

УДК 62-83

**А. В. Садовой**, д-р техн. наук

**А. Л. Дерец**, канд. техн. наук,

### **АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ К ИЗМЕНЕНИЮ ФОРМЫ ПЕРЕХОДНОЙ ТРАЕКТОРИИ**

***Аннотация.** Представлен алгоритм адаптации настроек релейной системы подчинённого регулирования к изменению формы траектории переходного процесса, протекающего в условиях ограничения канонических координат, в зависимости от величины задающего воздействия. Применение такого алгоритма позволит осуществить оптимизацию позиционного электропривода по быстродействию методом N-i переключений для любого диапазона перемещений.*

***Ключевые слова:** адаптивная система управления, позиционный электропривод, оптимальность по быстродействию, переходная траектория, скользящий режим, метод N-i переключений*

**A. Derets**, PhD.,

**A. Sadovoy**, ScD.

### **ADAPTATION OF TIME-OPTIMAL SERVO-DRIVE CONTROL SYSTEM TO TRANSIENT TRAJECTORY FORM VARIATION**

***Abstract.** The article presents an algorithm of sliding mode submissive control system settings adaptation to transient trajectory form variation with condition of canonic coordinate's limitation according to master control magnitude. Application of such algorithm would allow carrying out optimization in time domain of servo drive for any range of positioning.*

***Keywords:** adaptive control system, servo-drive, optimality in time domain, transient trajectory, sliding mode, N-i switches method*

**О. Л. Дерец**, канд. техн. наук,

**О. В. Садовой**, д-р техн. наук

### **АДАПТАЦІЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІЙНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДО ЗМІНИ ФОРМИ ПЕРЕХІДНОЇ ТРАЄКТОРІЇ**

***Анотація.** Представлено алгоритм адаптації налаштувань релейної системи підпорядкованого регулювання до зміни форми траєкторії перехідного процесу, що протікає в умовах обмеження канонічних координат, в залежності від величини задаючого впливу. Застосування такого алгоритму дозволить здійснити оптимізацію позиційного електропривода за швидкодією для будь-якого діапазону переміщень.*

***Ключові слова:** адаптивна система керування, позиційний електропривод, оптимальність за швидкодією, перехідна траєкторія, ковзний режим, метод N-i перемикачів*

**Введение.** Классические методы оптимизации систем управления [1, 2] приводят к синтезу релейных регуляторов, для которых предельное быстродействие является структурным свойством [3]. Однако применение таких методов в условиях характерного для электромеханических систем (ЭМС) ограничения промежуточных координат сопряжено с чрезмерным усложнением процедуры структурно-алгоритмического синтеза. Простое и эффективное решение данной проблемы было найдено авторами на основе обобщения теоремы об N интервалах [2] на каскадно-подчинённую структуру релейной системы управления. Разработанный в результате «метод N-i переключений» обеспечивает электромеханическим системам максимальное при заданных ограничениях быстродействие [4] в сочетании с устойчивостью скользящих режимов всех контуров регулирования.

**Постановка задачи исследования.** Программная реализация метода N-i переключений в виде универсальной численной процедуры изложена в работе

© Садовой А.В., Дерец А.Л., , 2014

[4] для систем произвольного порядка с фиксированными настройками. С массовым распространением цифровых контроллеров стала доступной адаптация настроек синтезируемых данным методом систем к изменению формы траектории оптимального по быстродействию переходного процесса в зависимости от диапазона воспроизводимого перемещения. В работах [5 – 10] представлены аналитические результаты синтеза методом N-i переключений системы разрывного управления при настройке на отработку отдельных типовых режимов позиционного электропривода, в частности, режимов большого, среднего и малого перемещений. Задача настоящей работы состоит в построении интегрированного алгоритма расчёта параметров релейной системы подчинённого регулирования, призванного обеспечить автоматическую самонастройку такой системы на воспроизведение оптимальной для текущего режима позиционирования переходной траектории.

**Материалы исследования.** Динамика системы управления позиционным электроприводом с каскад-

но-подчиненным включением релейных регуляторов описывается системами уравнений

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

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

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.

Коэффициенты обратных связей, синтезированные в работе [5], являются функциями уровней ограничения канонических координат

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

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}. \quad (3)$$

Выражения (3) актуальны для всех видов позиционирования, устойчивость скользких режимов регуляторов (2) с коэффициентами обратных связей (3) доказана в работе [6]. Наряду с величиной заданного перемещения  $\varphi^*$  уровни ограничений

$$\omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max}^*, a_{\max}^*, \quad (4)$$

продиктованные соображениями электрической и механической прочности ЭМС (1), служат исходными данными для процедуры параметрического синтеза регуляторов (2). Они представлены на блок-схеме разрабатываемого алгоритма самонастройки (рис. 1) блоком 1, осуществляющим присвоение

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^* \cdot \varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\max}^* \cdot a_{\max} = a_{\max}^*. \quad (5)$$

В статье [7] обоснована необходимость предварительной проверки реализуемости траектории оптимального по быстродействию переходного процесса при заданных ограничениях (5) по условию

$$\omega_{\max} / \varepsilon_{\max} > \varepsilon_{\max} / a_{\max} \quad (6)$$

(блок 2) с коррекцией уровня ограничения ускорения, реализуемого в блоке 3 по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\omega_{\max} \cdot a_{\max}}. \quad (7)$$

При воспроизведении скачка задающего воздействия, удовлетворяющего условию принадлежности диапазону малых перемещений [8]

$$|\varphi^*| \leq 2 \cdot \varepsilon_{\max}^3 / a_{\max}^2, \quad (8)$$

проверяемому в блоке 4, расчётные максимумы канонических координат определяются в блоке 5 согласно результатам работы [8]:

$$T_{sa} = \sqrt[3]{\frac{|\varphi^*|}{2 \cdot a_{\max}}}, \quad \varepsilon_{\max} = a_{\max} \cdot T_{sa}, \quad \omega_{\max} = a_{\max} \cdot T_{sa}^2. \quad (9)$$

Для задающих воздействий, превышающих предел малых перемещений, в блоке 6 проверяется условие принадлежности диапазону средних перемещений

$$|\varphi^*| < \omega_{\max}^2 / (2 \cdot \varepsilon_{\max}) + \omega_{\max} \cdot \varepsilon_{\max} / (2 \cdot a_{\max}), \quad (10)$$

а расчётный максимум скорости определяется в блоке 7 по результатам работы [9]:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}}\right)^2 + \varphi^* \cdot \varepsilon_{\max} - \frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}}}. \quad (11)$$

Для скачков  $\varphi^*$ , превышающих предел средних перемещений, выполняется подстановка значений (5), (7) в формулы (3), определяющая параметры каскада (2) для режима большого перемещения (блок 8). Один из возможных способов расчёта ограничений (5) рассмотрен в работе [10].

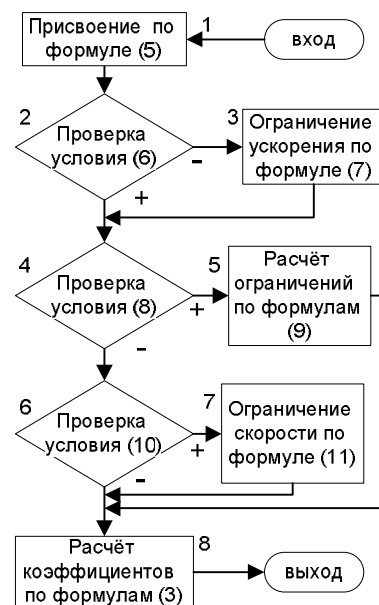


Рис. 1. Блок-схема алгоритма самонастройки

**Вывод.** Разработанный на основании результатов работ [5, 7, 8, 9] интегрированный алгоритм самонастройки релейной системы подчиненного регулирования обеспечивает адаптацию позиционного электропривода к изменению формы оптимальной по быстродействию переходной траектории во всём диапазоне воспроизводимых перемещений.

#### Список использованной литературы

1. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкредидзе, Е. Ф. Мищенко. – М. : Физматгиз, 1961. – 392 с.

2. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М. : Наука, 1966. – 624 с.

3. Цыпкин Я. З. Релейные автоматические системы / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1974. – 576 с.

4. Садовой А. В. Релейные системы оптимального управления электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина, А. Л. Дерез. – Днепропетровск : ДГТУ, 2011. – 337 с.

5. Садовой А. В. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N–i переключений / А. В. Садовой, А. Л. Дерез // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков : – 2005. – № 45. – С. 71 – 73.

6. Садовой А. В. Анализ характера скользящего режима оптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП / А. В. Садовой, А. Л. Дерез // Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепропетровск : – 2008. – Вып. 8. – С. 21 – 22.

7. Садовой А. В. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N–i переключений / А. В. Садовой, А. Л. Дерез // Вестник КППУ. – Кременчуг : – 2006. – Вып. 3/2006 (38). – С. 21 – 22.

8. Садовой А. В. Оптимизация по быстродействию методом N–i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода / А. В. Садовой, А. Л. Дерез // Вестник КППУ. – Кременчуг : – 2007. – Вып. 3/2007 (44). – С. 15 – 17.

9. Садовой А. В. Оптимизация по быстродействию режимов средних перемещений позиционных релейных СУЭП методом N–i переключений / А. В. Садовой, А. Л. Дерез // Сборник научных трудов ДГТУ. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепропетровск : – 2007. – С. 420 – 422.

10. Садовой О. В. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем / О. В. Садовой, О. Л. Дерезь. – Дніпропетровськ : ДДТУ, 2014. – 206 с.

Получено 06.07.2014

#### References

1. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., and Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* / [Mathematical theory of Optimal Processes], (1961), *Fizmatgiz Publ.*, Moscow, Russian Federation, 392 p. (In Russian).

2. Fel'dbaum A.A. *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem* [Theoretical Background of Optimal Automatic Systems], (1966), *Nauka Publ.*, Moscow, Russian Federation, 624 p. (In Russian).

3. Tsytkin Ya.Z. *Releinye avtomaticheskie sistemy* [Sliding-Mode Control Automatic Systems], (1974), *Nauka Publ.*, Moscow, Russian Federation, 576 p. (In Russian).

4. Sadovoi A.V., Sukhinin B.V., Sokhina Yu.V., and Derets A.L. *Releinye sistemy optimal'nogo upravleniya elektropriivodami* [Sliding-Mode Optimal Electric Drives Control Systems], (2011), *Dneprodzerzhinsk St. Techn. Univ*, Dneprodzerzhinsk, Ukraine, 337 p. (In Russian)

5. Sadovoi A.V., and Derets A.L. *Parametricheskii sintez pozitsionnykh releinykh sistem podchinennogo regulirovaniya metodom N–i pereklyuchenii* [Parametric Synthesis of Positional Sliding Mode Submissive Control Systems with N–i Switches Method], (2005), *Vestnik NTU KhPI. "Problemy Avtomatizirovannogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika"*, Khar'kov, Ukraine, Vol.45. pp.71 – 73 (In Russian).

6. Sadovoi A.V., and Derets A.L. *Analiz kharaktera skol'zyashchego rezhima optimal'noi po bystrodeistviyu pozitsionnoi releinoi SUEP* [Analysis of Sliding Mode of Time-Optimal Servo-Drive], (2008), *Sbornik Nauchnykh Trudov DGTU*, Dneprodzerzhinsk, Ukraine, Vol. 8. pp. 21 – 22 (In Russian),

7. Sadovoi A.V., and Derets A.L. *Ratsional'noe ograniichenie uskoreniya elektropriivodov, sinteziruemykh metodom N–i pereklyuchenii* [Rational Acceleration Limitation for Electric Drives with N–i Switches Method], (2006), *Vestnik KGPU*, Kremenchug, Ukraine, Vol. 3/2006 (38), pp. 21 – 22 (In Russian).

8. Sadovoi A.V., and Derets A.L. *Optimizatsiya po bystrodeistviyu metodom N–i pereklyuchenii rezhimov malykh peremeshchenii pozitsionnogo elektropriivoda* [Optimization in Time Domain of Servo-Drives in Small Transference mode with N–i switches Method], (2007), *Vestnik KGPU*, Kremenchug, Ukraine, Vol. 3/2007 (44). – pp. 15 – 17 (In Russian).

9. Sadovoi A.V., and Derets A.L. *Optimizatsiya po bystrodeistviyu rezhimov srednykh peremeshchenii pozitsionnykh releinykh SUEP metodom N–i pereklyuchenii* [Optimization in Time Domain of Sliding-Mode Control Servo-Drives in Middle Transference Mode with N–i Switches Method], (2007), *Sbornik Nauchnykh Trudov DGTU. "Problemy Avtomatizirovannogo Elektroprivoda. Teoriya i Praktika"*, Dneprodzerzhinsk, Ukraine, pp. 420 – 422 (In Russian).

10. Sadovoi O.V., and Derets' O.L. *Spetsial'ni pitannya matematichnogo opisu i modelyuvannya dynamiki skladnykh sistem* [Special Problems of Mathematical Description and Dynamic Simulation of Complicated Systems], (2014), *Dneprodzerzhinsk St. Techn. Univ*, Dneprodzerzhinsk, Ukraine, 206 p. (In Ukrainian).



Дерез

Александр Леонидович, канд. техн. наук, доц. каф. электротехники и электромеханики Днепропетровского государственного технического ун-та, г. Днепропетровск, ул. Днепропетровская, 2, р/тел. (80569) 55-20-05. E-mail:ald\_dstu@i.ua



Садовой

Александр Валентинович, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе Днепропетровского государственного технического ун-та, г. Днепропетровск, ул. Днепропетровская, 2, р/тел. (80569) 55-12-87. E-mail:alsadovoy@mail.ru