

Ч. 7, раздел 3. Настройка контура тока с компенсированной ЭДС двигателя и безынерционной обратной связью

Структурная схема контура тока с компенсированной ЭДС двигателя и безынерционной обратной связью приведена на рис. 1. Контур в прямом канале имеет одну большую постоянную времени $T_{яц}$ и одну малую постоянную времени $T_{\muт}$. Основное воздействие на входе контура – управляющее $U_{зт}$, основной тип управляющего воздействия – ступенчатое и линейное.

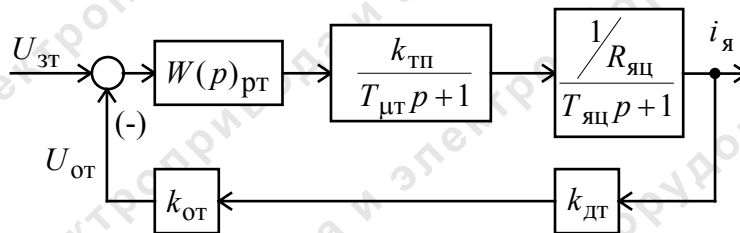


Рис. 1. Структурная схема контура тока с компенсированной ЭДС двигателя и безынерционной обратной связью

Основные требования к работе контура тока – максимальное быстродействие и малое (не более 10%) перерегулирование. Большое перерегулирование в контуре тока может приводить к срабатыванию токовой защиты и отключению привода при работе с предельными значениями тока в переходных режимах и в режиме стопорения. В электроприводах большой мощности дополнительно накладывается ограничение на максимальное значение скорости изменения тока якоря $\left(\frac{di}{dt}\right)$.

В соответствии с [ч. 7, раздел 3] контур тока с компенсированной ЭДС и безынерционной обратной связью применительно к управляющему воздействию может быть оптимизирован с ПИ-регулятором:

- точно по МО для системы 2-го порядка;
- точно по ЛО для системы 2-го порядка;
- приближенно по СО для системы 3-го порядка;
- точно по МО с фильтром на входе контура для системы 3-го порядка,

и с П-регулятором (или без регулятора) по МО для системы 2-го порядка.

Тип регулятора тока и метод оптимизации контура **предварительно** могут быть выбраны в соответствии с табл. 1

Расчет параметров цепи обратной связи

Коэффициент обратной связи контура по току

$$k_T = \frac{U_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{эп.макс}}}, \frac{\text{В}}{\text{А}},$$

где

$U_{\text{зт.макс}}$ – максимальное значение управляющего напряжения на входе контура тока, в аналоговых системах $U_{\text{зт.макс}} \leq 10 \text{ В}$;

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

Таблица 1

Тип регулятора	$\frac{T_{\text{яц}}}{T_{\text{мт}}}$	Оптimum	Наличие фильтра на входе контура	Примечание	Порядок передаточной функции контура
ПИ	≥ 1	МО	нет	точная настройка на МО	2
		ЛО	нет	$\sigma = 0\%$	2
ПИ	≥ 1	СО	нет	приближенная настройка на СО	3
			есть	точная настройка на МО	3
П	≥ 1 (≥ 20)	МО	нет	статическая система	2

* – рекомендуемое значение

Коэффициент передачи входной цепи канала обратной связи регулятора тока

$$k_{\text{от}} = \frac{k_T}{k_{\text{дт}}},$$

где $k_{\text{дт}}$ – коэффициент передачи датчика тока, $\frac{\text{В}}{\text{А}}$.

1. Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором

Для настройки контура тока выбирается ПИ-регулятор с передаточной функцией

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

Точная оптимизация контура тока по МО

Контур оптимизируется при значении отношения $\frac{T_{\text{яц}}}{T_{\text{мт}}} \geq 1$. Для точной оптимизации контура тока по МО коэффициент усиления и постоянная времени ПИ-регулятора определяется по выражениям:

$$k_{\text{рт}} = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}} \cdot 2 \cdot T_{\text{мт}}};$$
$$T_{\text{рт}} = T_{\text{яц}}.$$

Настроенный таким образом контур тока имеет следующие передаточные функции:

$$W(p)_{\text{т.раз}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{мт}} \cdot p}$$

– разомкнутого контура;

$$W(p)_{\text{т.зам}} = \frac{1/k_{\text{т}}}{2 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1}$$

– замкнутого контура по управлению.

Настройка контура тока по управлению соответствует типовой настройке на МО, замкнутый контур представляет собой колебательное звено 2-го порядка с коэффициентом демпфирования $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ и эквивалентной постоянной времени оптимизированного контура

$$T_{\text{т}} = 2 \cdot T_{\text{мт}}.$$

Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению и обеспечивает точную отработку заданного значения тока

$$I_{\text{уст}} = I_{\text{зад}} = \frac{U_{\text{зт}}}{k_{\text{т}}}, \text{ А.}$$

Ожидаемые показатели качества работы оптимизированного контура тока:

– установившаяся статическая ошибка по управлению при постоянном значении задающего сигнала, А,

$$\Delta I_{y.ст} = 0;$$

– установившаяся скоростная ошибка при линейном изменении задающего сигнала $U_{зт}(t)$, А,

$$\Delta I_{y.ск} = \frac{2 \cdot T_{\muт}}{k_T} \cdot \frac{dU_{зт}}{dt} = 2 \cdot T_{\muт} \cdot \left(\frac{di_{я}}{dt} \right)_{зад};$$

– полоса пропускания контура по модулю и фазе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

$$\omega_{п}^{(м)} = \omega_{п}^{(ф)} = \frac{0.71}{T_{\muт}};$$

– показатели работы при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$\sigma = 4.3\%$ – перерегулирование;

$t_{ру1}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\muт}$ – время первого вхождения в 5% зону, с;

$t_{ру2}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\muт}$ – время переходного процесса, с.

Максимальное значение производной тока (скорости изменения тока) при отработке ступенчатого входного воздействия $U_{зт.макс}$

$$\left(\frac{di_{я}}{dt} \right)_{макс} = 0.6448 \cdot \frac{U_{зт.макс}}{k_T \cdot 2 \cdot T_{\muт}} = 0.6448 \cdot \frac{I_{эп.макс}}{2 \cdot T_{\muт}}, \frac{\text{А}}{\text{с}}.$$

В практике электропривода производную тока принято измерять в номинальных токах двигателя $I_{дв.н}$ за секунду $\left(\frac{I_{дв.н}}{\text{с}} \right)$, тогда

$$\left(\frac{di_{я}}{dt} \right)_{макс} = 0.6448 \cdot \frac{I_{эп.макс}}{I_{дв.н} \cdot 2 \cdot T_{\muт}}, \left(\frac{I_{дв.н}}{\text{с}} \right).$$

Точная оптимизация контура тока по ЛО

Оптимизация контура по ЛО применяется при необходимости исключить перерегулирование тока. Контур настраивается при любом значении отношения $\frac{T_{яц}}{T_{\muт}} \geq 1$. Для точной оптимизации контура по ЛО коэффициент усиления и постоянная времени ПИ-регулятора определяются по выражениям

$$k_{\text{рт}} = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{т}} \cdot 4 \cdot T_{\text{мт}}}; \quad T_{\text{рт}} = T_{\text{яц}}.$$

Настроенный таким образом контур тока имеет следующие передаточные функции:

$$W(p)_{\text{т.раз}} = \frac{1}{4 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\text{мт}} \cdot p}$$

– разомкнутого контура;

$$W(p)_{\text{т.зам}} = \frac{1/k_{\text{т}}}{4 \cdot T_{\text{мт}}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\text{мт}} \cdot p + 1}$$

– замкнутого контура.

Настройка контура тока по управлению соответствует типовой настройке на ЛО, замкнутый контур представляет собой апериодическое звено 2-го порядка с коэффициентом демпфирования $\xi = 1$ и эквивалентной постоянной времени оптимизированного контура

$$T_{\text{т}} = 4 \cdot T_{\text{мт}}.$$

Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению и обеспечивает точную обработку заданного значения тока

$$I_{\text{уст}} = I_{\text{зад}} = \frac{U_{\text{зт}}}{k_{\text{т}}}, \text{ А.}$$

Ожидаемые показатели качества работы оптимизированного контура тока:

– установившаяся статическая ошибка по управлению при постоянном значении задающего сигнала, А,

$$\Delta I_{\text{у.ст}} = 0;$$

– установившаяся скоростная ошибка при линейном изменении задающего сигнала $U_{\text{зт}}(t)$, А,

$$\Delta I_{\text{у.ск}} = \frac{4 \cdot T_{\text{мт}}}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{dU_{\text{зт}}}{dt} = 4 \cdot T_{\text{мт}} \cdot \left(\frac{di_{\text{я}}}{dt} \right)_{\text{зад}};$$

– полоса пропускания контура по модулю и фазе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0.35}{T_{\text{мт}}};$$

– показатели работы при обработке ступенчатого управляющего воздействия:

$\sigma = 0\%$ – перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)} = 9.5 \cdot T_{\mu T}$ – время первого вхождения в 5% зону и время переходного процесса, с.

Максимальное значение производной тока при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{зт.макс}$

$$\left(\frac{di_{я}}{dt} \right)_{макс} = 0.6445 \cdot \frac{U_{зт.макс}}{k_T \cdot 4 \cdot T_{\mu T}} = 0.6445 \cdot \frac{I_{эп.макс}}{4 \cdot T_{\mu T}}, \frac{А}{с}$$

или в единицах измерения $\left(\frac{I_{дв.н}}{с} \right)$

$$\left(\frac{di_{я}}{dt} \right)_{макс} = 0.6445 \cdot \frac{I_{эп.макс}}{I_{дв.н} \cdot 4 \cdot T_{\mu T}}$$

Оптимизация контура тока по СО по точной методике

Контур настраивается при любом отношении постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}} \geq 1$. Для оптимизации контура по СО параметры передаточной функции ПИ-регулятора тока определяются по выражениям (ч.7, раздел 3):

$$k_{рТ} = \frac{R_{яц} \cdot T_{яц}}{k_{тП} \cdot k_T \cdot 2 \cdot T_{\mu T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2} \right)$$

– коэффициент усиления регулятора тока;

$$T_{рТ} = 4 \cdot T_{\mu T} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}} \right)^3}$$

– постоянная времени регулятора тока.

Настроенный таким образом контур тока имеет следующие передаточные функции:

$$W(p)_{\text{т.раз}} = \frac{4 \cdot T_{\mu\tau\theta} \cdot \frac{1 + \left(\frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}}\right)^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}}\right)^2} \cdot p + 1}{8 \cdot T_{\mu\tau\theta}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\mu\tau\theta}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\mu\tau\theta} \cdot p}$$

– разомкнутого контура;

$$W(p)_{\text{т.зам}} = \frac{\frac{1}{k_T} \cdot \left[4 \cdot T_{\mu\tau\theta} \cdot \frac{1 + \left(\frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}}\right)^2}{\left(1 + \frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}}\right)^2} \cdot p + 1 \right]}{8 \cdot T_{\mu\tau\theta}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\mu\tau\theta}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\mu\tau\theta} \cdot p + 1}$$

– замкнутого контура, где

$$T_{\mu\tau\theta} = \frac{T_{\mu\tau}}{1 + \frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}}}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Настройка контура тока по управлению близка к настройке на СО. Контур является астатической системой 2-го порядка и характеризуется большим перерегулированием при отработке ступенчатого задания тока.

Перерегулирование зависит от соотношения постоянных времени $\frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}}$ и

изменяется от 16.3% при $\frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}} = 1$ до 43.3% при $\frac{T_{\mu\tau}}{T_{\text{яц}}} = \infty$. Показатели качества работы контура приведены в (ч.7, раздел 3, рис. 3.1 – 3.4).

Для уменьшения перерегулирования до уровня 8.1% на входе контура тока устанавливается сглаживающий фильтр с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_2 \cdot p + 1}, \quad (1)$$

постоянная времени которого выбирается из условия

$$T_2 = 4 \cdot T_{\mu\Gamma} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}^2}{T_{яц}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{яц}}\right)^3}$$

Передаточная функция замкнутого контура тока с фильтром на входе имеет вид

$$W(p)_{\text{т.зам}} = \frac{1/k_T}{8 \cdot T_{\mu\Gamma\alpha}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\mu\Gamma\alpha}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\mu\Gamma\alpha} \cdot p + 1}$$

Настройка замкнутого контура тока с фильтром на входе соответствует МО для системы 3-го порядка с эквивалентной малой постоянной времени $T_{\mu\Gamma\alpha} < T_{\mu\Gamma}$ и эквивалентной постоянной времени оптимизированного замкнутого контура

$$T_T = 4 \cdot T_{\mu\Gamma\alpha} = \frac{4 \cdot T_{\mu\Gamma}}{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{яц}}}$$

значения которых зависят от отношения постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\mu\Gamma}}$.

Контур тока с фильтром на входе является астатической системой 1-го порядка по управлению и обеспечивает точную отработку заданного значения тока

$$I_{уст} = I_{зад} = \frac{U_{зг}}{k_T}, \text{ А.}$$

Ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура тока с фильтром на входе по управлению:

– установившаяся статическая ошибка по управлению при постоянном значении задающего сигнала, А,

$$\Delta I_{у.ст} = 0;$$

– установившаяся скоростная ошибка при линейном изменении задающего сигнала $U_{зг}(t)$, А,

$$\Delta I_{у.ск} = \frac{4}{k_T} \cdot \frac{T_{\mu\Gamma}}{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{яц}}} \cdot \frac{dU_{зг}}{dt} = \frac{4 \cdot T_{\mu\Gamma}}{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{яц}}} \cdot \left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{зад};$$

– полоса пропускания контура по модулю и фазе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 0.5 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}}{T_{\mu\Gamma}}$$

Показатели работы при обработке ступенчатого управляющего воздействия:

$\sigma = 8.1\%$ – перерегулирование;

$$t_{\text{пу1}}^{(5)} = 7 \cdot \frac{T_{\mu\Gamma}}{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}} \text{ – время первого вхождения в 5\% зону, с;}$$

$$t_{\text{пу2}}^{(5)} = 12 \cdot \frac{T_{\mu\Gamma}}{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}} \text{ – время переходного процесса, с.}$$

Максимальное значение производной тока при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{\text{зт.макс}}$

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt} \right)_{\text{макс}} = 0.8088 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}}{4 \cdot T_{\mu\Gamma}} \cdot \frac{U_{\text{зт.макс}}}{k_{\Gamma}} = 0.8088 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}}{4 \cdot T_{\mu\Gamma}} \cdot I_{\text{эп.макс}}, \frac{\text{А}}{\text{с}}$$

или в единицах измерения $\left(\frac{I_{\text{дв.н}}}{\text{с}} \right)$

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt} \right)_{\text{макс}} = 0.8088 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}}{4 \cdot T_{\mu\Gamma}} \cdot \frac{I_{\text{эп.макс}}}{I_{\text{дв.н}}}$$

Полоса пропускания и быстродействие контура тока, настроенного на СО, в общем случае зависят от отношения постоянных времени $\frac{T_{\text{яц}}}{T_{\mu\Gamma}}$.

Оптимизация контура тока по СО по типовой методике

Оптимизировать контур тока по СО и по типовой методике целесообразно только при отношении постоянных времени $\frac{T_{\text{яц}}}{T_{\mu\Gamma}} \geq 4$ (ч.7, раздел

3). Параметры передаточной функции ПИ-регулятора тока определяются по выражениям:

$$k_{\text{PT}} = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{T}} \cdot 2 \cdot T_{\text{MT}}}$$

– коэффициент усиления;

$$T_{\text{PT}} = 4 \cdot T_{\text{MT}}$$

– постоянная времени регулятора тока.

Для уменьшения перерегулирования (не более 8.1%) на входе контура тока устанавливается фильтр с передаточной функцией (1), постоянная времени которого выбирается из условия

$$T_2 = 4 \cdot T_{\text{MT}} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{T_{\text{яц}}}{4 \cdot T_{\text{MT}}} - 1\right)} \right].$$

Тогда контур тока имеет следующие передаточные функции:

$$W(p)_{\text{Т.раз}} = \frac{4 \cdot T_{\text{MT}} \cdot p + 1}{8 \cdot T_{\text{MT}}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\text{MT}}^2 \cdot \left(1 + \frac{T_{\text{MT}}}{T_{\text{яц}}}\right) \cdot p^2 + 8 \cdot \frac{T_{\text{MT}}^2}{T_{\text{яц}}} \cdot p}$$

– разомкнутого контура;

$$W(p)_{\text{Т.зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{T}}} \cdot (4 \cdot T_{\text{MT}} \cdot p + 1)}{T_2 \cdot p + 1} \times$$

$$\times \frac{1}{8 \cdot T_{\text{MT}}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\text{MT}}^2 \cdot \left(1 + \frac{T_{\text{MT}}}{T_{\text{яц}}}\right) \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\text{MT}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot T_{\text{MT}}}{T_{\text{яц}}}\right) \cdot p + 1}$$

– замкнутого контура с фильтром на входе.

Контур тока с фильтром на входе является астатической системой 1-го порядка по управлению, точно обрабатывает заданное значение тока

$$I_{\text{уст}} = I_{\text{зад}} = \frac{U_{\text{зТ}}}{k_{\text{T}}}, \text{ А,}$$

обеспечивает нулевую установившуюся статическую ошибку

$$\Delta I_{\text{у.уст}} = 0, \text{ А,}$$

и установившуюся скоростную ошибку, равную

$$\Delta I_{y.ck} = \frac{4 \cdot T_{\mu T}}{k_T} \cdot \left[\frac{2 \cdot T_{\mu T}}{T_{яц}} + 1 - e^{-\left(\frac{T_{яц}}{4 \cdot T_{\mu T}} - 1\right)} \right] \cdot \frac{dU_{3T}}{dt}, \text{ A.}$$

Показатели качества работы контура тока приведены в (ч. 7, раздел 3, рис. 3.1 – 3.4), и в общем случае зависят от отношения постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}}$. В сравнении с настройкой на СО по точной методике контур имеет худшие динамические характеристики и только при отношении постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}} \geq 20$ настройка контура тока становится близкой к настройке на МО для системы 3-го порядка.

2. Оптимизация контура тока с П-регулятором по МО

Контур настраивается при любом значении отношения $\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}} \geq 1$. Передаточная функция П-регулятора тока

$$W(p)_{PT} = k_{PT},$$

где

$$k_{PT} = \frac{R_{яц} \cdot T_{яц}}{k_{ТП} \cdot k_T \cdot 2 \cdot T_{\mu T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2} \right)$$

– коэффициент усиления регулятора (ч. 7, раздел 3).

Настроенный таким образом контур имеет следующие передаточные функции:

$$W(p)_{T.раз} = \frac{\frac{T_{яц}}{2 \cdot T_{\mu T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2} \right)}{T_{яц} \cdot T_{\mu T} \cdot p^2 + (T_{яц} + T_{\mu T}) \cdot p + 1}$$

– разомкнутого контура;

$$W(p)_{T.зам} = \frac{\frac{1}{k_T} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}} \right)^2}}{2 \cdot T_{\mu T}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}$$

– замкнутого контура по управлению, где

$$T_{\text{мтэ}} = \frac{T_{\text{мт}}}{1 + \frac{T_{\text{мт}}}{T_{\text{яц}}}} < T_{\text{мт}}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Контур тока является статической системой по управлению с коэффициентом передачи замкнутого контура меньше расчетного

$$k_{\text{т.зам}} = \frac{1}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\text{мт}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\text{мт}}}{T_{\text{яц}}}\right)^2} < \frac{1}{k_{\text{т}}}.$$

По этой причине контур обрабатывает заданное значение тока с ошибкой и, следовательно, установившееся значение тока будет меньше заданного

$$I_{\text{уст}} = \frac{U_{\text{зт}}}{k_{\text{т}}} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\text{мт}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\text{мт}}}{T_{\text{яц}}}\right)^2} < I_{\text{зад}} = \frac{U_{\text{зт}}}{k_{\text{т}}}.$$

Характеристическое уравнение передаточной функции замкнутого контура тока по управлению соответствует характеристическому уравнению оптимизированной по МО системы 2-го порядка с эквивалентной малой постоянной времени $T_{\text{мтэ}} < T_{\text{мт}}$ и эквивалентной постоянной времени оптимизированного контура

$$T_{\text{т}} = 2 \cdot \frac{T_{\text{мт}}}{1 + \frac{T_{\text{мт}}}{T_{\text{яц}}}}.$$

Это определяет соответствие динамических характеристик контура тока с П-регулятором характеристикам системы 2-го порядка, оптимизированной по МО.

Ожидаемые показатели качества работы оптимизированного замкнутого контура тока:

– установившаяся статическая ошибка при постоянном значении задающего сигнала

$$\Delta I_{y.ст} = \frac{U_{зт}}{k_T} \cdot \frac{2 \cdot \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}\right)^2} = I_{зад} \cdot \frac{2 \cdot \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}\right)^2}, \text{ А};$$

– полоса пропускания контура по модулю и фазе

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 0.71 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}{T_{\mu T}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– показатели работы при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$\sigma = 4.3\%$ – перегулирование;

$$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu T} = 4.1 \cdot \frac{T_{\mu T}}{1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}} \text{ – время первого вхождения в } 5\%$$

зону и время переходного процесса, с.

При отработке линейно изменяющегося управления $U_{зт}(t)$ динамическая ошибка контура определяется суммой двух ошибок – статической и скоростной

$$\Delta I_{дин} = \Delta I_{y.ст} + \Delta I_{y.ск}.$$

Статическая ошибка с изменением величины управления $U_{зт}(t)$ изменяется в соответствии с выражением

$$\Delta I_{y.ст} = \frac{U_{зт}(t)}{k_T} \cdot \frac{2 \cdot \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}\right)^2},$$

а скоростная ошибка остается постоянной

$$\Delta I_{y.ск} = \frac{2 \cdot T_{\mu T}}{k_T} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}\right)^3} \cdot \frac{dU_{зт}}{dt}, \text{ А}.$$

В результате динамическая ошибка контура не достигает установившегося значения.

Максимальное значение производной тока при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{\text{зт. макс}}$

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{макс}} = 0.6448 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{2 \cdot T_{\mu\text{T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)} \cdot \frac{U_{\text{зт. макс}}}{k_{\text{T}}} =$$

$$= 0.6448 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{2 \cdot T_{\mu\text{T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)} \cdot I_{\text{эп. макс}}, \frac{\text{А}}{\text{с}}$$

или в единицах измерения $\left(\frac{I_{\text{дв.н}}}{\text{с}}\right)$

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{макс}} = 0.6448 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{2 \cdot T_{\mu\text{T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)} \cdot \frac{I_{\text{эп. макс}}}{I_{\text{дв.н}}}$$

Компенсация статической ошибки контура тока с П-регулятором

Для исключения статической ошибки контура тока с П-регулятором достаточно увеличить значение максимального задающего напряжения на входе контура до значения

$$U_{\text{зт макс}}' = k_{\text{T}} \cdot I_{\text{эп макс}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)^2}{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}, \text{В.}$$

Однако в системах электропривода с унифицированными сигналами управления сделать это затруднительно.

В системах электропривода с унифицированными сигналами управления для исключения статической ошибки контура тока с П-регулятором необходимо уменьшить значение коэффициента обратной связи по току

$$k'_T = \frac{U_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{эп.макс}}} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)^2} = k_T \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)^2}, \frac{\text{В}}{\text{А}},$$

а коэффициент усиления регулятора тока соответственно увеличить

$$k'_{\text{рт}} = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{тп}} \cdot k'_T \cdot 2 \cdot T_{\mu\text{T}}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}^2}{T_{\text{яц}}^2}\right) = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{тп}} \cdot k_T \cdot 2 \cdot T_{\mu\text{T}}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)^2.$$

Тогда передаточная функция замкнутого контура тока принимает вид

$$W(p)_{\text{т.зам}} = \frac{1/k_T}{2 \cdot T_{\mu\text{T}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu\text{T}} \cdot p + 1}$$

и контур обрабатывает заданное значение тока без ошибки

$$I_{\text{уст}} = I_{\text{зад}} = \frac{U_{\text{зт}}}{k_T}, \text{ А.}$$

В результате такой настройки установившаяся статическая ошибка контура становится равной нулю $\Delta I_{\text{у.ст}} = 0$, а производная тока при обработке максимального скачка задания $U_{\text{зт.макс}}$ возрастает до значения

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{макс}} = 0.6448 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}}{2 \cdot T_{\mu\text{T}}} \cdot \frac{U_{\text{зт.макс}}}{k_T} = 0.6448 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}}{2 \cdot T_{\mu\text{T}}} \cdot I_{\text{эп.макс}}, \frac{\text{А}}{\text{с}}$$

или в единицах измерения $\left(\frac{I_{\text{дв.н}}}{\text{с}}\right)$

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{макс}} = 0.6448 \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}}{2 \cdot T_{\mu\text{T}}} \cdot \frac{I_{\text{эп.макс}}}{I_{\text{дв.н}}}.$$

Динамическая ошибка контура при обработке линейно изменяющегося входного воздействия $U_{\text{зт}}(t)$ равна скоростной ошибке, установившееся значение которой определяется выражением

$$\Delta I_{\text{у.ск}} = \frac{2 \cdot T_{\mu\text{T}}}{k_T \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu\text{T}}}{T_{\text{яц}}}\right)} \cdot \frac{dU_{\text{зт}}}{dt}, \text{ А.}$$

Оптимизация контура тока без регулятора по МО

Результаты, аналогичные полученным при настройке контура тока с П-регулятором, можно получить и при настройке контура тока без регулятора, если коэффициент обратной связи и максимальное значение напряжения управления выбрать равными:

$$k_T = \frac{R_{яц} \cdot T_{яц}}{k_{тп} \cdot 2 \cdot T_{\mu T}} \cdot \left(1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2} \right), \frac{В}{А}; \quad U_{зт.макс} = k_T \cdot I_{\text{Эп.макс}}, В.$$

Для исключения статической ошибки в контуре тока, настроенном согласно без регулятора тока, необходимо максимальное значение задающего напряжения на входе контура выбрать равным значению

$$U'_{зт.макс} = k_T \cdot I_{\text{Эп.макс}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}} \right)^2}{1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2}}, В.$$

3. Сравнительная оценка способов настройки контура тока при отработке управляющих воздействий

Полученные расчетные выражения позволяют сравнительно оценить способы настройки контура тока с компенсированной внутренней обратной связью по ЭДС двигателя по основным показателям качества отработки ступенчатых и линейно изменяющихся управляющих воздействий. На рис. 2 для различных настроек приведены графики показателей качества работы контура тока в зависимости от отношения постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}}$.

Из анализа приведенных зависимостей следует, что наибольшим быстродействием обладает контур тока с П-регулятором (или без него). Однако, из-за статической ошибки такую настройку контура тока следует применять только при отношении постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}} \geq 20$ (статическая ошибка в этом случае не превышает значения 10%).

Если же статическая ошибка в контуре с П-регулятором будет компенсирована, то такая настройка обеспечивает контуру тока лучшие качественные показатели работы по управлению при любых отношениях по-

стоянных времени. Следует иметь в виду, что контур тока без регулятора имеет неунифицированное значение задающего напряжения.

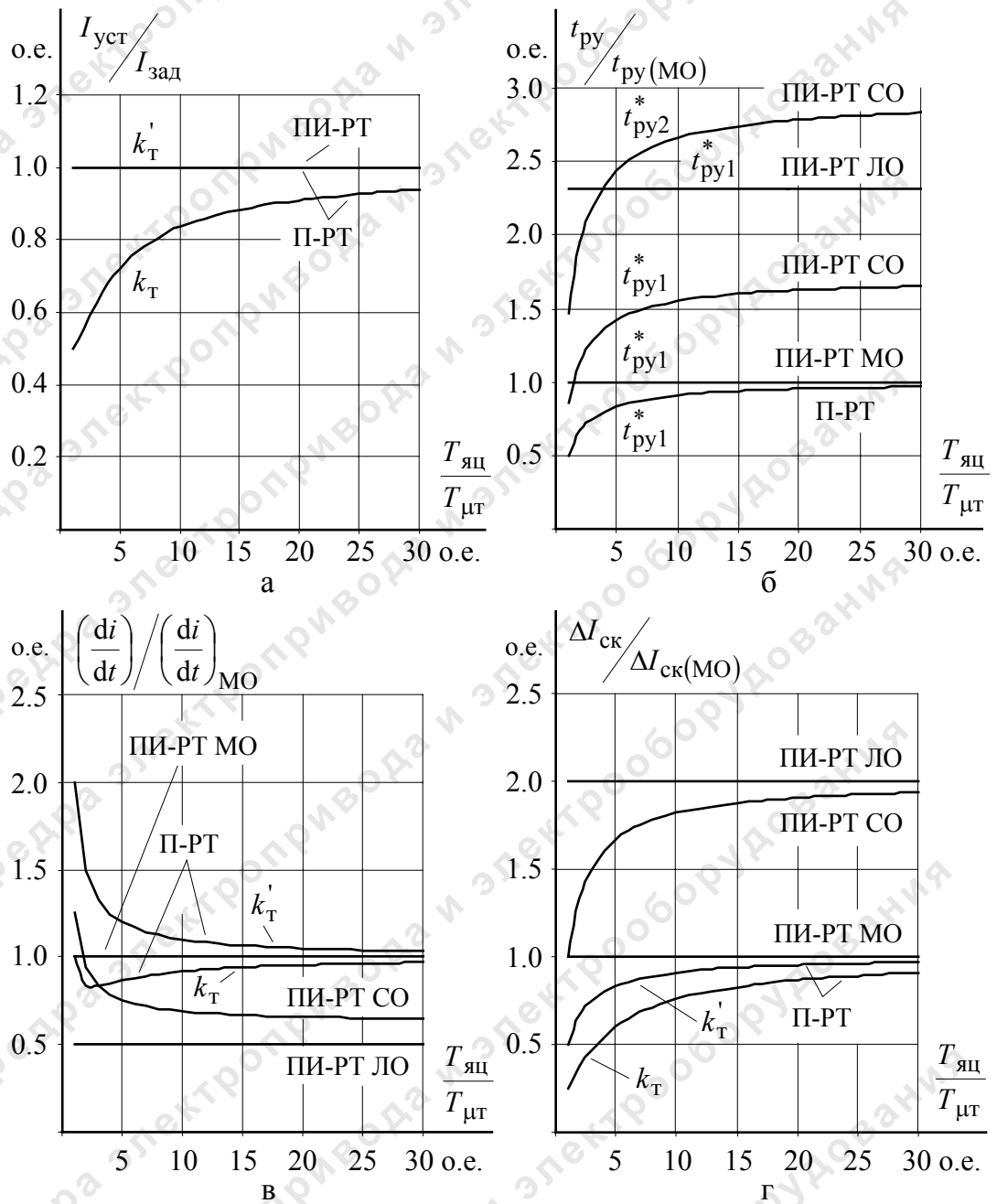


Рис. 2. Показатели качества работы контура тока по управлению при разных способах настройки: а – установившееся значение тока относительно заданного; б – время реакции на ступенчатое задание; в – максимальное значение производной при ступенчатом задании; г – скоростная ошибка при обработке линейно изменяющегося задания

Настройка контура тока с ПИ-регулятором на СО и фильтром на входе обеспечивает худшие динамические показатели работы контура в сравнении с настройкой на МО и ее применение нецелесообразно.

Контур тока, настроенный на СО без фильтра на входе имеет равную нулю скоростную ошибку и обеспечивает большее быстродействие в сравнении с настройкой на МО. Но большое перерегулирование тока (до 43% при отработке скачка задания) не позволяет применять такую настройку контура тока в системах регулируемого электропривода.

Настройка контура тока с ПИ-регулятором на МО обеспечивает технически оптимальные показатели работы контура вне зависимости от отношения постоянных времени $\frac{T_{яц}}{T_{\muт}}$ и является практически наиболее часто применяемой.

Настройку контура тока с ПИ-регулятором на ЛО следует применять в системах электропривода, в которых к быстродействию не предъявляется жестких требований и необходимо исключить перерегулирование тока. Для повышения быстродействия настройку контура тока на ЛО можно применить с П-регулятором (или без него).

На основании сделанных выводов составлена таблица 2, которой следует пользоваться при выборе типа регулятора и метода оптимизации контура тока с безынерционной обратной связью и компенсированной ЭДС двигателя.

Таблица 2

Типы регуляторов и методы оптимизации контура тока с компенсированной внутренней обратной связью по ЭДС двигателя

Тип регулятора	Тип оптимизации	$\frac{T_{яц}}{T_{\muт}}$	$\frac{T_M}{T_{\muт}}$	$\frac{T_M}{T_{яц}}$	$\frac{I_{уст}}{I_{зад}}$	$\frac{I_{макс}}{I_{зад}}$	$\sigma, \%$	Примечание	Быстродействие
ПИ	МО	≥ 1	Не имеют значения		1.0	1.043	4.3	Процессы в контуре не зависят от I_c и $\omega_{дв}$	Принято за базовое
	ЛО					1.0	0		Меньше в 2.3 раза
П и без регулятора	МО*	≥ 20			> 0.9	≤ 1.043	4.3		Больше (рис.2)
		≥ 8			> 0.8				
	МО**	≥ 1			1.0	1.043			

* – типовая настройка

** – настройка с компенсацией статической ошибки

Сделанные выводы относятся к настройке контура тока только с компенсированной внутренней обратной связью по ЭДС двигателя.