

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 62-83

DOI 10.31319/2519-2884.35.2019.44

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

Дніпровський державний технічний університет, г. Каменське

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАСЧЁТНОЙ АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Введение. Системы управления с каскадным включением релейных регуляторов, обладающих линейными функциями переключения, обеспечивают формирование нелинейных переходных траекторий, присущих оптимальным по быстродействию переходным процессам в условиях ограничения промежуточных координат [1], при синтезе их параметров методом N-i переключений [2]. В основе метода лежит прогнозируемость временных диаграмм таких процессов. Одним из методологических приёмов, обеспечивающих унификацию расчётных траекторий широкого круга электромеханических систем (ЭМС), является допущение о постоянстве рывка на интервалах стабилизации напряжения силового преобразователя. Для большинства ЭМС невозможно обеспечить строгое соответствие данного допущения реальным условиям их функционирования в силу непостоянства действия внутренних обратных связей в различных динамических режимах. Поэтому необходима эмпирическая оценка влияния соотношения реальной и расчётной амплитуд напряжения на качество переходных процессов при оптимизации по быстродействию методом N-i переключений.

Постановка задачи. Позиционный электропривод постоянного тока с жесткой кинематической цепью можно описать системой дифференциальных уравнений

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

где $p = \frac{d}{dt}$ – символ дифференцирования по времени, $\varphi, \omega, \varepsilon, a$ – соответственно угловые положение, скорость, ускорение и рывок исполнительного вала, u – напряжение преобразователя; i – ток якоря, i_s – статический ток, ω_m – угловая скорость вала машины, k_r – коэффициент редуктора, R, L, J – сопротивление, индуктивность и момент инерции машины, $c = k\Phi$, k – конструктивный коэффициент, Φ – номинальный магнитный поток машины.

Согласно методу N-i переключений для оптимального по быстродействию управления динамическим объектом третьего порядка

$$\left. \begin{aligned} p\varphi &= \omega \\ p\omega &= \varepsilon \\ p\varepsilon &= a \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

применяется каскад релейных регуляторов

$$\left. \begin{aligned} u_{R1} = u_{R\varphi} = \omega^* &= \omega_{\max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R2} = u_{R\omega} = \varepsilon^* &= \varepsilon_{\max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R3} = u_{R\varepsilon} = a^* &= a_{\max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} – уровни ограничения скорости, ускорения и рывка; $K_{\omega\varepsilon}$, $K_{\varphi\omega}$, $K_{\varphi\varepsilon}$ – коэффициенты обратных связей, символом * отмечены заданные значения соответствующих переменных, как входное, так и формируемые регуляторами для подчиненных им контуров.

Двойственная индексация регуляторов $R_1 = R\varphi$, $R_2 = R\omega$, $R_3 = R\varepsilon$ указывает на их положение в иерархии каскада (3) или на регулируемую величину в зависимости от контекста.

При синтезе коэффициентов обратных связей $K_{\omega\varepsilon}$, $K_{\varphi\omega}$, $K_{\varphi\varepsilon}$ каскада (3) для управления динамическим объектом (1) принимается за основу оптимальная траектория объекта (2), рассчитываемая при тех же уровнях ограничений канонических координат ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} , что и для реального объекта (1). Оптимизация по быстродействию регуляторов каскада (3) обеспечивается коэффициентами обратных связей [2]

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

где постоянные времени замкнутой системы определяются как

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

При управлении объектом (1) выходной сигнал каскада (3), формируемый регулятором $u_{R\varepsilon}$ прикладывается к нему с амплитудой U_{\max} . В работе [3] на примере режима больших перемещений установлена возможность получения желаемых динамических характеристик позиционного электропривода (1), управляемого регуляторами (3), путём коррекции расчётной амплитуды сигнала управления. Задачей настоящей работы является эмпирическая оценка эффективности данной меры применительно к режимам средних и малых перемещений.

Результаты исследования. Выполним синтез параметров каскада регуляторов (3) для объекта (1) при уровнях ограничений [2]

$$\omega_{\max} = 100 \text{ с}^{-1}, \quad \varepsilon_{\max} = 800 \text{ с}^{-2}, \quad a_{\max} = 57200 \text{ с}^{-3}. \quad (6)$$

которые соответствуют параметрам электромеханической системы (1)

$$R = 1 \text{ Ом}, c = 2 \text{ В} \cdot \text{с}, J = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, k_T = 1, L = 0,1 \text{ Гн} \quad (7)$$

$$I_H = 20 \text{ А}, \omega_H = 100 \text{ с}^{-1}, U_H = 220 \text{ В}, U_{\max} = 1,3U_H.$$

Тогда параметры оптимальных регуляторов каскада (3), определённые по формулам (4), (5) для режима больших перемещений при $\varphi^* = 20$ радиан, равны

$$K_{\omega\varepsilon} = 0.007 \text{ с}, K_{\varphi\omega} = 0.069 \text{ с}, K_{\varphi\varepsilon} = 0.0004534 \text{ с}^2. \quad (8)$$

Для режима средних перемещений при $\varphi^* = 5$ радиан уровни ограничений составят

$$\omega_{\max} = 57,9 \text{ с}^{-1}, \varepsilon_{\max} = 800 \text{ с}^{-2}, a_{\max} = 57200 \text{ с}^{-3}, \quad (9)$$

тогда параметры оптимальных регуляторов каскада (3) равны

$$K_{\omega\varepsilon} = 0.007 \text{ с}, K_{\varphi\omega} = 0.0432 \text{ с}, K_{\varphi\varepsilon} = 0.0002694 \text{ с}^2. \quad (10)$$

Для режима малых перемещений при $\varphi^* = 0,3$ радиан уровни ограничений составят

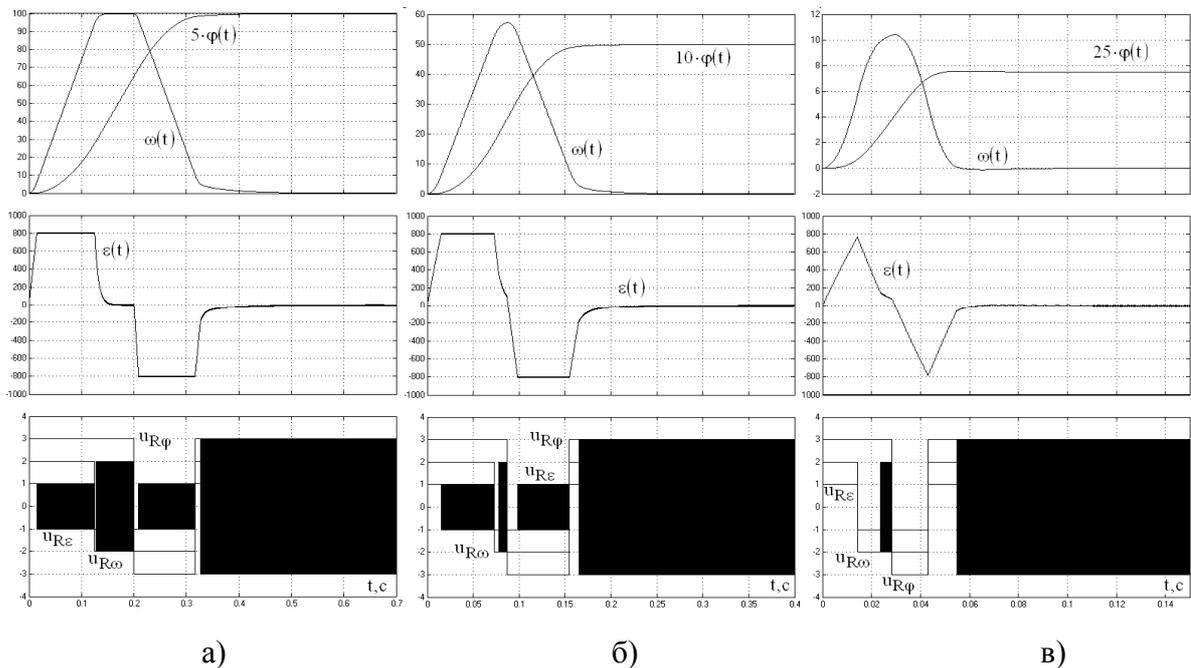
$$\omega_{\max} = 10,88 \text{ с}^{-1}, \varepsilon_{\max} = 789 \text{ с}^{-2}, a_{\max} = 57200 \text{ с}^{-3}, \quad (11)$$

а параметры оптимальных регуляторов каскада (3) равны

$$K_{\omega\varepsilon} = 0.0069 \text{ с}, K_{\varphi\omega} = 0.0138 \text{ с}, K_{\varphi\varepsilon} = 0.00006339 \text{ с}^2. \quad (12)$$

На рис.1 представлены графики переходных процессов ЭМС (1) под управлением каскада регуляторов (3) в режимах больших (рис.1, а), средних (рис.1, б) и малых (рис.1, в) перемещений. Отметим, что для удобства анализа взаимодействия регуляторов их сигналы представлены на рис.1 в относительных единицах с масштабами, соответствующими положению в иерархии каскада. При таком способе масштабирования перекрытие диаграмм не приводит к потере их информативности, поскольку «младшие» регуляторы повторяют переключения «старших».

Во всех представленных процессах отмечается преждевременное вхождение регу-



а) больших перемещений, б) средних, в) малых
Рисунок 1 – Переходные процессы позиционирования в режимах

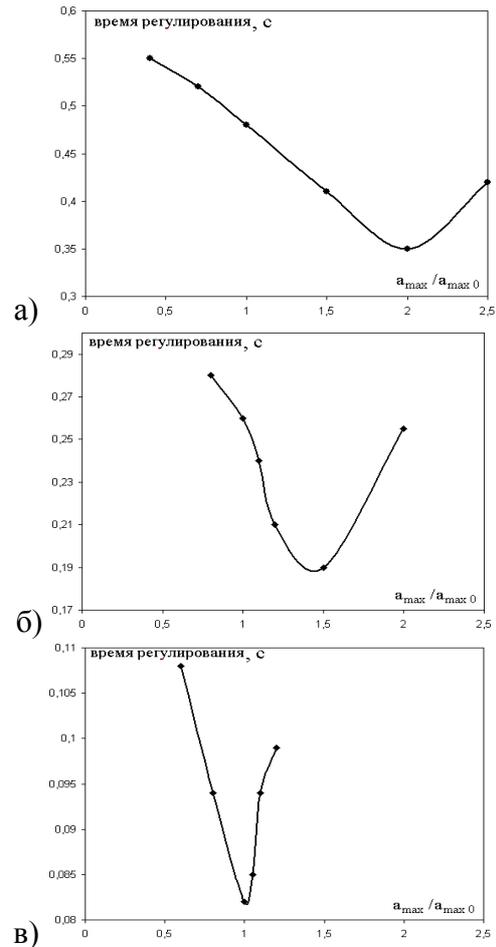
ляторов скорости и положения в скользящий режим в результате действия внутренних обратных связей ЭМС. В результате длительность позиционирования превышает минимально возможную, что свидетельствует о необходимости коррекции динамических характеристик рассмотренных систем в направлении оптимизации по быстродействию. Как показано в работе [3], завышение расчётного напряжения или эквивалентного ему рывка при синтезе регуляторов (3) способно предотвратить их раннее вхождение в

Приняв в качестве критерия окончания переходного процесса вхождение ошибки регулирования положения в диапазон $|\Delta\varphi| \leq 0,001\varphi^*$, построим зависимости длительности регулирования от относительного значения расчётного рывка, варьирование которого равносильно соответствующему изменению расчётной амплитуды напряжения преобразователя. Представленные на рис.3 кривые демонстрируют наличие у таких зависимостей выраженного экстремума, что свидетельствует о возможности минимизации длительности позиционирования в режимах как больших, так и средних или малых перемещений. Вместе с тем, необходимо отметить смещение точки экстремума к единице по мере уменьшения обрабатываемого скачка задающего воздействия. То есть, эффективность предлагаемого методологического приёма снижается при увеличении относительной длительности стабилизации напряжения. В таких режимах отличие максимума напряжения от расчётного значения вызывает в большей степени отклонение от оптимальной траектории чем компенсацию собственной сходимости объекта управления.

Выводы. Параметрический синтез каскада регуляторов (3) при расчётной амплитуде рывка, соответствующей положению экстремума выявленной закономерности, способен обеспечить позиционному электроприводу близкое к оптимальному быстроедействие для всех типовых форм переходной траектории. Данный эффект достигается благодаря предотвращению преждевременного возникновения скользящего режима регулятора положения. Отсутствие аналитического представления рассмотренных зависимостей обуславливает эмпирический подход к поиску экстремальных настроек системы управления. Перспективным направлением развития данной методики является её применение к релейно-модальным системам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. 624с.
2. Садовой О.В., Дерезь О.Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 206с.
3. Дерезь А.Л., Садовой А.В. Коррекция параметров квазиоптимальных по быстрдействию релейных систем третьего порядка, синтезированных методом N-i переключений. Вісник НТУ «ХП». Серія: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика». Х.: НТУ «ХП», 2019. № 9 (1334). С.20-23.



а) больших перемещений,
б) средних, в) малых

Рисунок 3 – Длительность позиционирования при варьировании напряжения преобразователя в режимах