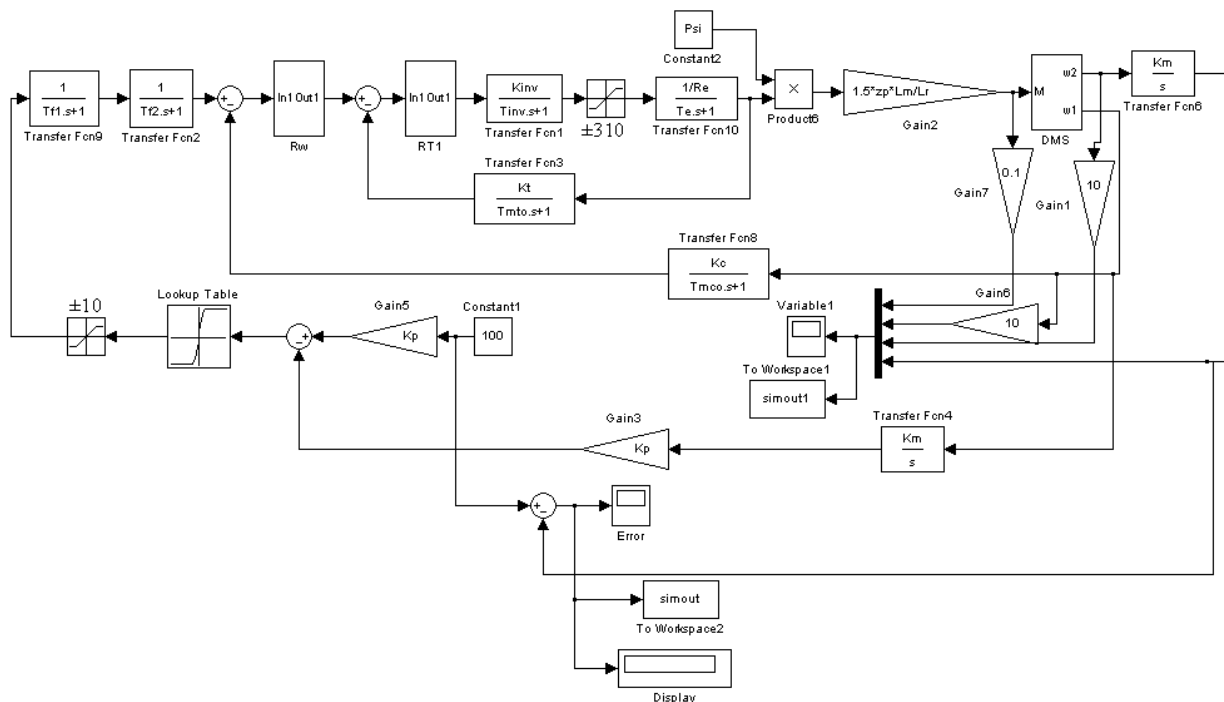


Рисунок 40 – Имитационная модель нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу двигателя

Коэффициент передачи датчика положения, установленного на выходном валу двигателя:

$$k_{дп} = \frac{i_{ред} \cdot n_{дп}}{360 \cdot 60} = \frac{3,24 \cdot 20000}{360 \cdot 60} = 3 \frac{\text{дискрет}}{\text{угл.мин}}$$

Коэффициент обратной связи по положению:

$$k_{п} = k_{дп} = 3 \frac{\text{дискрет}}{\text{угл.мин}}$$

Передаточная функция П-регулятора положения в случае установки датчика положения на валу двигателя:

$$W_{пп}(p) = k_{пп} = \frac{k_c}{k_m \cdot k_{п} \cdot a_{п} \cdot T_{\mu п}} = \frac{0,074}{1062 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 0,011} = 0,001032.$$

Таблица 9 – Характеристика параболического регулятора положения в случае установки датчика положения на валу двигателя

$U_{рп}$ , В	-10	-10	-8	-6	-4	-2	-0,1032
$\Delta\varphi_T$ , угл.мин	-200000	-22720	-14540	-8180	-3635	-	-200
$U_{рп}$ , В	0,1032	2	4	6	8	10	10
$\Delta\varphi_T$ , угл.мин	200	908,861	3635	8180	14540	22720	200000

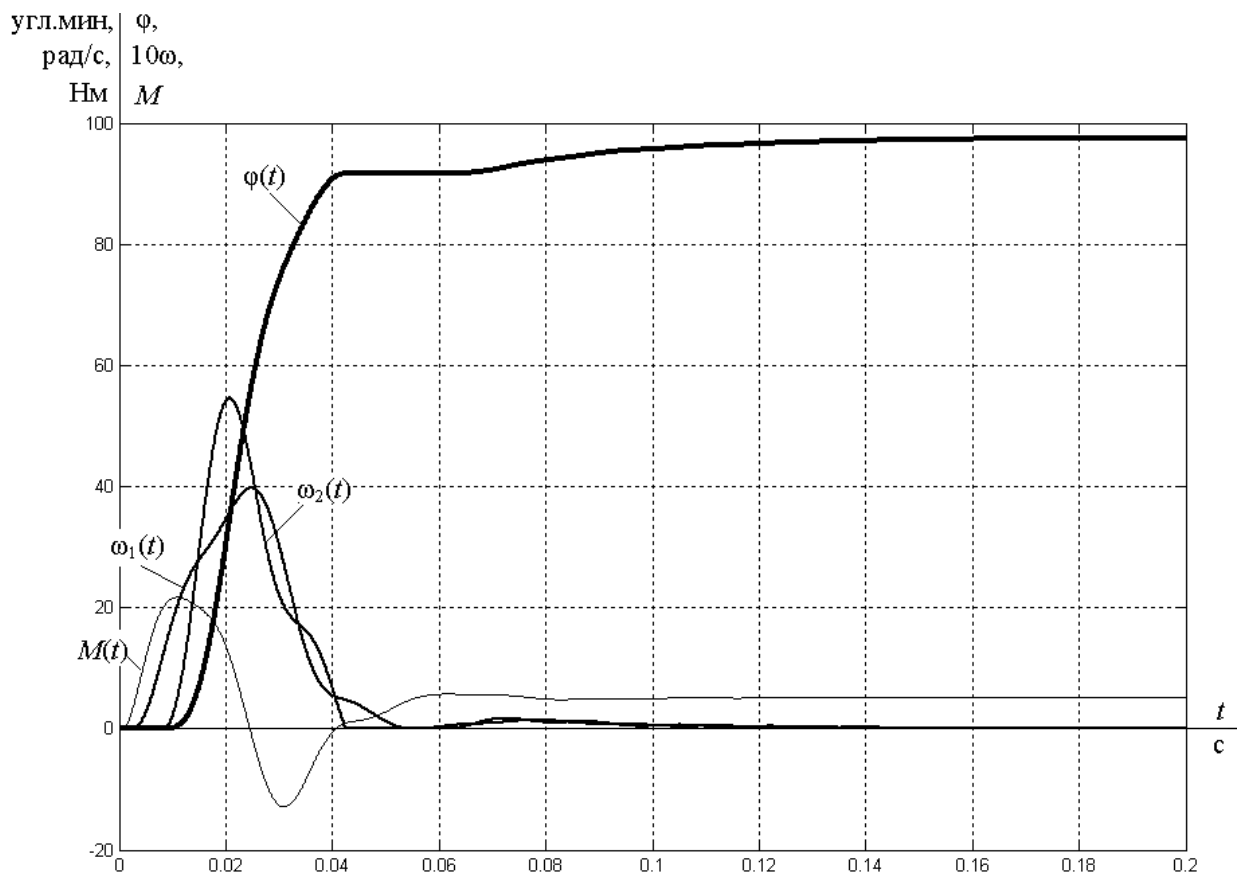


Рисунок 41 – Переходные процессы в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу двигателя при  $M_{с.мин}=5,181 \text{ Н}\cdot\text{м}$

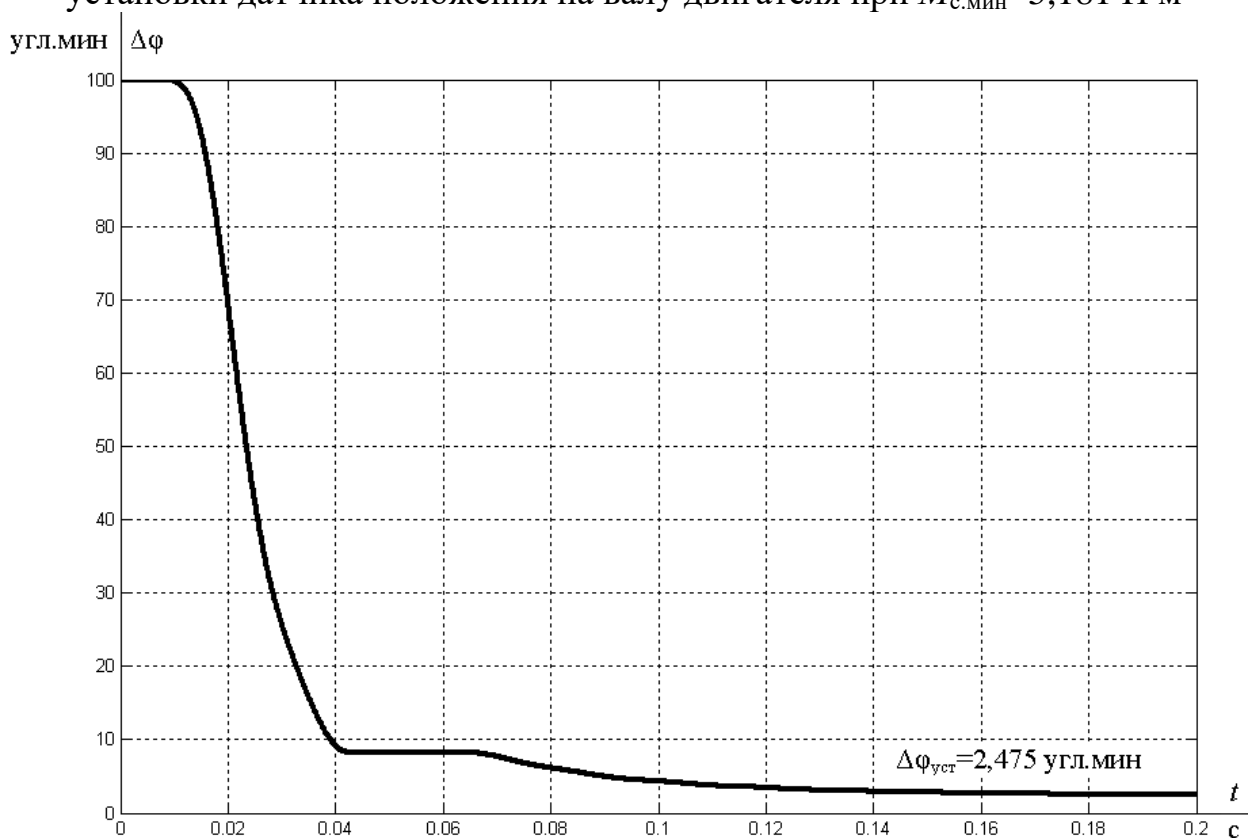


Рисунок 42 – Переходный процесс ошибки по положению в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу двигателя при  $M_{с.мин}=5,181 \text{ Н}\cdot\text{м}$

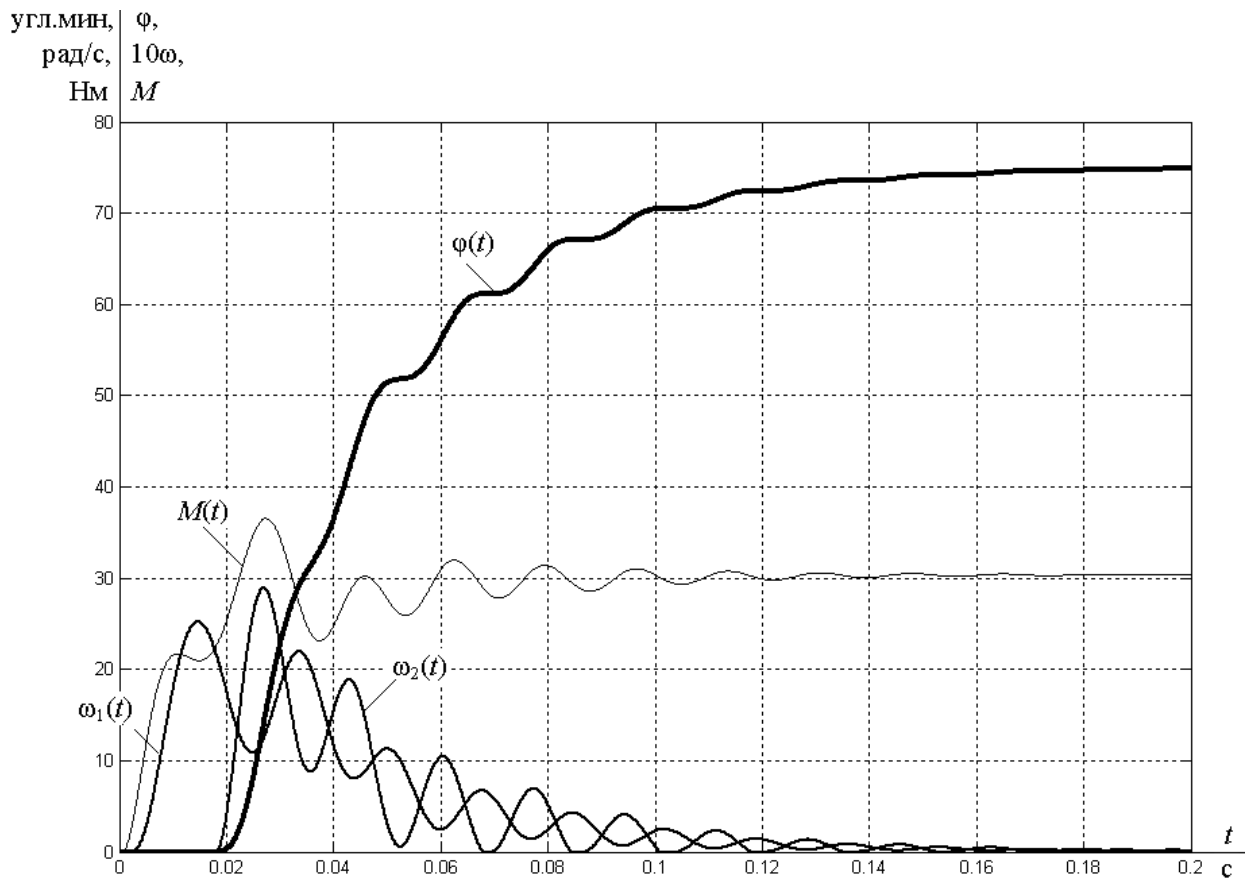


Рисунок 43 – Переходные процессы в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу двигателя при  $M_{с.макс}=30,397$  Н·м

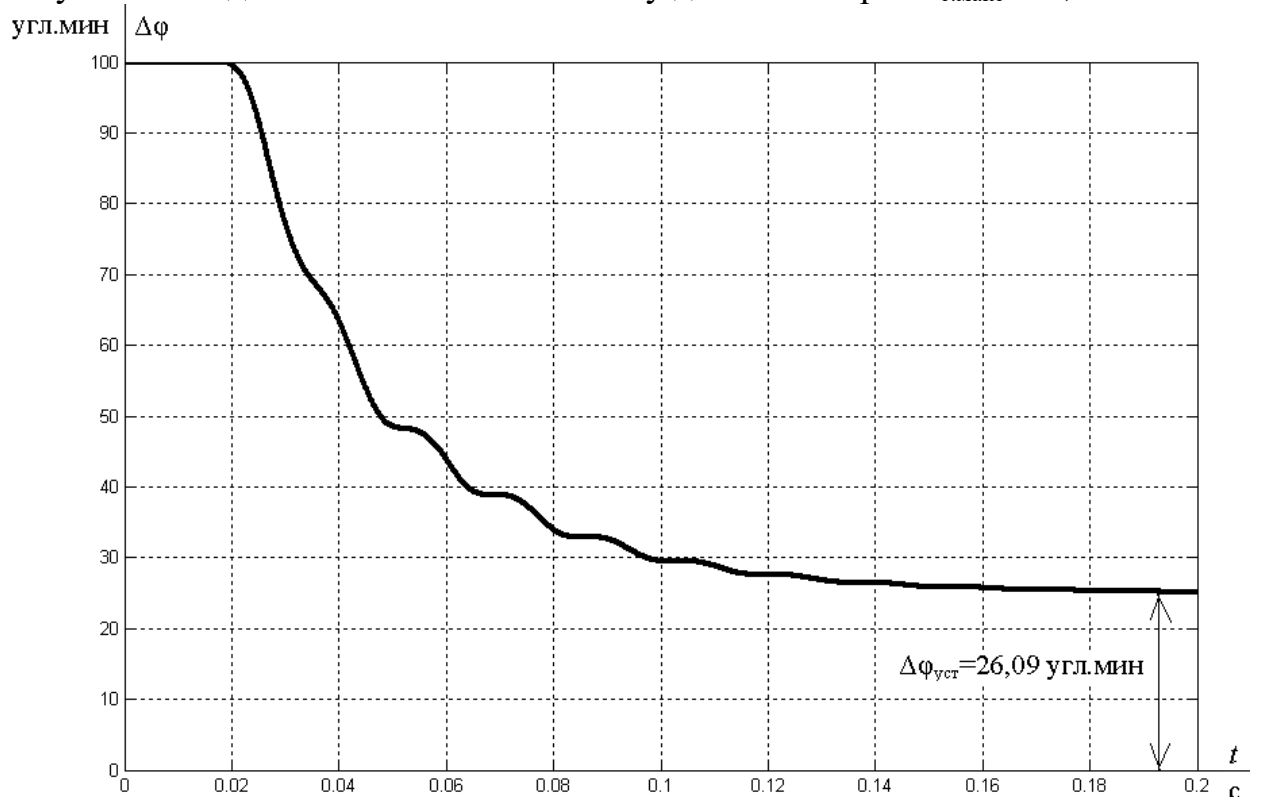


Рисунок 44 – Переходный процесс ошибки по положению в нелинейной САУ СЭП с ДМС в случае установки датчика положения на валу двигателя при  $M_{с.макс}=30,397$  Н·м

Теоретические значения максимальной и минимальной ошибки при установке датчика положения на валу двигателя:

$$\Delta\varphi_{\text{мин}} = \frac{k_m \cdot \Delta M_c}{c_{12}} = \frac{1062 \cdot 5,181}{1191} = 4,619 \text{ угл.мин};$$

$$\Delta\varphi_{\text{макс}} = \frac{k_m \cdot M_{c.\text{макс}}}{c_{12}} = \frac{1062 \cdot 30,397}{1191} = 27,1 \text{ угл.мин.}$$

Как видно из графиков, полученных при исследовании двухмассовой САУ СЭП, электропривод с датчиком положения на валу механизма обрабатывает входные воздействия без ошибки во всем диапазоне изменения нагрузки. В случае же установки датчика положения на валу электродвигателя возникает ошибка по положению, увеличивающаяся с ростом нагрузки на валу механизма. При этом ошибка, полученная при исследовании модели электропривода, меньше, чем ее теоретическое значение.