

О.П. Мальцева  
Л.С. Удут  
Н.В. Кояин

# **Системы управления электроприводов**

**Часть 1. Учебное пособие.**

О.П. Мальцева  
Л.С. Удут  
Н.В. Кояин

# **Системы управления электроприводов**

**Часть 2. Учебное пособие.**

**2007**

УДК 68–83–52

M21

**Мальцева О.П.**

M21 Системы управления электроприводов.: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 53 с.

В учебном пособии изложены методические указания по проектированию систем управления электроприводов постоянного тока. Даны рекомендации по выбору электродвигателя и преобразователя, приведена методика определения параметров силовой цепи электропривода. Представлены структурные схемы замкнутых систем, методика оптимизации контуров регулирования и исследования систем.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», направления подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 68–83–52

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор  
Томского университета систем управления и радиоэлектроники  
*В. А. Бейнарович*

Кандидат технических наук, доцент  
Северской государственной технологической академии  
*С. Н. Кладиев*

© Томский политехнический университет, 2007

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2007

# 1. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

## Введение

В регулируемых электроприводах постоянного тока в качестве источников питания чаще всего используются тиристорные преобразователи (управляемые выпрямители), обладающие практически неограниченной мощностью, высоким КПД и высоким быстродействием при малой мощности управления. Тиристорные преобразователи являются универсальным средством преобразования переменного напряжения питающей сети в регулируемое постоянное напряжение. Разработана и массово выпускается широкая номенклатура комплектных тиристорных электроприводов постоянного тока, состоящих из согласованных по своим характеристикам составных элементов, узлов и устройств электропривода. Электроприводы выпускаются одно-, двух- и многодвигательными с одноступенчатым и двухступенчатым регулированием скорости, неревверсивные и реверсивные с реверсом по цепи якоря или по цепи обмотки возбуждения, с обратной связью по скорости, ЭДС, напряжению и положению. В состав комплектного тиристорного электропривода входят:

- электродвигатель постоянного тока с тахогенератором или без него;
- тиристорный преобразователь для питания цепи якоря двигателя;
- тиристорный преобразователь для питания обмотки возбуждения;
- сглаживающий реактор в цепи якоря двигателя (при необходимости);
- система управления электропривода в составе тиристорного преобразователя (со стороны якоря и обмотки возбуждения двигателя);
- комплект аппаратов, приборов и устройств, обеспечивающих оперативное управление, контроль состояния, защиту и сигнализацию электропривода.

Наряду с комплектной поставкой тиристорных электроприводов возможна поставка и отдельно тиристорных преобразователей, предназначенных для питания двигателей и обмоток возбуждения генераторов и двигателей, и других комплектующих элементов электроприводов. Поставляемые некомплектно преобразователи имеют достаточный набор типовых элементов управления для реализации самых разнообразных систем автоматизированного электропривода с учетом специфики конкретных производственных машин и механизмов. В [2] приведены основные серии комплектных тиристорных электроприводов и тиристорных преобразовательных агрегатов для электроприводов и ряды номинальных значений их параметров.

## 1.1. Общие вопросы проектирования

### 1.1.1. Определение области работы регулируемого электропривода

Область работы электропривода (рис. 1.1) задана в 4-х квадрантах плоскости координат:

$\omega_{\text{эп.макс}}$  – максимальная угловая скорость электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$I_{\text{эп.макс}}$  – максимально допустимый ток электропривода, А.

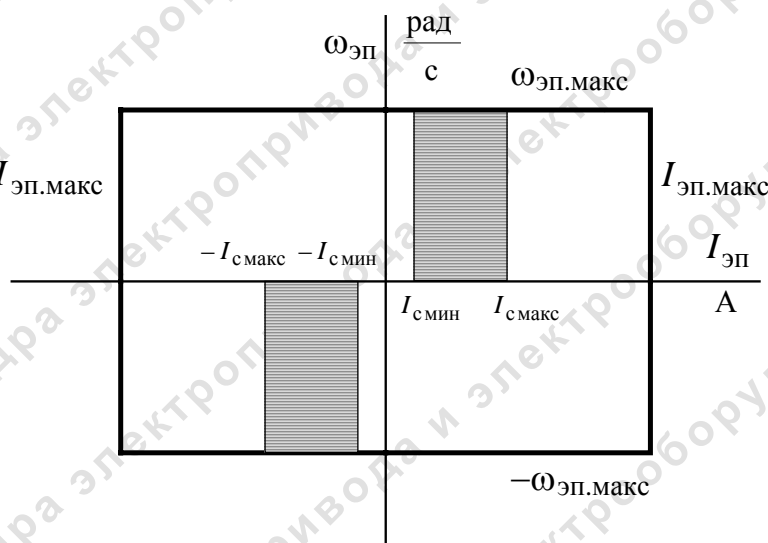


Рис. 1.1. Заданная область работы электропривода

### 1.1.2. Схемы реализации силовой части регулируемого электропривода

Три основных схемы реализации силовой части электропривода по системе тиристорный преобразователь–двигатель (ТП–Д) приведены на рис. 1.2.

В приведенных схемах приняты следующие обозначения:

$T$  – трансформатор силовой трехфазный преобразовательный;

$L1$  – сглаживающий реактор;

$L2, L3$  – токоограничивающие трехфазные реакторы;

ТПЯ, ТПВ – тиристорные преобразователи соответственно обмотки якоря и обмотки возбуждения.

### 1.1.3. Принцип реализации следящего электропривода

Следящий электропривод реализуется на базе регулируемого с организацией дополнительного внешнего контура по положению (рис. 1.3).

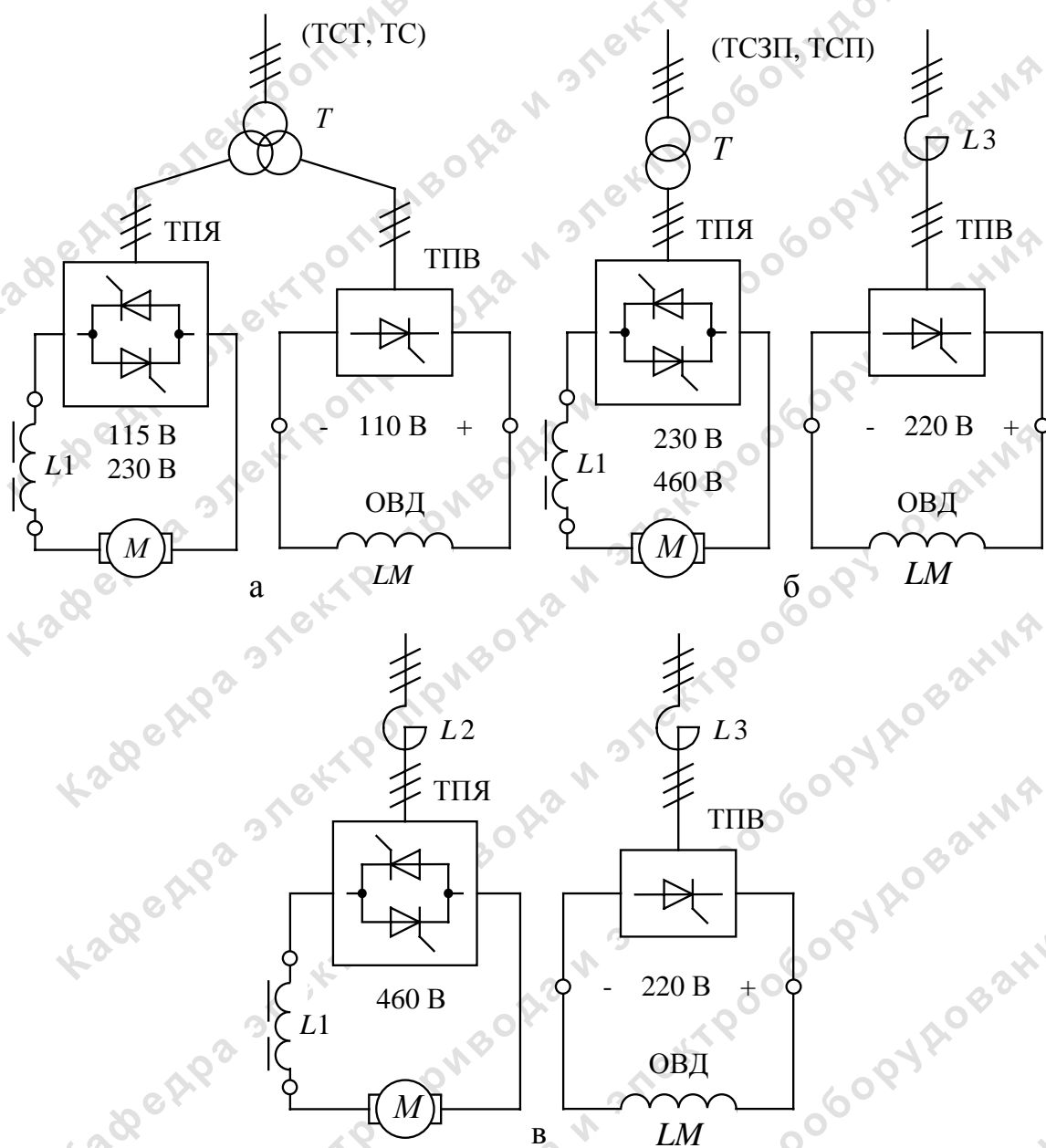


Рис. 1.2. Типовые схемы реализации силовой части электропривода по системе ТП-Д

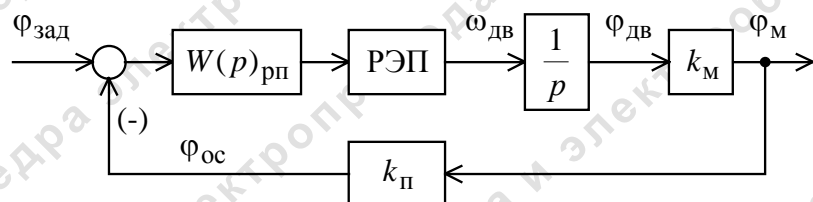


Рис. 1.3. Структурная схема следящего электропривода



В силовой канал электропривода входят:

- тиристорный преобразователь, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, который выполняет функцию электромеханического преобразователя;
- механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.

На схемах приняты следующие обозначения:  $M_{ср}$ ,  $M_{сА}$  – моменты нагрузки соответственно реактивного и активного характера.

### 1.2.2. Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала

#### *Определение дополнительных параметров двигателя*

Номинальный ток двигателя

$$I_{двн} \cong \frac{P_{двн}}{\eta_{двн} \cdot U_{двн}}, \text{ А.}$$

Номинальная угловая скорость двигателя

$$\omega_{двн} = \frac{\pi}{30} \cdot n_{двн}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Сопротивление двигателя в горячем состоянии

$$R_{дв} = k_t \cdot (R_{оя+15^\circ\text{C}} + R_{дп+15^\circ\text{C}}), \text{ Ом,}$$

где

$k_t = (1 + \alpha_m \cdot \tau)$ ;  $\tau = (60 \div 95)^\circ\text{C}$  – температура перегрева обмоток двигателя (принять  $\tau = 75^\circ\text{C}$ );

$$\Delta\alpha_m = 0.004 \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Индуктивность двигателя

$$L_{дв} = \gamma \cdot \frac{U_{двн}}{I_{двн} \cdot p \cdot \omega_{двн}}, \text{ Гн,}$$

где

$\gamma = 0.3 \div 0.4$  – коэффициент для двигателей типа 2П;

$p = 2$  – число пар полюсов.

Коэффициент ЭДС  $\left( \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right)$  и электромагнитного момента  $\left( \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} \right)$

двигателя при номинальном потоке возбуждения

$$c = \frac{U_{двн} - I_{двн} \cdot R_{дв}}{\omega_{двн}}.$$



Номинальный момент

$$M_{\text{дв н}} = \frac{P_{\text{дв н}}}{\omega_{\text{дв н}}}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Электромагнитный момент, соответствующий номинальному току

$$M_{\text{эм н}} = I_{\text{дв н}} \cdot c, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент трения на валу двигателя

$$M_{\text{с дв}} = M_{\text{эм н}} - M_{\text{дв н}}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный допустимый ток двигателя

$$I_{\text{дв макс}} = k_{\text{пер.дв}} \cdot I_{\text{дв н}}, \text{ А},$$

где  $k_{\text{пер.дв}}$  – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки двигателя по току ( $k_{\text{пер.дв}} = 3$  для двигателей типов 2ПФ и 2ПО,  $k_{\text{пер.дв}} = 4$  для двигателей типа 2ПБ).

### ***Расчет параметров тиристорного преобразователя***

Структурная схема тиристорного преобразователя приведена на рис. 1.5.

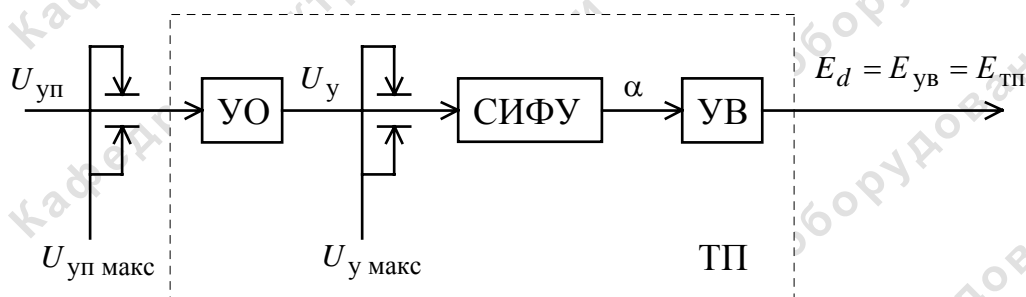


Рис. 1.5. Структурная схема тиристорного преобразователя

Среднее значение выпрямленной ЭДС преобразователя при угле управления  $\alpha = 0$  (ЭДС холостого хода)

$$E_{d0} = k_{u2л} \cdot U_{2л} = \frac{U_{2ф}}{k_{u2ф}}, \text{ В},$$

где  $k_{u2л}$ ,  $k_{u2ф}$  – коэффициенты схемы выпрямления по напряжению, для трехфазной мостовой схемы

$$k_{u2л} = 1.35, \quad k_{u2ф} = 0.428.$$

Максимальное значение коэффициента усиления тиристорного преобразователя

$$k_{\text{тп макс}} = \frac{\pi \cdot k_{y0} \cdot E_{d0}}{2 \cdot U_{\text{оп макс}}},$$

где  $k_{y0}$  – коэффициент управляющего органа на входе СИФУ, принять  $k_{y0} = 1$ .

Эквивалентное сопротивление от коммутации анодных токов

$$R_{\text{к}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot x_{\text{ф}}}{2 \cdot \pi} = \frac{m_{\text{в}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{с}} \cdot L_{\text{ф}}}{2 \cdot \pi} = \frac{m_{\text{в}} \cdot 314 \cdot L_{\text{ф}}}{2 \cdot \pi}, \text{ Ом},$$

где

$x_{\text{ф}}$  – индуктивное сопротивление обмотки фазы трансформатора или токоограничивающего реактора, Ом;

$L_{\text{ф}}$  – индуктивность обмотки фазы трансформатора или токоограничивающего реактора, Гн.

Активное сопротивление силовой цепи преобразователя

$$R_{\text{тп}} = 2 \cdot R_{\text{ф}} + R_{\text{к}}, \text{ Ом},$$

где  $R_{\text{ф}}$  – сопротивление вентильной обмотки фазы трансформатора или токоограничивающего реактора.

Индуктивность силовой цепи преобразователя

$$L_{\text{тп}} = 2 \cdot L_{\text{ф}}, \text{ Гн}.$$

Эквивалентная постоянная времени тиристорного преобразователя

$$T_{\text{тп}} = \frac{0.5}{m_{\text{в}} \cdot f_{\text{с}}}, \text{ с},$$

где  $f_{\text{с}} = 50$  Гц – частота питающей сети.

Максимальный допустимый ток преобразователя

$$I_{d \text{ макс}} = k_{\text{пер.тп}} \cdot I_{d \text{ н}}, \text{ А},$$

$k_{\text{пер.тп}}$  – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки преобразователя по току ( $k_{\text{пер.тп}} = 2$ ).

### **Расчет параметров якорной цепи**

Расчетное значение сопротивления якорной цепи

$$R_{\text{яц}} = R_{\text{ц.дв}} + R_{\text{тп}}, \text{ Ом}.$$

где  $R_{\text{ц.дв}} = R_{\text{дв.гор}} + 0.1 \cdot R_{\text{дв.гор}}$ , Ом – сопротивление цепи двигателя.

Расчетное значение индуктивности якорной цепи (сглаживающий реактор отсутствует)

$$L_{\text{яц}} = L_{\text{дв}} + L_{\text{тп}}, \text{ Гн}.$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}, \text{ с.}$$

Максимальный допустимый ток электропривода

$$I_{эп макс} = I_{дв макс}, \text{ А, при } I_{дв макс} < I_{d макс};$$

$$I_{эп макс} = I_{d макс}, \text{ А, при } I_{d макс} < I_{дв макс}.$$

### ***Расчет параметров механической системы***

Момент инерции механизма:

– для регулируемого электропривода

$$J_{м} = 0.5 \cdot J_{дв}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

– для следящего электропривода

$$J_{м} = 0.2 \cdot J_{дв}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{э} = J_{дв} + J_{м}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент нагрузки холостого хода электропривода

$$M_{схх} = M_{эп мин} + M_{сдв}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Если значение  $M_{эп мин}$  не задано, тогда принимаются следующие значения:

– для регулируемого электропривода

$$M_{схх} = M_{сдв}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– для следящего электропривода

$$M_{схх} = 0.15 \cdot M_{двн}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент длительной максимальной нагрузки электропривода

$$M_{с макс} = M_{эп макс} + M_{сдв}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Если значение  $M_{эп макс}$  не задано, тогда принимаются следующие значения:

– для регулируемого электропривода

$$M_{с макс} = M_{двн} + M_{сдв}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– для следящего электропривода момент максимальной нагрузки при рабочих скоростях

$$M_{с макс} = 0.8 \cdot M_{двн}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Электромеханическая постоянная времени

$$T_{м} = \frac{J_{э} \cdot R_{яц}}{c^2}, \text{ с.}$$

При отношении электромеханической постоянной времени к электромагнитной  $T_m/T_{яц} < 4$  необходимо принять решение о компенсации влияния ЭДС двигателя (см. рис. 1.6) путем введения положительной обратной связи по скорости (ПОС) на вход тиристорного преобразователя. Коэффициент ПОС рассчитывается по выражению

$$k_{\text{пос}} = \frac{c}{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{дс}}}.$$

### 1.2.3. Расчет предельных электромеханических характеристик разомкнутой системы ТП–Д и оценка выполнения заданной области работы электропривода

Ниже излагается методика расчета предельных характеристик для электропривода с постоянным токоограничением [2, пример 6.1]. Для электропривода с зависимым от скорости токоограничением следует обратиться к [2, пример 6.2].

Характеристики рассчитываются при пониженном напряжении сети:

- для трехфазной сети 380/220 В при  $k_{Uc} = 0.85$ ;
- для сетей 6 и 10 кВ при  $k_{Uc} = 0.9$ .

#### *Работа электропривода в I и III квадрантах*

Электрическая машина работает в *двигательном* режиме. Группа «Вперед» (I квадрант) или группа «Назад» (III квадрант) преобразователя работают в *выпрямительном* режиме (угол управления  $\alpha < 90^\circ$ ).

Минимальный угол управления преобразователем  $\alpha_{\text{мин}}$  находится из условия обеспечения максимальной скорости электропривода  $\omega_{\text{эп.макс}}$  при токе максимальной нагрузки  $I_{\text{с макс}}$  (допускается принимать номинальный ток двигателя  $I_{\text{дв.н}}$ )

$$\alpha_{\text{мин}} \leq \arccos \frac{c \cdot \omega_{\text{эп.макс}} + I_{\text{с макс}} \cdot R_{яц}}{k_{Uc} \cdot E_{d0}}, \text{ град.}$$

Принимаем  $\alpha_{\text{мин}} = \underline{\hspace{2cm}}$  град.

Электромеханическая характеристика разомкнутой системы ТП–двигатель при  $\alpha_{\text{мин}}$

$$\omega(I_{я}) = \frac{1}{c} \cdot (k_{Uc} \cdot E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\text{мин}} - R_{яц} \cdot I_{я}), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Результаты расчета свести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Электромеханическая характеристика при $\alpha_{\min} = \text{---}$ град $k_{Uc} = 0.85$ (I квадрант)	$I_{я}, \text{А}$	0	$I_{\text{дв.н}}$	$I_{\text{эп.макс}}$
	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$			

### Работа электропривода в II и IV квадрантах

Электрическая машина работает в *генераторном* режиме (режим рекуперативного торможения). Группа «Назад» (II квадрант) или группа «Вперед» (IV квадрант) преобразователя работают в *инверторном* режиме (угол управления  $\alpha > 90^\circ$ ).

Предельная характеристика безопасного инвертирования при работе преобразователя в инверторном режиме

$$\omega(I_{я}) = \frac{1}{c} \cdot [k_{Uc} \cdot E_{d0} \cdot \cos \delta + (R_{\text{тп}} - R_{\text{ц.дв}}) \cdot I_{я}], \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где

$$R_{\text{тп}} = 2 \cdot R_{\text{тр.ф}} + R_{\text{к}}, \text{Ом};$$

$$R_{\text{ц.дв}} = R_{\text{яц}} - R_{\text{тп}}, \text{Ом};$$

$$\delta \approx (5 \div 6)^\circ.$$

Результаты расчета свести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Характеристика предельного инвертирования (II квадрант)	$I_{я}, \text{А}$	0	$-I_{\text{дв.н}}$	$-I_{\text{эп.макс}}$
	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$			

Максимальный угол управления преобразователем при работе в инверторном режиме

$$\alpha_{\text{макс}} = \arccos \left( \frac{2 \cdot R_{\text{тп}} \cdot I_{\text{эп.макс}}}{k_{Uc} \cdot E_{d0}} - \cos \delta \right), \text{град.}$$

Принимаем угол  $\alpha_{\text{макс}} = \text{---}$  град.

Электромеханическая характеристика разомкнутой системы ТП–Д при угле управления  $\alpha_{\text{макс}}$  (для II квадранта принимается  $I_{\text{эп.макс}} < 0$ )

$$\omega(I_{я}) = \frac{1}{c} \cdot (-k_{Uc} \cdot E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\text{макс}} - R_{\text{яц}} \cdot I_{я}), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Результаты расчета свести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Электромеханическая характеристика при $\alpha_{\max} = \text{---}$ град $k_{Uc} = 0.85$ (II квадрант)	$I_{я}, \text{А}$	0	$-I_{\text{дв.н}}$	$-I_{\text{эп.макс}}$
	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$			

По результатам расчетов (табл. 1.1–1.3) строятся предельные электромеханические характеристики разомкнутой системы преобразователь - двигатель, на основании анализа которых делается вывод о правильности выбора комплектующих силовой цепи электропривода, и при необходимости уточняются принятые ранее значения углов управления  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$  [2, примеры 6.1 и 6.2].

#### 1.2.4. Расчет электромеханических характеристик разомкнутой системы ТП–Д с учетом режима прерывистых токов

Расчет и построение статических электромеханических характеристик  $\omega = f(I_{я})$  в зонах прерывистого и непрерывного токов при различных углах управления выполняются с помощью программы *РТОК*, для чего в программу необходимо ввести следующие параметры:

- сопротивление  $R_{яц}$ , Ом, и индуктивность якорной цепи  $L_{яц}$ , Гн;
- эквивалентное сопротивление от коммутации анодных токов  $R_k$ , Ом;
- число фаз преобразователя  $m_b$ ;
- коэффициент ЭДС двигателя  $c, \left( \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right)$ ;
- действующее значение ЭДС источника переменного тока  $E_2$ , В, (для трехфазной мостовой схемы принять  $E_2 = U_{2л}$ );
- среднее значение выпрямленной ЭДС  $E_{d0}$ , В.

Для расчета граничной характеристики ввести  $\alpha_{\text{нач}} = 0^\circ$ ,  $\alpha_{\text{кон}} = 180^\circ$ ,  $\Delta\alpha = 1^\circ$ .

Расчет электромеханических характеристик выполнить для следующих углов управления:  $\alpha_{\min}$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $\alpha_{\max}$ .

За базовые значения принять  $I_{\text{баз}} = I_{\text{дв.н}}$ ,  $\omega_{\text{баз}} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{c}$ .

Оценку ширины области прерывистых токов и величины пульсаций тока двигателя можно выполнить по следующим выражениям.

Максимальное значение гранично-непрерывного тока при угле управления  $\alpha = 90^\circ$

$$I_{d\text{гр.макс}} = \frac{k_{\text{гр.макс}} \cdot E_{d0}}{\omega_c \cdot L_{\text{яц}}},$$

где  $k_{\text{гр.макс}} = 1 - \frac{\pi}{m_B} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m_B}$ .

Действующее значение первой гармоники выпрямленного тока в процентах от номинального тока двигателя рассчитывается по выражению

$$p(1) \% = \frac{E_{d(1)} \cdot 100}{m_B \cdot I_{\text{двн}} \cdot \omega_c \cdot L_{\text{яц}}}$$

для двух значений угла управления:

$$- \alpha = 90^\circ, E_{d(1)} = \frac{E_{d0}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 \cdot m_B}{(m_B^2 - 1)};$$

$$- \alpha = \alpha_{\text{мин}}, E_{d(1)} = \frac{E_{d0}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 \cdot \cos \alpha_{\text{мин}}}{(m_B^2 - 1)} \sqrt{1 + m_B^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{\text{мин}}}.$$

Сделать выводы по полученным значениям  $I_{d\text{гр.макс}}$  и  $p(1) \%$ .

1. Сравнить область прерывистых токов с заданной областью изменения длительных нагрузок электропривода (рис. 1.1) и оценить:

- необходимость применения сглаживающего реактора;
- необходимость учета или компенсации влияния прерывистых токов при настройке системы регулирования (применение адаптивного регулятора тока, устройства линеаризации регулировочных характеристик тиристорного преобразователя).

2. На основании полученных значений  $p(1) \%$  оценить требуемое снижение мощности двигателя при работе в нижней части диапазона регулирования скорости [1, рис. 5.6].

Если принято решение о необходимости применения сглаживающего реактора (рис. 1.2,  $L1$ ), тогда по [2, подразделы 4.2 и 5.6] выбирается реактор и, начиная с подраздела 5.3, уточняются параметры и характеристики силовой части электропривода.

### 1.2.5. Расчет регулировочных характеристик тиристорного преобразователя

Расчет регулировочных характеристик тиристорного преобразователя производится с использованием следующих программ:

- $A\_UU$  – регулировочная характеристика СИФУ  $\alpha = f(U_y)$ ;
- $ETP\_A$  – регулировочная характеристика ТП  $E_{\text{тп}} = f(\alpha)$ ;

–  $E_{TP\_UU}$  – регулировочная характеристика ТП  $E_{TP} = f(U_{уп})$ .

Вводимые параметры:

- минимальный угол управления  $\alpha_{мин}$ , град;
- максимальный угол управления  $\alpha_{макс}$ , град;
- начальный угол управления  $\alpha_{нач}$ , град, (принять  $\alpha_{нач} = 120^\circ$ );
- коэффициент управляющего органа на входе СИФУ  $k_{yo}$ , (принять  $k_{yo} = 1$ );
- максимальное опорное напряжение (1/2 размаха опорного напряжения),  $U_{оп.макс}$ , В;
- максимальное напряжение управления  $U_{у.макс}$ , В, принять  $U_{у.макс} = \frac{\alpha_{нач} - \alpha_{мин}}{180} \cdot U_{уп.макс}$ , где  $U_{уп.макс} = 10$  В;
- индуктивность якорной цепи  $L_{яц}$ , Гн;
- сопротивление якорной цепи  $R_{яц}$ , Ом;
- эквивалентное сопротивление, вносимое за счет коммутации анодных токов  $R_k$ , Ом;
- число фаз преобразователя  $m_b$ ;
- коэффициент ЭДС двигателя  $c, \frac{В \cdot с}{рад}$ ;
- максимальное значение выпрямленной ЭДС при угле управления  $\alpha = 0$   $E_{d0}$ , В;
- действующее значение ЭДС источника переменного тока  $E_2$ , В, для мостовой схемы выпрямления  $E_2 = U_{2л}$ .

### 1.3. Линеаризованная САУ электропривода

#### 1.3.1. Структурная схема линеаризованной САУ электропривода

Структурные схемы линеаризованных САУ регулируемого и следящего электроприводов приведены, соответственно, на рис. 1.6, а и 1.6, б. Принимается решение о целесообразности (или нецелесообразности) применения положительной обратной связи по скорости (ПОС) в системе регулирования электропривода.

Ниже излагается методика оптимизации многоконтурных систем регулирования с малой постоянной времени в прямом канале и безынерционной обратной связью.



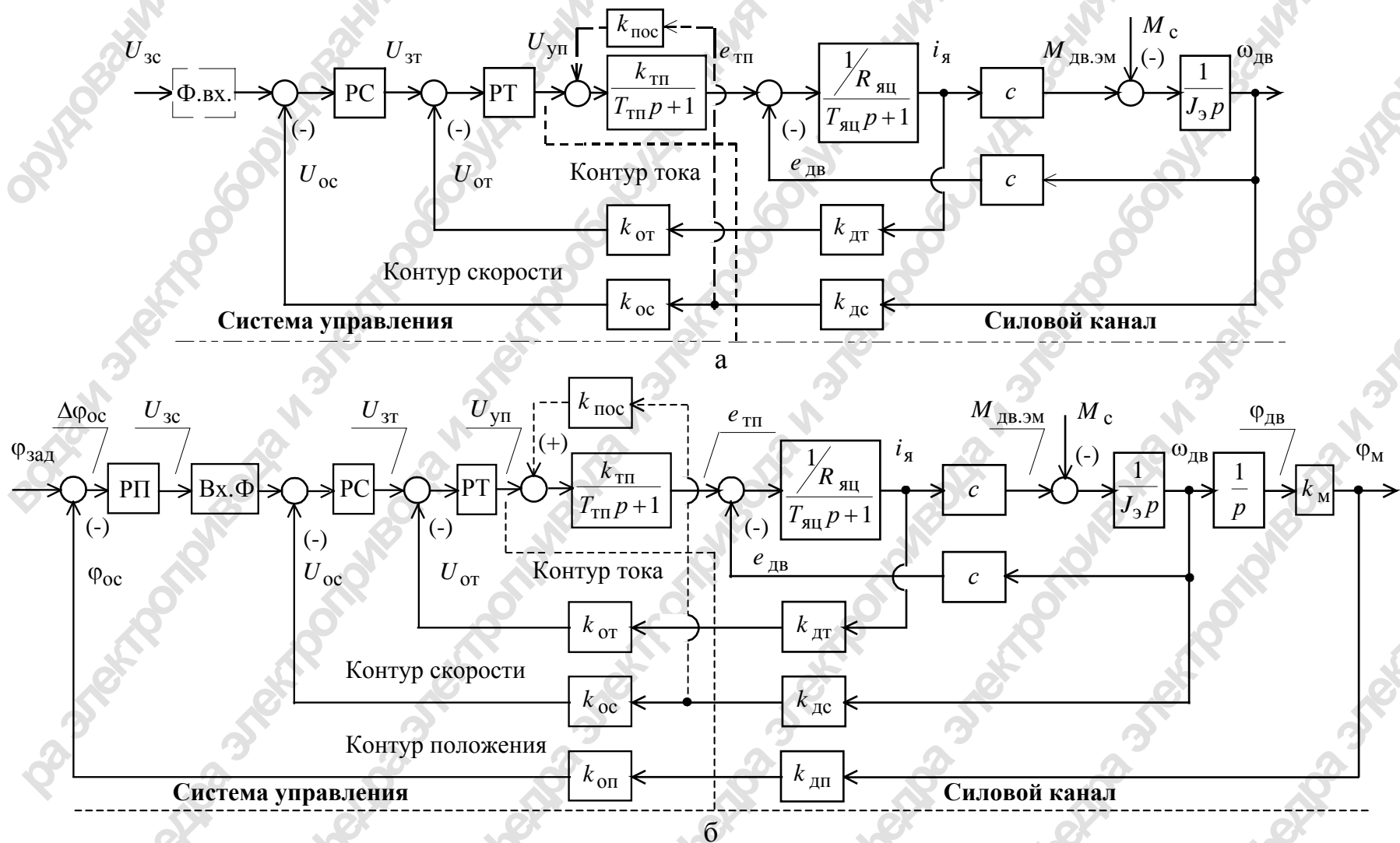


Рис. 1.6. Структурные схемы линейризованных САУ: а – регулируемого электропривода; б – следящего электропривода

### 1.3.2. Оптимизация контуров регулирования

#### Оптимизация контура тока

В системах электропривода без положительной обратной связи по скорости оптимизация контура тока осуществляется без учета обратной связи по ЭДС двигателя, что соответствует режиму работы электропривода с заторможенным двигателем.

Структурная схема контура тока приведена на рис. 1.7.

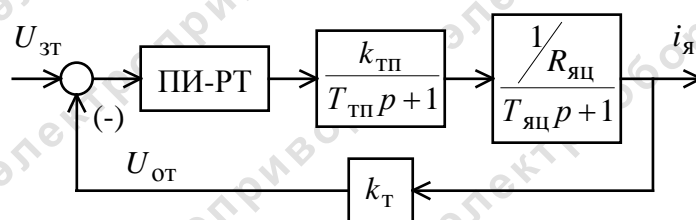


Рис. 1.7. Структурная схема контура тока в режиме заторможенного двигателя

Малая постоянная времени контура тока

$$T_{\mu\tau} = T_{\tau\pi}, \text{ с.}$$

Коэффициент обратной связи по току

$$k_{\tau} = \frac{U_{\text{рс макс}}}{I_{\text{эп макс}}}, \text{ В/А,}$$

где  $U_{\text{рс макс}} = 10 \text{ В}$  – максимальное значение напряжения регулятора скорости.

Коэффициент передачи входной цепи регулятора тока

$$k_{\text{от}} = \frac{k_{\tau}}{k_{\text{дт}}}.$$

Передаточная функция регулятора тока при оптимизации по МО

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

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{рт}} = \frac{T_{\text{яц}} \cdot R_{\text{яц}}}{k_{\tau\pi} \cdot k_{\tau} \cdot a_{\tau} \cdot T_{\text{мп}}}.$$

Постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{рт}} = T_{\text{яц}}.$$

Контур тока, оптимизированный по МО, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз.т}} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1)}; \quad (1.1)$$

– замкнутого контура

$$W(p)_{\text{зам.т}} = \frac{\frac{1}{k_T}}{a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1}. \quad (1.2)$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого оптимизированного контура тока:

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

– полоса пропускания по модулю и фазе  $\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0.71}{T_{\text{мт}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  и

соответственно  $f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}}{2 \cdot \pi} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц};$

– перерегулирование, время первого согласования и время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия

$$\sigma = 4.3\%, \quad t_{\text{py1}}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\text{мт}}, \text{с}, \quad t_{\text{py2}}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\text{мт}}, \text{с}.$$

Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контура тока могут быть построены по структурной схеме рис. 1.7 с использованием программ *CLASSIC* и *Simulink* или получены по выражениям соответствующих передаточных функций (1.1) и (1.2) с помощью программ *CLASSIC*, *LACH*. По полученным характеристикам необходимо определить:

– для разомкнутого контура запасы устойчивости по модулю  $\Delta L$ , dB, и фазе  $\Delta \varphi$ , град;

– для замкнутого контура полосу пропускания по модулю и фазе  $\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \omega_{\text{п}}^{(\text{м})}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , и  $f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = f_{\text{п}}^{(\text{м})}, \text{Гц}$ .

Имитационное моделирование контура тока выполняется по структурной схеме рис. 1.7 с использованием программ *CLASSIC*, *DORA*, *Simulink*.

Теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура тока свести в табл. 1.4.

Сделать выводы по результатам сравнения ожидаемых и экспериментально полученных показателей качества работы контура тока.

Таблица 1.4

Показатели переходных процессов по управлению  
линеаризованного контура тока, оптимизированного по МО

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{уст}, A$
Ожидаемые показатели			
Результаты моделирования			

### Оптимизация контура скорости

Малая постоянная времени контура скорости

$$T_{\mu c} = a_T \cdot T_{\mu T}, c.$$

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{U_{з макс}}{\omega_{эп макс}}, B \cdot c / рад.$$

Коэффициент передачи входной цепи регулятора скорости

$$k_{oc} = \frac{k_c}{k_{дс}}.$$

### Оптимизация контура скорости по МО

Структурная схема контура скорости при оптимизации по МО  
приведена на рис. 1.8.

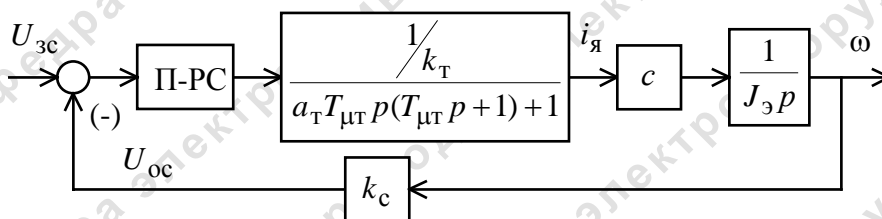


Рис. 1.8. Структурная схема линеаризованного контура скорости при оптимизации по МО

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{pc}(p) = k_{pc}.$$

Коэффициент усиления регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{J_{э} \cdot k_T}{c \cdot k_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T}}.$$

Контур скорости, оптимизированный по МО, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз.с}} = \frac{1}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1]}; \quad (1.3)$$

– замкнутого контура по управлению

$$W(p)_{\text{зам.с}} = \frac{1/k_c}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1] + 1}. \quad (1.4)$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура скорости, оптимизированного по МО:

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

– полоса пропускания по фазе  $\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0.35}{T_{\text{мт}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , и  $f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$ ;

– полоса пропускания по модулю  $\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0.5}{T_{\text{мт}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  и

$$f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц};$$

– перерегулирование, время первого согласования и время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия

$$\sigma = 8.1\%; \quad t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\text{мт}}, \text{с}, \quad t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\text{мт}}, \text{с}.$$

Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контура скорости могут быть построены по структурной схеме рис. 1.8 с использованием программ *CLASSIC* и *Simulink* или получены по выражениям соответствующих передаточных функций (1.3) и (1.4) с помощью программ *CLASSIC*, *LACH*. По полученным характеристикам необходимо определить:

– для разомкнутого контура запасы устойчивости по модулю  $\Delta L$ , dB и фазе  $\Delta\phi$ , град;

– для замкнутого контура полосу пропускания по модулю  $\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{\text{п}}^{(\text{м})}, \text{Гц}$ , и фазе  $\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{\text{п}}^{(\text{ф})}, \text{Гц}$ .

Имитационное моделирование контура скорости выполняется по структурной схеме рис. 1.8 с использованием программ *CLASSIC*, *DORA* и *Simulink*.

Для получения более точных характеристик и показателей качества работы оптимизированного контура скорости следует воспользоваться двухконтурной структурной схемой САР скорости (рис. 1.6, а) с уче-

том внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя и ПОС при ее наличии (при моделировании принять  $M_c = 0$ ).

Теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура скорости свести в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Показатели переходных процессов по управлению линеаризованного контура скорости, оптимизированного по МО

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta\omega_{уст}, \frac{рад}{c}$
Ожидаемые показатели			
Результаты моделирования			

Сделать выводы по результатам сравнения ожидаемых и экспериментально полученных показателей качества работы контура скорости, а также оценить влияние ЭДС двигателя и ПОС на характер переходных процессов в контуре скорости.

#### Оптимизация контура скорости по СО

Структурная схема контура скорости при оптимизации по СО приведена на рис. 1.9.

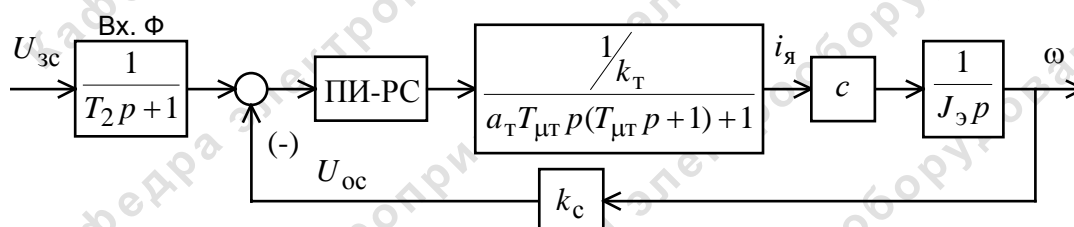


Рис. 1.9. Структурная схема линеаризованного контура скорости при оптимизации по СО

Передаточная функция регулятора скорости

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

Коэффициент усиления регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{J_э \cdot k_T}{c \cdot k_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot a_T \cdot T_{мт}}.$$

Постоянная времени регулятора скорости

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{мт}, c.$$

Контур скорости, оптимизированный по СО, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз.с}} = \frac{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1}{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot [a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1] + 1\}}; \quad (1.5)$$

– замкнутого контура по управлению без фильтра на входе

$$W(p)_{\text{зам.с}} = \frac{\frac{1}{k_c} \cdot (b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot [a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1}. \quad (1.6)$$

Передаточная функция фильтра на входе

$$W_{\text{ф.вх}}(p) = \frac{1}{T_2 \cdot p + 1}.$$

Постоянная времени фильтра

$$T_2 = b_c \cdot a_t \cdot a_c \cdot T_{\text{мт}}.$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости с фильтром на входе

$$W_{\text{сз}}(p) = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{1}{b_c \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \{a_c \cdot a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p [a_t \cdot T_{\text{мт}} \cdot p (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1}. \quad (1.7)$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура скорости, оптимизированного по СО:

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

– полоса пропускания по фазе  $\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0.18}{T_{\text{мт}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$  и

по модулю  $\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0.284}{T_{\text{мт}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$ ;

– перерегулирование, время первого согласования и время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия

$$\sigma = 6.2\%, \quad t_{\text{py1}}^{(5)} = 13.6 \cdot T_{\text{мт}}, \text{с}, \quad t_{\text{py2}}^{(5)} = 20.3 \cdot T_{\text{мт}}, \text{с}.$$

Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контура скорости с фильтром и без фильтра на входе могут быть получены по структурной схеме рис. 1.9 с

использованием программ *CLASSIC* и *Simulink* или по выражениям соответствующих передаточных функций (1.5), (1.6) и (1.7) с помощью программ *CLASSIC*, *LACH*. По полученным характеристикам необходимо определить:

- для разомкнутого контура запасы устойчивости по модулю  $\Delta L$ , dB, и фазе  $\Delta\varphi$ , град;
- для замкнутого контура полосу пропускания по модулю  $\omega_{\Pi}^{(м)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}, f_{\Pi}^{(м)}, \text{Гц}$ , и фазе  $\omega_{\Pi}^{(ф)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}, f_{\Pi}^{(ф)}, \text{Гц}$ .

Имитационное моделирование контура скорости выполняется по структурной схеме рис. 1.9 с использованием программ *CLASSIC*, *DORA* и *Simulink*.

Для получения более точных характеристик и показателей качества работы оптимизированного контура скорости следует воспользоваться двухконтурной структурной схемой САР скорости (рис. 1.6, а) с учетом внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя и ПОС при ее наличии (при моделировании принять  $M_c = 0$ ).

Теоретические и экспериментальные показатели качества линеаризованного контура скорости свести в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Показатели переходных процессов по управлению линеаризованного контура скорости, оптимизированного по СО

$t_{\text{py1}}^{(5)}, \text{с}$	$t_{\text{py2}}^{(5)}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$\Delta\omega_{\text{уст}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Ожидаемые показатели			
Результаты моделирования			

Сделать выводы по результатам сравнения ожидаемых и экспериментально полученных показателей качества работы контура скорости, а также оценить влияние ЭДС двигателя и ПОС на характер переходных процессов в контуре скорости.

### **Оптимизация контура положения**

Структурная схема контура положения при оптимизации по МО приведена на рис. 1.10.

Малая постоянная времени контура положения:

- при оптимизации контура скорости по МО

$$T_{\mu\text{п}} = a_{\text{с}} \cdot T_{\mu\text{с}} = a_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\mu\text{т}}, \text{с};$$



– при оптимизации контура скорости по СО

$$T_{\mu\pi} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c} = b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T}, \text{ с.}$$

Коэффициент обратной связи по положению

$$k_{\pi} = k_{\text{оп}} \cdot k_{\text{дп}},$$

где принять  $k_{\text{оп}} = 4$ .

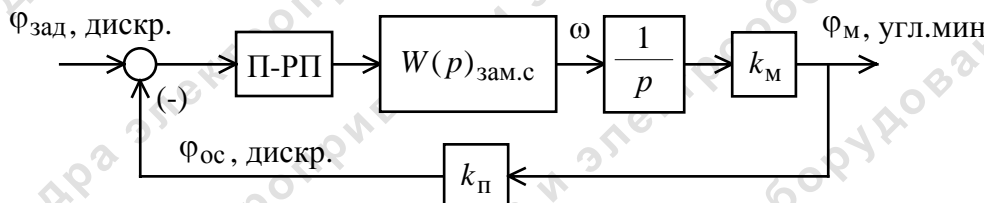


Рис. 1.10. Структурная схема контура положения

Коэффициент передачи импульсного датчика положения, установленного на выходном валу механизма, угол поворота которого измеряется в угловых минутах,

$$k_{\text{дп}} = \frac{n_{\text{дп}}}{360 \cdot 60}, \frac{\text{дискрет}}{\text{угл.мин}},$$

где  $n_{\text{дп}}$  – число периодов выходного сигнала датчика положения выбирается из ряда следующих типовых значений числа периодов выходного сигнала датчика положения [3]:  $n_{\text{дп}} = 1500; 1800; 2000; 2048; 2500; 2540; 3000; 3600; 4000; 4096; 5000; 6500; 7200; 7500; 9000; 10000; 12000; 15000; 18000; 20000; 25000; 36000; 50000$ .

Передаточная функция регулятора положения

$$W_{\text{рп}}(p) = k_{\text{рп}}.$$

Коэффициент усиления регулятора положения

$$k_{\text{рп}} = \frac{k_c}{k_M \cdot k_{\pi} \cdot a_{\pi} \cdot T_{\mu\pi}}.$$

Контур положения, оптимизированного по МО, имеет следующие передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз.п}} = \frac{1}{a_{\pi} \cdot T_{\mu\pi} \cdot p \cdot \{T_{\mu\pi} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\}}; \quad (1.8)$$

– замкнутого контура по управлению

$$W(p)_{\text{зам.п}} = \frac{\frac{1}{k_{\pi}}}{a_{\pi} \cdot T_{\mu\pi} \cdot p \cdot \{T_{\mu\pi} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\}}. \quad (1.9)$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура положения, оптимизированного по МО, при настройке контура скорости на МО:

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

– полоса пропускания по фазе  $\omega_{п}^{(\phi)} = \frac{0.18}{T_{\mu\tau}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{п}^{(\phi)} = \frac{\omega_{п}^{(\phi)}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$  и

по модулю  $\omega_{п}^{(м)} = \frac{0.284}{T_{\mu\tau}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{п}^{(м)} = \frac{\omega_{п}^{(м)}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$ ;

– перерегулирование, время первого согласования и время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия

$$\sigma = 6.2 \%, \quad t_{\text{py}1}^{(5)} = 13.6 \cdot T_{\mu\tau}, \text{с}, \quad t_{\text{py}2}^{(5)} = 20.3 \cdot T_{\mu\tau}, \text{с}.$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура положения, оптимизированного по МО, при настройке контура скорости на СО:

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

– полоса пропускания по фазе  $\omega_{п}^{(\phi)} = \frac{0.09}{T_{\mu\tau}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{п}^{(\phi)} = \frac{\omega_{п}^{(\phi)}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$  и

по модулю  $\omega_{п}^{(м)} = \frac{0.139}{T_{\mu\tau}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{п}^{(м)} = \frac{\omega_{п}^{(м)}}{2 \cdot \pi}, \text{Гц}$ ;

– перерегулирование, время первого согласования и время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия

$$\sigma = 5.0 \%,$$

$$t_{\text{py}1}^{(5)} = 30.4 \cdot T_{\mu\tau}, \text{с}, \quad t_{\text{py}2}^{(5)} = 30.4 \cdot T_{\mu\tau}, \text{с}.$$

Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контура положения могут быть получены соответственно по выражениям передаточных функций (1.8) и (1.9) с помощью программ *CLASSIC*, *LACH* или по структурной схеме рис. 1.10 с использованием программ *CLASSIC* и *Simulink*.

По полученным характеристикам необходимо определить:

– для разомкнутого контура запасы устойчивости по модулю  $\Delta L$ , dB и фазе  $\Delta\varphi$ , град;

– для замкнутого контура полосу пропускания по модулю  $\omega_{п}^{(м)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{п}^{(м)}, \text{Гц}$ , и фазе  $\omega_{п}^{(\phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $f_{п}^{(\phi)}, \text{Гц}$ .

Имитационное моделирование контура положения выполняется по структурной схеме рис. 1.10 с использованием программ *CLASSIC*, *DORA*, *Simulink*.

Для получения более точных характеристик и показателей качества работы оптимизированного контура положения следует воспользоваться двухконтурной структурной схемой САР положения (рис. 1.6, б) с учетом внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя и ПОС при ее наличии (при моделировании принять  $M_c = 0$ ).

Теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура положения свести в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Показатели переходных процессов по управлению линеаризованного контура положения, оптимизированного по МО

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta\varphi_{уст}, \frac{рад}{c}$
Ожидаемые показатели			
Результаты моделирования			

Сделать выводы по результатам сравнения ожидаемых и экспериментально полученных показателей качества. Оценить влияние ЭДС двигателя и ПОС, при ее наличии, на характер переходных процессов в контуре положения.

### 1.3.3. Сводные таблицы оптимизации контуров регулирования

Методика оптимизации контуров, передаточные функции и показатели качества работы замкнутых оптимизированных контуров СЭП приведены в табл. 1.8 – 1.10 для сочетания типов регуляторов тока и скорости ПИ-РТ + П-РС и в табл. 1.11 – 1.13 для сочетания ПИ-РТ + ПИ-РС.

*Примечание.* Оптимизация контуров регулирования с инерционными цепями обратных связей изложена в подразделе 2.3.3.

Таблица 1.8

## Методика оптимизации контуров СЭП по управлению

Контур	Малая постоянная контура	Оптимум	Регулятор		Коэффициент оптимизации	Расчетные выражения	
			Тип	Передаточная функция		Коэффициент усиления, постоянная времени регулятора	Коэффициент обратной связи контура
тока	$T_{\text{мг}} = T_{\text{тп}}$	МО	ПИ	$k_{\text{рт}} \cdot \frac{T_{\text{рт}} p + 1}{T_{\text{рт}} p}$	$a_{\text{т}} = 2$	$k_{\text{рт}} = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}}$ $T_{\text{рт}} = T_{\text{яц}}$	$k_{\text{т}} = \frac{U_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{эп.макс}}}$ $U_{\text{зт.макс}} = 10 \text{ В}$
скорости	$T_{\text{мс}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}$	МО	П	$k_{\text{рс}}$	$a_{\text{с}} = 2$	$k_{\text{рс}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot k_{\text{т}}}{c \cdot k_{\text{с}}} \times$ $\times \frac{1}{a_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}}$	$k_{\text{с}} = \frac{U_{\text{зс.макс}}}{\omega_{\text{эп.макс}}}$ $U_{\text{зс.макс}} = 10 \text{ В}$
положения	$T_{\text{мс}} = a_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}$	МО	П	$k_{\text{рп}}$	$a_{\text{п}} = 2$	$k_{\text{рп}} = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{м}} \cdot k_{\text{п}}} \times$ $\times \frac{1}{a_{\text{п}} \cdot a_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}}$	$k_{\text{п}} =$ $= \frac{k_{\text{оп}} \cdot n_{\text{дп}}}{360 \cdot 60}$
		СО	ПИ	$k_{\text{рп}} \cdot \frac{T_{\text{рп}} p + 1}{T_{\text{рп}} p}$	$a_{\text{п}} = 2$ $b_{\text{п}} = 2$	$k_{\text{рп}} = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{м}} \cdot k_{\text{п}}} \times$ $\times \frac{1}{a_{\text{п}} \cdot a_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}}$ $T_{\text{рп}} = b_{\text{п}} \cdot a_{\text{п}} \cdot a_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мт}}$	

Таблица 1.9

Передаточные функции оптимизированных контуров СЭП по управлению

Контур	Полные передаточные функции разомкнутого и замкнутого контура
Тока МО ПИ-РТ	$\frac{1}{a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1)} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu T}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p}$ $\frac{1/k_T}{a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1} = \frac{1/k_T}{a_T \cdot T_{\mu T}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}$
Скорости МО ПИ-РС	$\frac{1}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1]} =$ $= \frac{1}{a_c a_T^2 T_{\mu T}^3 p^3 + a_c a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 + a_c a_T T_{\mu T} p}$ $\frac{1/k_c}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1} =$ $= \frac{1/k_c}{a_c a_T^2 T_{\mu T}^3 p^3 + a_c a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 + a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$
Положения МО ПИ-РП	$\frac{1}{a_{\Pi} \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\}} =$ $= \frac{1}{a_{\Pi} a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^4 p^4 + a_{\Pi} a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + a_{\Pi} a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 + a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p}$ $\frac{1/k_{\Pi}}{a_{\Pi} \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1} =$ $= \frac{1/k_{\Pi}}{a_{\Pi} a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^4 p^4 + a_{\Pi} a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + a_{\Pi} a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 + a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$
Положения СО ПИ-РП	$\frac{b_{\Pi} \cdot a_{\Pi} \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}{b_{\Pi} \cdot a_{\Pi}^2 \cdot a_c^2 \cdot a_T^2 \cdot T_{\mu T}^2 \cdot p^2 \cdot \{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\}} =$ $= \frac{b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} \cdot p + 1}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^5 p^5 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^4 p^4 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^3 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2}$ $\frac{(1/k_{\Pi}) \cdot (b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} \cdot p + 1)}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 \{a_c a_T T_{\mu T} p [a_T T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1) + 1] + 1\} + b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$ $= \frac{(1/k_{\Pi}) \cdot (b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p + 1)}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^5 p^5 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^4 p^4 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^3 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 +}$ $\rightarrow \frac{b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p + 1}{b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$

Таблица 1.10

Показатели качества работы оптимизированных контуров СЭП по управлению

Контур		тока	скорости	положения	
Оптимизация		МО	МО	МО	СО
Порядок уравнения		2	3	4	5
Малая постоянная времени контура		$T_{\text{мт}}$	$2 \cdot T_{\text{мт}}$	$4 \cdot T_{\text{мт}}$	$4 \cdot T_{\text{мт}}$
Полная передаточная функция замкнутого контура		$\frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{1}{2T_{\text{мт}}^2 p^2 + 2T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{с}}} \cdot \frac{1}{8T_{\text{мт}}^3 p^3 + 8T_{\text{мт}}^2 p^2 + 4T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{64T_{\text{мт}}^4 p^4 + 64T_{\text{мт}}^3 p^3 + 32T_{\text{мт}}^2 p^2 + 8T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{1024T_{\text{мт}}^5 p^5 + 1024T_{\text{мт}}^4 p^4 + 512T_{\text{мт}}^3 p^3 + 128T_{\text{мт}}^2 p^2 + 16T_{\text{мт}} p + 1}$
Усеченная передаточная функция		$\frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{1}{2T_{\text{мт}}^2 p^2 + 2T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{с}}} \cdot \frac{1}{8T_{\text{мт}}^2 p^2 + 4T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{32T_{\text{мт}}^2 p^2 + 8T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{512T_{\text{мт}}^3 p^3 + 128T_{\text{мт}}^2 p^2 + 16T_{\text{мт}} p + 1}$
Перерегулирование, $\sigma$ , %		4.32	8.14	6.24	52
Время первого согласования $t_{\text{py1}}^{(5)}$ , с		$4.1 \cdot T_{\text{мт}}$	$7.0 \cdot T_{\text{мт}}$	$13.2 \cdot T_{\text{мт}}$	$11.0 \cdot T_{\text{мт}}$
Время переходного процесса $t_{\text{py2}}^{(5)}$ , с		$4.1 \cdot T_{\text{мт}}$	$11.9 \cdot T_{\text{мт}}$	$20.3 \cdot T_{\text{мт}}$	$37.2 \cdot T_{\text{мт}}$
Полоса пропускания, рад/с	$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}$	$\frac{0.71}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.497}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.282}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.299}{T_{\text{мт}}}$
	$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}$	$\frac{0.71}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.353}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.182}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.158}{T_{\text{мт}}}$

Таблица 1.11

## Методика оптимизации контуров СЭП по управлению

Контур	Малая постоянная контура	Оптимум	Регулятор		Коэффициент оптимизации	Расчетные выражения	
			Тип	Передаточная функция		Коэффициент усиления, постоянная времени регулятора	Коэффициент обратной связи контура
тока	$T_{\text{MT}} = T_{\text{ТП}}$	МО	ПИ	$k_{\text{PT}} \cdot \frac{T_{\text{PT}} p + 1}{T_{\text{PT}} p}$	$a_{\text{T}} = 2$	$k_{\text{PT}} = \frac{R_{\text{ЯЦ}} \cdot T_{\text{ЯЦ}}}{k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{T}} \cdot a_{\text{T}} \cdot T_{\text{MT}}}$ $T_{\text{PT}} = T_{\text{ЯЦ}}$	$k_{\text{T}} = \frac{U_{\text{ЗТ.макс}}}{I_{\text{ЭП.макс}}}$ $U_{\text{ЗТ.макс}} = 10 \text{ В}$
скорости	$T_{\text{МС}} = a_{\text{T}} \cdot T_{\text{MT}}$	СО	ПИ	$k_{\text{РС}} \cdot \frac{T_{\text{РС}} p + 1}{T_{\text{РС}} p}$	$a_{\text{С}} = 2$ $b_{\text{С}} = 2$	$k_{\text{РС}} = \frac{J_{\text{Э}} \cdot k_{\text{T}}}{c \cdot k_{\text{С}}} \times$ $\times \frac{1}{a_{\text{С}} \cdot a_{\text{T}} \cdot T_{\text{MT}}}$ $T_2 = T_{\text{РС}} = b_{\text{С}} a_{\text{С}} a_{\text{T}} T_{\text{MT}}$	$k_{\text{С}} = \frac{U_{\text{ЗС.макс}}}{\omega_{\text{ЭП.макс}}}$ $U_{\text{ЗС.макс}} = 10 \text{ В}$
положения	$T_{\text{МП}} = b_{\text{С}} a_{\text{С}} a_{\text{T}} T_{\text{MT}}$	МО	П	$k_{\text{РП}}$	$a_{\text{П}} = 2$	$k_{\text{РП}} = \frac{k_{\text{С}}}{k_{\text{М}} \cdot k_{\text{П}}} \times$ $\times \frac{1}{a_{\text{П}} \cdot b_{\text{С}} \cdot a_{\text{С}} \cdot a_{\text{T}} \cdot T_{\text{MT}}}$	$k_{\text{П}} =$ $= \frac{k_{\text{ОП}} \cdot n_{\text{ДП}}}{360 \cdot 60}$
		СО	ПИ	$k_{\text{РП}} \cdot \frac{T_{\text{РП}} p + 1}{T_{\text{РП}} p}$	$a_{\text{П}} = 2$ $b_{\text{П}} = 2$	$k_{\text{РП}} = \frac{k_{\text{С}}}{k_{\text{М}} \cdot k_{\text{П}}} \times$ $\times \frac{1}{a_{\text{П}} \cdot b_{\text{С}} \cdot a_{\text{С}} \cdot a_{\text{T}} \cdot T_{\text{MT}}}$ $T_{\text{РП}} = b_{\text{П}} a_{\text{П}} b_{\text{С}} a_{\text{С}} a_{\text{T}} T_{\text{MT}}$	

Таблица 1.12

Передаточные функции оптимизированных контуров СЭП по управлению

Контур	Полные передаточные функции контура
Тока МО	см. табл. 1.9
Скорости СО ПИ-РС	$\frac{b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}{b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\}} =$ $= \frac{b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1}{b_c a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^4 p^4 + b_c a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + b_c a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2}$ <p style="text-align: center;">Замкнутого с фильтром на входе контура</p> $\frac{1/k_c}{b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p \cdot (T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1] + 1\}} =$ $= \frac{1/k_c}{b_c a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^4 p^4 + b_c a_c^2 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + b_c a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 + b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$
Положения (с фильтром на входе контура скорости) МО ПИ-РП	$\frac{1}{a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p \{b_c a_c a_T T_{\mu T} p \{a_c a_T T_{\mu T} p [a_T T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1) + 1] + 1\} + 1\}} =$ $= \frac{1}{a_{\Pi} b_c^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^5 p^5 + a_{\Pi} b_c^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^4 p^4 + a_{\Pi} b_c^2 a_c^3 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + a_{\Pi} b_c^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 +}$ $\rightarrow \frac{1/k_{\Pi}}{a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p \{b_c a_c a_T T_{\mu T} p \{a_c a_T T_{\mu T} p [a_T T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1) + 1] + 1\} + 1\}} =$ $\frac{1/k_{\Pi}}{a_{\Pi} b_c^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^5 p^5 + a_{\Pi} b_c^2 a_c^3 a_T^4 T_{\mu T}^4 p^4 + a_{\Pi} b_c^2 a_c^3 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + a_{\Pi} b_c^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 +}$ $\rightarrow \frac{1/k_{\Pi}}{a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$
Положения (с фильтром на входе контура скорости) СО ПИ-РП	$\frac{b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 \{b_c a_c a_T T_{\mu T} p [a_c a_T T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1) + 1] + 1\}} =$ $= \frac{b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^4 a_T^5 T_{\mu T}^6 p^6 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^4 a_T^5 T_{\mu T}^5 p^5 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^4 a_T^4 T_{\mu T}^4 p^4 +}$ $\rightarrow \frac{(1/k_{\Pi}) \cdot (b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1)}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^3 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2}$ $= \frac{(1/k_{\Pi}) \cdot (b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1)}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 \{b_c a_c a_T T_{\mu T} p [a_c a_T T_{\mu T} p (T_{\mu T} p + 1) + 1] + 1\} + b_{\Pi} a_{\Pi} a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$ $= \frac{(1/k_{\Pi}) \cdot (b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1)}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^4 a_T^5 T_{\mu T}^6 p^6 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^4 a_T^5 T_{\mu T}^5 p^5 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^4 a_T^4 T_{\mu T}^4 p^4 +}$ $\rightarrow \frac{(1/k_{\Pi}) \cdot (b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1)}{b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^3 a_c^3 a_T^3 T_{\mu T}^3 p^3 + b_{\Pi} a_{\Pi}^2 b_c^2 a_c^2 a_T^2 T_{\mu T}^2 p^2 + b_{\Pi} a_{\Pi} b_c a_c a_T T_{\mu T} p + 1}$



Таблица 1.13

Показатели качества работы оптимизированных контуров СЭП по управлению

Контур	тока	скорости с фильтром на входе	положения	
Оптимизация	МО	СО	МО	СО
Порядок уравнения	2	4	5	6
Малая постоянная времени контура	$T_{\text{мт}}$	$4 \cdot T_{\text{мт}}$	$8 \cdot T_{\text{мт}}$	$8 \cdot T_{\text{мт}}$
Полная передаточ- ная функция замк- нутого контура	$\frac{1}{k_{\text{г}}} \cdot \frac{1}{2T_{\text{мт}}^2 p^2 + 2T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{с}}} \cdot \frac{1}{64T_{\text{мт}}^4 p^4 + 64T_{\text{мт}}^3 p^3 + 32T_{\text{мт}}^2 p^2 + 8T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{1024T_{\text{мт}}^5 p^5 + 1024T_{\text{мт}}^4 p^4 + 512T_{\text{мт}}^3 p^3 + 128T_{\text{мт}}^2 p^2 + 16T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{32768T_{\text{мт}}^6 p^6 + 32768T_{\text{мт}}^5 p^5 + 16384T_{\text{мт}}^4 p^4 + 4096T_{\text{мт}}^3 p^3 + 512T_{\text{мт}}^2 p^2 + 32T_{\text{мт}} p + 1}$
Усеченная пере- даточная функция	$\frac{1}{k_{\text{г}}} \cdot \frac{1}{2T_{\text{мт}}^2 p^2 + 2T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{с}}} \cdot \frac{1}{32T_{\text{мт}}^2 p^2 + 8T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{128T_{\text{мт}}^2 p^2 + 16T_{\text{мт}} p + 1}$	$\frac{1}{k_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{4096T_{\text{мт}}^3 p^3 + 512T_{\text{мт}}^2 p^2 + 32T_{\text{мт}} p + 1}$
Перерегулирование	$\sigma = 4.32 \%$	$\sigma = 6.24 \%$	$\sigma = 5.47 \%$	$\sigma = 50.9 \%$
Время первого со- гласования $t_{\text{py1}}^{(5)}$ , с	$4.1 \cdot T_{\text{мт}}$	$13.2 \cdot T_{\text{мт}}$	$26.7 \cdot T_{\text{мт}}$	$21.8 \cdot T_{\text{мт}}$
Время переходного процесса $t_{\text{py2}}^{(5)}$ , с	$4.1 \cdot T_{\text{мт}}$	$20.3 \cdot T_{\text{мт}}$	$40.1 \cdot T_{\text{мт}}$	$74.4 \cdot T_{\text{мт}}$
$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}$	$\frac{0.71}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.282}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.138}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.149}{T_{\text{мт}}}$
$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}$	$\frac{0.71}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.182}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.0915}{T_{\text{мт}}}$	$\frac{0.079}{T_{\text{мт}}}$

### 1.3.4. Обработка контуром скорости возмущающих воздействий

#### Контур скорости оптимизированного по МО

Структурная схема линейаризованного контура скорости, оптимизированного по МО, при обработке возмущающего воздействия приведена на рис. 1.11.

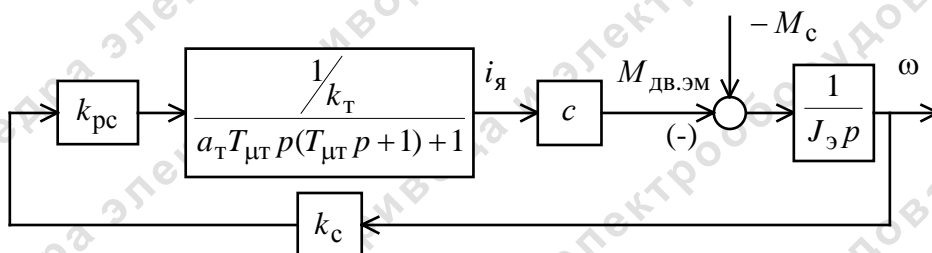


Рис. 1.11. Структурная схема линейаризованного контура скорости, оптимизированного по МО при обработке возмущения

Передаточная функция замкнутого контура скорости по возмущению

$$W(p)_{\text{возм.зам}} = \frac{\omega(p)}{-M_c(p)} = \frac{\frac{a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}}}{J_{\text{э}}} \cdot [a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1]}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1] + 1} \approx \frac{a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}}}{J_{\text{э}}} \cdot (a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1) \approx \frac{a_c \cdot a_T^2 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1}{a_c \cdot a_T^2 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1}. \quad (1.10)$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура скорости, настроенного на МО, при обработке ступенчатого возмущающего воздействия:

– установившаяся ошибка по возмущению

$$\Delta \omega_{\text{в уст}} = \frac{a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}}}{J_{\text{э}}} \cdot \Delta M_c,$$

– динамический провал (всплеск) скорости при ступенчатом набросе (сбросе) нагрузки  $\Delta M_c$

$$\Delta \omega_{\text{в макс}} = \left( \frac{2 \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}}}{J_{\text{э}}} \cdot \Delta M_c \right) \cdot [0.37 \cdot (1 + 0.95 \cdot a_c)].$$

Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики замкнутого контура скорости при обработке возмущающего воздействия могут быть получены по выражению (1.10) с помощью программ CLASSIC, LACH или по структурной схеме рис. 1.11 с использованием программ CLASSIC и Simulink.

Имитационное моделирование работы контура скорости при отработке возмущающего воздействия выполняется по структурной схеме рис. 1.11 с использованием программ *CLASSIC*, *DORA*, *Simulink*.

Для получения более точных характеристик и показателей качества работы оптимизированного контура скорости следует воспользоваться двухконтурной структурной схемой САР скорости (рис. 1.6, а) с учетом внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя и ПОС при ее наличии.

Теоретические и экспериментальные показатели качества работы контура свести в табл. 1.14. Время переходного процесса по возмущению  $t_{рв}$  оценивается по окончательному вхождению в зону допустимых отклонений  $\pm \Delta$ , где  $\Delta = 0.1 \cdot \Delta \omega_{в уст}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Таблица 1.14

Показатели переходных процессов по возмущению контура скорости, оптимизированного по МО при  $\Delta M_c =$  Н·м

$\Delta \omega_{в макс}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\Delta \omega_{в уст}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$t_{рв}, \text{с}$
Ожидаемые показатели		
Результаты моделирования		

Сделать выводы по результатам сравнения ожидаемых и экспериментально полученных показателей качества работы контура скорости.

### Контур скорости настроен на СО

Структурная схема контура скорости, оптимизированного по СО, при отработке возмущающего воздействия приведена на рис. 1.12.

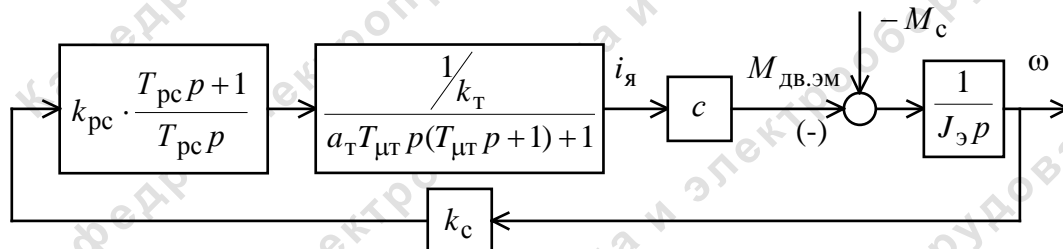


Рис. 1.12. Структурная схема линейризованного контура скорости, оптимизированного по СО при отработке возмущения

Передаточная функция замкнутого контура скорости по возмущению

$$\begin{aligned}
 W(p)_{\text{возм.зам}} &= \frac{\omega(p)}{-M_c(p)} = \\
 &= \frac{\frac{b_c \cdot a_c^2 \cdot a_T^2 \cdot T_{\text{мт}}^2}{J_3} \cdot p \cdot [a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \cdot (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1]}{b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p \{ a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p [a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p (T_{\text{мт}} \cdot p + 1) + 1] + 1 \} + 1} \approx (1.11) \\
 &\approx \frac{\frac{b_c \cdot a_c^2 \cdot a_T^2 \cdot T_{\text{мт}}^2}{J_3} p \cdot (a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c^2 \cdot a_T^3 \cdot T_{\text{мт}}^3 \cdot p^3 + b_c \cdot a_c^2 \cdot a_T^2 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + b_c \cdot a_c \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1}.
 \end{aligned}$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура скорости, оптимизированного по СО, при отработке ступенчатого возмущающего воздействия:

– установившаяся ошибка по возмущению

$$\Delta\omega_{\text{в уст}} = 0,$$

– динамический провал (всплеск) скорости при ступенчатом набросе (сбросе) нагрузки  $\Delta M_c$

$$\Delta\omega_{\text{в макс}} = \left( \frac{2 \cdot a_T \cdot T_{\text{мт}}}{J_3} \cdot \Delta M_c \right) \cdot [0.44 \cdot (1 + 0.615 \cdot a_c)].$$

Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики замкнутого контура скорости при отработке возмущающего воздействия могут быть получены по выражению (1.11) с помощью программ *CLASSIC*, *LACH* или по структурной схеме рис. 1.12 с использованием программ *CLASSIC*, *Simulink*.

Имитационное моделирование работы контура скорости при отработке возмущения выполняется по структурной схеме рис. 1.12 с использованием программ *CLASSIC*, *DORA*, *Simulink*.

Для получения более точных характеристик и показателей качества работы оптимизированного контура скорости следует воспользоваться двухконтурной структурной схемой САР скорости (рис. 1.6, а) с учетом внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя и ПОС при ее наличии.

Теоретические и экспериментальные показатели качества работы контура свести в табл. 1.15. Время переходного процесса по возмущению  $t_{\text{рв}}$  оценивается по окончательному вхождению в зону допустимых отклонений  $\pm \Delta$ , где  $\Delta = 0.1 \cdot \Delta\omega_{\text{в макс}}$ , рад/с.

Таблица 1.15

Показатели переходных процессов по возмущению контура скорости, оптимизированного по СО при  $\Delta M_c = \quad \text{Н} \cdot \text{м}$

$\Delta\omega_{\text{в макс}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\Delta\omega_{\text{в уст}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$t_{\text{рв}}, \text{с}$
Ожидаемые показатели		
Результаты моделирования		

Сделать выводы по результатам сравнения ожидаемых и экспериментально полученных показателей качества работы контура.

### 1.3.5. Отработка контуром положения линейного входного сигнала

Экспериментальные исследования отработки контуром положения линейного входного сигнала (режим равномерной заводки) выполняется по структурной схеме, приведенной на рис. 1.13. На вход контура пути подается линейно изменяющееся воздействие

$$\varphi_{\text{зад}}(t) = \omega_{\text{зад}} \cdot t,$$

где  $\omega_{\text{зад}} = \text{const}$  – заданная скорость,  $\frac{\text{дискр.}}{\text{с}}$ .

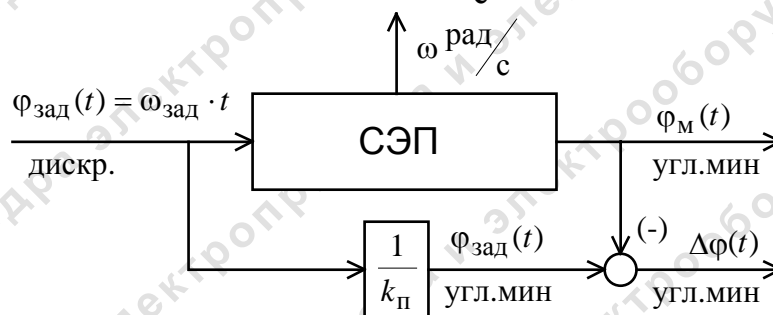


Рис. 1.13. Схема набора модели для исследования отработки контуром положения линейного входного воздействия

Графики переходных процессов отработки контуром положения линейного входного воздействия приведены на рис. 1.14. По результатам обработки полученных графиков переходных процессов находятся значения:

$\omega_{\text{зад}}$  – заданное значение скорости,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$\Delta\varphi_{\text{уст}}$  – установившееся значение угловой ошибки, угл. мин.

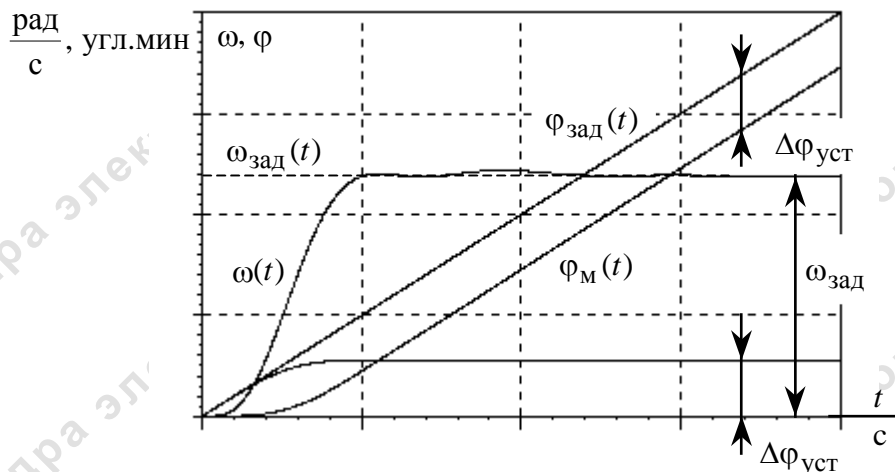


Рис. 1.14. Графики переходных процессов отработки контуром положения линейного входного воздействия

Качество работы СЭП в режиме равномерной заводки определяется добротностью контура пути по скорости с П регулятором положения:

- экспериментальное значение добротности

$$D_{\omega} = \frac{\omega_{\text{зад}} \cdot k_{\text{м}}}{\Delta\varphi_{\text{уст}}}, \text{ с}^{-1};$$

- теоретические значения добротности

$$D_{\omega} = k_{\text{п}} \cdot \frac{1}{k_{\text{с}}} \cdot k_{\text{рп}} \cdot k_{\text{м}}, \text{ с}^{-1}.$$

С ПИ регулятором положения

$$D_{\omega} = \infty.$$

#### 1.4. Расчет статических характеристик регулируемого электропривода

Под статическим режимом работы электропривода понимается режим, в котором значение основной координаты электропривода (для регулируемого электропривода – скорости) неизменно. Статическими характеристиками электропривода являются механические  $\omega(M)$  и электромеханические  $\omega(I)$  характеристики.

##### 1.4.1. Режим стабилизации скорости

Структурная схема САУ электропривода с положительной обратной связью на вход преобразователя (ПОС) для установившегося режима стабилизации скорости приведена на рис. 1.15.

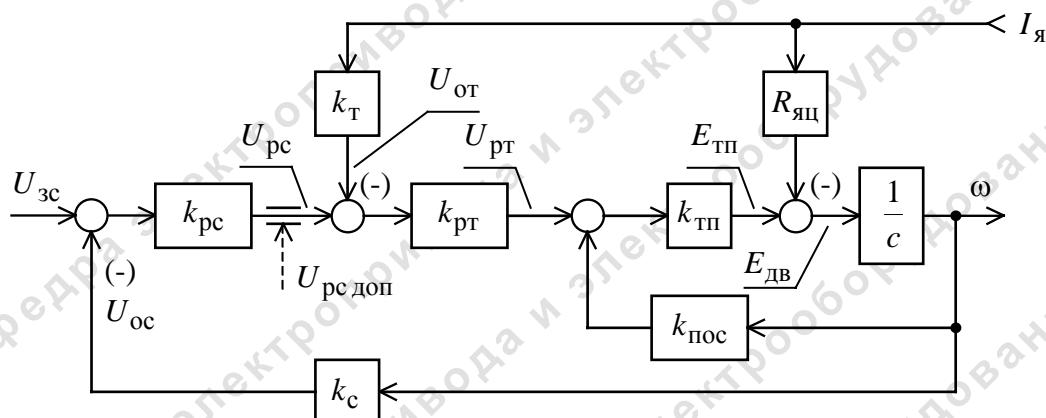


Рис. 1.15. Структурная схема САУ электропривода для установившегося режима стабилизации скорости

Структурная схема рис. 1.15 описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}(U_{зс} - k_c \cdot \omega) \cdot k_{рс} &= U_{рс}; \\ (U_{рс} - k_t \cdot I_{я}) \cdot k_{рт} &= U_{рт}; \\ (U_{рт} + k_{пос} \cdot \omega) \cdot k_{тп} &= E_{тп}; \\ E_{тп} - I_{я} \cdot R_{яц} &= E_{дв}; \\ E_{дв} &= c \cdot \omega,\end{aligned}$$

где в случае ПИ-регуляторов скорости и тока необходимо принять  $k_{рс} = k_{оу рс}$  и  $k_{рт} = k_{оу рт}$ ;

$k_{оу}$  – коэффициент усиления операционного усилителя, на котором реализован ПИ-регулятор;

$$k_{пос} = \frac{c}{k_{тп}} \text{ – коэффициент ПОС на вход преобразователя, } \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

Решив совместно приведенную систему уравнений относительно скорости  $\omega$ , получим выражение для электромеханической характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости.

### САР электропривода с ПОС (общий случай)

Выражение для электромеханической характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости

$$\begin{aligned}\omega(I_{я}) &= \frac{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп}}{c - k_{пос} \cdot k_{тп} + k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot U_{зс} - \\ &- \frac{R_{яц} + k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_t}{c - k_{пос} \cdot k_{тп} + k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot I_{я} = \omega_0(U_{зс}) - \Delta\omega(I_{я}),\end{aligned}\tag{1.12}$$

где

$$\begin{aligned}\omega_0(U_{зс}) &= \frac{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп}}{c - k_{пос} \cdot k_{тп} + k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot U_{зс} = \\ &= \frac{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c}{c - k_{пос} \cdot k_{тп} + k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot \frac{U_{зс}}{k_c}\end{aligned}$$

– скорость идеального холостого хода в замкнутой системе при управляющем напряжении  $U_{зс}$ , рад/с ;

$$\omega_{зад}(U_{зс}) = \frac{U_{зс}}{k_c} - \text{заданное значение скорости, рад/с ;}$$

$$\begin{aligned}\Delta\omega(I_{я}) &= \frac{R_{яц} + k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_{т}}{c - k_{пос} \cdot k_{тп} + k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot I_{я} = \\ &= \frac{k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_{т}}{1 + \frac{R_{яц}}{k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_{т}}} \cdot \frac{R_{яц} \cdot I_{я}}{c} \\ &= \frac{R_{яц}}{1 - \frac{k_{пос} \cdot k_{тп}}{c} + \frac{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c}{c}} \cdot \frac{R_{яц} \cdot I_{я}}{c}\end{aligned}$$

– абсолютная погрешность скорости в замкнутой системе при изменении тока нагрузки, рад/с ;

$$\Delta\omega_{раз}(I_{я}) = \frac{R_{яц} \cdot I_{я}}{c} - \text{абсолютная погрешность скорости разомкнутой системы при изменении тока нагрузки, рад/с .}$$

Абсолютная погрешность скорости замкнутой системы электропривода по управлению

$$\Delta\omega_y(U_{зс}) = \frac{c - k_{пос} \cdot k_{тп}}{c - k_{пос} \cdot k_{тп} + k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot \frac{U_{зс}}{k_c}, \text{ рад/с .}$$

### **САР электропривода с ПОС и полной компенсацией ЭДС двигателя ( $k_{пос} \cdot k_{тп} = c$ )**

Выражение для электромеханической характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости

$$\begin{aligned}\omega(I_{я}) &= \frac{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп}}{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot U_{зс} - \frac{R_{яц} + k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_{т}}{k_{рс} \cdot k_{рт} \cdot k_{тп} \cdot k_c} \cdot I_{я} = \\ &= \omega_0(U_{зс}) - \Delta\omega(I_{я}),\end{aligned} \quad (1.13)$$



где

$$\omega_0(U_{3c}) = \frac{U_{3c}}{k_c}$$

– скорость идеального холостого хода в замкнутой системе при управляющем напряжении  $U_{3c}$ , которая в данном случае равна заданной скорости

$$\omega_{зад}(U_{3c}) = \frac{U_{3c}}{k_c}, \text{ рад/с};$$

$$\Delta\omega(I_{я}) = \frac{R_{яц} + k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{Т}}{k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}} \cdot I_{я} = \frac{1 + \frac{k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{Т}}{R_{яц}}}{\frac{k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}}{c}} \cdot \frac{R_{яц} \cdot I_{я}}{c}$$

– абсолютная погрешность скорости в замкнутой системе при изменении тока нагрузки, рад/с;

$$\Delta\omega_{раз}(I_{я}) = \frac{R_{яц} \cdot I_{я}}{c} - \text{абсолютная погрешность скорости разомкнутой системы при изменении тока нагрузки, рад/с.}$$

Абсолютная погрешность скорости замкнутой системы электропривода по управлению

$$\Delta\omega_y(U_{3c}) = 0.$$

### ***САР электропривода без ПОС***

Выражение для электромеханической характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости

$$\begin{aligned} \omega(I_{я}) &= \frac{k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП}}{c + k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}} \cdot U_{3c} - \frac{R_{яц} + k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{Т}}{c + k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}} \cdot I_{я} = \\ &= \omega_0(U_{3c}) - \Delta\omega(I_{я}), \end{aligned} \quad (1.14)$$

где

$$\omega_0(U_{3c}) = \frac{k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП}}{c + k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}} \cdot U_{3c} = \frac{k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}}{c + k_{рс} \cdot k_{рТ} \cdot k_{тП} \cdot k_{с}} \cdot \frac{U_{3c}}{k_{с}}$$

– скорость идеального холостого хода в замкнутой системе при управляющем напряжении  $U_{3c}$ , рад/с;

$$\omega_{зад}(U_{3c}) = \frac{U_{3c}}{k_{с}} - \text{заданное значение скорости, рад/с};$$

$$\Delta\omega(I_{\text{я}}) = \frac{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}{c + k_{\text{рс}} \cdot k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{с}}} \cdot I_{\text{я}} =$$

$$= \frac{1 + \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}}{R_{\text{яц}}}}{1 + \frac{k_{\text{рс}} \cdot k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{с}}}{c}} \cdot \frac{R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{я}}}{c}$$

– абсолютная погрешность скорости в замкнутой системе при изменении тока нагрузки, рад/с ;

$\Delta\omega_{\text{раз}}(I_{\text{я}}) = \frac{R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{я}}}{c}$  – абсолютная погрешность скорости разомкнутой системы при изменении тока нагрузки, рад/с .

Абсолютная погрешность скорости замкнутой системы электропривода по управлению

$$\Delta\omega_{\text{у}}(U_{\text{зс}}) = \frac{c - k_{\text{пос}} \cdot k_{\text{тп}}}{c + k_{\text{рс}} \cdot k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{с}}} \cdot \frac{U_{\text{зс}}}{k_{\text{с}}}, \text{ рад/с} .$$

Результаты расчета электромеханических характеристик по выражениям (1.12), (1.13) и (1.14) свести в табл. 1.16 и привести в виде графиков (см. рис. 1.17).

Относительная погрешность скорости по возмущению (при изменении нагрузки) рассчитывается по выражению

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{\omega(U_{\text{зс}}; I_{\text{схх}}) - \omega(U_{\text{зс}}; I_{\text{смакс}})}{\omega(U_{\text{зс}}; I_{\text{схх}}) + \omega(U_{\text{зс}}; I_{\text{смакс}})} \cdot 100, \% . \quad (1.15)$$

Таблица 1.16

Статические электромеханические характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости

$\omega(I_{\text{я}})$	$U_{\text{зс}} = 10\text{В}$	$I_{\text{я}}, \text{А}$	0	$I_{\text{двн}}$	$I_{\text{эп макс}}$	$\Delta_{\text{н}}, \%$
		$\omega, \text{рад/с}$				
	$U_{\text{зс}} = 5\text{В}$	$\omega, \text{рад/с}$				
	$U_{\text{зс}} = 0.01\text{В}$	$\omega, \text{рад/с}$				

#### 1.4.2. Режим стабилизации тока электропривода с постоянным токоограничением

Структурная схема САУ электропривода для установившегося режима стабилизации (ограничения) тока при постоянном токоограничении приведена на рис. 1.16.

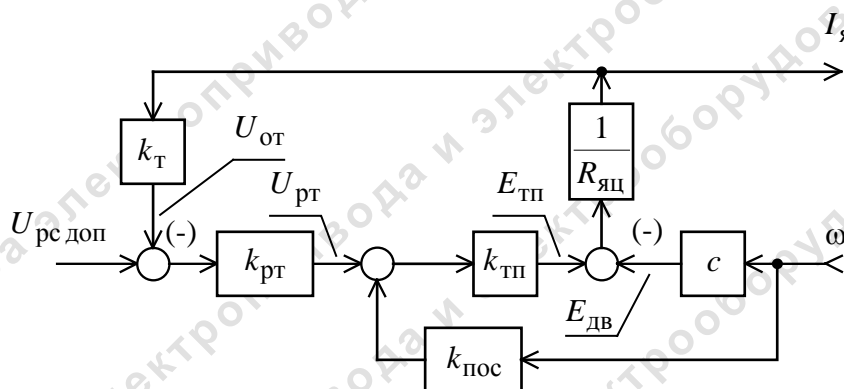


Рис. 1.16. Структурная схема САУ электропривода для установившегося режима стабилизации тока

Структурная схема рис. 1.16 при  $U_{рс доп} = \text{const}$  описывается следующей системой уравнений:

$$(U_{рс доп} - k_T \cdot I_{я}) \cdot k_{рТ} = U_{рТ};$$

$$(U_{рТ} + k_{пос} \cdot \omega) \cdot k_{ТП} = E_{ТП};$$

$$E_{ДВ} = c \cdot \omega;$$

$$E_{ТП} - E_{ДВ} = I_{я} \cdot R_{яц}.$$

Решив совместно приведенную систему уравнений относительно тока  $I_{я}$ , получим выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации (ограничения) тока.

### САР электропривода с ПОС (общий случай)

Выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации тока

$$I_{я}(\omega) = \frac{k_{рТ} \cdot k_{ТП}}{R_{яц} + k_{рТ} \cdot k_{ТП} \cdot k_T} \cdot U_{рс доп} - \frac{c - k_{пос} \cdot k_{ТП}}{R_{яц} + k_{рТ} \cdot k_{ТП} \cdot k_T} \cdot \omega =$$

$$= I_{стоп}(U_{рс доп}) - \Delta I_{я}(\omega), \quad (1.16)$$

где

$$I_{стоп}(U_{рс доп}) = \frac{k_{рТ} \cdot k_{ТП}}{R_{яц} + k_{рТ} \cdot k_{ТП} \cdot k_T} \cdot U_{рс доп}$$

– ток стопорения при  $\omega = 0, \text{A}$ ;

$$\Delta I_{я}(\omega) = \frac{c - k_{пос} \cdot k_{ТП}}{R_{яц} + k_{рТ} \cdot k_{ТП} \cdot k_T} \cdot \omega$$

– абсолютная погрешность тока при изменении скорости, А.

### САР электропривода с ПОС и полной компенсацией ЭДС двигателя ( $k_{\text{пос}} \cdot k_{\text{тп}} = c$ )

Выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации тока

$$I_{\text{я}}(\omega) = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}} = I_{\text{стоп}}(U_{\text{рс доп}}), \quad (1.17)$$

где

$$I_{\text{стоп}}(U_{\text{рс доп}}) = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}$$

– ток стопорения при  $\omega = 0$ , А;

$\Delta I_{\text{я}}(\omega) = 0$  – абсолютная погрешность тока при изменении скорости, А.

### САР электропривода без ПОС

Выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации тока

$$\begin{aligned} I_{\text{я}}(\omega) &= \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}} - \frac{c}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \omega = \\ &= I_{\text{стоп}}(U_{\text{рс доп}}) - \Delta I_{\text{я}}(\omega), \end{aligned} \quad (1.18)$$

где

$$I_{\text{стоп}}(U_{\text{рс доп}}) = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}$$

– ток стопорения при  $\omega = 0$ , А;

$$\Delta I_{\text{я}}(\omega) = \frac{c}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \omega$$

– абсолютная погрешность тока при изменении скорости, А.

Результаты расчета электромеханических характеристик по выражениям (1.16), (1.17) и (1.18) свести в табл. 1.17 и привести в виде графиков (см. рис. 1.17).

Таблица 1.17

Статические электромеханические характеристики электропривода с постоянным токоограничением в режиме стабилизации тока

$I_{\text{я}}(\omega)$	$\omega, \text{рад/с}$	0	$\omega_{\text{эп макс}}$
	$I_{\text{я}}, \text{А}$		



$$[U_{\text{рс доп}}(\omega) - k_{\text{т}} \cdot I_{\text{я}}] \cdot k_{\text{рт}} = U_{\text{рт}};$$

$$(U_{\text{рт}} + k_{\text{пос}} \cdot \omega) \cdot k_{\text{тп}} = E_{\text{тп}};$$

$$E_{\text{дв}} = c \cdot \omega;$$

$$E_{\text{тп}} - E_{\text{дв}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{яц}}.$$

Решив совместно приведенную систему уравнений относительно тока  $I_{\text{я}}$ , получим выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации (ограничения) тока.

### ***САР электропривода с ПОС (общий случай)***

Выражение для электромеханической характеристики привода в режиме ограничения тока

$$I_{\text{я}}(\omega) = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}(\omega) - \frac{c - k_{\text{пос}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \omega. \quad (1.19)$$

Формула (1.19) определяет фактическое значение тока двигателя при скорости  $\omega$  и соответствующем ей значении  $U_{\text{рс доп}}(\omega)$ .

Заданное значение допустимого тока при скорости  $\omega$

$$I_{\text{эп доп}}(\omega) = \frac{U_{\text{рс доп}}(\omega)}{k_{\text{т}}}, \text{ А}. \quad (1.20)$$

Абсолютная погрешность поддержания заданного допустимого тока при скорости  $\omega$

$$\Delta I_{\text{я}}(\omega) = \frac{R_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \frac{U_{\text{рс доп}}(\omega)}{k_{\text{т}}} + \frac{c - k_{\text{пос}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \omega, \text{ А}.$$

Ток стопорения электродвигателя при  $\omega = 0$

$$I_{\text{стоп}} = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}(\omega = 0), \text{ А}.$$

### ***САР электропривода с ПОС и полной компенсацией ЭДС двигателя ( $k_{\text{пос}} \cdot k_{\text{тп}} = c$ )***

Выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации тока

$$I_{\text{я}}(\omega) = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}(\omega). \quad (1.21)$$

Заданное значение допустимого тока при скорости  $\omega$

$$I_{\text{эп доп}}(\omega) = \frac{U_{\text{рс доп}}(\omega)}{k_{\text{т}}}, \text{ А}. \quad (1.22)$$

Абсолютная погрешность поддержания заданного допустимого тока при скорости  $\omega$

$$\Delta I_{\text{я}}(\omega) = \frac{R_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \frac{U_{\text{рс доп}}(\omega)}{k_{\text{т}}}, \text{ А.}$$

Ток стопорения электродвигателя при  $\omega = 0$

$$I_{\text{стоп}} = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}(\omega = 0), \text{ А.}$$

### **САР электропривода без ПОС**

Выражение для электромеханической характеристики привода в режиме стабилизации тока

$$I_{\text{я}}(\omega) = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}(\omega) - \frac{c}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \omega. \quad (1.23)$$

Заданное значение допустимого тока при скорости  $\omega$

$$I_{\text{эп доп}}(\omega) = \frac{U_{\text{рс доп}}(\omega)}{k_{\text{т}}}, \text{ А.} \quad (1.24)$$

Абсолютная погрешность поддержания заданного допустимого тока при скорости  $\omega$

$$\Delta I_{\text{я}}(\omega) = \frac{R_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \frac{U_{\text{рс доп}}(\omega)}{k_{\text{т}}} + \frac{c}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot \omega, \text{ А.}$$

Ток стопорения электродвигателя при  $\omega = 0$

$$I_{\text{стоп}} = \frac{k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}}}{R_{\text{яц}} + k_{\text{рт}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}}} \cdot U_{\text{рс доп}}(\omega = 0), \text{ А.}$$

Результаты расчета электромеханических характеристик по выражениям (1.19) и (1.20), (1.21) и (1.22), (1.23) и (1.24) свести в табл. 1.18 и привести в виде графиков (см. рис 1.19).

Таблица 1.18

Статические электромеханические характеристики электропривода с зависимым токоограничением в режиме стабилизации тока

$\omega$ , рад/с	$U_{\text{рс доп}}(\omega)$ , В	$I_{\text{эп доп}}(\omega)$ , А	$I_{\text{я}}(\omega)$ , А
0			
$\omega_{\text{эп макс}}$			

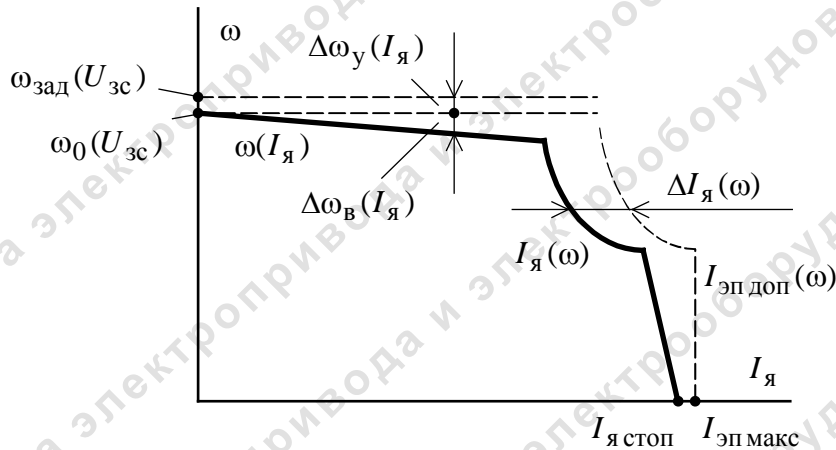


Рис. 1.19. Статические характеристики замкнутой системы электропривода с зависимым токоограничением

Для построения механических характеристик электропривода  $\omega(M)$  момент двигателя находится по выражению  $M = c \cdot I_{\text{я}}$ , Н · м.

## 1.5. Исследование нелинейной САУ электропривода

### 1.5.1. Основные нелинейности САУ электропривода

Основные нелинейности характеристик элементов САУ ЭП:

- насыщение регулятора положения  $U_{\text{рп макс}} \leq 10 \text{ В}$ , принять  $U_{\text{рп макс}} = 10 \text{ В}$ ;
- насыщение регулятора скорости  $U_{\text{рс макс}} \leq (10 \div 12) \text{ В}$ , принять  $U_{\text{рс макс}} = 10 \text{ В}$ ;
- насыщение регулятора тока  $U_{\text{рт макс}} \leq (10 \div 12) \text{ В}$ , принять  $U_{\text{рт макс}} = 10 \text{ В}$ ;
- характеристика устройства постоянного токоограничения, реализованного путем ограничения выходного напряжения регулятора скорости  $U_{\text{рс}} \leq U_{\text{рс доп}}$ , где  $U_{\text{рс доп}} = k_{\text{т}} \cdot I_{\text{эп макс}}$ , В;
- ограничение угла управления тиристорного преобразователя, которое учитывается ограничением ЭДС преобразователя  $E_{\text{тп макс}} = E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\text{мин}}$ , В;
- реактивный характер нагрузки  $M_{\text{с}}(\omega) = M_{\text{с}} \cdot \text{sign } \omega$ .

Структурная схема нелинейной САУ РЭП приведена на рис. 1.20, нелинейной САУ СЭП – на рис. 1.21.

При выполнении программы исследований нелинейной САУ электропривода на имитационных моделях следует обратиться к [4, примеры 3.2 и 3.3].



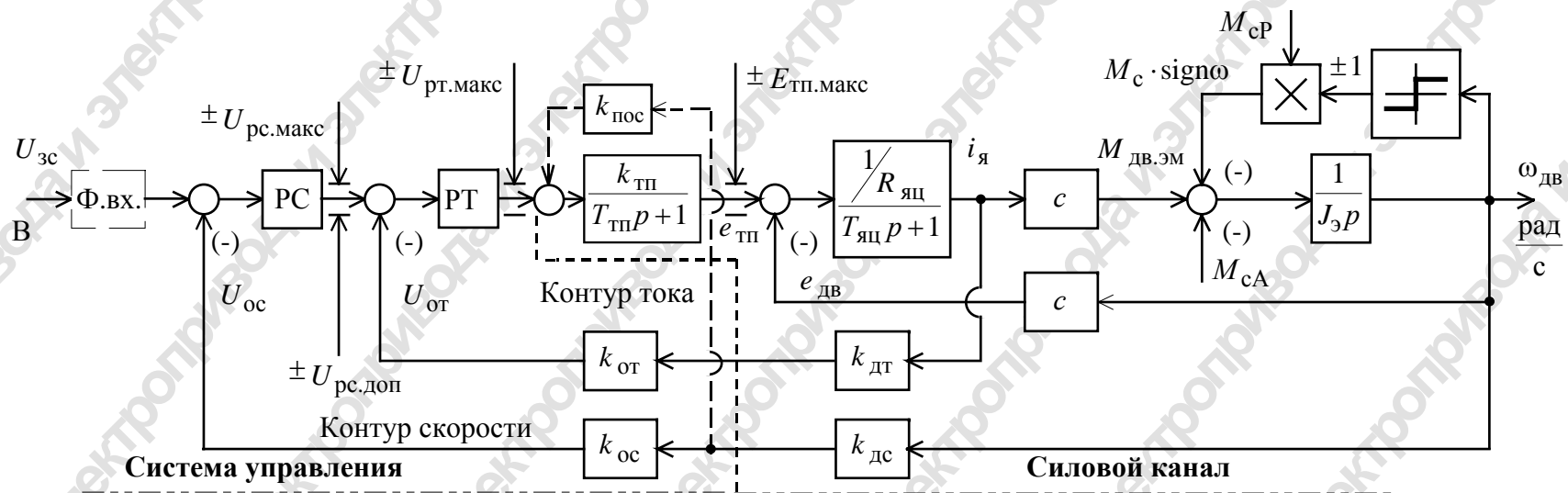


Рис. 1.20. Структурная схема нелинейной САУ РЭП

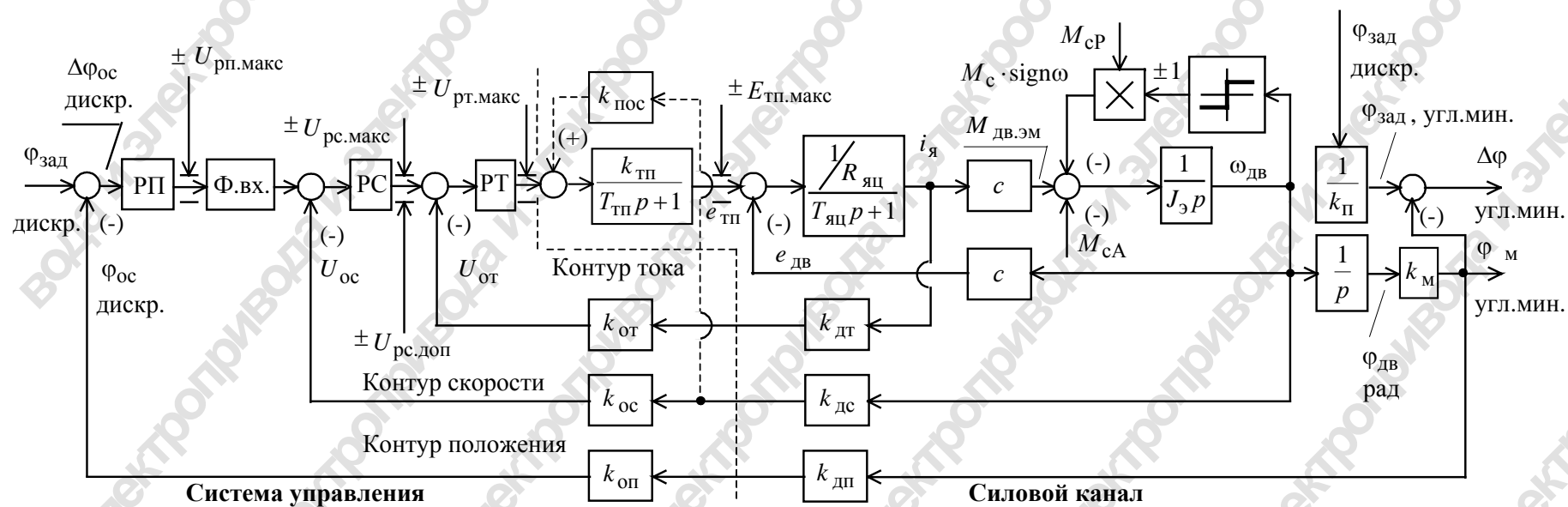


Рис. 1.21. Структурные схемы нелинейной САУ СЭП

### 1.5.2. Расчет динамических и статических характеристик регулируемого электропривода с использованием нелинейной модели САУ электропривода

Под динамическим режимом работы электропривода понимается режим, в котором значение основной координаты электропривода (для регулируемого электропривода – скорости) изменяется. Динамической характеристикой электропривода является зависимость между мгновенными значениями двух координат электропривода, например, скорости и тока или скорости и момента, для одного и того же момента времени переходного режима работы электропривода.

Для расчета методом имитационного моделирования динамических характеристик  $\omega(i_{\text{я}})$ ,  $\omega(M_{\text{эп}})$ , где все значения переменных мгновенные, и статических характеристик  $\omega(I_{\text{я}})$ ,  $\omega(M_{\text{эп}})$ , где все значения переменных средние, замкнутой системы электропривода используется схема набора модели, приведенная на рис. 1.22. Динамические характеристики снимаются блоком *XY Graph (T-OUT)* в режиме задания ступенчатого управляющего воздействия  $U_{\text{зс}}(t) = \text{const}$ , а статические характеристики – в режиме медленно линейно изменяющейся нагрузки  $M_{\text{с}}(t) = M_{\text{с}} \cdot t$  при постоянном значении задания на скорость  $U_{\text{зс}} = \text{const}$  (см. рис. 1.23).

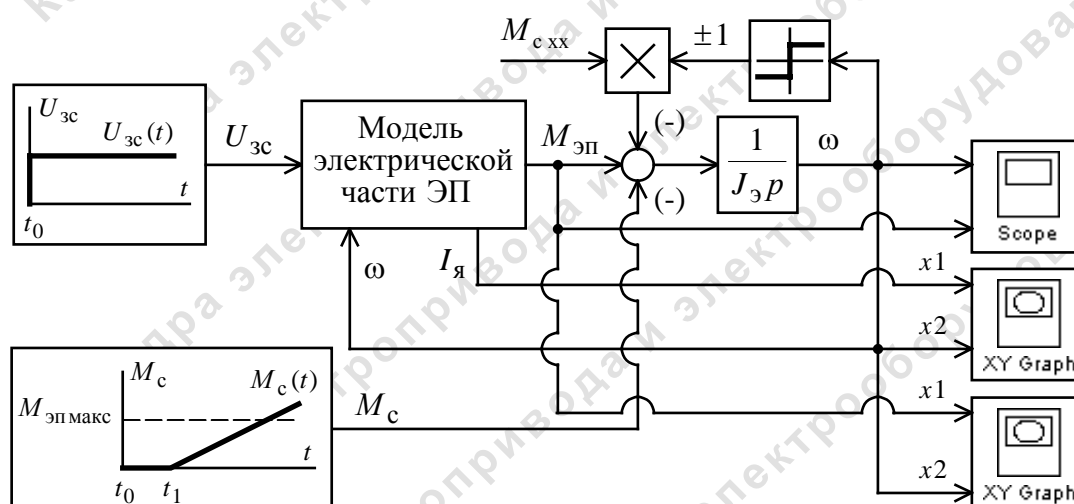


Рис. 1.22. Схема набора модели для расчета динамических и статических характеристик электропривода

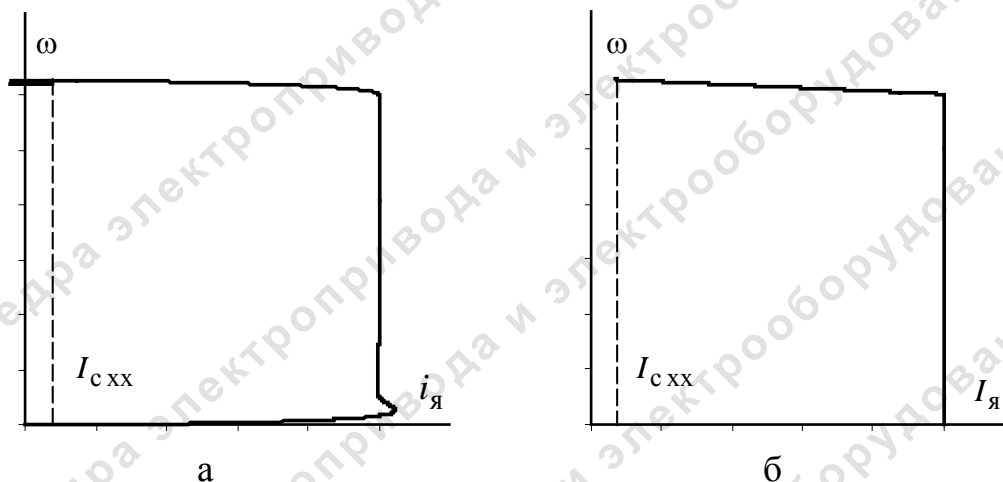


Рис. 1.23. Характеристики замкнутой системы электропривода:  
а – динамическая; б – статическая

### Список литературы к разделу 1

1. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 152 с.

2. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 4. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 152 с.

3. Удут Л. С., Кояин Н. В., Мальцева О. П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 6. Механическая система электропривода постоянного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 144 с.

4. Кояин Н.В., Удут Л.С., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 5. – Применение программы *DORA-FUZZY* в расчетах электроприводов постоянного тока: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 156 с.

5. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 1991. – 104 с. (разделы 1, 2).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### 1. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Общие вопросы проектирования</b>	<b>4</b>
1.1.1. Определение области работы регулируемого электропривода	4
1.1.2. Схемы реализации силовой части регулируемого электропривода	4
1.1.3. Принцип реализации следящего электропривода	4
<b>1.2. Силовой канал электропривода</b>	<b>6</b>
1.2.1. Структурная схема силового канала	6
1.2.2. Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала	7
1.2.3. Расчет предельных электромеханических характеристик разомкнутой системы ТП-Д и оценка выполнения заданной области работы	11
1.2.4. Расчет электромеханических характеристик разомкнутой системы ТП-Д с учетом режима прерывистых токов	13
1.2.5. Расчет регулировочных характеристик тиристорного преобразователя	14
<b>1.3. Линеаризованная САУ электропривода</b>	<b>15</b>
1.3.1. Структурная схема линеаризованной САУ	15
1.3.2. Оптимизация контуров регулирования	17
1.3.3. Сводные таблицы оптимизации контуров регулирования	26
1.3.4. Отработка контуром скорости возмущающих воздействий	33
1.3.5. Отработка контуром положения линейного входного сигнала	36
<b>1.4. Расчет статических характеристик регулируемого электропривода</b>	<b>37</b>
1.4.1. Режим стабилизации скорости	38
1.4.2. Режим стабилизации тока электропривода с постоянным токоограничением	41
1.4.3. Режим стабилизации тока электропривода с зависимым от скорости токоограничением	44
<b>1.5. Исследование нелинейной САУ электропривода</b>	<b>47</b>
1.5.1. Основные нелинейности САУ электропривода	47
1.5.2. Расчет динамических и статических характеристик регулируемого электропривода с использованием нелинейной модели САУ электропривода	50
<b>Список литературы к разделу 1</b>	<b>51</b>

**Ольга Павловна Мальцева  
Леонид Степанович Удут  
Николай Вадимович Кояин**

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Учебное пособие

Научный редактор  
доктор технических наук,  
профессор

Р.Ф. Бекишев

Редактор

С.П. Барей

Подписано к печати 24.10.2007. Формат 60х84/16.

Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. 8,84. Уч.-изд.л. 8,0.

Заказ . Тираж 200 экз.


Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Томского политехнического университета  
сертифицирована NATIONAL QUALITY ASSURANCE

по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.