

ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РЕЖИМОВ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОЗИЦИОННЫХ РЕЛЕЙНЫХ СУЭП МЕТОДОМ N-i ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Введение. Синтез релейных систем подчиненного регулирования (СПР) методом N-i переключений [1] обеспечивает формирование предельно-апериодического переходного процесса в условиях ограничения промежуточных координат. В [2] получена аналитическая связь параметров регуляторов с уровнями ограничения промежуточных координат электрохимической системы, при которой оптимальное по быстродействию позиционирование осуществляется в режиме больших перемещений. Однако, отклонение систем с фиксированными параметрами от расчетной трапецеидальной траектории, возникающее, в частности, в режимах малых и средних перемещений, приводит к неоправданному увеличению длительности позиционирования.

Постановка задачи исследования. Широкое распространение микропроцессорных контроллеров делает возможной адаптацию законов управления, синтезируемых методом N-i переключений, к изменению формы переходной траектории. В [3, 4] обоснована необходимость ограничения промежуточных координат систем управления с медленными внутренними контурами, что приводит к формированию оптимальных по быстродействию процессов с треугольными диаграммами ускорения или рывка. В [5] изложен синтез релейной системы подчиненного регулирования, осуществляющей оптимальное по быстродействию позиционирование в режиме малых перемещений, когда все промежуточные координаты не достигают ограничений, устанавливаемых из соображений электрической и механической прочности объекта управления. В таком режиме все текущие параметры релейной СПР целиком определяются величиной скачка перемещения. Простота расчетной процедуры данного метода допускает модификацию настроек регуляторов в реальном времени. Целью настоящей работы является разработка алгоритма оптимизации по быстродействию режима средних перемещений релейной системы путем определения ее параметров, исходя из величины перемещения.

Материалы исследования. Применительно к позиционному электроприводу, динамика которого описывается системой дифференциальных уравнений

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

метод N-i переключений приводит к построению каскадно-подчиненной системы регуляторов, реализующей алгоритмы управления:

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

где $\varphi, \omega, \varepsilon, a$ - соответственно угловые положение, скорость, ускорение и рывок исполнительного вала, u - напряжение преобразователя; символом * отмечены заданные значения соответствующих переменных, как входные, так и формируемые регуляторами для подчиненных им контуров; $k_p, R, L, J, c = k\Phi$ - параметры электропривода; индексами max отмечены уровни ограничения координат состояния.

Согласно [2], коэффициенты обратных связей оптимальной по быстродействию СПР определяются как

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}, \quad K_{\varphi\omega} = \frac{\omega_{\max}}{2 \cdot \varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\omega_{\max}}{4 \cdot a_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}^2}{12 \cdot a_{\max}^2}. \quad (3)$$

Упорядоченное вхождение регуляторов в скользящий режим достигается, благодаря организации N-i переключений каждого i-го (считая от входа) регулятора в окрестностях характерных точек оптимальной траектории [1]. Такая способность системы основана на предварительном прогнозировании переходных траекторий, предопределенных заложенными в регуляторах уровнями ограничения производных ошибки. Однако, в режиме сред-

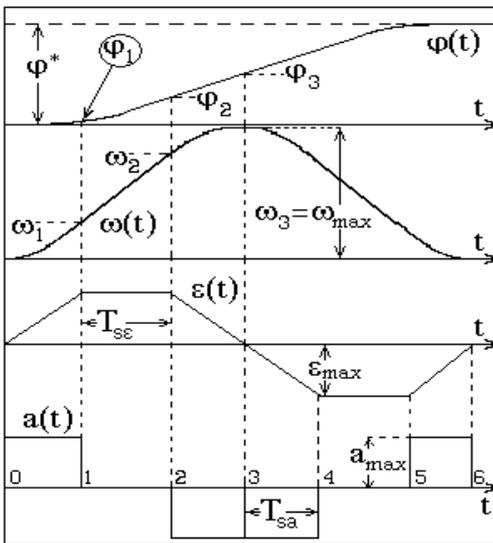


Рисунок 1 – Траектории режима средних перемещений

них перемещений (рисунок 1) максимальная скорость, достигаемая в переходном процессе, меньше найденного по предельным характеристикам электромеханической системы уровня ограничения, действующего в режиме больших перемещений. Эта скорость зависит от величины заданного перемещения и, следовательно, должна рассчитываться как функция заданного перемещения при каждом скачкообразном изменении φ^* . СУЭП с уточненными таким образом уровнями ограничения и определенными по ним коэффициентами обратных связей обеспечит формирование оптимального по быстродействию переходного процесса.

Представленная на рисунке 1 траектория построена при условии ограничения рывка и ускорения на предварительно определенных уровнях a_{\max} , ε_{\max} . Длительности стабилизации рывка и ускорения обозначены как T_{sa} , T_{se} соответственно. Для установления зависимости ω_{\max} от φ^* выразим величину углового перемещения, осуществляемого при движении по типовой траектории режима средних перемещений, через фиксированные ограничения a_{\max} , ε_{\max} и варьируемую ω_{\max} . Определим координаты состояния в точках переключения управляющего воздействия, для чего разобьем траекторию оптимального по быстродействию процесса отработки малого перемещения φ^* на шесть участков, границы которых на рисунке 1 отмечены точками 0 - 6. Благодаря допущению о стабилизации рывка на интервалах T_{sa} на уровнях $\pm a_{\max}$, значения переменных состояния в точках 1 - 6 рассчитываются как суммы ряда Тейлора с конечным числом членов.

При нулевых начальных условиях выполним интегрирование по времени системы (1) на участке 0-1 с постоянным рывком $a_{0-1} = a_{\max}$, в результате получим координаты состояния в точке 1 оптимальной траектории:

$$\omega_1 = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2}; \quad \varepsilon_1 = a_{\max} \cdot T_{sa} = \varepsilon_{\max}; \quad \varphi_1 = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}.$$

Значения вектора состояния в точке 2 получим путем интегрирования по времени системы (1) на участке 1-2 при начальных условиях, соответствующих состоянию в точке 1, и нулевом рывке $a_{1-2} = 0$:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0 = \varepsilon_{\max}; \quad \omega_2 = \omega_1 + \varepsilon_{\max} \cdot T_{se}; \quad \text{тогда} \quad \varphi_2 = \varphi_1 + \omega_1 \cdot T_{se} + \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{se}^2}{2}.$$

Значения вектора состояния в точке 3 получим путем интегрирования системы (1) на участке 2-3 при начальных условиях, соответствующих состоянию в точке 2, и постоянном отрицательном рывке $a_{2-3} = -a_{\max}$:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 - a_{\max} \cdot T_{sa} = \varepsilon_{\max};$$

$$\omega_3 = \omega_2 + \varepsilon_{\max} \cdot T_{sa} - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} = \omega_{\max}; \quad (4)$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 + \omega_2 \cdot T_{sa} + \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}. \quad (5)$$

Продолжив интегрирование системы (1) до точки 6, можно получить величину воспроизводимого скачка $\varphi_6 = \varphi^*$, однако с учетом симметрии расчетной траектории допустимо при установлении связи отработываемого скачка положения с максимумами промежуточных координат ограничиться выражением $2\varphi_3 = \varphi^*$.

Подстановка в (5) полученных выше выражений для φ^* , φ_1 , φ_2 , ω_1 , ω_2 позволяет представить заданное перемещение как функцию интервалов стабилизации промежуточных координат в оптимальном по быстродействию переходном процессе:

$$\frac{\varphi^*}{2} = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6} + a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} \cdot T_{se} + \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{se}^2}{2} + \left(a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} + \varepsilon_{\max} \cdot T_{se} \right) \cdot T_{sa} + \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}. \quad (6)$$

В рассматриваемом режиме средних перемещений длительность стабилизации ускорения

$$T_{se} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\varepsilon_{\max}}, \quad (7)$$

является неизвестной на этапе расчета траектории, поскольку скорость в точке 2 зависит от искомой ω_{\max} согласно выражению (4). Упростив (4) с учетом равенства $a_{\max} \cdot T_{sa} = \varepsilon_{\max}$, получим

$$\omega_{\max} = \omega_2 + \varepsilon_{\max} \cdot T_{sa} - \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{sa}}{2} = \omega_2 + a_{\max} \cdot T_{sa}^2 - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} = \omega_2 + a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2},$$

откуда выразим $\omega_2 = \omega_{\max} - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2}$ и подставим в (7), что позволит выразить T_{se} через ω_{\max} как

$$T_{se} = \frac{\omega_{\max} - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} - \omega_1}{\varepsilon_{\max}}. \quad \text{С учетом } \omega_1 = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} \text{ получим } T_{se} = \frac{\omega_{\max} - a_{\max} \cdot T_{sa}^2}{\varepsilon_{\max}}.$$

Подстановка полученного выражения для T_{se} в (6) дает уравнение, связывающее максимальную скорость режима большого треугольника с обрабатываемым скачком перемещения:

$$\frac{\varphi^*}{2} = a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6} + a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} \cdot \frac{\omega_{\max} - a_{\max} \cdot T_{sa}}{\varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2} \cdot \left(\frac{\omega_{\max} - a_{\max} \cdot T_{sa}}{\varepsilon_{\max}} \right)^2 + \left(a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} + \varepsilon_{\max} \cdot \frac{\omega_{\max} - a_{\max} \cdot T_{sa}}{\varepsilon_{\max}} \right) \cdot T_{sa} + \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^2}{2} - a_{\max} \cdot \frac{T_{sa}^3}{6}.$$

После упрощения получим квадратное уравнение с неизвестной ω_{\max}

$$\omega_{\max}^2 \cdot \frac{1}{\varepsilon_{\max}} + \omega_{\max} \cdot \frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}} - \varphi^* = 0 \quad \text{и найдем его корни в виде} \quad \omega_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{2} \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}} \right)^2 + \frac{4 \cdot \varphi^*}{\varepsilon_{\max}}} \right).$$

Отбросив не имеющий физического смысла отрицательный корень, получим формулу для расчета уровня ограничения скорости в зависимости от скачка задающего воздействия для режима средних перемещений:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}} \right)^2 + \varphi^* \cdot \varepsilon_{\max}} - \frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}} = \sqrt{\omega_1^2 + \varphi^* \cdot \varepsilon_{\max}} - \omega_1. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (3) дает значения коэффициентов обратных связей контура регулирования положения релейной СПР, настроенного на выполнение переключений в двух ($N-i=3-1=2$) точках переходной траектории, соответствующих точкам 3, 5 расчетной (рисунок 1):

$$K_{\varphi\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}} \right)^2 + \varphi^* \cdot \varepsilon_{\max}} - \frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}}}{2 \cdot \varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{4 \cdot a_{\max}} \right)^2 + \frac{\varphi^*}{4 \cdot \varepsilon_{\max}}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{4 \cdot a_{\max}}, \quad (9)$$

$$K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}} \right)^2 + \varphi^* \cdot \varepsilon_{\max}} - \frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}}}{4 \cdot a_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}^2}{12 \cdot a_{\max}^2} = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}} \right)^2 + \varphi^* \cdot \frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}^2}} - \frac{\varepsilon_{\max}^2}{6 \cdot a_{\max}^2} \right). \quad (10)$$

Наряду с расчетом коэффициентов обратных связей перенастройка системы (2) на среднее перемещение требует также присвоения уровню ограничения скорости (система (2), первое уравнение) нового значения, найденного с применением (8) и определяемого величиной скачка φ^* .

Заметим, что полученный алгоритм адаптации к величине скачка применим для режимов, в которых расчетная величина T_{se} неотрицательна. В противном случае СУЭП входит в режим малых перемещений, для которого вступает в силу алгоритм модификации параметров, изложенный в [5].

Вывод. Примененный в данной работе способ построения переходной траектории и отыскания максимальной скорости как функции заданного скачка перемещения в контексте метода N-i переключений является вспомогательным этапом оригинальной процедуры определения параметров замкнутой по вектору состояния системы на основании желаемого вида ее временной характеристики. Предложенный в виде последовательности вычислений по формулам (8), (9), (10) алгоритм определения параметров релейной системы подчиненного регулирования как функций скачка задающего воздействия может быть использован для настройки позиционного электропривода на оптимальную по быстродействию обработку произвольного среднего перемещения.

Литература.

1. Садовой А.В., Дерез А.Л. Оптимизация по быстродействию релейных систем подчиненного регулирования методом N-i переключений - Вестник НТУ ХПИ Серия «Электротехника, электроника, электропривод», "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" – Харьков, 2004, №43. - С.53 - 56.
2. Садовой А.В., Дерез А.Л. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N-i переключений - Вестник НТУ ХПИ Серия «Электротехника, электроника, электропривод», "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" – Харьков, 2005, №45. - С.71 - 73.
3. Садовой А.В., Дерез А.Л. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N-i переключений - Вестник КГПУ. Выпуск 3/2006 (38), Кременчуг 2006. - С.21-22.
4. Садовой А.В., Дерез А.Л. Ограничение рывка в системе управляемый преобразователь-двигатель при оптимизации по быстродействию – В тематическом выпуске "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" межведомственного научно-технического сборника «Электромашиностроение и электрооборудование». – Киев: Техника, 2006. - С.64-65.

5. Садовой А.В., Дерез А.Л. Оптимизация по быстродействию методом N-i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода - Вестник КГПУ. Выпуск 3/2007 (44), Кременчуг 2007. - С.15-17.

Садовой О.В., Дереть О.Л.

Оптимізація за швидкістю режимів середніх переміщень позиційних релейних СУЕП методом N-і переключень

В роботі отримано співвідношення заданої величини переміщення та параметрів релейної системи регулювання, які забезпечують оптимальний за швидкістю перехідний процес позиційного електроприводу.

Sadovoy A.V., Derets A.L.

Optimization in time domain of “medium transposition” of sliding mode control servo-drives with “N-i switching” method

In this paper obtained correlation for magnitude of performing transposition with parameters of sliding mode control system, which provides time-optimal transient for servo-drive applications.