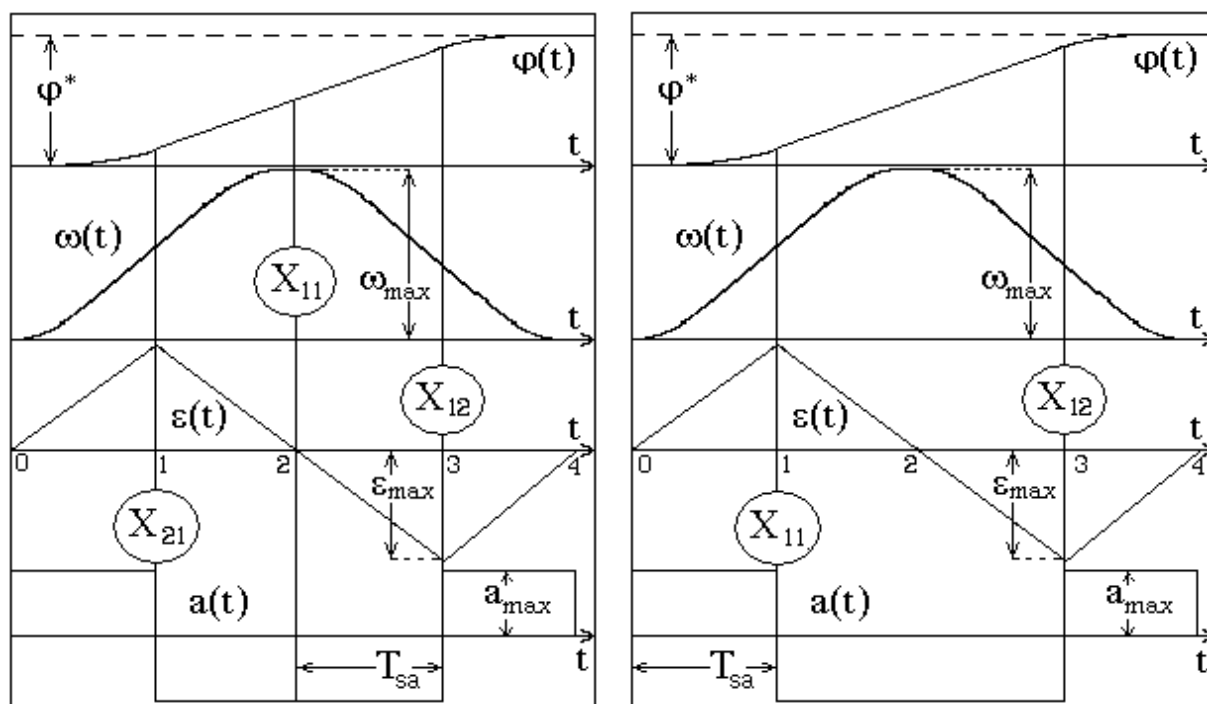


Днепродзержинский государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ N-і ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ ТЕОРЕМЫ ОБ N ИНТЕРВАЛАХ

Введение. Метод N-і переключений предназначен для параметрического синтеза каскада релейных регуляторов, реализующих оптимальный по быстродействию переходный процесс позиционного электропривода в условиях ограничения промежуточных координат. Простота математического аппарата данного метода позволяет адаптировать его к различным формам переходной траектории [1-3], что весьма актуально при построении самонастраивающихся систем. Теорема об N интервалах [4] является одной из теоретических предпосылок метода N-і переключений, а для отдельных режимов, в частности для малых перемещений, она может в явном виде служить составной частью процедуры синтеза.

Постановка задачи. В работе [3] в аналитической форме выполнен синтез системы третьего порядка для динамических режимов, в которых не достигается ни один из наперёд заданных уровней ограничения. При этом в качестве ограничений приняты максимумы, достигаемые каноническими координатами на временных диаграммах, имеющих форму криволинейных треугольников (рис.1, а). Выбор характерных точек переключения регуляторов в данной статье был выполнен из условия согласованной ра-



а) характерные точки каскада регуляторов б) характерные точки единичного регулятора

Рисунок 1 – Траектории режима малых перемещений

боты трёх регуляторов каскада. Синтезированная при таком подходе система подчинённого регулирования в целом обеспечивает переключения управляющего воздей-

вия в соответствии с теоремой об N интервалах, однако для каждого отдельно взятого регулятора данное условие не соблюдается. Вместе с тем структура системы подчинённого регулирования является избыточной для отработки малых перемещений. Для реализации такого режима в соответствии с теоремой об N интервалах настройка на расчётную траекторию необходима только внешнему регулятору трёхконтурной системы. Задачей настоящей работы является развитие результатов работы [3] в направлении всеобъемлющей адаптации математического аппарата метода N-i переключений к форме траектории оптимального по быстродействию переходного процесса.

Результаты работы. Динамика позиционного электропривода описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} p\varphi = \omega; p\omega = \varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot (i - i_c) \\ p\varepsilon = a = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot \frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\varphi, \omega, \varepsilon, a$ – соответственно угловые положение, скорость, ускорение и рывок исполнительного вала; u – напряжение преобразователя; $k_p, R, L, J, c = k\Phi$ – параметры электромеханической системы.

Релейная система управления позиционным электроприводом (1) с каскадно-подчиненным включением регуляторов реализует алгоритмы [3]:

$$\left. \begin{aligned} u_{R\varphi} = \omega^* = \omega_{\max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R\omega} = \varepsilon^* = \varepsilon_{\max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R\varepsilon} = u^* = U_{\max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где символом * отмечены заданные значения соответствующих переменных как входное, так и формируемые регуляторами.

Коэффициенты обратных связей контура регулирования положения

$$K_{\varphi\omega} = T_{sa}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{T_{sa}^2}{2} - \frac{T_{sa}^2}{6} = \frac{T_{sa}^2}{3}, \quad (3)$$

синтезированные в статье [3] для случая выбора характерных точек переключения согласно рис.1, а), обеспечивают электроприводу оптимальное по быстродействию позиционирование и устойчивый скользящий режим регулятора положения R_φ при колебательном движении в малой окрестности точки равновесия. Недопустимость перерегулирований при позиционировании послужила предпосылкой для модификации метода N-i переключений [5], направленной на придание аperiодического характера квазиустановившемуся движению ценой незначительного увеличения длительности переходного процесса.

Исчерпывающим решением задачи адаптации метода N-i переключений к настройке системы управления электроприводом на малые перемещения может стать прямое применение теоремы об N интервалах при выборе характерных точек переключения регулятора положения. Согласно данной теореме регулятор системы третьего порядка должен сформировать в оптимальном по быстродействию переходном процессе три интервала постоянства управляющего воздействия, что целиком согласуется с требованием выбора двух точек переключения в соответствии с методом N-i переключений

чений. Однако в отличие от характерных точек единичных переключений регуляторов R_φ и R_ω каскада (2), обозначенных на рис.1, а) как X_{11}, X_{12} и X_{21} соответственно, изломы расчётных траекторий должны приходиться на моменты переключения регулятора R_φ в точках 1, 3, которые обозначены как характерные точки X_{11}, X_{12} на рис.1, б) и соответствуют моментам изменения знака расчётного рывка.

Процедура прогнозирования точек оптимальной по быстродействию переходной траектории в принятой системе обозначений изложена в публикациях [1-3, 5] и в настоящей работе может быть опущена из-за своей громоздкости. По результатам статьи [3] координаты точек расчётной траектории 1 и 3, принятых в качестве характерных для регулятора положения, выражаются через интервал T_{sa} следующим образом:

$$\Delta\varphi_{11} = \varphi^* - \varphi_1 = \varphi_4 - \varphi_1 = 2 \cdot a_{\max} \cdot T_{sa}^3 - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}, \quad \omega_{11} = \omega_1 = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2}, \quad \varepsilon_{12} = a_{\max} \cdot T_{sa};$$

$$\Delta\varphi_{12} = \varphi^* - \varphi_3 = \varphi_4 - \varphi_3 = \varphi_1 = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}, \quad \omega_{12} = \omega_3 = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2}, \quad \varepsilon_{12} = -a_{\max} \cdot T_{sa}.$$

Их подстановка в систему уравнений переключения

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{11} - K_{\varphi\omega} \cdot \omega_{11} - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon_{11} &= 0 \\ \Delta\varphi_{12} - K_{\varphi\omega} \cdot \omega_{12} - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon_{12} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

позволяет методом N-i переключений определить искомые коэффициенты обратных связей регулятора положения. Опустив выкладки, аналогичные изложенным в статьях [1-3], приведём аналитические выражения коэффициентов, представленных как функции расчётной длительности интервалов постоянства управляющего воздействия T_{sa} :

$$K_{\varphi\omega} = 2T_{sa}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{5}{6}T_{sa}^2, \quad (4)$$

где T_{sa} в свою очередь является функцией воспроизводимого углового перемещения φ^* :

$$T_{sa} = \sqrt[3]{\frac{|\varphi^*|}{2 \cdot a_{\max}}}. \quad (5)$$

Полученные настройки регулятора положения, реализующего все необходимые в оптимальном по быстродействию переходном процессе переключения управляющего воздействия, позволяют реализовать систему управления позиционным электроприводом как одноконтурную, исключив из алгоритма (2) внутренние контуры при отработке малых перемещений и реализовав управление по алгоритму

$$u_{pp} = u^* = U_{\max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon). \quad (6)$$

Особо отметим, что реализация всех единичных переключений регулятором положения не противоречит сохранению в структуре системы управления внутренних контуров регулирования скорости и ускорения, на которые возлагается функция временного удержания изображающей точки системы в заданных границах области пространства состояний при ударном приложении возмущающих воздействий и разного рода аварийных режимах, таких как обрыв главной обратной связи и т.п. В штатных режимах работа R_ω, R_ε каскада (2) сведётся к повторению переключений R_φ (рис.2)

с изменением масштаба его выходного сигнала с ω_{\max} на u_{\max} в соответствии с системой уравнений (2). Для таких случаев настройка внутренних регуляторов каскада (2) осуществляется согласно работе [3]:

$$\varepsilon_{\max} = a_{\max} \cdot T_{sa}, \quad \omega_{\max} = a_{\max} \cdot T_{sa}^2, \quad K_{\omega\varepsilon} = \frac{T_{sa}}{2}. \quad (7)$$

Результаты моделирования переходных процессов в синтезированной системе управления третьего порядка представлены на рис.2. Сигналы регуляторов показаны в относительных единицах с кратными масштабами, визуально уменьшающими амплитуду сигнала по мере подчиненности регулятора. Диаграмма переключений релейных регуляторов демонстрирует синхронную работу каскада (2) при отработке «малого треугольника». Данный режим является частным случаем работы системы подчинённого регулирования, ориентированной на воспроизведение траекторий более общей формы. Характер переключений R_{φ} удовлетворяет требованиям теоремы об N интервалах, что свидетельствует об оптимальности синтезированной системы по быстродействию. Соответствие диаграмм переходных процессов, приведенных на рис.2, их расчётному виду, приведенному на рис.1, б), свидетельствует о корректности аналитических результатов работы.

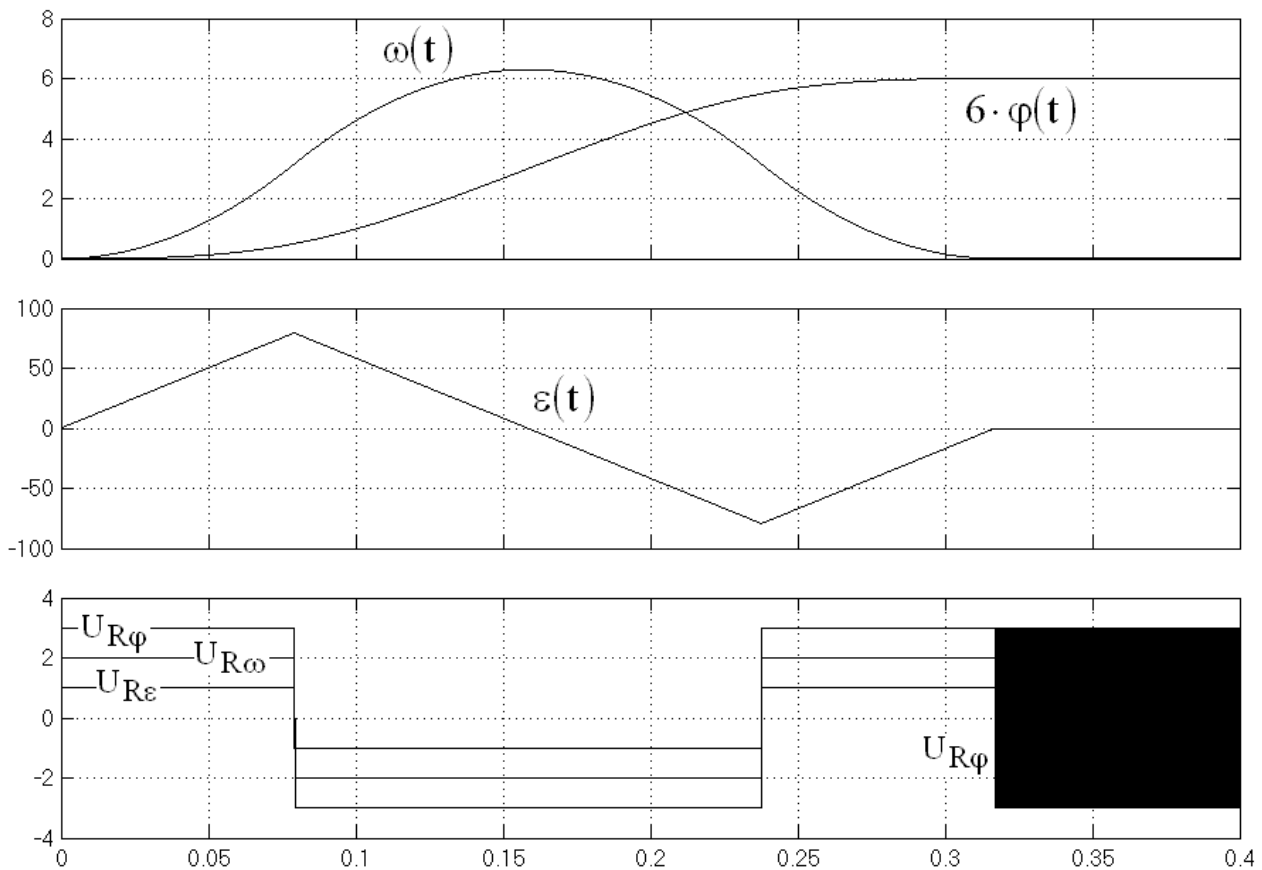


Рисунок 2 – Переходные процессы в синтезированной системе

Возможность однозначного выражения коэффициентов обратных связей контура регулирования положения, настроенного на оптимальную по быстродействию отработку малых перемещений, через величину T_{sa} и расчётное ограничение рывка a_{\max} позволяет аналитически выполнить оценку устойчивости скользящего режима R_{φ} .

Характеристическое уравнение регулятора положения с параметрами (4)

$$\frac{5}{6} T_{sa}^2 \cdot p^2 + 2T_{sa} \cdot p + 1 = 0$$

всегда имеет отрицательные действительные корни

$$p_{1,2} = -\frac{1}{5T_{sa}} (6 \pm \sqrt{6}). \quad (8)$$

Данное обстоятельство весьма существенно для позиционных электроприводов, поскольку придаёт апериодический характер движению системы управления как при больших отклонениях от заданного состояния, так и в малой окрестности точки равновесия.

Окончательно предлагаемый алгоритм настройки релейной системы регулирования положения на осуществление малого перемещения произвольной величины принимает следующий вид. Для структуры с единичным регулятором (6) настройка сводится к выполнению последовательности вычислений по формулам (5), (4), а для полного каскада (2) – к последовательности формул (5), (4), (7). В обоих случаях оптимальная переходная траектория и корни (8) в явном виде не рассчитываются.

Выводы. Непосредственное применение теоремы об N интервалах в составе оригинальной процедуры определения параметров методом N-i переключений обеспечивает позиционному электроприводу предельное быстродействие в процессе отработки малых перемещений и апериодический характер движения в скользящем режиме. Результаты данной работы, полученные для системы управления позиционным электроприводом, замкнутой по вектору канонических координат, могут быть распространены на все синтезированные данным методом системы третьего порядка, замкнутые по старшим производным выходной величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовой А.В. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N-i переключений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник НТУ ХПИ. Серия «Электротехника, электроника, электропривод», выпуск 45 "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков. – 2005. – С.71-73.
2. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию режимов средних перемещений позиционных релейных СУЭП методом N-i переключений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007.– С.420-422.
3. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию методом N-i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник КГПУ. – Кременчуг. – 2007. – Выпуск 3/2007 (44). – С.15-17.
4. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / Фельдбаум А.А. – М.: Наука, 1966. – 624с.
5. Дерез А.Л. Синтез квазиоптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП с апериодическим входением в скользящий режим / Дерез А.Л. // Научные труды Донецкого технического университета. Серия „Электротехника и энергетика“. – Донецк: ДонТУ. – 2007. – Выпуск 7 (128). – С.72-75.

Поступила в редколлегию 27.06.2013.