

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С НЕЛИНЕЙНЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ

Введение. Значительное количество промышленных электроприводов (ЭП) имеет в своем составе упругие кинематические связи, что позволяет рассматривать данный класс как двухмассовые электромеханические системы (ЭМС).

Как известно, наличие упругой кинематической связи существенно влияет на динамику ЭП независимо от характера приложенной нагрузки.

Наличие в составе данных систем упругих кинематических связей приводит к появлению дополнительных пульсаций упругого момента и, как следствие, возникновению в процессе эксплуатации усталостных напряжений и преждевременному выходу из строя механических частей ЭП. Совокупное сочетание упругостей с нелинейностями, обусловленными наличием зазоров в кинематической цепи, приводит к нежелательным явлениям в процессе регулирования, борьбе с которыми необходимо уделять внимание при синтезе систем управления.

Исходя из сказанного, задачи синтеза систем управления можно сформулировать следующим образом:

- получение необходимых динамических свойств и минимизация ошибки в статическом режиме;
- обеспечение квазиинвариантности к параметрическим и координатным возмущениям.

Постановка задач исследования. Целью данной работы является исследовать влияние на переходные процессы в системе ЭП нелинейностей, обусловленных наличием в соединительных муфтах и редукторах зазоров и люфтов а также установить влияние на переходные процессы в системе ЭП места положения зазора: до упругого вала или после него.

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:

$$\begin{cases} p\omega_2 = \frac{1}{J_2} M_y; \\ pM_y = -C_{12}\omega_2 + C_{12}\omega_1; \\ p\omega_1 = -\frac{1}{J_1} M_y + \frac{C\hat{O}}{J_1} I; \\ pI = -\frac{C\hat{O}}{R_Y\hat{O}_Y} \omega_1 - \frac{1}{\hat{O}_Y} I + \frac{1}{R_Y\hat{O}_Y} E_{\hat{I}}; \\ pE_{\hat{I}} = -\frac{1}{\hat{O}_I} E_{\hat{I}} + \frac{k\hat{O}\hat{I}}{T_{\hat{I}}} U_{\hat{O}}, \end{cases} \quad (1)$$

Параметры исследуемой системы (двигатель, преобразователь): двигатель типа П151–8К (обозначения общепринятые в теории электропривода): $P_H = 320$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_H = 1580$ А; $M_H = 6331$ Н·м; $\omega_H = 54,908$ с⁻¹; $J_1 = J_d = 95,75$ кг·м²; $C\Phi_H = 4,007$ В·с; $T_M = 0,358$ с; $T_{\hat{O}} = 0,072$ с; $T_{\mu} = 0,0025$ с; $K_{\Pi\Pi} = 31$; $C_{12} = 10^7$ Н·м/рад.

Максимальные значения фазовых координат объекта: $I_m = 3950$ А; $E_{mm} = 310$ В; $\omega_m = \omega_H = 54,908$ с⁻¹.

На основании системы уравнений (1) получим структурную схему объекта управления (рис. 1).

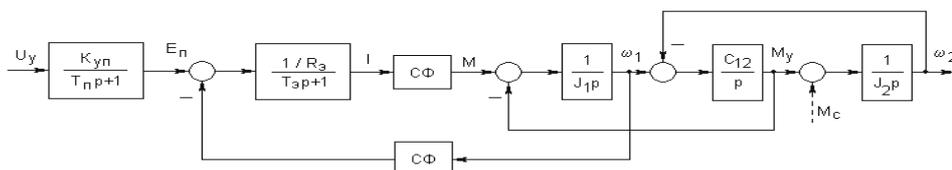


Рис. 1. Структурная схема двухмассового объекта ЭП

Однако, структурная схема на рис. 1 приведена без учета зазоров в кинематической цепи. Для дальнейших исследований на основании общей структуры двухмассовой ЭМС были составлены 2 модели в Simulink, их принципиальным отличием является место положения зазора и его характер.

На рис.2 представлена расчетная схема двухмассовой ЭМС.

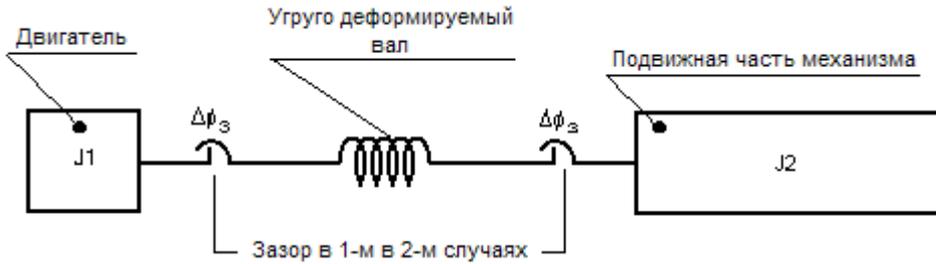


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой ЭМС

В соответствии с расчетной схемой для случая, при котором зазор, представленный нелинейностью вида «люфт», находится вблизи первой массы, в пакете Simulink была разработана модель, изображенная на рис.3.

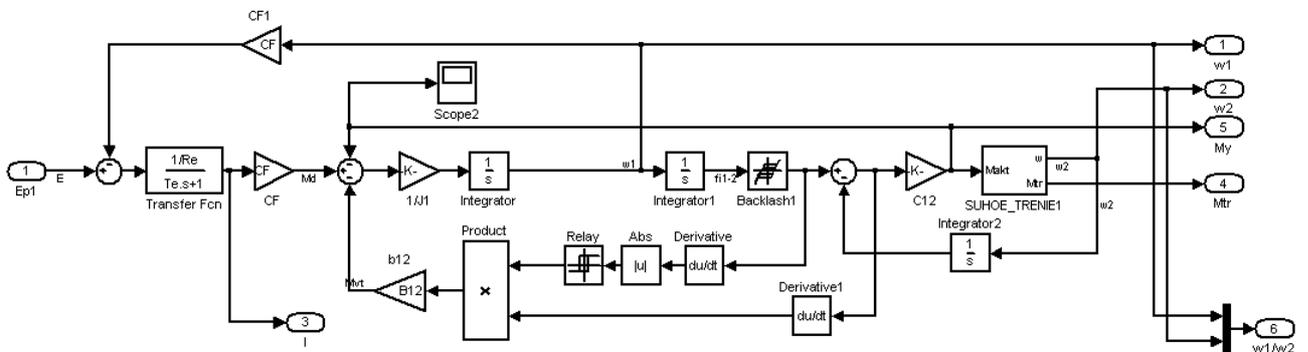


Рис. 3. Модель расчетной двухмассовой ЭМС в пакете Simulink

Аналогичным образом, опираясь на расчетную схему, была разработана модель для случая, при котором зазор находится вблизи второй массы и представлен нелинейностью вида «зона нечувствительности». Модель в Simulink, созданная для описанного случая, представлена на рис. 4.

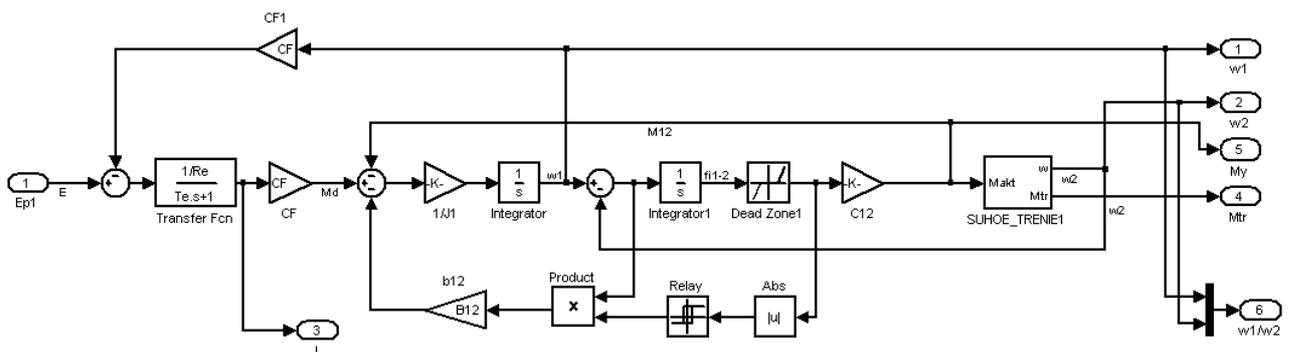


Рис. 4. Модель расчетной двухмассовой ЭМС с зазором в пакете Simulink

Далее моделирование объекта проводилось в составе скоростной релейной системы, синтезированной в пространстве естественных координат. В [1] для одномассового ЭП показан синтез оптимальной системы управления, в которой релейные регуляторы тока и скорости включены последовательно и работают в скользящем режиме, структурно-алгоритмический синтез выполнен по методике, разработанной на кафедре АЭМС ДонГТУ [2]. Полная математическая модель данной системы приведена на рис. 5. При моделировании зазора нелинейностью вида «зона нечувствительности» величина зазора $\Delta\phi_{знч}$ принималась равной $\pm 0,01$ рад.; в случае, когда зазор представлен нелинейностью вида «люфт», величина зазора $\Delta\phi_{л}$ составляла $0,002$ рад.; графики переходных процессов в системе, приведенной далее, получены при моделировании зазоров именно при данных величинах зазоров: $\Delta\phi_{знч} = \pm 0,01$ рад $\approx \pm 0,57^\circ$; $\Delta\phi_{л} = 0,002$ рад $\approx 0,114^\circ$. Пуск производился под

номинальной нагрузкой $M_H = 6331$ Н·м. Далее место положения зазора и характер нелинейности зазора варьировались. Соотношение между моментами инерции первой и второй масс (J_1 к J_2) составило 1 : 3.

Алгоритмы оптимальных релейных регуляторов тока (РТ) и скорости (РС) в соответствии с [3] представлены в виде:

$$U_{D0}(\dot{A}_I, I, \omega) = U_{\text{om}} \cdot \text{sign}[A_{31}\eta_1 + A_{32}\eta_2 + A_{33}\eta_3]; \quad (2)$$

$$U_{EC}(\dot{A}_I, I, \omega) = U_{\text{om}} \cdot \text{sign}[A_{-31}\eta_1 + A_{-32}\eta_2 + A_{-33}\eta_3], \quad (3)$$

где $\eta_1 = E^* - E$; $\eta_2 = I^* - I$; $\eta_3 = \omega^* - \omega$; E^* , I^* , ω^* - желаемые значения фазовых координат.

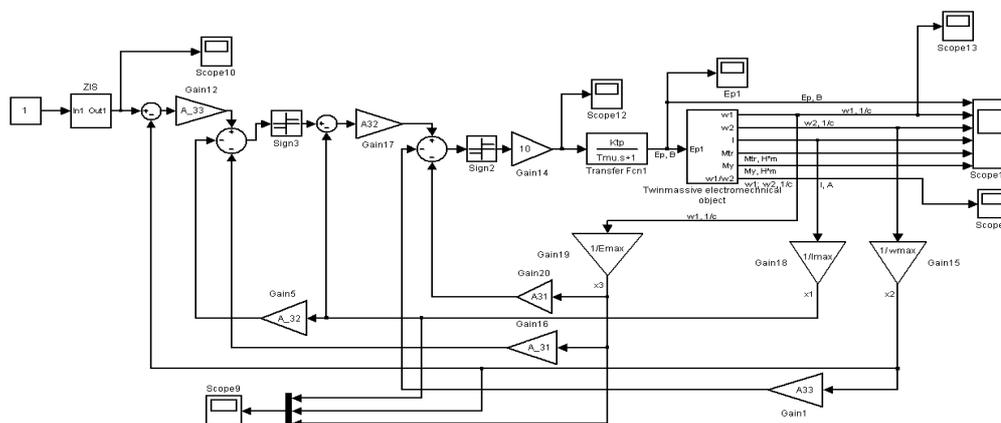


Рис. 5. Полная математическая модель оптимальной системы управления

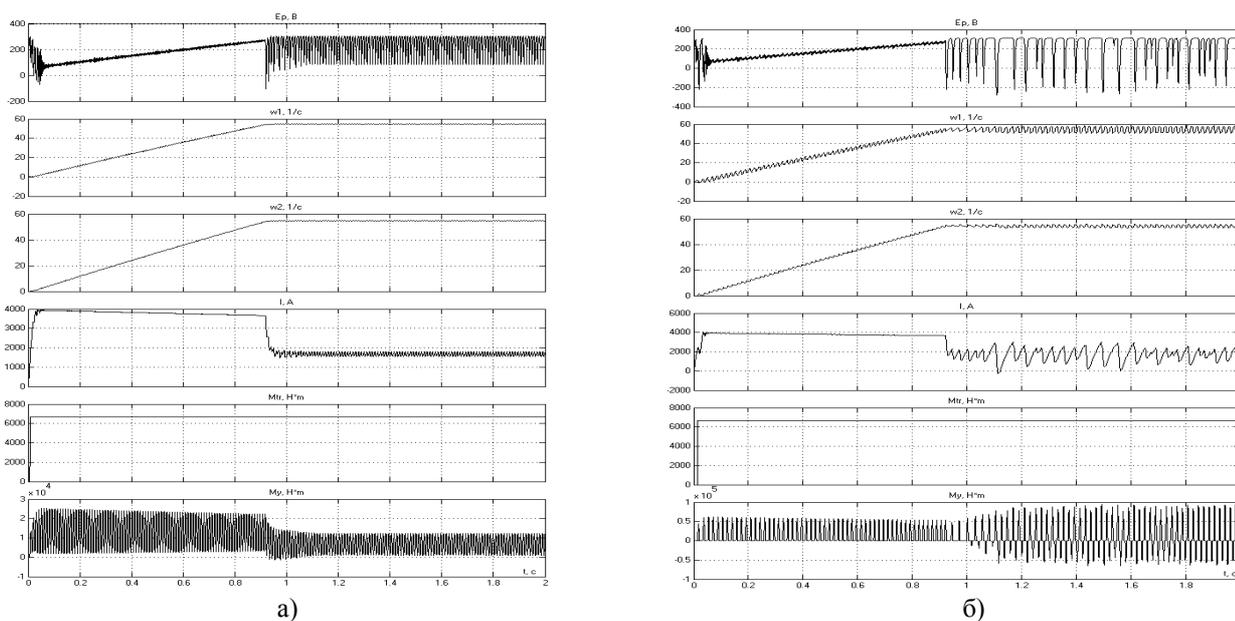


Рис. 6. Переходные процессы в двухмассовой системе ЭП с зазором, реализованным нелинейностью вида «зона нечувствительности»
 а) зазор при 1-й массе;
 б) зазор при 2-й массе

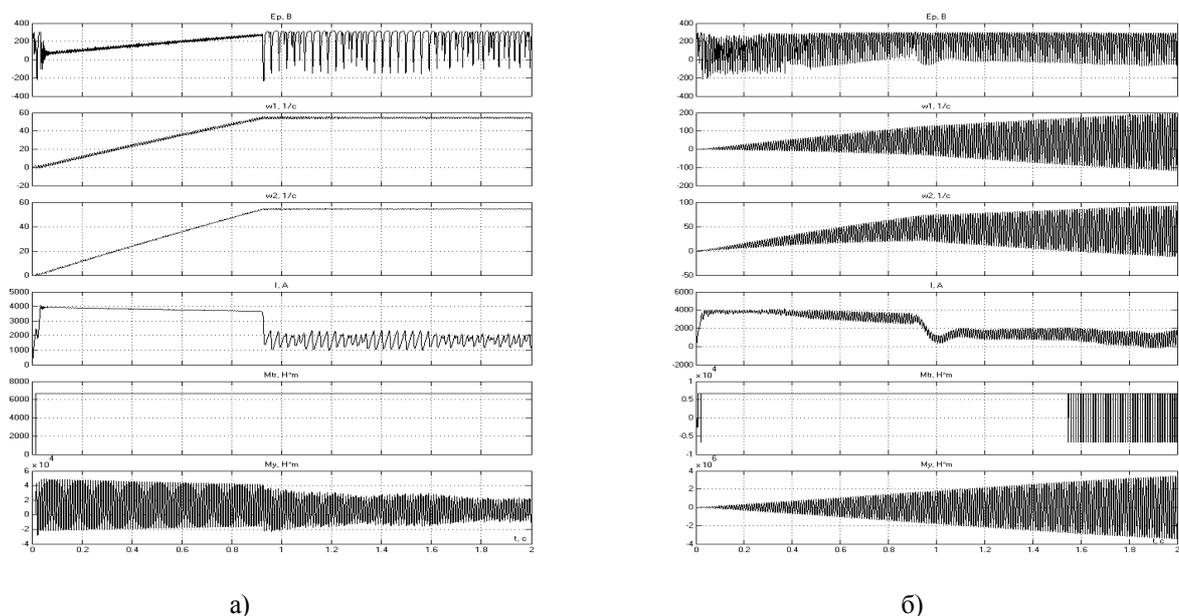


Рис. 7. Переходные процессы в двухмассовой системе ЭП с зазором, реализованным нелинейностью вида «люфт»

- а) зазор при 1-й массе;
б) зазор при 2-й массе

Выводы. Анализ переходных процессов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при одной и той же величине зазора более неблагоприятным с точки зрения влияния его на переходные процессы в системе является случай, при котором зазор располагается вблизи второй массы после упруго деформируемого вала;
- 2) режим автоколебаний обусловлен природой самого объекта управления, а не особенностями функционирования релейной САУ. Частота собственных автоколебаний составляет

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} \quad (4)$$

при указанных ранее значениях параметров системы $\Omega_{12} = 373,16 \text{ с}^{-1}$ или 59,4 Гц;

- 3) при зазоре типа «люфт» расположенном вблизи второй массы система теряет работоспособность, в то время как при аналогичном зазоре, но вблизи первой массы работоспособность сохраняется;
- 4) амплитуда колебаний выходной координаты ω_2 : $\sigma_{\max\%} = 1,63\%$ при зазоре вида «зона нечувствительности» при первой массе; $\sigma_{\max\%} = 2,6\%$ при зазоре вида «люфт» при первой массе; $\sigma_{\max\%} = 7,06\%$ при зазоре типа «зона нечувствительности» при второй массе.

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что зазор в кинематической цепи двухмассовой ЭМС существенно влияет на амплитуду колебаний основных координат ЭП. Даже в случае, если перерегулирование по скорости находится в пределах допустимых 5%, то амплитуда колебаний упругого момента достигает большой величины, и в ходе эксплуатации системы ЭП систематическое воздействие колебаний значительной амплитуды приведет к накоплению усталостных напряжений в элементах кинематической цепи ЭП, а, следовательно, к преждевременному выходу из строя механической части ЭП. В дальнейшем при синтезе оптимальных САУ следует уделить внимание вопросам снижения механических колебаний в системе, не ухудшая при этом статических и динамических характеристик системы.

Литература.

1. Зеленов А. Б. Оптимальное релейное управление электроприводом с характеристикой нагрузки, имеющей участок отрицательного вязкого трения // Вестник Харьков. госуд. политехн. унив-та, серия «Электротехника, электроника и электропривод», 2000. – Вып. 113. – С. 82 – 84.
2. Зеленов 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.