

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 62-83

ДЕРЕЦ А.Л., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., професор

Днепровский государственный технический университет, г. Камянское

АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕТВЁРТОГО ПОРЯДКА, СИНТЕЗИРОВАННОЙ МЕТОДОМ N-i ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ, К ИЗМЕНЕНИЮ ФОРМЫ ПЕРЕХОДНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Введение. Предельное быстродействие является структурным свойством систем разрывного управления. Однако применение классических методов оптимизации [1] в условиях характерного для электроприводов ограничения промежуточных координат сопряжено с чрезмерным усложнением процедуры структурно-алгоритмического синтеза, которое усугубляется с ростом порядка системы. Простое и эффективное решение данной проблемы было найдено авторами на основе обобщения теоремы об N интервалах [1] на каскадно-подчинённую структуру релейной системы управления. Разработанный в результате «метод N-i переключений» обеспечивает электромеханическим системам (ЭМС) максимальное при заданных ограничениях быстродействие [2] в сочетании с устойчивостью скользящих режимов всех контуров регулирования.

Постановка задачи. Реализация метода N-i переключений в виде универсальной численной процедуры изложена в работе [2] 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 скачка задающего воздействия.

Рассмотрим нейтрально-устойчивый динамический объект четвёртого порядка, моделируемый каскадом интегрирующих звеньев, вектор координат состояния которого обозначим

$$\left(\Omega, p\Omega, p^2\Omega, p^3\Omega, p^4\Omega \right) = \left(\Omega, \varphi, \omega, \varepsilon, a \right), \quad (1)$$

где Ω – регулируемая величина, a – управляющее воздействие, $p = \frac{d}{dt}$ – символ дифференцирования по времени.

В системе обозначений (1) математическое описание каскада регуляторов релейной системы подчинённого регулирования (СПР) четвёртого порядка имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{R\Omega} = u_{R1} = \varphi^* &= -\varphi_{\max} \cdot \text{sign} \left(\Omega - \Omega^* + K_{\Omega\varphi} \cdot \varphi + K_{\Omega\omega} \cdot \omega + K_{\Omega\varepsilon} \cdot \varepsilon \right) \\ u_{R\varphi} = u_{R2} = \omega^* &= -\omega_{\max} \cdot \text{sign} \left(\varphi - \varphi^* + K_{\varphi\omega} \cdot \omega + K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon \right) \\ u_{R\omega} = u_{R3} = \varepsilon^* &= -\varepsilon_{\max} \cdot \text{sign} \left(\omega - \omega^* + K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon \right) \\ u_{R\varepsilon} = u_{R4} = a^* &= -a_{\max} \cdot \text{sign} \left(\varepsilon - \varepsilon^* \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где u_{Ri} – сигнал i-го (считая от входа) регулятора; символом «*» отмечены заданные значения координат, как входное, так и формируемые регуляторами; индексами «max» отмечены уровни ограничений канонических координат. Двойная индексация регуляторов указывает на их положение в иерархии каскада и на привязку к регулируемой переменной.

В работах [3-10] представленны аналитические результаты синтеза методом N-i переключений системы разрывного управления четвёртого порядка при настройке на отработку отдельных разновидностей переходной траектории. Задача настоящей работы состоит в построении интегрированного алгоритма расчёта параметров релейной СПР, призванного обеспечить автоматическую самонастройку такой системы на воспроизведение текущего динамического режима без дотяжек и перерегулирований.

Результаты работы. Параметрический синтез регуляторов $R_\varepsilon, R_\omega, R_\varphi$ внутренних контуров СПР (2) и аналитическое исследование их устойчивости выполнены в работах [3, 4] для позиционного электропривода в системе обозначений (1), что обеспечивает преимущество выражений коэффициентов обратных связей $K_{\omega\varepsilon}, K_{\varphi\omega}, K_{\varphi\varepsilon}$ при оптимизации по быстродействию систем более высоких порядков

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

В ходе оптимизации по быстродействию внешнего регулятора R_Ω каскада (2) методом N-i переключений в работе [5] на примере электропривода с упругой связью установлены однозначные аналитические зависимости коэффициентов обратных связей $K_{\Omega\varphi}, K_{\Omega\omega}, K_{\Omega\varepsilon}$ от уровней ограничений канонических координат системы четвёртого порядка:

$$K_{\Omega\varphi} = \frac{\varphi_{\max}}{2\omega_{\max}} + \frac{\omega_{\max}}{2\varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2a_{\max}}; \quad K_{\Omega\omega} = \frac{\varphi_{\max}}{4\varepsilon_{\max}} + \frac{\omega_{\max}}{4a_{\max}} + \frac{\varphi_{\max}\varepsilon_{\max}}{4\omega_{\max}a_{\max}} + \frac{\omega_{\max}^2}{12\varepsilon_{\max}^2} + \frac{\varepsilon_{\max}^2}{12a_{\max}^2};$$

$$K_{\Omega\varepsilon} = \frac{\varphi_{\max}}{8a_{\max}} + \frac{\varphi_{\max}\varepsilon_{\max}^2}{24\omega_{\max}a_{\max}^2} + \frac{\omega_{\max}\varepsilon_{\max}}{24a_{\max}^2} + \frac{\omega_{\max}^2}{24\varepsilon_{\max}a_{\max}}. \quad (4)$$

Устойчивость скользящего режима R_Ω с коэффициентами обратных связей (3) аналитически подтверждается результатами работы [6], в которой коэффициенты (3) представлены функциями постоянных времени замкнутой системы

$$T_a = \frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}}; \quad T_\varepsilon = \frac{\omega_{\max}}{\varepsilon_{\max}}; \quad T_\omega = \frac{\varphi_{\max}}{\omega_{\max}}. \quad (5)$$

Выраженные через них коэффициенты (3), (4) приобретают компактный вид

$$K_{\Omega\omega} = \frac{1}{4}(T_\omega T_\varepsilon + T_\varepsilon T_a + T_\omega T_a) + \frac{1}{12}(T_\varepsilon^2 + T_a^2), \quad K_{\Omega\varepsilon} = \frac{1}{8}T_\omega T_\varepsilon T_a + \frac{1}{24}(T_\omega T_a^2 + T_\varepsilon T_a^2 + T_\varepsilon^2 T_a),$$

$$K_{\Omega\varphi} = \frac{1}{2}(T_\omega + T_\varepsilon + T_a), \quad K_{\varphi\omega} = \frac{1}{2}(T_a + T_\varepsilon), \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{1}{4}T_a T_\varepsilon + \frac{1}{12}T_a^2, \quad K_{\omega\varepsilon} = \frac{1}{2}T_a. \quad (6)$$

Расчёт коэффициентов обратных связей регуляторов (2) по формулам (5), (6) или (3), (4) обеспечивает воспроизведение переходной траектории (рис.1) с трапецидальной формой временных диаграмм всех промежуточных координат системы, присущей так называемому «режиму трапеции». В данном режиме достигаются все предельно установленные предельные значения канонических координат.

По мере уменьшения отрабатываемого скачка задающего воздействия отдельные координаты не достигают своих уровней ограничения в переходных процессах, что обуславливает изменение формы траектории и создаёт потребность в перерасчёте настроек регуляторов (2). К таким настройкам принадлежат амплитуды выходных сигналов реле, реализующие вышеупомянутые максимумы, а также коэффициенты обрат-

них связей, зависящие от них. В серии работ [7-9] задача перерасчёта максимумов канонических координат и основанных на их величинах настроек системы решена для особой

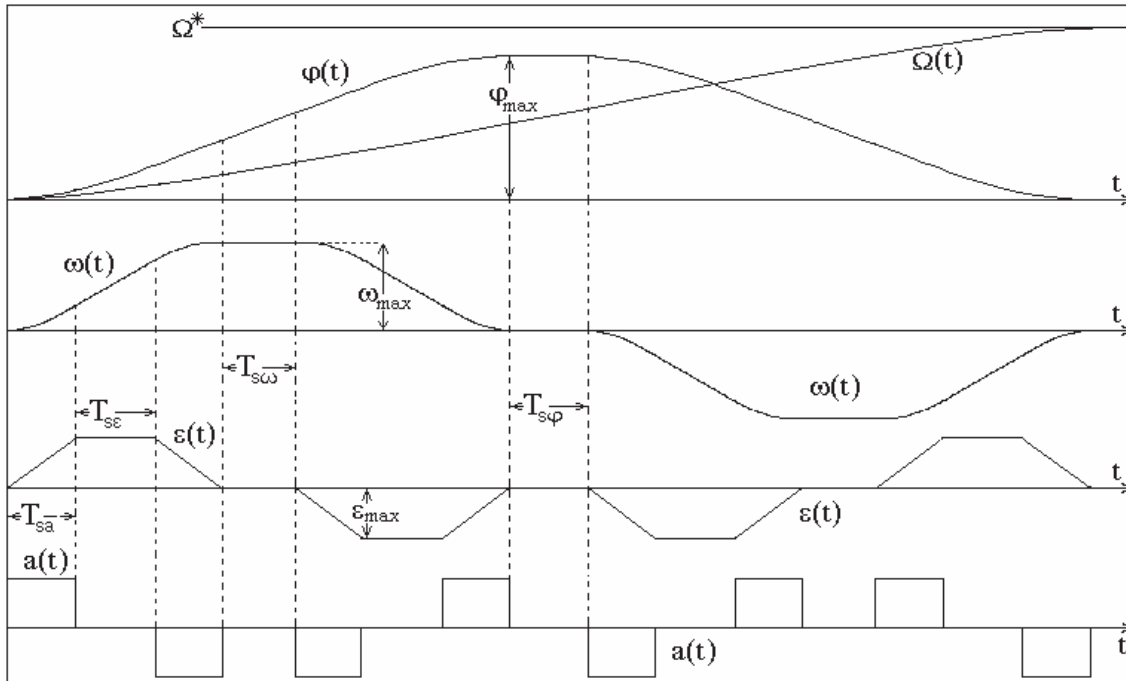


Рисунок 1 – Временные диаграммы режима трапеции

разновидности переходных траекторий, получаемых из траектории режима трапеции путём вырождения в ноль длительности интервалов стабилизации отдельных координат. Введём для их обозначения общий специфический термин «вырожденная трапеция k-й степени», где k указывает на количество промежуточных координат, интервалы стабилизации которых обращаются в ноль для траекторий данной формы. Так, на рис.2,а вырожден интервал $T_{s\varphi}$, на рис.2,б обращаются в ноль $T_{s\varphi}$, $T_{s\omega}$, а на рис.2,в – $T_{s\varphi}$, $T_{s\omega}$, $T_{s\varepsilon}$, что соответствует первой [7], второй [8] и третьей [9] степеням вырожденности трапециевидной траектории системы четвёртого порядка.

Семейство траекторий, представленных на рис.1, 2, в силу подобия их фрагментов описывается одинаковыми аналитическими выражениями, как и лежащие на них характерные точки переключений регуляторов (2), благодаря чему определение коэффициентов обратных связей согласно методу N-i переключений выполняется для них по единым формулам (6). Данное обстоятельство делает использование режимов вырожденных трапеций привлекательными для реализации алгоритма самонастройки системы четвёртого порядка на обработку произвольных скачков задающего воздействия. Однако следует заметить, что в отличие от систем третьего порядка данный тип переходных траекторий не является математически строго оптимальным по быстродействию. При настройке на режим вырожденной трапеции продолжительность переходных процессов превышает минимально возможную их длительность, определённую для данных уровней ограничений, на величину наименьшей постоянной времени системы T_a , что приемлемо с технической точки зрения.

Выполним построение блок-схемы алгоритма настройки СПР четвёртого порядка на воспроизведение произвольного скачка задающего воздействия Ω^* . Исходными дан-

ними для параметричного синтезу каскада регуляторів (2), наряду с величиною Ω^* , являются уровни ограничений канонических координат

$$\varphi_{\max}^*, \omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max}^*, a_{\max}^* \quad (7)$$

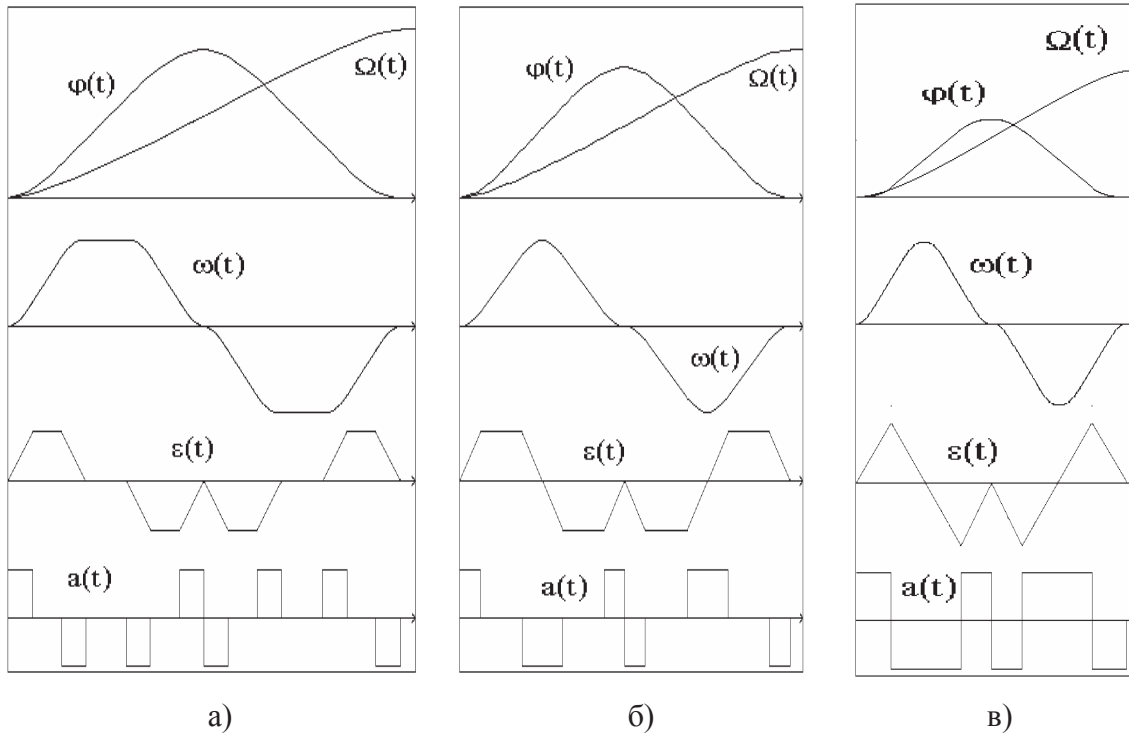


Рисунок 2 – Временные диаграммы вырожденных трапеций

продиктованные соображениями электрической и механической прочности ЭМС (1). Их присвоение текущим уровням ограничений

$$\varphi_{\max} = \varphi_{\max}^*, \omega_{\max} = \omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\max}^*, a_{\max} = a_{\max}^* \quad (8)$$

представлено на схеме разрабатываемого алгоритма (рис.3) блоком 1.

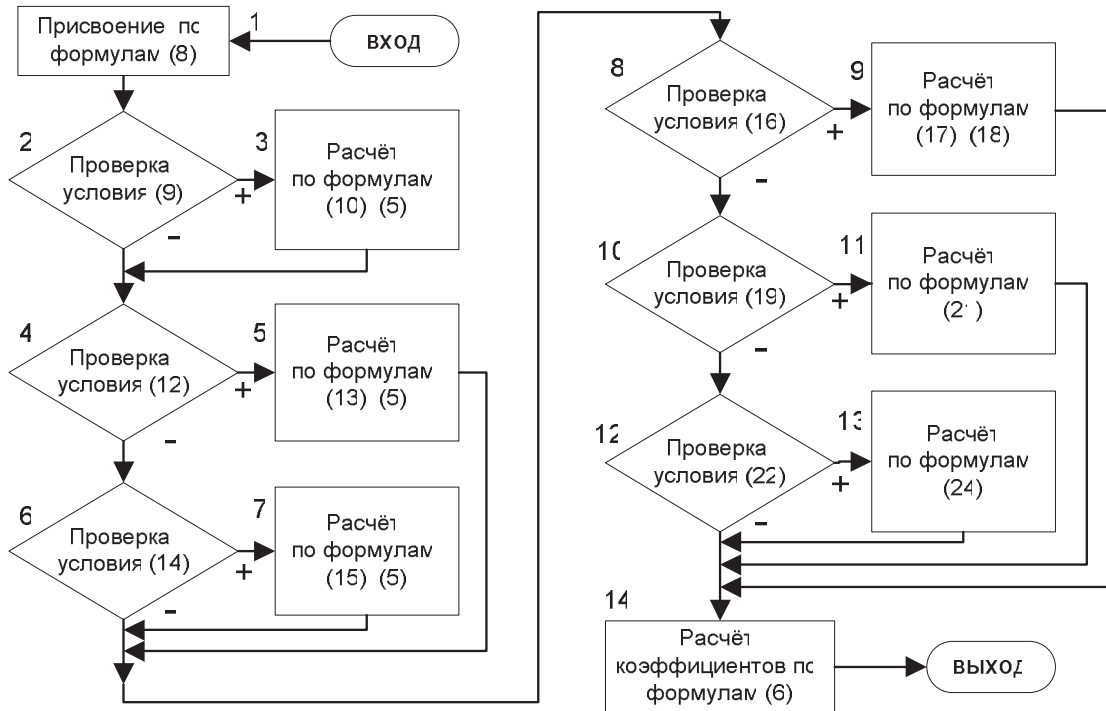


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма настройки системы четвёртого порядка

Однако произвольные соотношения максимумов канонических координат (7) могут задавать физически нереализуемые траектории. Иными словами, некоторые из исходных значений максимумов (7) могут оказаться недостижимыми в реальных переходных процессах. Данное обстоятельство обуславливает необходимость проверки уровней ограничений (7) на предмет реализуемости определяемых ими переходных траекторий и последующей коррекции этих уровней с учётом соотношений, присущих трапециевидным траекториям. Эти меры требуется выполнить на начальном этапе настройки каскада (2), предваряющем расчёт коэффициентов обратных связей. Следует подчеркнуть, что в вышеприведенном замечании речь идёт не о настройке системы полного порядка, варианты которой разработаны в статьях [5-9], а о необходимости взаимного согласования ограничений именно промежуточных координат. Такой подход продиктован соблюдением условий реализуемости фрагментов переходной траектории, обеспечиваемым работой внутренних регуляторов каскада (2), образующих с частью объекта управления подсистемы пониженного порядка. Динамика этих подсистем в обозначениях (1) рассмотрена в работах [3], [4], [10-13] на примере систем регулирования скорости и положения электропривода, имеющих соответственно второй и третий порядок.

В статье [10] обоснована необходимость проверки достижимости максимума ускорения ε_{\max} при фиксированных ограничениях скорости и рывка ω_{\max}, a_{\max} на оптимальной по быстродействию траектории системы второго порядка. Необходимость коррекции ε_{\max} проверяется по условию, которое с учётом подстановок (5) приобретает вид

$$T_{\varepsilon} < T_a, \tag{9}$$

а расчёт физически реализуемого ограничения ускорения выполняется по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\omega_{\max} \cdot a_{\max}}. \tag{10}$$

Заметим, что введение постоянных времени (5) в неравенство (9) и далее в ряд других неравенств и расчётных формул помимо придания единообразия аналитическим результатам, заимствованным из работ [3-13], способствует некоторому ускорению вычислений при выполнении разработанного алгоритма в реальном времени.

Включение в структуру разрабатываемого алгоритма (рис.3) блоков 2 и 3 по материалам работы [10] с перерасчётом постоянных времени (5) обеспечивает согласование только уровней ограничения ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} . Задача взаимного согласования ограничений всех промежуточных координат, включая φ_{\max} , в явном виде не рассматривалась в отдельных публикациях, посвящённых разработке метода N-i переключений. Однако, материалы работ [11], [12], в которых выполнена оптимизация по быстрдействию режимов «треугольника» позиционного электропривода, могут быть полностью адаптированы к данной задаче благодаря использованию системы обозначений (1). Для этого в неравенствах и формулах из работ [11], [12] следует рассматривать заданное значение положения φ как уровень ограничения

$$\varphi^* = \varphi_{\max}, \quad (11)$$

формирование которого обеспечивает подсистема третьего порядка из каскада (2), по структуре эквивалентная системе позиционирования, замкнутой по каноническим координатам.

Воспользовавшись адаптированными результатами работы [11], введём в разрабатываемый алгоритм (рис.3) блок 4, осуществляющий проверку соотношения максимумов промежуточных координат на соответствие условию реализации малого треугольника, которое с учётом подстановок (5), (11) приобретает вид

$$\varphi_{\max} < 2\varepsilon_{\max} T_a^2. \quad (12)$$

При соблюдении условия (12) в блоке 5 выполняется согласование ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} с предустановленным значением φ_{\max} по формулам, которые с учётом (5), (11) принимают вид

$$T_a = \sqrt[3]{\frac{\varphi_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}}, \quad \varepsilon_{\max} = a_{\max} \cdot T_a, \quad \omega_{\max} = a_{\max} \cdot T_a^2, \quad (13)$$

после чего выполняется обновление постоянных времени (5) и переход к настройке на скачѐк задающего воздействия в блоках 8 и далее по схеме, представленной на рис.3.

Если максимумы (7) не удовлетворяют условию (12), необходимо проверить их на соответствие режиму большого треугольника и скорректировать при необходимости по результатам работ [12], [13]. Условие соответствия «большому треугольнику» из статьи [13] с учётом подстановок (5), (11) приобретает вид

$$\varphi_{\max} < \frac{1}{2} \omega_{\max} (T_a + T_\varepsilon). \quad (14)$$

Неравенство (14) проверяется в блоке 6 (рис.3), а расчётный максимум скорости определяется в блоке 7 по формуле из работы [12], которая после подстановки выражений (5), (11) приобретает вид

$$\omega_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \varepsilon_{\max} T_a\right)^2 + \varphi_{\max} \cdot \varepsilon_{\max}} - \frac{1}{2} \varepsilon_{\max} T_a. \quad (15)$$

После этого выполняется обновление постоянных времени (5) и дальнейшая настройка на скачок задающего воздействия (блоки 8 и далее по схеме). Если условие (4), как и (2), не выполнено, максимумы канонических координат не требуют коррекции.

Описанная выше часть схемы алгоритма до точки входа в блок 8 реализует только перерасчёт предустановленных максимумов из соображений физической реализуемости режима трапеции системой полного (четвёртого) порядка. Далее сформируем алгоритм настройки на режимы трапеции с различной степенью вырожденности траектории.

В работе [9] выполнен синтез параметров релейной СПР для случая варьируемых φ_{\max} , ω_{\max} , ε_{\max} , что соответствует вырожденной трапеции третьей степени (аналог «малого треугольника» по классификации режимов позиционирования). Для диапазона задающих воздействий, удовлетворяющего неравенству (блок 8 на рис.3)

$$8a_{\max}T_a^4 > \left| \Omega^* \right| > 0, \quad (16)$$

уровни ограничений φ_{\max} , ω_{\max} , ε_{\max} должны определяться по выражениям

$$\varphi_{\max} = \omega_{\max}T_{\omega}, \quad \omega_{\max} = \varepsilon_{\max}T_{\varepsilon}, \quad \varepsilon_{\max} = a_{\max}T_a, \quad (17)$$

где постоянные времени

$$T_{\omega} = T_{\varepsilon} + T_a, \quad T_{\varepsilon} = T_a, \quad T_a = 4\sqrt{\frac{|\Omega^*|}{8 \cdot a_{\max}}} \quad (18)$$

являются функциями скачка задающего воздействия Ω^* . При выполнении условия (16) вычисления по формулам (18), (17) выполняются в блоке 9, после чего в блоке 14 синтезируются коэффициенты обратных связей. В противном случае Ω^* проверяется на принадлежность другим диапазонам.

В работе [8] представлен синтез параметров релейной СПР для случая варьируемых φ_{\max} , ω_{\max} , что соответствует вырожденной трапеции второй степени. Для задающих воздействий, удовлетворяющих неравенствам

$$2\omega_{\max}(T_{\varepsilon} + T_a)^2 > \left| \Omega^* \right|, \quad (19)$$

$$\left| \Omega^* \right| \geq 8a_{\max}T_a^4, \quad (20)$$

максимальные значения первой и второй производных φ_{\max} , ω_{\max} выходной координаты Ω и постоянные времени системы должны определяться по выражениям

$$\varphi_{\max} = \omega_{\max}T_{\omega}, \quad \omega_{\max} = \varepsilon_{\max}T_{\varepsilon}, \quad T_{\omega} = T_{\varepsilon} + T_a,$$

$$T_{\varepsilon} = 3\sqrt{\frac{T_a^3}{27} + \frac{|\Omega^*|}{4 \cdot \varepsilon_{\max}}} + \sqrt{\frac{(\Omega^*)^2}{16 \cdot \varepsilon_{\max}^2} + \frac{T_a^3 \cdot |\Omega^*|}{54 \cdot \varepsilon_{\max}}} + 3\sqrt{\frac{T_a^3}{27} + \frac{|\Omega^*|}{4 \cdot \varepsilon_{\max}}} - \sqrt{\frac{(\Omega^*)^2}{16 \cdot \varepsilon_{\max}^2} + \frac{T_a^3 \cdot |\Omega^*|}{54 \cdot \varepsilon_{\max}}} - \frac{2}{3}T_a \quad (21)$$

как функции скачка задающего воздействия Ω^* . При выполнении условия (19), проверяемого в блоке (10), вычисления по формулам (21) выполняются в блоке 11, после чего в блоке 14 синтезируются коэффициенты обратных связей. В противном случае проверяется диапазон Ω^* , лежащий выше.

В статье [7] на примере электропривода с упругой связью представлен синтез параметров релейной СПР для случая варьируемого φ_{\max} , что соответствует отработке вырожденной трапеции первой степени (аналог «большого треугольника» по общепринятой классификации режимов позиционирования). Установлено, что для диапазона задающих воздействий, ограниченного неравенствами

$$\varphi_{\max} (T_a + T_\varepsilon + T_\omega) > \left| \Omega^* \right|, \quad (22)$$

$$\left| \Omega^* \right| \geq 2\omega_{\max} (T_\varepsilon + T_a)^2, \quad (23)$$

максимальное значение первой производной φ_{\max} выходной координаты Ω и постоянная T_ω должны определяться по выражениям

$$\varphi_{\max} = \omega_{\max} T_\omega, \quad T_\omega = \sqrt{\left(\frac{T_\varepsilon + T_a}{2} \right)^2 + \frac{\left| \Omega^* \right|}{\omega_{\max}}} - \frac{T_\varepsilon + T_a}{2} \quad (24)$$

как функции скачка задающего воздействия Ω^* . При выполнении условия (22), проверяемого в блоке (12), вычисления по формулам (24) выполняются в блоке 13, после чего в блоке 14 синтезируются коэффициенты обратных связей. Если задающее воздействие имеет величину не ниже верхней границы режима вырожденной трапеции первого порядка, определяемой неравенством (22), синтез коэффициентов в блоке 14 (рис.3) выполняется по уровням ограничений, определённым на момент входа в блок 8.

Выводы. Разработанный на основании результатов работ [3-13] интегрированный алгоритм настройки релейной СПР реализует во всём диапазоне задающих воздействий адаптацию параметров регуляторов к изменению формы расчётной переходной траектории, обеспечивая формирование переходного процесса с быстродействием, близким к оптимальному. Результаты настоящей работы ориентированы на применение в самонастраивающихся системах управления электроприводами с конечной жёсткостью кинематической цепи. Потенциал развития изложенной методики параметрического синтеза заключается в возможности использования иных форм расчётной траектории, специфичных для конкретных объектов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / Фельдбаум А.А. – М.: Наука, 1966. – 624с.
2. Релейные системы оптимального управления электроприводами / Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В., Дерез А.Л. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2011. – 337с.
3. 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.
4. Садовой А.В. Анализ характера скользящего режима оптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007. – Вып. 1(8). – С.140-144.

5. Садовой А.В. Параметрический синтез релейной системы подчиненного регулирования скорости электропривода с упругой связью / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. – Кременчуг: КГПУ. – Выпуск 3/2008(50). – Часть 1. – С.83-87.
6. Садовой А.В. Анализ устойчивости скользящего режима оптимальной по быстродействию системы четвертого порядка / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник НТУ ХПИ. Серия «Электротехника, электроника и электропривод». – Харьков, 2008. – Выпуск 30. – С.91-93.
7. Дерез А.Л. Оптимизация по быстродействию системы регулирования скорости электропривода методом N-i переключений при неопределённом максимуме упругого момента / Дерез А.Л., Садовой А.В. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2013. – Вып. 1 (21). – С.150-156.
8. Дерез А.Л. Синтез релейной системы управления четвёртого порядка методом N-i переключений при неопределённых максимумах первой и второй производных регулируемой координаты / Дерез А.Л., Садовой А.В. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2016. – Вып. 1 (28). – С.81-88.
9. Садовой А.В. Синтез методом N-i переключений релейной системы четвёртого порядка без внутренних ограничений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2008. – Вып. 1 (9). – С.167-171.
10. Садовой А.В. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N-i переключений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник КГПУ. – Кременчуг. – 2006. – Вып. 3/2006 (38). – С.21-22.
11. 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. – Вып. 3/2007 (44). – С.15-17.
12. 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 ДГТУ (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007. – С.420-422.
13. Дерез А.Л. Адаптация системы оптимального по быстродействию управления позиционным электроприводом к изменению формы переходной траектории / Дерез А.Л., Садовой А.В. // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: Техника. – 2014. – №15(91). – С.72-74.

Поступила в редколлегию 28.03.2017.

УДК 621.396.67:001.57

С'ЯНОВ О.М., д.т.н., професор
КОСУХІНА О.С., к.т.н., доцент
ПОЛЯКОВ Р.М., аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**РОЗРАХУНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
НОВИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**