

УДК 68-83-52

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ТИПОВЫМ МЕТОДИКАМ

Н.В. Кояин, О.П. Мальцева, Л.С. Удуд

Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Проведено обобщение типовых методик оптимизации контуров регулирования систем электропривода, систематизированы и дополнены показатели качества при обработке управляющих и возмущающих воздействий. Рассмотрены модульный и линейный оптимумы настройки контуров.

Многоконтурные системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией находят широкое практическое применение в электроприводах как постоянного, так и переменного тока. В соответствии с принципом последовательной коррекции каждому звену объекта управления с большой постоянной времени должно соответствовать звено с обратной передаточной функцией в составе регулятора. Поскольку в составе объекта управления имеются инерционные звенья, то регулятор должен содержать соответствующее число форсирующих звеньев. Сложность объекта управления в контуре регулирования однозначно определяет сложность его регулятора. Если ограничиться пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД)-регулятором как наиболее сложным, то речь может идти об оптимизации двух типов контуров с объектами управления, содержащими инерционное звено с малой постоянной времени T_μ и последовательно включенные с ним:

- инерционные звенья первого порядка (не более двух) с большими постоянными времени $T_1 > T_2 > T_\mu$ (рис. 1, а);
- интегрирующее звено и не более одного инерционного звена с большими постоянными времени $T_0 > T_2 > T_\mu$ (рис. 1, б).

При настройке контура тип и параметры регулятора выбираются таким образом, что регулятор компенсирует большие инерционности объекта и приводит передаточную функцию контура к нормированному виду с учетом значения эквивалентной малой постоянной времени и выбранного критерия оптимизации. В практике наладки систем электропривода основное применение находят два критерия оптимальной настройки контуров по управлению: модульный (технический) оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО). Впервые предложенные С. Кесслером в 50-е годы прошлого века [1, 2] и получившие широкое распространение в электроприводах постоянного тока, данные критерии и сегодня не утратили своей значимости. Простые и удобные для практического использования, обеспечивающие качественные показатели, удовлетворяющие в большинстве случаев предъявляемым требованиям, эти ставшие классическими методы привлекают к себе пристальное внимание специалистов в области систем управления, занимающихся проектированием и созданием качественных электроприводов, в том числе переменного тока, разработкой новых методов идентификации технологических процессов и настройки промышленных регуляторов [3–6]. Несмотря на многочисленные публикации, посвященные практической оптимизации

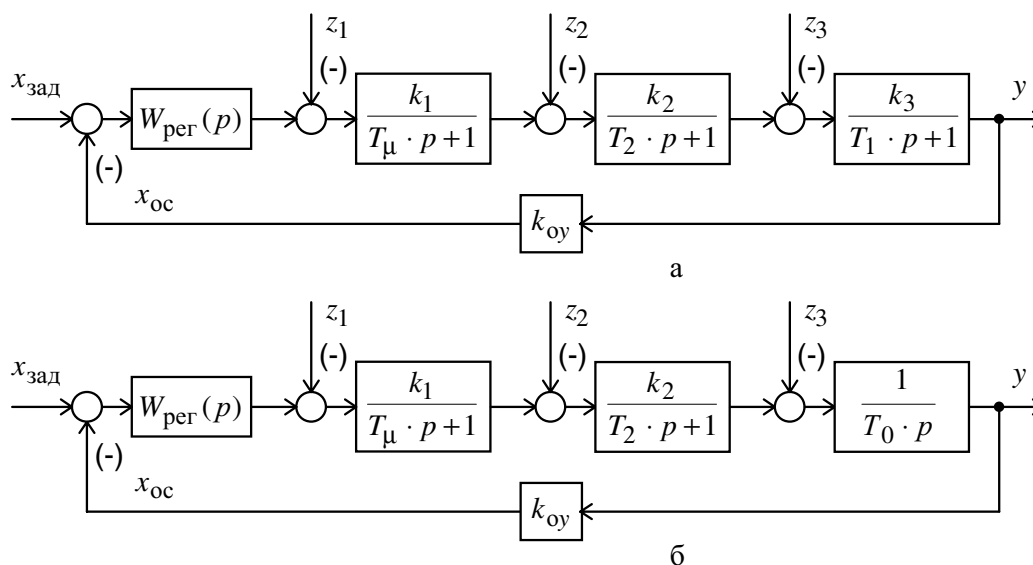


Рис. 1. Контур регулирования с объектом управления, содержащим: а) только инерционные звенья; б) интегрирующее звено

систем регулирования, ряд вопросов, касающихся выбора критериев оптимизации, качества обработки возмущающих воздействий, методики настройки систем с последовательно-параллельной коррекцией и т.д., остается по-прежнему нерешенным. Новые области практического применения требуют не только сравнительного анализа существующих методик оптимизации, но и дальнейшего их развития с учетом возрастающих требования к качеству регулирования и возможностей современной элементной базы.

Целью данной статьи является обобщение типовых методик оптимизации систем автоматизированного электропривода, систематизация и дополнение качественных показателей при обработке контуром регулирования управляющих и возмущающих воздействий.

Модульный оптимум настройки контура

Простейший оптимизированный по МО контур характеризуется наличием одного интегрирующего звена в контуре регулирования, представляет собой систему второго порядка и имеет следующие нормированные передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{y(t)}{x_{\text{зад}}(t)} = \frac{1}{aT_{\mu} p(T_{\mu} p + 1)}; \quad (1)$$

– замкнутого контура по управлению

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{у.зам}} &= \frac{y(t)}{x_{\text{зад}}(t)} = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \frac{1}{aT_{\mu} p(T_{\mu} p + 1) + 1} = \\ &= \frac{1}{k_{\text{оу}}} \frac{1}{aT_{\mu}^2 p^2 + aT_{\mu} p + 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_{\text{зад}}(t)$ – задающее воздействие; $y(t)$ – выходная координата; $k_{\text{оу}}$ – коэффициент обратной связи; a – коэффициент оптимизации; p – оператор дифференцирования.

Передаточная функция замкнутого контура по возмущению зависит от места приложения возмущающего воздействия z_i

$$W(p)_{\text{в.зам}} = \frac{y(t)}{z_i(t)} = W'_{\text{об}}(p) \frac{aT_{\mu} p(T_{\mu} p + 1)}{aT_{\mu}^2 p^2 + aT_{\mu} p + 1}, \quad (3)$$

где $W'_{\text{об}}(p)$ – передаточная функция части объекта управления, входящей в прямой канал обработки возмущения.

Передаточные функции оптимизированного по МО разомкнутого (1) и замкнутого по управлению (2) контура не зависят от состава объекта управления, а значения коэффициентов полинома знаменателя, как и для передаточной функции по возмущению (3), определяются только величиной малой постоянной времени объекта T_{μ} .

Вид и значения коэффициентов полинома числителя передаточной функции по возмущению (3) зависят от типа и параметров звеньев объекта управ-

ления, к входу которых приложено возмущающее воздействие. В результате реакция контура на возмущающее воздействие и установившаяся ошибка будут зависеть от места приложения воздействия. В дальнейшем в качестве основного возмущающего воздействия рассматривается приложенное к выходному звену объекта управления возмущение z_3 , что является наиболее характерным случаем для контуров регулирования систем управления электроприводов. По МО может быть оптимизирован любой из приведенных на рис. 1 контуров.

Оптимизация по МО контура с инерционными звеньями

Для настройки на МО контура с инерционными звеньями (рис. 1, а) в общем случае выбирается ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$\begin{aligned} W_{\text{рег}}(p) &= k'_{\text{рег}} \frac{(T_{\text{из}} p + 1)(T_{\text{уп}} p + 1)}{T_{\text{и}} p} = \\ &= k_{\text{рег}} \frac{(T_{\text{из}} p + 1)(T_{\text{уп}} p + 1)}{T_{\text{из}} p}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $k'_{\text{рег}} = \frac{1}{k_1 k_2 k_3 k_{\text{оу}}}$, $k_{\text{рег}} = \frac{T_1}{k_1 k_2 k_3 k_{\text{оу}} a T_{\mu}}$ (5)

– коэффициент усиления регулятора;
 $T_{\text{из}} = T_{\text{рег}} = T_1$ (6)

– постоянная времени изодрома (регулятора), с;
 $T_{\text{уп}} = T_2$ (7)

– постоянная времени предупреждения, с;
 $T_{\text{и}} = a T_{\mu}$ (8)

– постоянная времени интегрирования, с;
– k_1, k_2 и k_3 – коэффициенты передачи звеньев прямой цепи;
– $a=2$ – коэффициент оптимизации контура по МО.

Если $T_2=0$, то применяется пропорционально-интегральный регулятор

$$W_{\text{рег}}(p) = k'_{\text{рег}} \frac{T_{\text{из}} p + 1}{T_{\text{и}} p} = k_{\text{рег}} \frac{T_{\text{из}} p + 1}{T_{\text{из}} p}. \quad (9)$$

При $T_2=0$ и $T_1=0$ применяется интегральный регулятор

$$W_{\text{рег}}(p) = k'_{\text{рег}} \frac{1}{T_{\text{и}} p} = k_{\text{рег}} \frac{1}{T_{\text{из}} p}. \quad (10)$$

Коэффициенты усиления и постоянные времени передаточных функций регуляторов (9) и (10) определяются соответственно по выражениям (5), (6) и (8).

Оптимизация по МО контура с интегрирующим звеном

Для настройки на МО контура, содержащего интегрирующее звено (рис. 1, б), в общем случае выбирается пропорционально-дифференциальный регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{пер}}(p) = k_{\text{пер}} (T_{\text{уп}} p + 1). \quad (11)$$

Постоянная времени упреждения выбирается в соответствии с (7), а коэффициент усиления регулятора определяется по выражению

$$k_{\text{пер}} = \frac{T_0}{k_1 k_2 k_{\text{оу}} a T_{\mu}}. \quad (12)$$

Если $T_2=0$, то применяется пропорциональный регулятор, коэффициент усиления которого определяется по выражению (12).

Частотные характеристики оптимизированных по МО контуров

При условии равенства постоянных времени T_{μ} частотные характеристики оптимизированных в соответствии с МО контуров по управлению одинаковы (рис. 2). Полоса пропускания по модулю и фазе

$$\omega_n^{(м)} = \omega_n^{(ф)} = \frac{0,71}{T_{\mu}}, \text{ рад/с}.$$

Частотные характеристики оптимизированных контуров по возмущению принципиально разные и зависят от параметров объекта управления (рис. 3, где $L(\omega)$ – логарифмические амплитудно-частотные и $\varphi(\omega)$ – фазо-частотные характеристики).

Показатели качества работы оптимизированных по МО контуров при отработке управляющих воздействий

Оптимизированные по МО контуры регулирования имеют в прямом канале интегрирующее звено (в контуре рис. 1, а, в составе регулятора, а в контуре рис. 1, б, в составе объекта управления). Это обеспечивает замкнутому контуру астатизм первого порядка по управлению. При отработке управляющего воздействия контуры имеют нулевую установившуюся ошибку $\Delta y_{\text{уст}}$ и скоростную ошибку

$$\Delta y_{\text{у.ск}} = \frac{2T_{\mu}}{k_{\text{оу}}} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\text{зад}} = 2T_{\mu} \left(\frac{dy}{dt} \right)_{\text{зад}}. \quad (13)$$

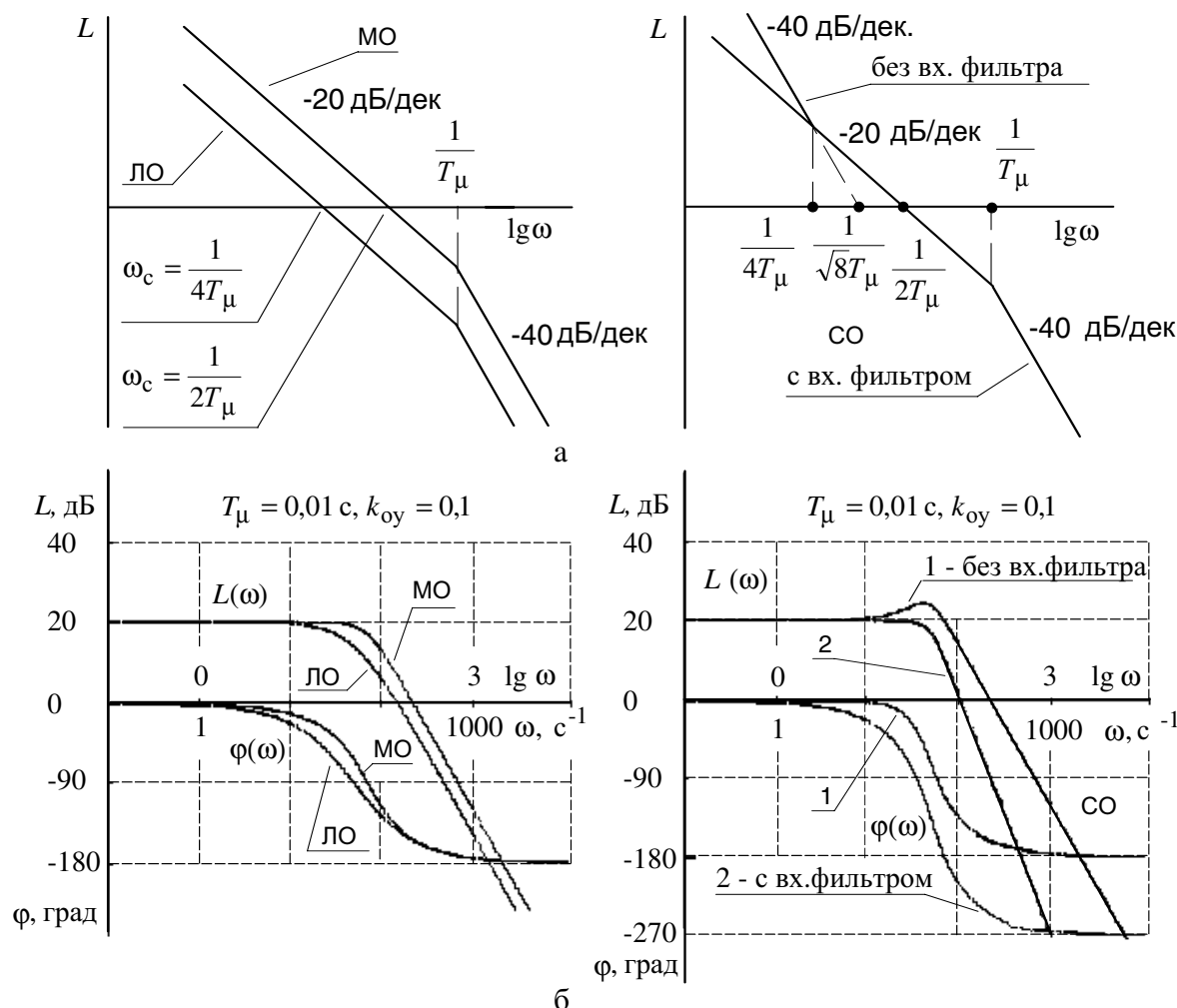


Рис. 2. Логарифмические частотные характеристики оптимизированного контура: а) разомкнутого (асимптотические); б) замкнутого по управлению

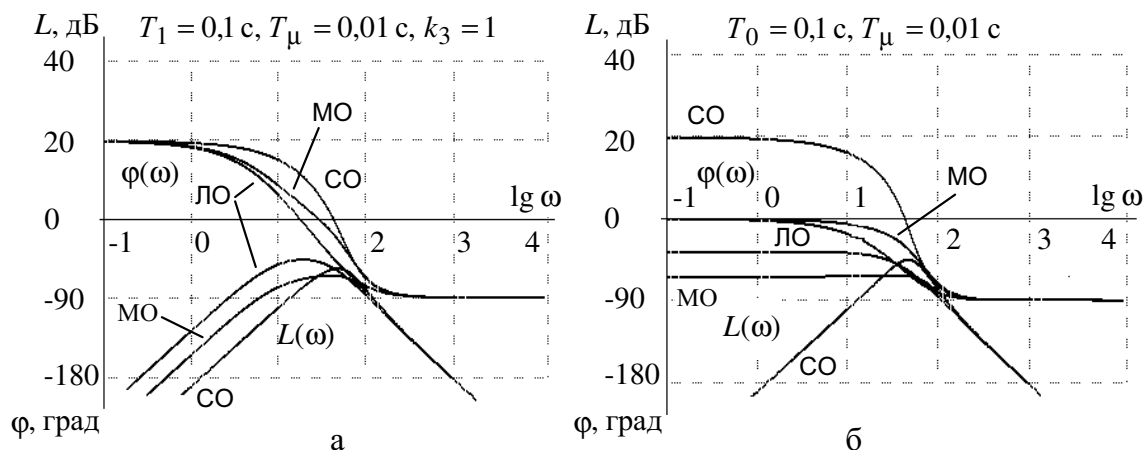


Рис. 3. Логарифмические частотные характеристики по возмущению z_3 оптимизированного контура: а) с инерционными звеньями; б) с интегрирующим звеном

Реакция оптимизированного по МО контура 2-го порядка на управляющее воздействие определяется только величиной малой постоянной времени T_μ и не зависит от других параметров контура и соотношения большой и малой постоянных времени объекта управления (рис. 4). Показатели отработки ступенчатых управляющих воздействий:

- перерегулирование $\sigma=4,32\%$;
- время первого и окончательного вхождения в 5% зону $t_{\text{пр}1}^{(5)}=t_{\text{пр}2}^{(5)}=4,1 T_\mu$.

Переходные характеристики по управлению оптимизированных по МО контуров будут одинаковыми, если равны их малые постоянные времени T_μ (рис. 4). При необходимости полностью исключить перерегулирование контур настраивается на так называемый линейный оптимум (ЛО).

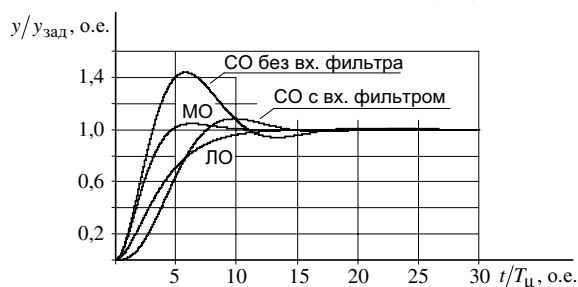


Рис. 4. Переходные характеристики по управлению оптимизированного контура

Показатели качества работы оптимизированного по МО контура с инерционными звеньями при отработке возмущающих воздействий

Реакция оптимизированного по МО контура с инерционными звеньями в зависимости от места приложения возмущающего воздействия приведена на рис. 5, а. В таком контуре при отработке возмущения интегрирующее звено входит в цепь обратной связи, поэтому он является астатической системой по возмущению и обеспечивает нулевую статическую ошибку вне зависимости от места

приложения возмущающего воздействия: $\Delta y_{\text{в.уст}}=0$. Значение максимальной динамической ошибки $\Delta y_{\text{в.макс}}$ и время отработки ступенчатого возмущающего воздействия (окончательного вхождения в 10% зону от $\Delta y_{\text{в.макс}}$) неоднозначно зависят от отношения постоянных времени T_1/T_μ и приведены для возмущающего воздействия z_3 в виде графиков на рис. 6 в относительных единицах. В абсолютных единицах максимальная ошибка и время переходного процесса определяются по выражениям:

$$\Delta y_{\text{в.макс}} = \Delta y_{\text{в.макс}}^* k_3 \Delta z_3; \quad t_{\text{рв}} = t_{\text{рв}}^* T_\mu. \quad (14)$$

Приближенно время переходного процесса и максимальное значение динамической ошибки для возмущения z_3 могут быть найдены следующим образом:

$$t_{\text{рв}} \approx \left(2,4 + 2,3 \frac{T_1}{T_\mu} \right) T_\mu; \quad (15)$$

$$\Delta y_{\text{в.макс}} \approx 1,93 \frac{T_\mu}{T_1 \left(1 + \frac{2T_\mu}{T_1} \right)} k_3 \Delta z_3. \quad (16)$$

Показатели качества работы оптимизированного по МО контура с интегрирующим звеном при отработке возмущающих воздействий

Оптимизированный по МО контур (рис. 1, б) является статической системой по возмущению и имеет при отработке возмущающего воздействия не равную нулю установившуюся ошибку (рис. 5, б). Реакция оптимизированного контура на скачок возмущающего воздействия в общем случае определяется не только малой постоянной времени T_μ , но также зависит от других параметров контура и от отношения постоянных времени T_0/T_μ .

Установившаяся и максимальная динамическая ошибки вне зависимости от места приложения возмущающего воздействия зависят от отношения постоянных времени T_0/T_μ , в частности для возмущения z_3

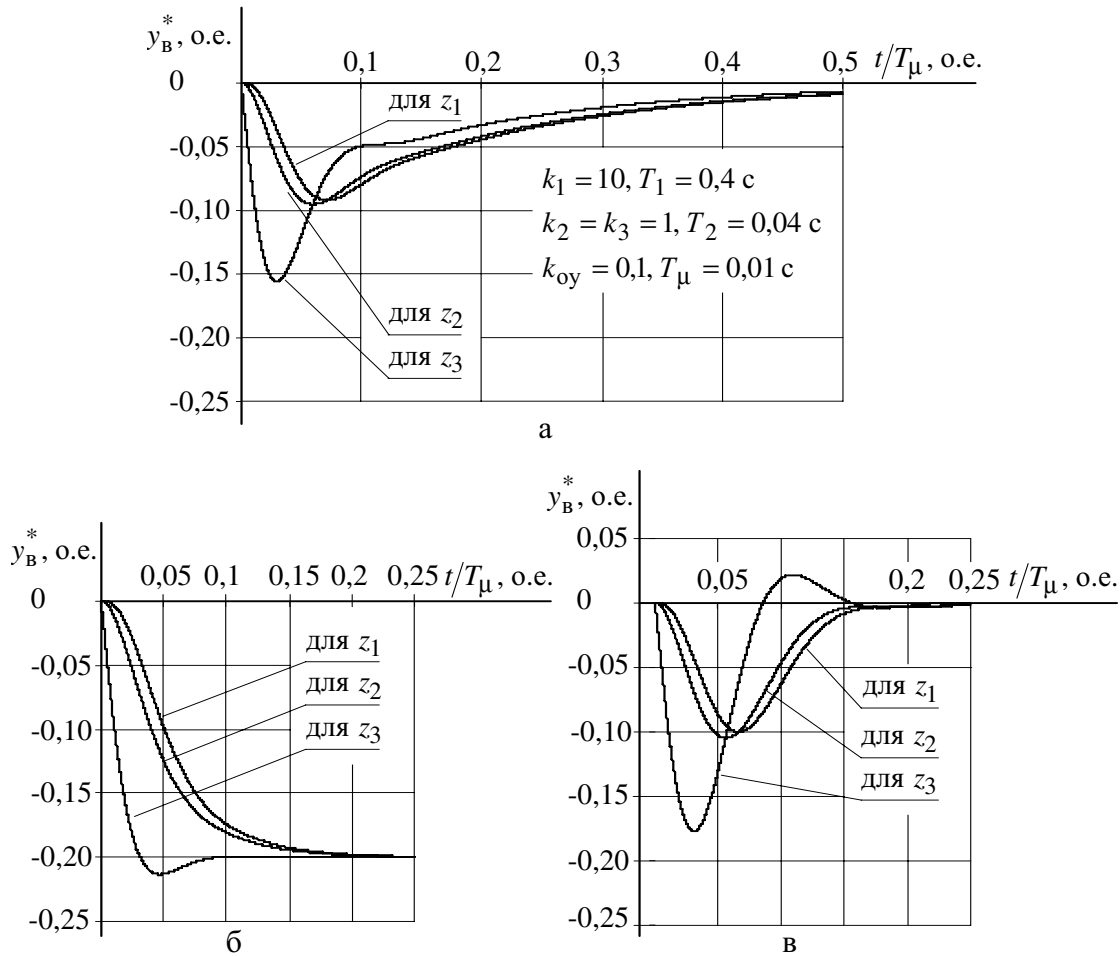


Рис. 5. Реакция оптимизированного контура на ступенчатое возмущающее воздействие в зависимости от места приложения возмущения: а) контур с инерционными звеньями, МО; б) контур с интегрирующим звеном, МО; в) контур с интегрирующим звеном, СО

$$\Delta y_{в,уст} = 2k'_{об} \frac{T_\mu}{T_0} \Delta z; \quad (17)$$

$$\Delta y_{в,макс} = 2,134 k_3 \frac{T_\mu}{T_0} \Delta z_3, \quad (18)$$

где $k'_{об}$ – коэффициент усиления части объекта управления, входящей в прямой канал отработки возмущающего воздействия.

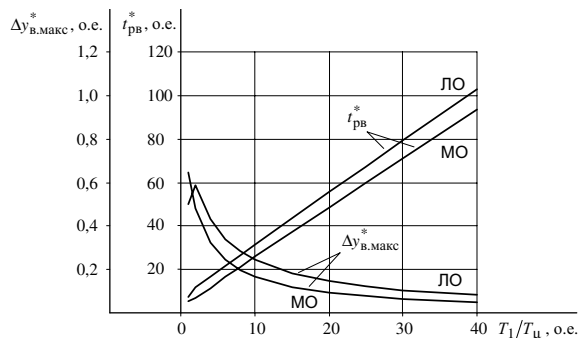


Рис. 6. Показатели отработки ступенчатого возмущающего воздействия z_3 оптимизированным контуром с инерционными звеньями

Следует отметить, что отношение $\frac{\Delta y_{в,макс}}{\Delta y_{в,уст}} = 1,067$

остаётся всегда постоянным, а время отработки возмущения z_3 зависит только от значения малой постоянной времени T_μ : $t_{рв} = 2,45 T_\mu$. Переходная характеристика по возмущению приведена на рис. 7, где за базовое значение принято установившееся значение ошибки при оптимизации по линейному оптимуму.

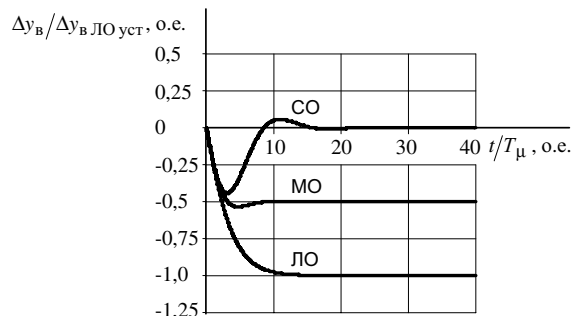


Рис. 7. Переходные характеристики по возмущению z_3 оптимизированного контура с интегрирующим звеном

Оптимизация по линейному оптимуму

При настройке на ЛО выбирается коэффициент оптимизации $a=4$. Передаточные функции контура определяются выражениями (1–3). Частотные и переходные характеристики по управлению оптимизированных по ЛО контуров одинаковые, определяются только значением малой постоянной времени T_μ и приведены соответственно на рис. 2 и 4. Полоса пропускания замкнутых контуров по модулю и фазе:

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0,33}{T_\mu}, \frac{\text{рад.}}{\text{с}}; \quad \omega_{\Pi}^{(Ф)} = \frac{0,51}{T_\mu}, \frac{\text{рад.}}{\text{с}}.$$

Оптимизированные по ЛО контуры имеют следующие показатели качества обработки управляющих воздействий:

$$\Delta y_{\text{у.ск}} = \frac{4T_\mu}{k_{\text{об}}} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\text{зад}} = 4T_\mu \left(\frac{dy}{dt} \right)_{\text{зад}}; \quad (19)$$

$$\Delta y_{\text{у.уст}} = 0; \quad \sigma = 0\%; \quad t_{\text{py1}}^{(5)} = t_{\text{py2}}^{(5)} = 9,5T_\mu.$$

Контур с инерционными звеньями, оптимизированный по ЛО, обеспечивает нулевую установившуюся ошибку по возмущению $\Delta y_{\text{в.уст}}=0$, а значение максимальной ошибки $\Delta y_{\text{в.макс}}$ и время отработки $t_{\text{рв}}$ ступенчатого возмущения z_3 неоднозначно зависят от отношения T_1/T_μ и приведены в относительных единицах на рис. 6. В абсолютных единицах показатели качества работы контура определяются по выражениям (14). Время переходного процесса и максимальное значение динамической ошибки могут быть приближенно найдены следующим образом:

$$t_{\text{рв}} \approx \left(7,15 + 2,42 \frac{T_1}{T_\mu} \right) T_\mu, \quad (20)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kessler C. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III. Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum // Regelungstechnik. – 1955. – В. 3. – Н. 2. – С. 40–49.
2. Kessler C. Das symmetrische Optimum. Teil I und III // Regelungstechnik. – 1958. – В. 6. – Н. 11. – С. 395–400; Н. 12. – С. 432–436.
3. Voda A.A., Landau I.D. A method for the auto-calibration of PID controllers // Automatica. – 1995. – V. 31. – № 1. – P. 41–53.

$$\Delta y_{\text{в.макс}} \approx 3,5 \frac{T_\mu}{T_1 \left(1 + \frac{4T_\mu}{T_1} \right)} k_3 \Delta z_3. \quad (21)$$

Логарифмические частотные и переходные характеристики по возмущению контура с инерционными звеньями, оптимизированного по ЛО, приведены соответственно на рис. 3, а, и рис. 6.

Контур с интегрирующим звеном при оптимизации по ЛО имеет следующие показатели отработки ступенчатых возмущающих воздействий:

$$\Delta y_{\text{в.уст}} = \Delta y_{\text{в.макс}} = 4k'_{\text{об}} \frac{T_\mu}{T_0} \Delta z; \quad (22)$$

$$t_{\text{рв}} = 6,53T_\mu. \quad (23)$$

Логарифмические частотные и переходные характеристики контура по возмущению приведены соответственно на рис. 3, б, и рис. 7.

Заключение

Настройка контура на модульный оптимум не является оптимальной ни по быстродействию, которое можно увеличить, повышая перерегулирование (коэффициент оптимизации контура $a < 2$), ни по перерегулированию, которое можно уменьшить, снижая быстродействие ($a > 2$). Однако такая оптимизация в большинстве случаев удовлетворяет требованиям к работе замкнутого контура по управлению в отношении и быстродействия, и перерегулирования. Благодаря этому, а также простоте реализации, модульный оптимум является наиболее распространенным способом оптимизации контуров регулирования в системах электропривода. По возмущению настройка контуров на модульный оптимум имеет явные недостатки: малое быстродействие контура с инерционными звеньями и наличие установившейся ошибки в контуре с интегрирующим звеном.

4. O'Dwyer A. PI and PID controller tuning rules for time delay processes: a summary // Proc. of the Irish signals and systems conference. – N.U.I., Galway, 1999. – P. 331–346.
5. Preitl S., Precup, R.E. An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers // Automatica. – 1999. – V. 35. – № 10. – P. 1731–1736.
6. Vrancic D., Strmenic S., Hanus R. Improving disturbance rejection of PI controllers by means of the magnitude optimum method // ISA Transactions. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 73–74.