

УДК 62.83

**СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УПРУГОЙ СВЯЗЬЮ МЕТОДОМ N-і ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ**

А. Л. Дерез, А. В. Садовой

Днепродзержинский государственный технический университет
ул. Днепростроевская, 2, г. Днепродзержинск, 51935, Украина. E-mail: ALD_DSTU@i.ua

Выполнено построение фрагмента переходной траектории системы подчиненного регулирования пятого порядка, оптимальной по быстродействию при ограничении канонических координат. Методом N-і переключений осуществлён синтез аналитических выражений для параметров регулятора положения релейной системы управления электроприводом с упругой связью. Приведен результат моделирования переходного процесса позиционирования.

Ключевые слова: оптимизация по быстродействию, метод N-і переключений.

**СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНОЙ ЗА ШВИДКОДІЄЮ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ПРУЖНИМ ЗВ'ЯЗКОМ МЕТОДОМ N-і ПЕРЕМИКАНЬ**

О. Л. Дерезь, О. В. Садовой

Дніпродзержинський державний технічний університет
ул. Дніпробудівська, 2, г. Дніпродзержинськ, 51935, Україна. E-mail: ALD_DSTU@i.ua

Виконано побудову фрагменту перехідної траєкторії системи підпорядкованого регулювання п'ятого порядку, оптимальної за швидкістю при обмеженні канонічних координат. Методом N-і перемикачів здійснено синтез аналітичних виразів для параметрів регулятора положення релейної системи керування електроприводом з пружним зв'язком. Наведено результат моделювання перехідного процесу позиціонування.

Ключові слова: оптимізація за швидкістю, метод N-і перемикачів.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Предельно-апериодические процессы позиционирования электропривода с упругой связью способны формировать релейные системы подчиненного регулирования с линейными уравнениями скольжения, синтезированными методом N-і переключений. Наряду с численным решением задачи параметрического синтеза [1], данный метод позволяет устанавливать аналитическую связь коэффициентов обратных связей контуров регулирования с заданными уровнями ограничения канонических координат системы. В работе [2] приведено решение такой задачи для системы регулирования скорости электропривода с упругим передаточным устройством, порядок которой равен четырем. Благодаря однотипности фрагментов оптимальной по быстродействию траектории, формируемых внутренними контурами системы подчиненного регулирования, параметрический синтез системы управления перемещением такого электропривода можно осуществить путем развития результатов работы [2] для систем пятого порядка.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Рассмотрим релейную систему подчиненного регулирования углового положения Φ выходного вала электропривода с упругой связью, замкнутую по вектору канонических координат, представив ограничение по управлению эквивалентным ограничением 5-й производной регулируемой величины. Математическое описание такой системы имеет вид

$$\left. \begin{aligned} u_{R\Omega} &= \Omega^* = -\Omega_{max} \operatorname{sign}(\Phi - \Phi^* + K_{\Phi\Omega}\Omega + K_{\Phi\phi}\phi + K_{\Phi\omega}\omega + K_{\Phi\varepsilon}\varepsilon) \\ u_{R\Omega} &= \Phi^* = -\phi_{max} \operatorname{sign}(\Omega - \Omega^* + K_{\Omega\phi}\phi + K_{\Omega\omega}\omega + K_{\Omega\varepsilon}\varepsilon) \\ u_{R\phi} &= \omega^* = -\omega_{max} \operatorname{sign}(\phi - \phi^* + K_{\phi\omega}\omega + K_{\phi\varepsilon}\varepsilon) \\ u_{R\omega} &= \varepsilon^* = -\varepsilon_{max} \operatorname{sign}(\omega - \omega^* + K_{\omega\varepsilon}\varepsilon) \\ u_{R\varepsilon} &= a^* = -a_{max} \operatorname{sign}(\varepsilon - \varepsilon^*) \end{aligned} \right\} (1^*)$$

где $\begin{pmatrix} \Phi \\ \Omega \\ \phi \\ \omega \\ \varepsilon \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi \\ p\Phi \\ p^2\Phi \\ p^3\Phi \\ p^4\Phi \\ p^5\Phi \end{pmatrix}$ – перемещение рабочего органа;
– скорость рабочего органа;
– угол закручивания упругого вала;
– скорость закручивания вала;
– ускорение закручивания;
– рывок при закручивании;

$p = d/dt$; u_{Ri} – сигнал i-го (считая от входа) регулятора; индексами «max» отмечены уровни ограничения канонических координат, достигаемые при отработке системой заданного перемещения Φ^* ; символом «*» отмечены также заданные значения промежуточных координат, формируемые регуляторами; K_{ij} – коэффициенты обратных связей.

Принятые в (1) буквенные обозначения k-х производных регулируемой координаты $p^k\Phi$ заимствованы из ряда предшествующих работ авторов, в частности [2], в которых выполнен синтез внутренних регуляторов системы (1), образующих подсистему (1*). Помимо преемственности результатов, такая система обозначений призвана облегчить восприятие расчета траектории оптимального по быстродействию переходного процесса, которая представлена на рис. 1, поскольку обозначения канонических координат совпадают с символами определяющих их физических величин. Прогнозируемая траектория используется в методе N-і переключений, согласно которому при выполнении синтеза контура регулирования пятого порядка требуется составить систему уравнений переключения регулятора R_Φ для четырех характерных точек оптимальной по быстродействию траектории и решить её относительно неизвестных коэффициентов обратных связей. Благодаря симметрии оптимальной траектории (с учетом знака нечётных координат), достаточно выполнить

прогнозирование только её начального участка [1] до отметки времени «15» (рис. 1), преобразовав координаты вектора состояния в расчетных характеристических точках $\hat{X}^{i,j}$ к действительным координатам $X^{i,j}$ по выражению

$$X_k^{i,j} = (-1)^{(k+i+1)} \hat{X}_k^{i,j}, \quad (2)$$

где i – номер регулятора, считая от входа; j – номер характерной точки по порядку переключений во времени; k – индекс канонической координаты.

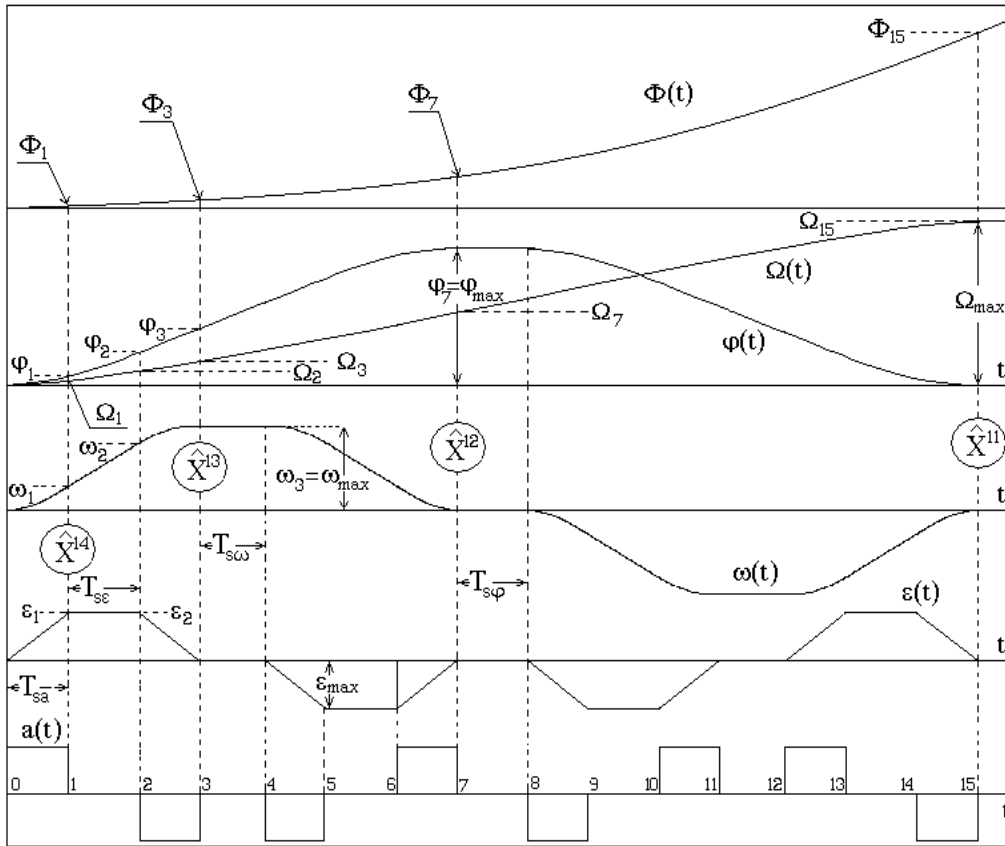


Рисунок 1 – Расчётные временные диаграммы оптимального по быстродействию переходного процесса

В связи с большим объёмом вычислений, необходимых для расчёта траектории системы пятого порядка, воспользуемся промежуточными результатами работы [2], а именно, выражениями для $r\Phi...r^5\Phi$ в точках 1, 3, 7 по сквозной нумерации переключений управляющего воздействия (рис. 1), соответствующих расчётным характеристическим точкам $\hat{X}^{1,4}$, $\hat{X}^{1,3}$, $\hat{X}^{1,2}$ регулятора R_Φ :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 = \varepsilon_{max} = a_{max} T_{sa}; \quad \omega_1 = a_{max} \frac{T_{sa}^2}{2}; \\ \phi_1 = a_{max} \frac{T_{sa}^3}{6}; \quad \Omega_1 = a_{max} \frac{T_{sa}^4}{24}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_3 = 0; \quad \omega_3 = a_{max} (T_{sa}^2 + T_{sa} T_{se}) = \omega_{max}; \\ \phi_3 = a_{max} \left(T_{sa}^3 + \frac{3}{2} T_{sa}^2 T_{se} + \frac{1}{2} T_{sa} T_{se}^2 \right); \\ \Omega_3 = a_{max} \times \\ \times \left(\frac{7}{12} T_{sa}^4 + \frac{7}{6} T_{sa}^3 T_{se} + \frac{3}{4} T_{sa}^2 T_{se}^2 + \frac{1}{6} T_{sa} T_{se}^3 \right); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_7 = 0; \quad \omega_7 = 0; \\ \phi_7 = \phi_{max} = a_{max} \left(2T_{sa}^3 + 3T_{sa}^2 T_{se} + T_{sa} T_{se}^2 + \right. \\ \left. + T_{sa}^2 T_{s\omega} + T_{sa} T_{se} T_{s\omega} \right); \\ \Omega_7 = a_{max} \left(4T_{sa}^4 + 8T_{sa}^3 T_{se} + 5T_{sa}^2 T_{se}^2 + T_{sa} T_{se}^3 + \right. \\ \left. + 3T_{sa}^3 T_{s\omega} + \frac{9}{2} T_{sa}^2 T_{se} T_{s\omega} + \frac{3}{2} T_{sa} T_{se}^2 T_{s\omega} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} T_{sa} T_{se} T_{s\omega} + \frac{1}{2} T_{sa}^2 T_{s\omega}^2 \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Данные результаты получены путём суммирования рядов Тейлора, имеющих конечное число членов благодаря допущению о постоянстве рывка на интервалах T_{sa} :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \frac{a_i T_{si}}{1!}, \quad \omega_{i+1} = \omega_i + \frac{\varepsilon_i T_{si}}{1!} + \frac{a_i T_{si}^2}{2!}; \\ \phi_{i+1} = \phi_i + \frac{\omega_i T_{si}}{1!} + \frac{\varepsilon_i T_{si}^2}{2!} + \frac{a_i T_{si}^3}{3!}; \\ \Omega_{i+1} = \Omega_i + \frac{\phi_i T_{si}}{1!} + \frac{\omega_i T_{si}^2}{2!} + \frac{\varepsilon_i T_{si}^3}{3!} + \frac{a_i T_{si}^4}{4!}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где T_{si} – отрезок времени между i -й и $i+1$ -й точками, равный интервалу стабилизации соответствующей координаты согласно рис. 1.

Аналогичный вид имеет выражение для построения временной диаграммы $\Phi(t)$:

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + \frac{\Omega_i T_{si}}{1!} + \frac{\phi_i T_{si}^2}{2!} + \frac{\omega_i T_{si}^3}{3!} + \frac{\varepsilon_i T_{si}^4}{4!} + \frac{a_i T_{si}^5}{5!}. \quad (7)$$

Определим ряд значений регулируемой координаты Φ в точках переключения управляющего воздействия на оптимальной траектории. Получим Φ_1 путём аналитического интегрирования по выражению (7) на интервале $0-1$, равном T_{sa} , при нулевых начальных условиях и стабилизации координаты a на уровне a_{max} :

$$\Phi_1 = \Phi_0 + \frac{\Omega_0 T_{sa}}{1!} + \frac{\phi_0 T_{sa}^2}{2!} + \frac{\omega_0 T_{sa}^3}{3!} + \frac{\varepsilon_0 T_{sa}^4}{4!} + \frac{a_0 T_{sa}^5}{5!} = 0 + \frac{0 \cdot T_{sa}}{1!} + \frac{0 \cdot T_{sa}^2}{2!} + \frac{0 \cdot T_{sa}^3}{3!} + \frac{0 \cdot T_{sa}^4}{4!} + \frac{a_{max} T_{sa}^5}{5!} = \frac{a_{max} T_{sa}^5}{120}.$$

Найденное выражение определяет первую координату четвёртой характерной точки \hat{X}_1^{14} первого регулятора системы (1), отображённую на начальный участок оптимальной по быстродействию траектории (рис. 1): $\Phi_1 = \hat{X}_1^{14}$.

Продолжив интегрирование на интервале $1-2$, равном T_{se} , при ненулевых начальных условиях

$$\left. \begin{aligned} a_1 = 0; \varepsilon_1 = \varepsilon_{max} = a_{max} T_{sa}; \omega_1 = a_{max} \frac{T_{sa}^2}{2}; \\ \phi_1 = a_{max} \frac{T_{sa}^3}{6}; \Omega_1 = a_{max} \frac{T_{sa}^4}{24}; \Phi_1 = \frac{a_{max} T_{sa}^5}{120} \end{aligned} \right\}$$

и стабилизации координаты ε на уровне ε_{max} , определим Φ_2 по выражению (7):

$$\begin{aligned} \Phi_2 = \Phi_1 + \frac{\Omega_1 T_{se}}{1!} + \frac{\phi_1 T_{se}^2}{2!} + \frac{\omega_1 T_{se}^3}{3!} + \frac{\varepsilon_1 T_{se}^4}{4!} + \frac{a_1 T_{se}^5}{5!} = \\ a_{max} \frac{T_{sa}^5}{120} + a_{max} \frac{T_{sa}^4 T_{se}}{24} + a_{max} \frac{T_{sa}^3 T_{se}^2}{6 \cdot 2} + a_{max} \frac{T_{sa}^2 T_{se}^3}{2 \cdot 6} + \\ + a_{max} \frac{T_{sa} T_{se}^4}{24} + \frac{0 \cdot T_{se}^5}{120} = a_{max} \frac{T_{sa}^5}{120} + a_{max} \frac{T_{sa}^4 T_{se}}{24} + \\ + a_{max} \frac{T_{sa}^3 T_{se}^2}{12} + a_{max} \frac{T_{sa}^2 T_{se}^3}{12} + a_{max} \frac{T_{sa} T_{se}^4}{24}. \end{aligned}$$

Аналогичные выкладки, выполняемые при прогнозировании оптимальной по быстродействию траектории между точками 2 и 15, в настоящей работе опустим в связи с их громоздкостью и однообразием, приведя лишь необходимые для синтеза регулятора положения результаты для точек 3, 7 и 15:

$$\begin{aligned} \Phi_3 = a_{max} \frac{T_{sa}^5}{4} + a_{max} \frac{5T_{sa}^4 T_{se}}{8} + a_{max} \frac{7T_{sa}^3 T_{se}^2}{12} + \\ + a_{max} \frac{T_{sa}^2 T_{se}^3}{4} + a_{max} \frac{T_{sa} T_{se}^4}{24}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_7 = a_{max} \left(\frac{9T_{sa}^5}{2} + \frac{45T_{sa}^4 T_{se}}{4} + \frac{61T_{sa}^3 T_{se}^2}{6} + 4T_{sa}^2 T_{se}^3 + \frac{7T_{sa} T_{se}^4}{12} + \right. \\ \left. + T_{s\omega}^3 \left(\frac{T_{sa}^2}{6} + \frac{T_{sa} T_{se}}{6} \right) + T_{s\omega}^2 \left(\frac{3T_{sa}^3}{2} + \frac{9T_{sa}^2 T_{se}}{4} + \frac{3T_{sa} T_{se}^2}{4} \right) \right. \\ \left. + T_{s\omega} \left(\frac{55T_{sa}^4}{12} + \frac{55T_{sa}^3 T_{se}}{6} + \frac{23T_{sa}^2 T_{se}^2}{4} + \frac{7T_{sa} T_{se}^3}{6} \right) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{15} = a_{max} \left(32T_{sa}^5 + 80T_{sa}^4 T_{se} + 72T_{sa}^3 T_{se}^2 + \right. \\ \left. + 28T_{sa}^2 T_{se}^3 + 4T_{sa} T_{se}^4 + T_{s\omega}^3 (T_{sa}^2 + T_{sa} T_{se}) + \right. \\ \left. + T_{s\omega}^2 (10T_{sa}^3 + 15T_{sa}^2 T_{se} + 5T_{sa} T_{se}^2) + T_{s\omega} \times \right. \\ \left. \times (32T_{sa}^4 + 64T_{sa}^3 T_{se} + 40T_{sa}^2 T_{se}^2 + 8T_{sa} T_{se}^3) + \right. \\ \left. T_{s\phi} (+24T_{sa}^3 T_{se} + 15T_{sa}^2 T_{se}^2 + 3T_{sa} T_{se}^3) + \right. \\ \left. + \frac{3}{2} T_{s\phi} T_{s\omega} (T_{sa}^2 + T_{sa} T_{se}) + \right. \\ \left. + T_{s\phi}^2 \left(T_{sa}^3 + \frac{T_{s\omega} T_{sa} T_{se}}{2} + \frac{3T_{sa}^2 T_{se}}{2} + \frac{T_{sa} T_{se}^2}{2} \right) + \right. \\ \left. + T_{s\phi} T_{s\omega} \left(\frac{9T_{sa} T_{se}^2}{2} + \frac{27T_{sa}^2 T_{se}}{2} + 9T_{sa}^3 \right) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega_{15} = a_{max} \left(16T_{sa}^3 T_{se} + 10T_{sa}^2 T_{se}^2 + 2T_{sa} T_{se}^3 + \right. \\ \left. + 8T_{sa}^4 + T_{s\omega} (6T_{sa}^3 + 9T_{sa}^2 T_{se} + 3T_{sa} T_{se}^2) + \right. \\ \left. + T_{s\omega}^2 (T_{sa} T_{se} + T_{sa}^2) + T_{s\phi} T_{s\omega} (T_{sa} T_{se} + T_{sa}^2) + \right. \\ \left. T_{s\phi} (2T_{sa}^3 + 3T_{sa}^2 T_{se} + T_{sa} T_{se}^2) \right). \end{aligned}$$

Заметим, что явное использование выражений (6) при интегрировании между точками 7–15 не является обязательным, поскольку, благодаря симметрии временных диаграмм оптимального по быстродействию процесса, координаты $\phi, \omega, \varepsilon$ можно отобразить с точек 1–7 на точки 8–15 с соответствующим изменением знака, а величины $\Omega_8 - \Omega_{15}$ можно вывести как дополняющие $\Omega_1 - \Omega_7$ до значения $\Omega_{15} = \Omega_{max} = 2\Omega_7 + \phi_7 T_{s\phi}$, что позволит избежать явного вычисления взаимно уничтожающихся членов ряда.

Найденные выражения

$$\Phi_3 = \hat{X}_1^{13}; \Phi_7 = \hat{X}_1^{12}; \Phi_{15} = \hat{X}_1^{11}; \Omega_{15} = \hat{X}_2^{11}$$

вместе с заимствованными из [2] выражениями (3)–(5) определяют координаты всех четырех характерных точек переключения регулятора R_Φ в оптимальном по быстродействию переходном процессе и позволяют составить систему уравнений для его синтеза согласно методу N-i переключений. Такая система с коэффициентами обратных связей регулятора R_Φ в качестве неизвестных параметров имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} -\Phi_{15} + K_{\Phi\Omega} \Omega_{15} - K_{\Phi\phi} \phi_{15} + \\ + K_{\Phi\omega} \omega_{15} - K_{\Phi\varepsilon} \varepsilon_{15} = 0; \\ -\Phi_7 + K_{\Phi\Omega} \Omega_7 - K_{\Phi\phi} \phi_7 + K_{\Phi\omega} \omega_7 - K_{\Phi\varepsilon} \varepsilon_7 = 0; \\ -\Phi_3 + K_{\Phi\Omega} \Omega_3 - K_{\Phi\phi} \phi_3 + K_{\Phi\omega} \omega_3 - K_{\Phi\varepsilon} \varepsilon_3 = 0; \\ -\Phi_1 + K_{\Phi\Omega} \Omega_1 - K_{\Phi\phi} \phi_1 + K_{\Phi\omega} \omega_1 - K_{\Phi\varepsilon} \varepsilon_1 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Знаки в (8) расставлены с учетом преобразования

(2) расчетных характерных точек $\hat{X}^{i,j}$ в реальные точки переключения на конечном участке траектории. Однако непосредственная подстановка в систему (8) координат состояния, определённых как функ-

ции интервалов T_{si} , приводит к чрезвычайно громоздким преобразованиям при отыскании корней. Кроме того, результатом такой подстановки будут коэффициенты обратных связей, выраженные как явные функции расчётных временных интервалов. Перечисленные методологические проблемы могут быть разрешены путём замены в выражениях координат состояния величин T_{si} постоянными времени замкнутой системы

$$T_a = \frac{\varepsilon_{max}}{a_{max}}; T_\varepsilon = \frac{\omega_{max}}{\varepsilon_{max}}; T_\omega = \frac{\phi_{max}}{\omega_{max}}; T_\phi = \frac{\Omega_{max}}{\phi_{max}}, \quad (9)$$

взаимосвязь которых с интервалами стабилизации на оптимальной траектории установлена для системы четвёртого порядка в [2] и имеет вид:

$$T_{sa} = T_a; T_{se} = T_\varepsilon - T_a; T_{so} = T_\omega - T_\varepsilon - T_a. \quad (10)$$

Выполнив обобщение последовательности (9) для пятого порядка без строгого доказательства, получим

$$T_{sp} = T_\phi - T_\omega - T_\varepsilon - T_a. \quad (11)$$

Замены переменных (9), (11) делают выражения канонических координат гораздо более компактными и существенно упрощают решение системы (8). Так, выражения Ω_{15} , Φ_{15} принимают вид:

$$\Omega_{15} = a_{max} T_a T_\varepsilon T_\omega T_\phi; \quad \Phi_{15} = \frac{1}{2} a_{max} \times \\ \times (T_a^2 T_\varepsilon T_\omega T_\phi + T_a T_\varepsilon^2 T_\omega T_\phi + T_a T_\varepsilon T_\omega^2 T_\phi + T_a T_\varepsilon T_\omega T_\phi^2),$$

а их подстановка в первое уравнение системы (8)

$$(T_a^2 T_\varepsilon T_\omega T_\phi + T_a T_\varepsilon^2 T_\omega T_\phi + T_a T_\varepsilon T_\omega^2 T_\phi + T_a T_\varepsilon T_\omega T_\phi^2) \times \\ \times \left(-\frac{1}{2} a_{max} \right) + a_{max} T_a T_\varepsilon T_\omega T_\phi K_{\Phi\Omega} = 0$$

позволяет отыскать коэффициент обратной связи регулятора положения по скорости:

$$K_{\Phi\Omega} = \frac{1}{2} (T_a + T_\varepsilon + T_\omega + T_\phi). \quad (12)$$

Опустив аналогичные подстановки и выкладки, выполняемые при дальнейшем решении системы (8), приведем полученные в результате коэффициенты обратных связей регулятора положения:

$$K_{\Phi\phi} = \frac{1}{12} (T_a^2 + T_\varepsilon^2 + T_\omega^2) + \\ + \frac{1}{4} (T_a T_\varepsilon + T_a T_\phi + T_a T_\omega + T_\varepsilon T_\omega + T_\varepsilon T_\phi + T_\omega T_\phi); \quad (13)$$

$$K_{\Phi\omega} = \frac{1}{8} (T_a T_\varepsilon T_\omega + T_a T_\varepsilon T_\phi + T_a T_\omega T_\phi + T_\varepsilon T_\omega T_\phi) + \\ + \frac{1}{24} (T_a^2 T_\phi + T_a^2 T_\varepsilon + T_a^2 T_\omega + T_\varepsilon^2 T_\phi + T_\varepsilon^2 T_a + \\ + T_\varepsilon^2 T_\omega + T_\varepsilon T_\omega^2 + T_a T_\omega^2); \quad (14)$$

$$K_{\Phi\varepsilon} = \frac{1}{16} T_a T_\varepsilon T_\omega T_\phi + \frac{1}{144} (T_a^2 T_\omega^2 + T_a^2 T_\varepsilon^2) - \\ - \frac{1}{720} T_a^4 + \frac{1}{48} (T_a^2 T_\varepsilon T_\phi + T_a^2 T_\varepsilon T_\omega + T_a^2 T_\omega T_\phi + \\ + T_a T_\varepsilon^2 T_\phi + T_a T_\varepsilon T_\omega^2 + T_a T_\varepsilon T_\omega^2). \quad (15)$$

Эти коэффициенты непосредственно определяются уровнями ограничений канонических координат системы (1) и могут быть явно представлены как функции величин a_{max} , ε_{max} , ω_{max} , ϕ_{max} , Ω_{max} путём подстановки (9), (11) в выражения (12)–(15).

В совокупности с выведенными в [2] формулами коэффициентов обратных связей внутренних контуров (1*) выражения (12)–(15) определяют параметры релейной системы подчиненного регулирования (1), оптимизированной по быстродействию методом N-i переключений при заданных ограничениях промежуточных координат.

Пример процесса позиционирования, реализованного двухмассовой электромеханической системой при данных настройках регуляторов, представлен на рис. 2, где показаны следующие координаты электропривода: Φ, Ω – угловые положение и скорость выходного вала; M – упругий момент; Ω'_1, M'_1 – приведенные к выходному валу скорость и момент на валу двигателя; U_{Ri} – сигналы регуляторов в о.е. с кратными масштабами, визуально уменьшающими амплитуду сигнала по мере подчиненности регулятора. Приведенная на рис. 2 диаграмма переключений каскада релейных регуляторов демонстрирует перераспределение ими функций поддержания скользящего режима на различных участках воспроизводимой оптимальной по быстродействию траектории за счёт реализации каждым регулятором N-i единичных переключений перед входением в скользящий режим.

Соответствие диаграмм переходных процессов, приведенных на рис. 2, их расчётному виду, приведенному на рис. 1, свидетельствует о корректности выполненного обобщения выражений (9), поскольку полученная таким образом формула (11) использована в ключевых аналитических преобразованиях при выводе выражений (12)–(15).

Следует отметить, что результат данной работы является более универсальным по отношению к синтезированному в [3] регулятору положения двухмассовой электромеханической системы в части, касающейся выражений для коэффициентов. Несмотря на предполагаемую локализацию расчётной траектории, представленной на рис. 1 в области пространства состояний с фиксированными границами, сама форма такой траектории является более общей по отношению к использованной в работе [3] траектории режима малых перемещений. Поэтому полученные в [3] формулы коэффициентов обратных связей являются частным случаем выражений (12)–(15) при $T_{se} = 0$, $T_{so} = 0$, $T_{sp} = 0$. Однако непосредственный их вывод из (12)–(15) является нецелесообразным из-за необходимости громоздких подстановок, обратных выражениям (9), (11).

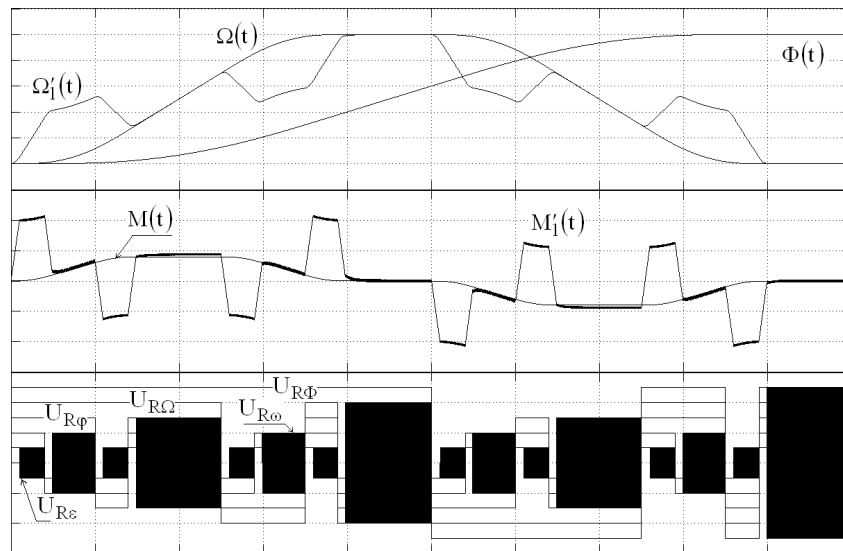


Рисунок 2 – Переходный процесс в синтезированной системе

ВЫВОДЫ. В настоящей работе в аналитической форме синтезированы параметры релейного регулятора положения, обеспечивающие электроприводу с упругой связью оптимальное по быстродействию позиционирование при заданных ограничениях промежуточных координат, реализуемых внутренними контурами системы подчиненного регулирования, настроенными согласно [2]. Данные настройки систем пятого порядка, замкнутых по вектору канонических координат, актуальны для диапазона «больших перемещений», в котором все координаты достигают расчётных уровней ограничения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В., Дерец А.Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2011. – 337 с.

2. Садовой А.В., Дерец А.Л. Параметрический синтез релейной системы подчиненного регулирования скорости электропривода с упругой связью // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. – Кременчуг: КПУ, 2008. – Вып. 3/2008 (50), ч. 1. – С. 83–87.

3. Садовой А.В., Дерец А.Л. Оптимизация по быстродействию режима малых перемещений двухмассовой электромеханической системы методом N-i переключений на подвижных границах области // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника, 2011. – Вып. 03 (79). – С. 89–91.

POINT-TO-POINT CONTROLLER PARAMETERS SYNTHESIS BY N-i SWITCHING METHOD FOR TIME-OPTIMAL SLIDING MODE CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE WITH ELASTIC TRANSMISSION MECHANISM

A. Derets, A. Sadovoy

Dniprodzerzhinsk State Technical University

ul. Dneprostroyevskaya, 2, Dneprodzerzhinsk, 51935, Ukraine. E-mail: ALD_DSTU@i.ua

The fragment of transition trajectory was obtained for fifth-order submissive control system with canonic coordinates limitation. Point-to-point controller parameters synthesis was carried out by n-i switching method for time-optimal sliding mode control system of electric drive with elastic coupling. Presented the simulation results of point-to-point transfer.

Key words: optimization in time domain, N-i switching method.

REFERENCES

1. Sadovoy A.V., Suhinin B.V., Sohina J.V., Derets A.L. *Sliding mode optimal electric drive control systems*. – Dneprodzerzhinsk: DSTU. – 2011. – 337 p. [in Russian]

2. Sadovoy A.V., Derets A.L. Parametric synthesis of sliding mode submissive speed control system for electric drive with elastic transmission mechanism // *Bulletin of Kremenchuk State Politechnical University*. – Kremenchuk: Tehnika, 2011. – № 03 (79). – PP. 83–87. [in Russian]

3. Sadovoy A.V., Derets A.L. Optimization in time domain of small transpositions of two-mass servo-drive by method of N-i switches on movable area borders // *Electrotechnical and Computing Systems*. – K.: Tehnika, 2011. – № 03 (79). – PP. 89–91. [in Russian]

Стаття надійшла 16.07.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Сергіємком С.А.