

Оптимизация 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.

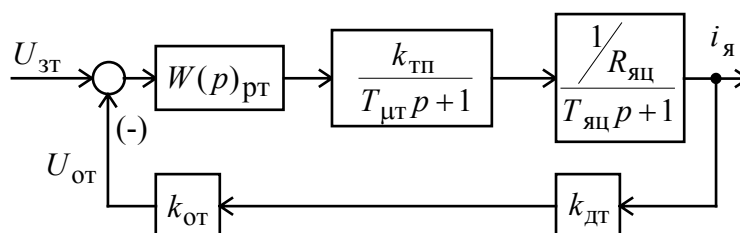


Рис. 1. Структурная схема контура тока с компенсированной ЭДС двигателя и безынерционной обратной связью

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 $\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)$.

Контур тока с компенсированной ЭДС и безынерционной обратной связью применительно к управляющему воздействию может быть оптимизирован с ПИ-регулятором:

- по МО для системы 2-го порядка;
- по ЛО для системы 2-го порядка,
- 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.

Примечание: В соответствии с [часть 7, раздел 3] контур тока с ПИ-регулятором может быть настроен и на симметричный оптимум.

Таблица 1

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

Тип регулятора	Тип оптимизации	$\frac{T_{яц}}{T_{\mu T}}$	$\frac{T_M}{T_{\mu T}}$	$\frac{T_M}{T_{яц}}$	$\frac{I_{уст}}{I_{зад}}$	$\frac{I_{макс}}{I_{зад}}$	$\sigma, \%$	Примечание	Быстродействие
ПИ	МО	≥ 1	Не имеют значения	1.0	1.043	4.3	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	4.3		Большее
		≥ 8		> 0.8					
	МО**	≥ 1		1.0	1.043				

* – типовая настройка

** – настройка с компенсацией статической ошибки.

Расчет параметров цепи обратной связи

Коэффициент обратной связи контура по току

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

где

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

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

Коэффициент передачи входной цепи канала обратной связи регулятора тока

$$k_{от} = \frac{k_T}{k_{дт}},$$

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

Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором

Для настройки контура тока выбирается ПИ-регулятор с передаточной функцией

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

Оптимизация контура тока по МО

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

$$k_{PT} = \frac{R_{яц} \cdot T_{яц}}{k_{ТП} \cdot k_T \cdot 2 \cdot T_{\mu T}};$$
$$T_{PT} = T_{яц}.$$

Настроенный таким образом контур тока имеет следующие передаточные функции:

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

– разомкнутого контура;

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

– 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

$$T_T = 2 \cdot T_{\mu T}.$$

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

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

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,

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

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

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0.71}{T_{\mu T}};$$

– показатели работы при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$\sigma = 4.3\%$ – перерегулирование;

$t_{\text{py}1}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu T}$ – время первого вхождения в 5% зону, с;

$t_{\text{py}2}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu T}$ – время переходного процесса, с.

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

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

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

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

Оптимизация контура тока по ЛО

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

выражениям

$$k_{\text{PT}} = \frac{R_{\text{яц}} \cdot T_{\text{яц}}}{k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{T}} \cdot 4 \cdot T_{\mu T}}; \quad T_{\text{PT}} = T_{\text{яц}}.$$

Настроенный таким образом контур тока имеет следующие передаточные функции:

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

– разомкнутого контура;

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

– 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

$$T_T = 4 \cdot T_{\mu\Gamma}.$$

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

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

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,

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

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

$$\omega_{\Pi}^{(\text{м})} = \omega_{\Pi}^{(\text{ф})} = \frac{0.35}{T_{\mu\Gamma}};$$

– показатели работы при обработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$\sigma = 0\%; \quad t_{\text{пу1}}^{(5)} = t_{\text{пу2}}^{(5)} = 9.5 \cdot T_{\mu\Gamma}, \text{ с.}$$

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

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

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

$$\left(\frac{di_{\text{я}}}{dt}\right)_{\text{макс}} = 0.6445 \cdot \frac{I_{\text{Эп.макс}}}{I_{\text{ДВ.Н}} \cdot 4 \cdot T_{\mu\Gamma}}.$$

Оптимизация контура тока с П-регулятором по МО

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

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

где

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

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

Настроенный таким образом контур имеет следующие передаточные функции:

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

– разомкнутого контура;

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

– замкнутого контура по управлению, где

$$T_{\mu\Gamma\text{Э}} = \frac{T_{\mu\Gamma}}{1 + \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_{\text{яц}}}} < T_{\mu\Gamma}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

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

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

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

$$I_{уст} = \frac{U_{зг}}{k_T} \cdot \frac{1 + \frac{T_{\mu T}^2}{T_{яц}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}\right)^2} < I_{зад} = \frac{U_{зг}}{k_T}.$$

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

$$T_T = 2 \cdot \frac{T_{\mu T}}{1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}.$$

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

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

– 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:

$$\sigma = 4.3\%; \quad t_{\text{py}1}^{(5)} = t_{\text{py}2}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu T \text{Э}} = 4.1 \cdot \frac{T_{\mu T}}{1 + \frac{T_{\mu T}}{T_{яц}}}, \text{ с.}$$

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

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

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

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

а скоростная ошибка остается постоянной

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

В результате динамическая ошибка контура не достигает установившегося значения.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

а коэффициент усиления регулятора тока соответственно увеличить

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

Тогда передаточная функция замкнутого контура тока принимает вид

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

и контур обрабатывает заданное значение тока без ошибки

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

Сравнительная оценка способов настройки контура тока

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 зависимости показателей качества работы контура тока 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 постоянных времени. Следует иметь в виду, что контур тока без регулятора имеет неунифицированное значение задающего напряжения.

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

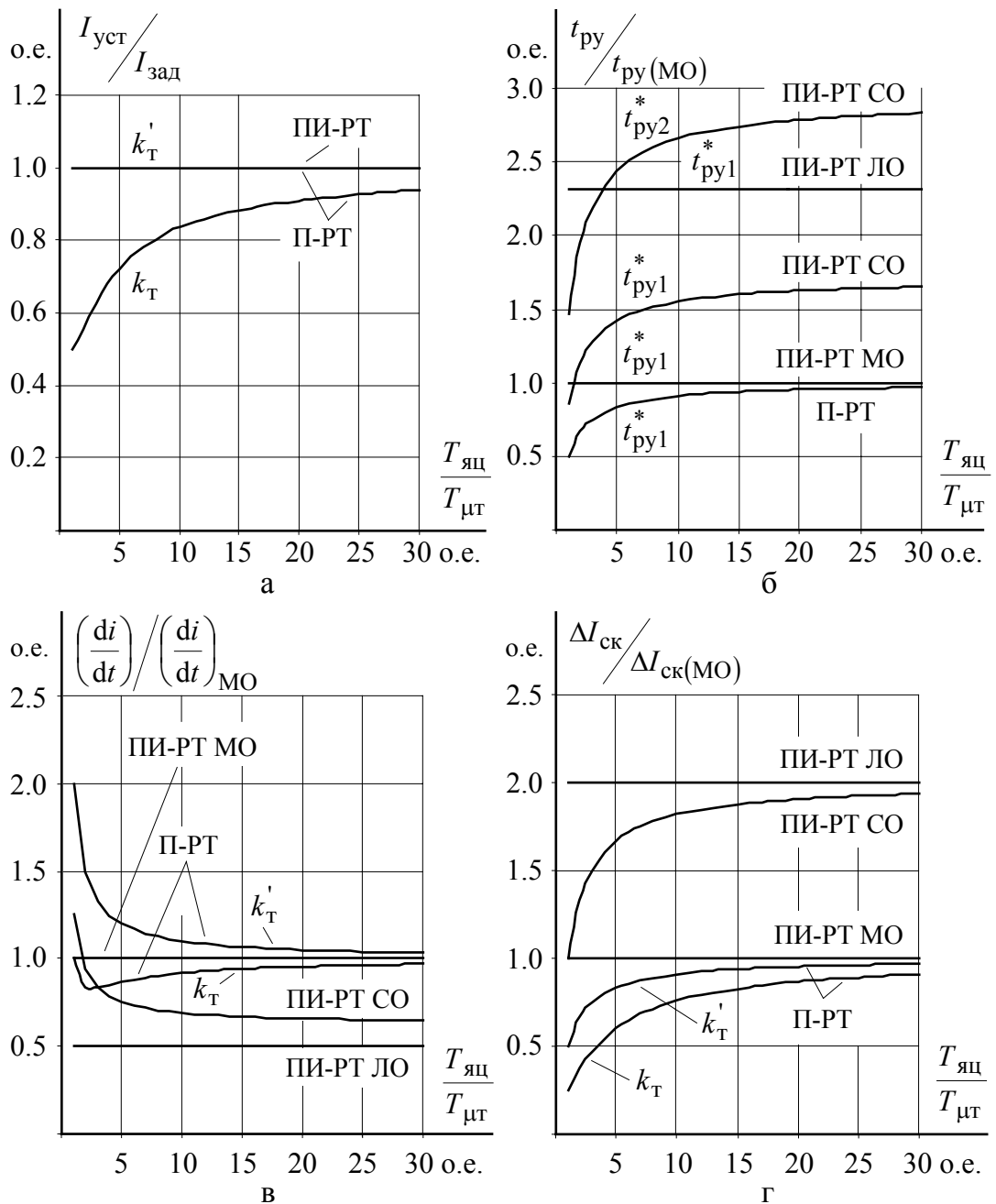


Рис. 2. Показатели качества работы контура тока по управлению при разных способах настройки: а – установившееся значение тока относительно заданного; б – время реакции на ступенчатое задание; в – максимальное значение производной при ступенчатом задании; г – скоростная ошибка при обработке линейно изменяющегося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

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

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

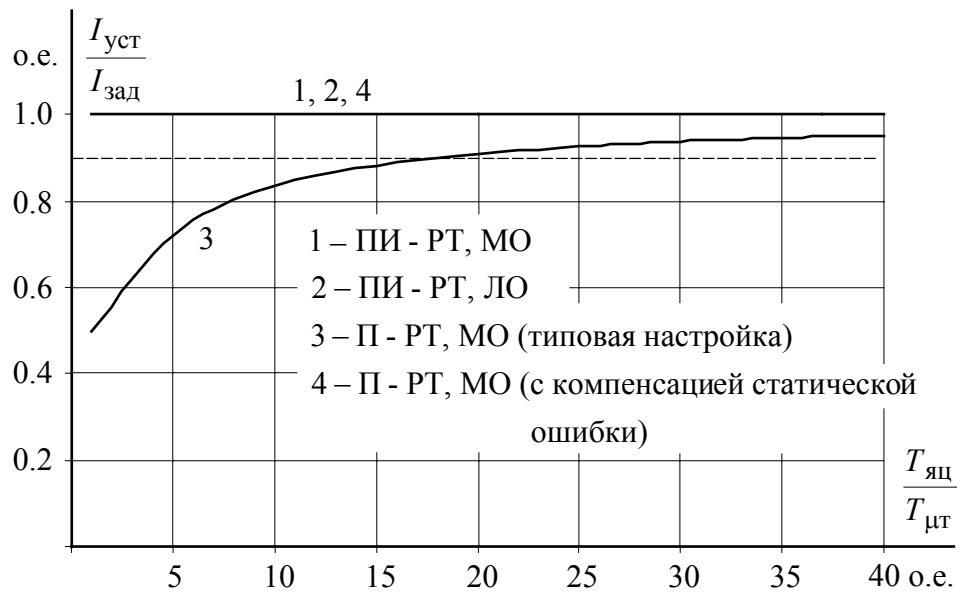


Рис. 3

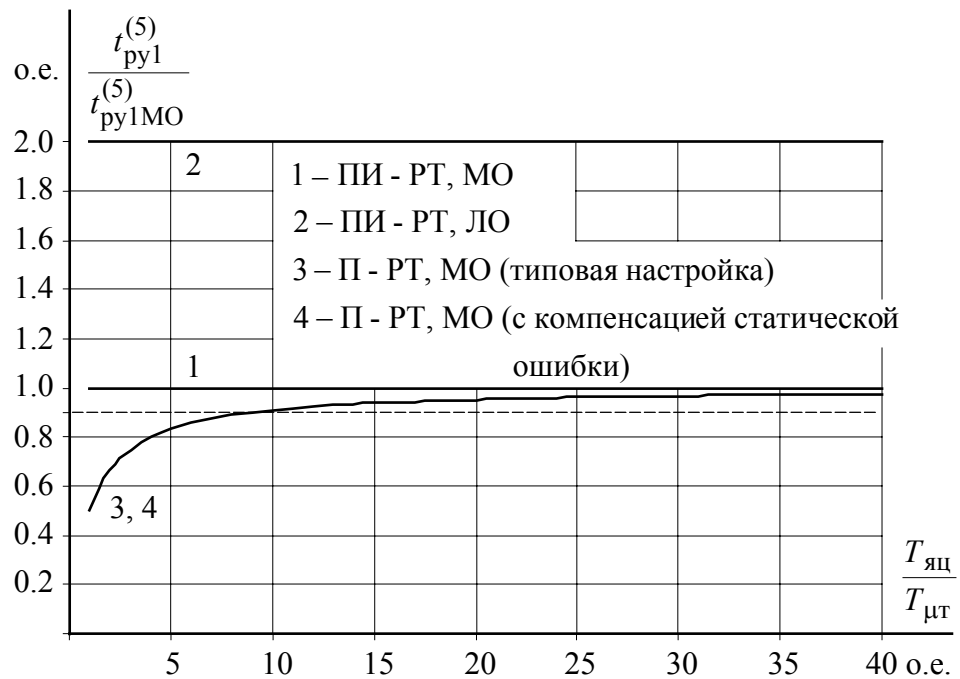


Рис. 4

Влияние некомпенсированной ЭДС двигателя на процессы в контуре тока

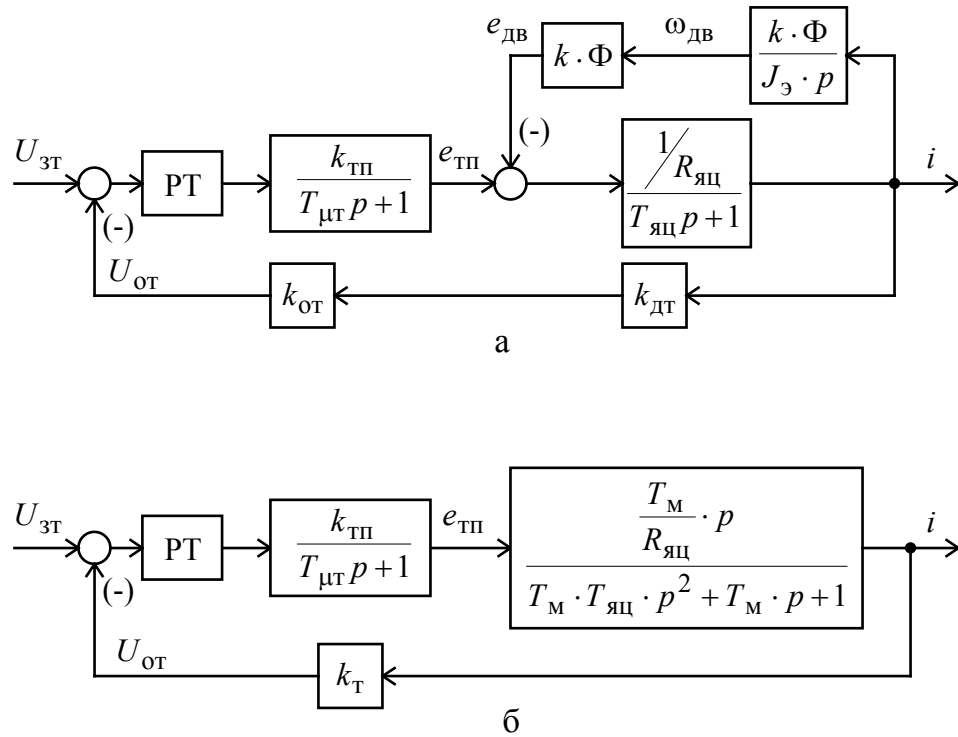


Рис. 1. Структурная схема контура тока с безынерционной обратной связью и учетом ЭДС двигателя: а – исходная; б - преобразованная

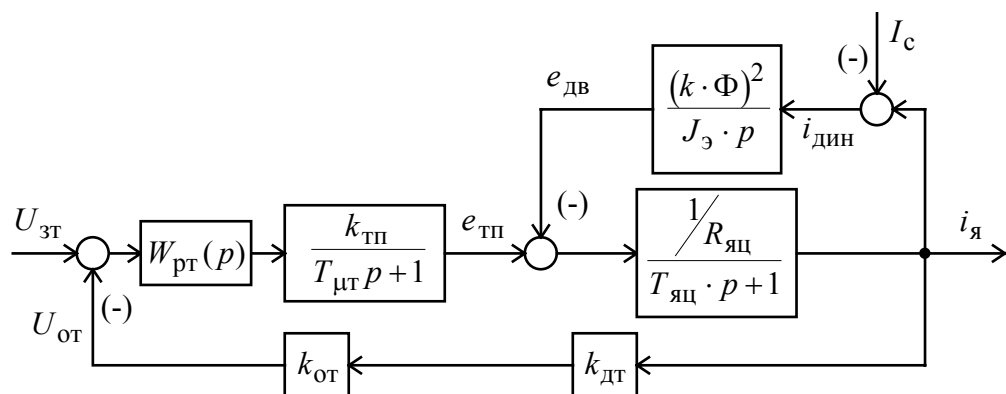


Рис. 2. Структурная схема контура тока с учетом ЭДС двигателя и статической нагрузки

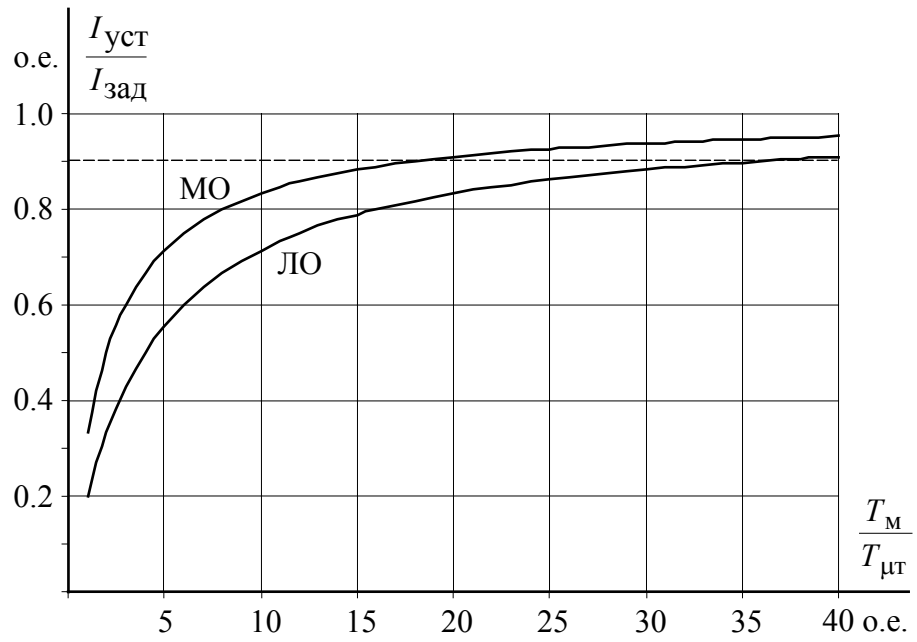


Рис. 3. Зависимость установившегося значения тока в контуре с некомпенсированной ЭДС двигателя от отношения постоянных времени $\frac{T_m}{T_{\mu T}}$

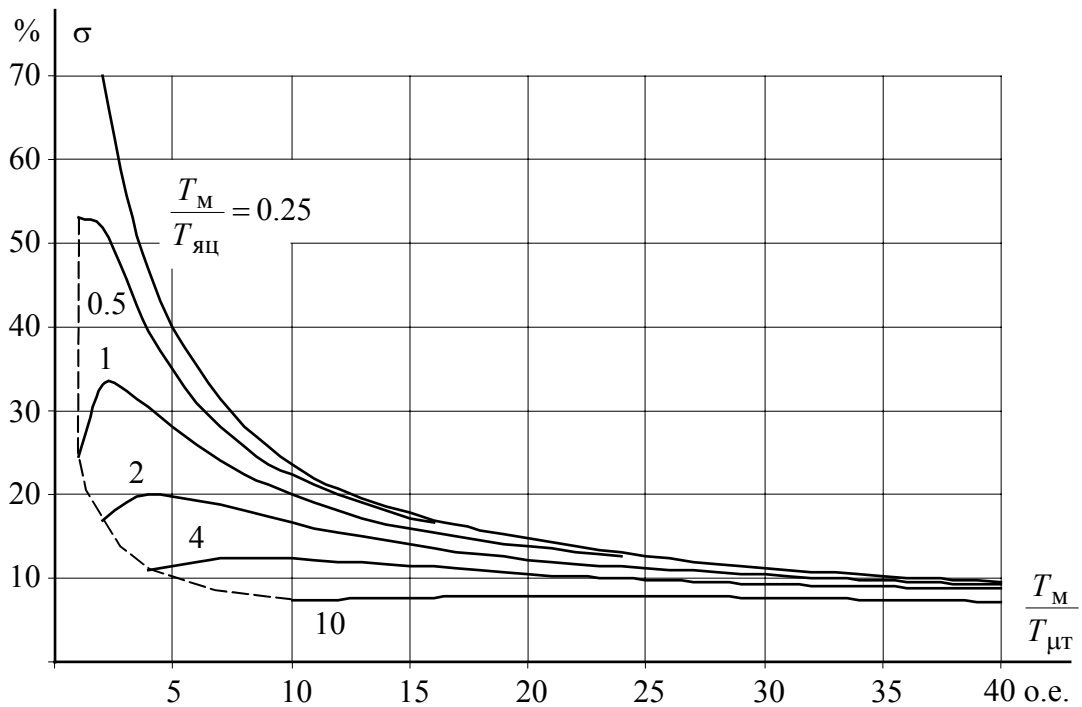


Рис. 4. Зависимость перерегулирования тока в контуре с некомпенсированной ЭДС двигателя, ПИ-регулятором и настройкой на MO

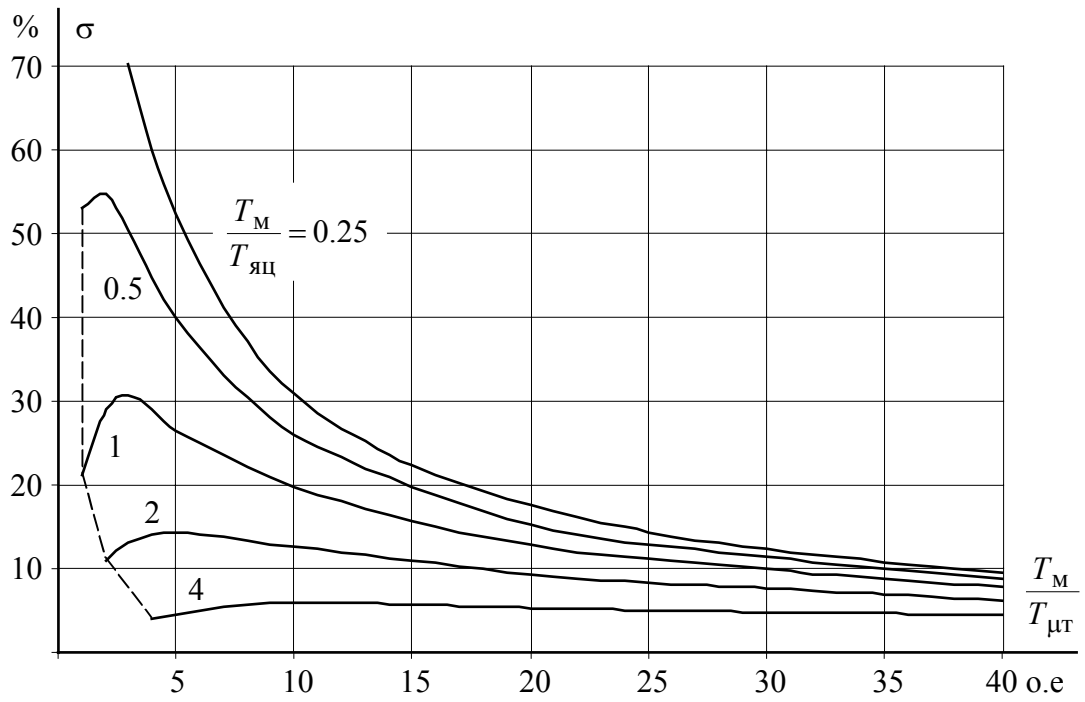


Рис. 5. Зависимость перерегулирования тока в контуре с некомпенсированной ЭДС двигателя, ПИ-регулятором и настройкой на ЛО