

## РЕЛЕЙНО-МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВУХМАССОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**Введение.** Среди современных способов управления электроприводами (ЭП) особое место занимает релейно-модальное, как особый случай обратной задачи динамики. Данный способ управления имеет целый ряд преимуществ по сравнению с иными способами управления:

– возможность получить любое демпфирование и быстродействие «в малом» в электроприводе любой сложности;

– робастность системы управления;

– относительная простота синтеза для сложных систем с высоким порядком.

Однако наряду с достоинствами данный способ управления имеет и недостатки, основным из которых является повышенное число измеряемых координат, то есть повышенная потребность в датчиках. В идеальном случае необходимо замыкание обратных связей по полному вектору состояния объекта управления. Другим существенным недостатком является отсутствие токоограничения.

**Постановка задач исследования.** Целью данной работы является исследовать возможности релейно-модального управления, синтезированного в различных фазовых пространствах, двухмассовыми электромеханическими системами при условии рассмотрения в качестве объекта управления двухмассового ЭП постоянного тока с учетом упруго деформируемого вала и зазора в соединительной муфте, реализованного нелинейностью типа «люфт».

**Материалы исследования.** Объектом исследования в данной работе выступает двухмассовый ЭП постоянного тока, состоящий из двигателя постоянного тока независимого возбуждения и управляемого преобразователя. Первой массой с моментом инерции  $J_1$  в таком объекте является совокупность якоря машины, тормозного шкива, соединительной муфты; ко второй массе относятся приведенные к валу двигателя моменты инерции различных частей рабочего механизма, формирующие момент инерции  $J_2$ . Местом приложения статической нагрузки является вторая масса.

Без учета статической нагрузки система дифференциальных уравнений, которые описывают данный объект, имеет вид:

$$\begin{cases} p\omega_2 = \frac{1}{J_2} M_y; \\ pM_y = -C_{12}\omega_2 + C_{12}\omega_1; \\ p\omega_1 = -\frac{1}{J_1} M_y + \frac{C\Phi}{J_1} I; \\ pI = -\frac{C\Phi}{R_2 T_2} \omega_1 - \frac{1}{T_2} I + \frac{1}{R_2 T_2} E_{II}; \\ pE_{II} = -\frac{1}{T_{II}} E_{II} + \frac{k_{II}}{T_{II}} U_y \end{cases} \quad (1)$$

Параметры исследуемой системы (двигатель, преобразователь): двигатель П151–8К (обозначения общепринятые в теории электропривода):  $P_{II} = 320$  кВт;  $U_{II} = 220$  В;  $I_{II} = 1580$  А;  $M_{II} = 6331$  Н·м;  $\omega_{II} = 54,908$  с<sup>-1</sup>;  $J_1 = J_D = 95,75$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_2 = 3 \cdot J_1 = 287,25$  кг·м<sup>2</sup>;  $C\Phi_{II} = 4,007$  В·с;  $T_M = 0,358$  с;  $T_2 = 0,072$  с;  $T_\mu = 0,0025$  с;  $K_{TII} = 31$ ;  $C_{12} = 10^7$  Н·м/рад. Максимальные значения фазовых координат объекта:  $I_m = 3950$  А;  $E_{um} = 310$  В;  $\omega_m = \omega_{II} = 54,908$  с<sup>-1</sup>.

На рис. 1 представлена модель в среде MATLAB/Simulink, реализующая двухмассовый электромеханический объект с кинематической цепью, в которой присутствуют 2 нелинейности: упруго деформируемый вал, а так же зазор в соединительной муфте. В данном случае рассматривался вариант, в котором зазор в муфте реализован нелинейностью типа «люфт» и располагается перед упруго деформируемым валом, то есть вблизи первой массы.

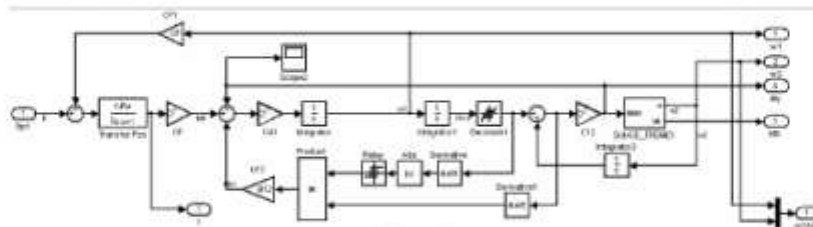


Рис. 1

Синтез релейно-модального регулятора осуществлялся согласно методике, изложенной в [4].

Систему (1) запишем в матричной форме:

$$p \cdot X(p) = A \cdot X(p) + B \cdot u(p), \quad (2)$$

где  $X(p)$  – вектор переменных состояния;  $u(p)$  – вектор входных координат;  $B$  – матрица входа.

Чтобы удостовериться в том, что объект управления полностью управляемый запишем матрицу управляемости:

$$S = \begin{bmatrix} B & A \cdot B & A^2 \cdot B & A^3 \cdot B & A^4 \cdot B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & s_{15} \\ 0 & 0 & 0 & s_{24} & s_{25} \\ 0 & 0 & s_{33} & s_{34} & s_{35} \\ 0 & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ранг матрицы управляемости  $\text{rank}(S)=5$ , следовательно, объект полностью управляемый.

В качестве желаемого характеристического полинома системы задамся нормированным полиномом Баттерворта 4-го порядка:

$$G_4(p_{\omega}) = p_{\omega}^4 + 2,613 p_{\omega}^3 + 3,414 p_{\omega}^2 + 2,613 p_{\omega} + 1 \quad (4)$$

Определяем дополнительную матрицу-строку:

$$R_1 = B^T \cdot S = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \cdot S \quad (5)$$

На основании (6) получим матрицу канонического преобразования:

$$P = \begin{bmatrix} R_1 & R_1 \cdot A & R_1 \cdot A^2 & R_1 \cdot A^3 & R_1 \cdot A^4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Рассчитываем коэффициенты релейного модального регулятора:

$$D = G_4(p_{\omega}) \cdot P^{-1}. \quad (7)$$

Моделирование объекта проводилось в составе скоростной релейно-модальной системы, синтезированной в пространстве канонических и естественных координат. Полная математическая модель системы в пространстве канонических координат приведена на рис. 2.

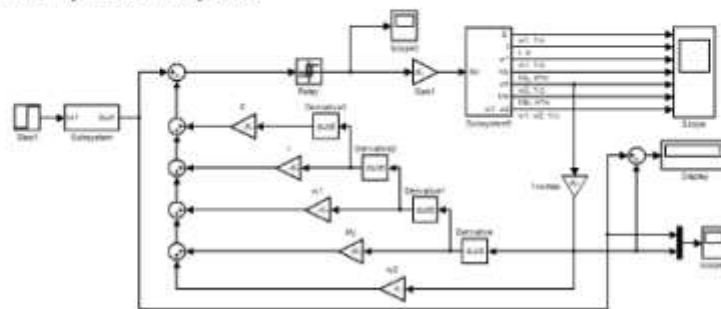


Рис. 2

При моделировании зазора нелинейностью вида «зона нечувствительности» величина зазора  $\Delta\varphi_{\text{ДН}}$  принималась равной  $\pm 0,01$  рад.; в случае, когда зазор представлен нелинейностью вида «люфт» величина зазора  $\Delta\varphi_{\text{Д}}$  составляла  $0,002$  рад.; графики переходных процессов в системе, приведенные далее, получены при моделировании зазоров именно при данных величинах зазоров  $\Delta\varphi_{\text{ДН}} = \pm 0,01$  рад  $\approx \pm 0,57^\circ$ ;  $\Delta\varphi_{\text{Д}} = 0,002$  рад  $\approx 0,114^\circ$ . Пуск производился под номинальной нагрузкой  $M_{\text{Д}} = 6331$  Н·м. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Величина среднегеометрического корня при синтезе системы в пространстве канонических координат составила:

$$\omega_{0\_кан.} = \Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} = 118 \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Аналогично было осуществлено моделирование системы, синтезированной в пространстве естественных координат, с тем отличием, что величина среднегеометрического корня

$$\omega_{0\_ест.} = 2,5 \cdot \Omega_{12} = 295 \text{ с}^{-1}. \quad (9)$$

Полная математическая модель системы в пространстве естественных координат приведена на рис. 4.

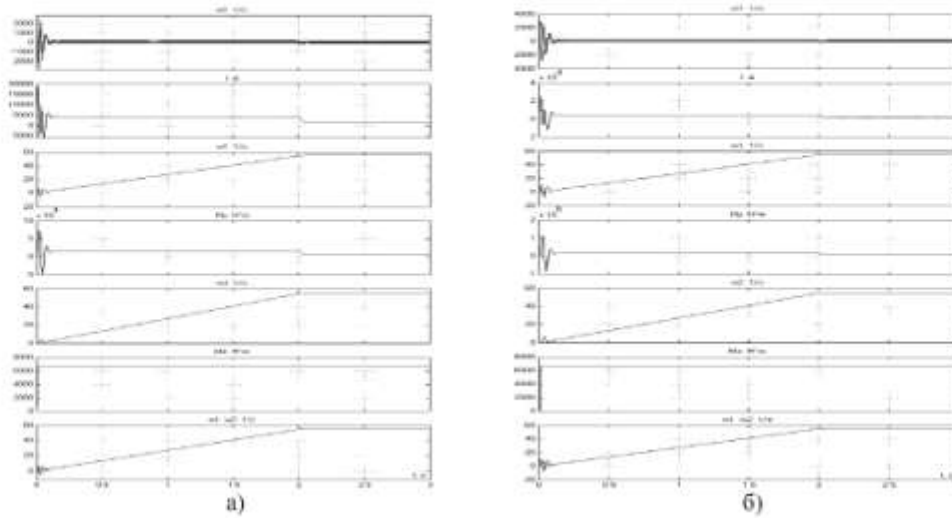


Рис. 3 – Переходные процессы в двухмассовой системе ЭП, синтезированной в пространстве канонических координат, с зазором, реализованным нелинейностью вида: а) люфт; б) зона нечувствительности

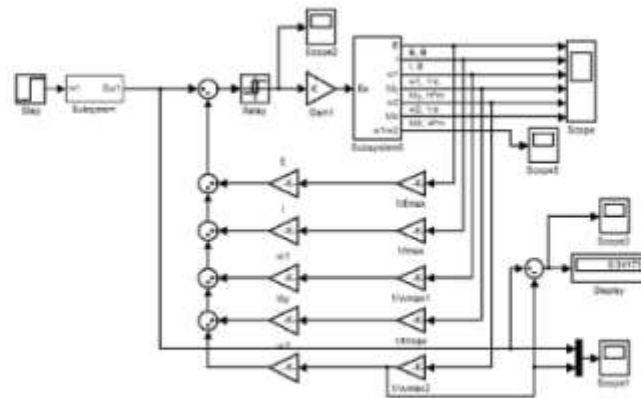


Рис. 4

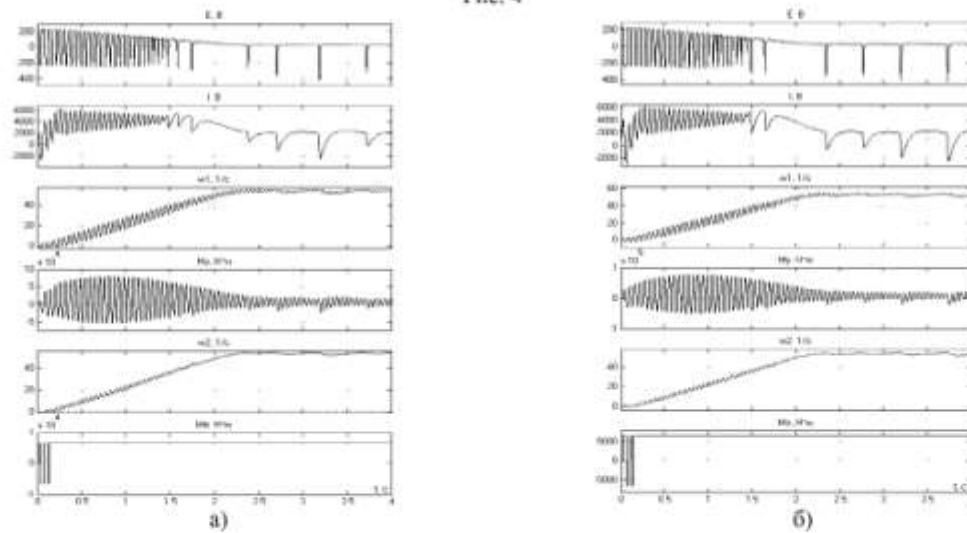


Рис. 5 – Переходные процессы в двухмассовой системе ЭП, синтезированной в пространстве естественных координат, с зазором, реализованным нелинейностью вида: а) люфт; б) зона нечувствительности

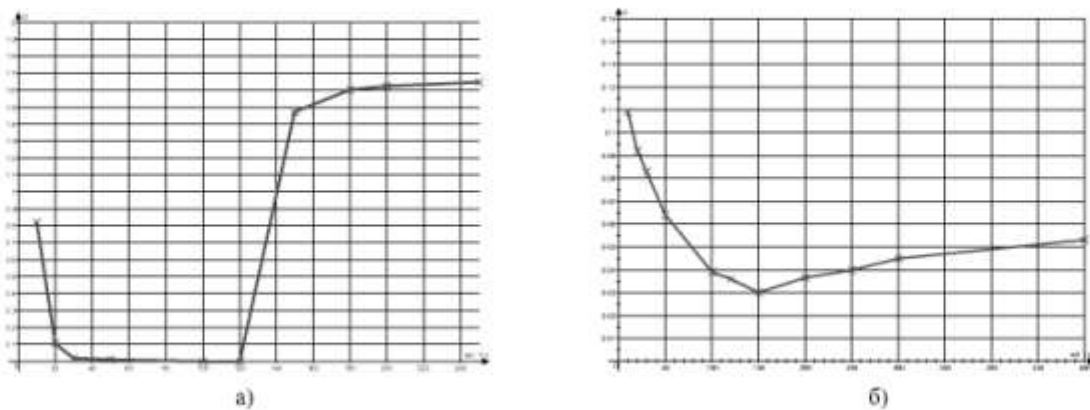


Рис. 6 – Экспериментальные зависимости амплитуды перерегулирования от величины среднегеометрического корня: а) в пространстве канонических координат; б) в пространстве естественных координат

**Выводы.** Анализ результатов, полученных в ходе исследования, позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Вид переходного процесса в системе релейно-модального управления не зависит от вида нелинейности, реализующей зазор в кинематической цепи объекта;
- 2) Зависимость амплитуды перерегулирования от величины среднегеометрического корня в рабочем диапазоне значений носит экстремальный характер;
- 3) Автоколебания обусловлены совокупным влиянием нелинейностей механической части, а не особенностями работы релейно-модальной САУ;
- 4) Амплитуда колебаний выходной координаты  $\omega_2$ :  $\sigma_{\max\%} = 0\%$ ; в системе, синтезированной в пространстве естественных координат  $\sigma_{\max\%} = 3,6\%$ ;
- 5) Необходимость замыкания обратных связей релейно-модального регулятора по полному вектору состояния объекта обуславливает необходимость синтеза наблюдателя состояния, в виду того, что измерение в реальном объекте величины упругого момента  $M_s$  не возможно;
- 6) Полное подавление колебаний выходной координаты в системе, синтезированной в пространстве естественных координат, классическими методами на этапе синтеза не представляется возможным, в этой связи целесообразным будет отказ от классических алгоритмов релейно-модального управления и поиск новых структурно-алгоритмических методов, способных обеспечить работоспособность системы в широких пределах изменения параметров нелинейностей в кинематической цепи ЭП, а также низкую чувствительность к параметрическим и координатным возмущениям.

#### Литература

1. Зеленев А. Б. Оптимальное релейное управление электроприводом с характеристикой нагрузки, имеющей участок отрицательного вязкого трения // Вестник Харьков. госуд. политехн. ун-та, серия «Электротехника, электроника и электропривод», 2000. – Вып. 113, С. 82 – 84.
2. Зеленев А. Б. Синтез и исследование релейных систем управления электроприводом постоянного тока // Изв. вузов. Электромеханика. – 1979. - № 5. – С. 407 – 413.
3. Столяров В. Н., Мотченко А. И. Синтез нелинейных систем электропривода с низкой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям // Электротехника. – 1999, №5. С. 29-32.
4. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостережачими стану : посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Донецьк: Норд-Прес, 2004. – 298 с.