

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук,
Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук
И.В. БОВДУЙ,
А.В. ВОЛОШКО,
Е.В. ВИНИЧЕНКО

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Наведена математична модель електропривода як три масової електромеханічної системи. Розроблено метод синтезу робастного управління і наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Приведена математическая модель электропривода как трехмассовой электромеханической системы. Разработан метод синтеза робастного управления и приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

Введение. Одной из важнейших проблем современной теории и практики систем автоматического регулирования является создание быстродействующих следящих приводов с широким диапазоном регулирования скорости при обеспечении высокой точности и плавности отработки входных воздействий. В целом ряде случаев обеспечение плавного движения исполнительной оси следящего привода является решающей задачей, так как неплавное перемещение объекта снижает его выходные характеристики, а иногда не позволяет вообще их обеспечить. Причины неплавного перемещения следящим приводом нагрузки – внутренние и внешние возмущения, действующие на элементы привода, такие как нелинейность характеристики трения, кинематические погрешности и упругие деформации механических передач, помехи датчиков обратных связей, изменение коэффициентов усиления элементов и т.д.

Постановка проблемы. В настоящее время проблема обеспечения плавной работы следящих приводов пока до конца не решена. Еще далеко не закончена работа по исследованию влияния на плавность перемещения нагрузки того или иного возмущающего фактора. Нет и разработанных методов синтеза следящих приводов с учетом обеспечения требований по плавности при действии целого ряда возмущений.

Влияние на устойчивость, точность, качество переходных процессов следящего привода параметров механических передач: люфта, упругости, кинематических погрешностей, инерционности – это классические задачи, которые исследованы достаточно полно для практического использования

их результатов. Но есть и целый ряд вопросов, которые остаются и сегодня проблемными: обеспечение необходимой плавности перемещения объекта регулирования и установление связей показателей плавности с параметрами механической передачи; обеспечение требуемых показателей качества приводов при переменном передаточном числе и переменных параметрах нагрузки [1-4]. Эти вопросы в целом ряде конкретных задач являются определяющими, а поэтому их рассмотрение при исследовании следящих приводов с механическими передачами являются актуальным.

Анализ литературы. Характер динамических процессов в значительной степени определяются наличием упругих элементов в кинематической цепи электромеханической системы от приводного двигателя до рабочего органа. Возникновение колебаний в режиме буксования в основном обусловлено наличием падающего участка в характеристике внешнего трения. Причем, такой падающий участок особенно характерен при работе электромеханических систем на низких скоростях движения рабочего органа, что часто сопровождается его неплывным движением. Синтез таких систем рассмотрен в [1-4]. Однако синтезированные таким образом системы обладают различными динамическими характеристиками при работе на восходящем и падающем участках характеристики внешнего трения.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является повышение точности работы системы управления в различных режимах работы за счет применения многокритериального синтеза робастного регулятора.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. За расчетную схему исполнительного механизма примем схему клинового механизма, показанную на рис. 1. На схеме обозначено: m_i – массы; P_i – вес; C_{y2}, C_{y4} – жесткости; x_i – координаты; β – угол подъема резьбы винта; $i = \overline{1,4}$ (1 – электродвигатель; 2 – ходовая гайка; 3 – ходовой винт; 4 – нагрузка).

Для упрощения анализа предполагаем, что двигатель перемещается с постоянной приведенной скоростью v . За начало отсчета координат принимаем положение системы, при котором упругие связи недеформированы. Учитывая, что $x_1 = vt$, $x_3 = x_2 \operatorname{tg} \beta$, принимаем за обобщенные координаты x_2 и x_4 .

Составим уравнения Лагранжа для рассматриваемой системы:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_2} = Q_2;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_4} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_4} + \frac{\partial v}{\partial x_4} = Q_4.$$

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{m_2 x_2^2}{2} + \frac{m_3 x_2^2 t g^2 \beta}{2} + \frac{m_4 x_4^2}{2}.$$

Потенциальная энергия системы

$$U = \frac{C_{y2} (vt - x_2)^2}{2} + \frac{C_{y3} (x_2 t g \beta - x_4)^2}{2} - P_3 x_2 t g \beta - T_4 x_4.$$

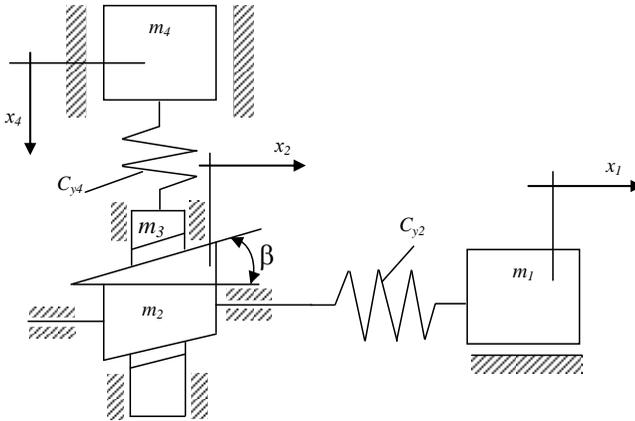


Рис.1. Схема исполнительного механизма в виде трехмассовой системы

Полученную систему дифференциальных уравнений приведем к следующему виду:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 = & -\frac{1}{m_2} [C_{\partial 2} (\dot{x}_2 - v) + C_{\partial 4} (\dot{x}_2 t g \beta - \dot{x}_4) t g \beta + C_{y2} (x_2 - vt) - \\ & - C_{y4} (x_4 - x_2 t g \beta) t g \beta - f(\dot{x}_2)] [C_{y4} (x_4 - x_2 t g \beta) + C_{\partial 4} (\dot{x}_4 - \dot{x}_2 t g \beta)]; \\ \ddot{x}_4 = & -\frac{1}{m_4} [C_{\partial 4} (\dot{x}_4 - \dot{x}_2 t g \beta) + C_{y4} (x_4 - x_2 t g \beta) - P_4]. \end{aligned}$$

Метод решения. К системе управления предъявляются разнообразные требования при работе их в различных режимах. Приведем частные критерии оптимизации, предъявляемые к системе. Время отработки заданного угла рассогласования – t_{pe2} . Время разгона до номинальной скорости и время торможения до полного останова – t_{paz} . Ошибка отработки гармонического сигнала заданной амплитуды и частоты ε_{zap} . Ошибка стабилизации при случайном изменении момента нагрузки ε_{cl} . Макси-

мальная скорость наведения ω_{\max} . Минимальная скорость наведения ω_{\min} . Неплавность наведения при минимальной скорости $\Delta\omega_{\min}$. Естественно, что при этом должны быть учтены ограничения по напряжению и току, а также по скорости вращения приводного двигателя.

Для решения задачи многокритериального синтеза робастного управления воспользуемся концепцией функционально – множественной принадлежности на элементах пространства состояний [5-6]. При этом предполагается, что цель управления, ограничения на вектор состояния и управления могут быть приведены к единым ограничениям на вектор состояния системы. Предположим, что исходная нелинейная система может быть описана в пространстве состояний нелинейным дифференциальным уравнением состояния в следующем виде:

$$\dot{x} = f(x, u, t), x(t_0) = x_0, t \geq t_0, u \in U(x, t),$$

где $U(x, t) \subset R^m$ – некоторое заданное множество для каждого x и $t \geq t_0$, для выполнения следующего соотношения на вектор состояния:

$$x = x(t) \in Q(t), t \geq t_0;$$

$$Q(t) = \{x \in R^n : \psi(x, t) \leq 0\},$$

где $\psi(x, t)$ – скалярная непрерывно-дифференцируемая по всем своим переменным функция.

Тогда для обеспечения условия принадлежности вектора состояния $x(t)$ множеству $Q(t)$ достаточно, чтобы обеспечивалось неравенство:

$$(\nabla_x \psi, f(x, u, t)) \leq 0,$$

для каждого $x \in \Gamma Q(t)$ и хотя бы одного соответствующего ему значения $u \in U(x, t)$ при $t \geq t_0$. Здесь $\Gamma Q(t) = \{x \in R^n : \psi(x, t) = 0\}$ – граница множества $Q(t)$; $\nabla_x \psi$ – градиент функции $\psi(x, t)$; $(\nabla_x \psi, f(\cdot))$ – скалярное произведение векторов $\nabla_x \psi, f(\cdot) \in R^n$.

Обычно часть требований, предъявляемых к системе, формулируются в форме минимума либо максимума вектора контролируемых переменных

$$y = \varphi(x(t), t) \in Q(t), t \geq t_0,$$

где $\varphi(x, t)$ – некоторая заданная непрерывно-дифференцируемая $(n \times 1)$ – вектор-функция, а множество

$$Q(t) = \{y \in R^n : \psi(y, t) \leq 0\}.$$

Тогда, для обеспечения условия принадлежности вектора состояния $\bar{x}(t)$ множеству $Q(t)$ для выполнения ограничений на вектор состояния и для обеспечения условия принадлежности вектора цели управления $y(t)$

множеству $Q(t)$ достаточно, чтобы выполнялось неравенство:

$$\left(\nabla_y \psi, \nabla_x \varphi \cdot f(x, u, t) + \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) \leq 0,$$

для каждого $y \in \Gamma Q(t)$ и каждого $x \in M(y, t)$ и хотя бы для одного, соответствующего каждому значения $u \in U(x, t), t \geq t_0$. Здесь $\Gamma Q(t)$ – граница множества $Q(t)$; $\nabla_y \psi$ – градиент функции $\psi(y, t)$; $\nabla_x \varphi$ – якобиан функции $\varphi(x, t)$; $M(y, t)$ – некоторое многообразие, соответствующее $y \in \Gamma Q(t)$ и определяемое согласно зависимости:

$$M(y, t) = \{x \in R^n : \varphi(x, t) = y\}; \\ Q(t) \subseteq B_\varphi \text{ при } t \geq t_0.$$

При минимизации управляющего воздействия это неравенство может быть записано в виде следующего неравенства

$$\min_{u \in U(x, t)} \left(\nabla_y \psi, \nabla_x \varphi \cdot f(x, u, t) \right) + \left(\nabla_y \psi, \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\partial \psi}{\partial t} \leq 0.$$

При синтезе робастной системы гарантированного управления объектом с параметрическими, структурными и неопределенностями внешних воздействий это неравенство может быть записано в виде максимального неравенства

$$\max_{x \in M(y, t)} \min_{u \in U(x, t)} \left(\nabla_y \psi, \nabla_x \varphi \cdot f(x, u, t) \right) + \left(\nabla_y \psi, \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\partial \psi}{\partial t} \leq 0,$$

для каждого $y \in \Gamma Q(t)$ и каждого $x \in M(y, t), t \geq t_0$.

Результаты расчета на ЭВМ. В качестве примера на рис. 2 показан переходный процесс скорости рабочего механизма по моменту сопротивления в робастной системе управления соответствующей наибольшему наклону характеристики внешнего трения в редукторе. Несмотря на то, что переходный процесс по моменту сопротивления являются сильно колебательными, в реальных условиях моменты сопротивления изменяются не мгновенно, а достаточно плавно и при этом величина дисперсии ошибки компенсации случайного изменения момента сопротивления удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к системе управления.

В работе были проведены всесторонние исследования влияния наклонов характеристик внешнего трения на динамические характеристики синтезируемой робастной системы управления. При исследовании системы управления наклоны падающих участков этих характеристик внешнего трения выбирались такие, при которых исходная непрерывная система становилась неустойчивой. При таких значениях коэффициентов внешнего трения система робастного управления остается устойчивой,

однако при этом существенно увеличивается колебательность переходных процессов. Причем, наибольшую колебательность имеют переходные процессы именно той массы, в которой характеристика внешнего трения имеет наибольший наклон падающего участка.

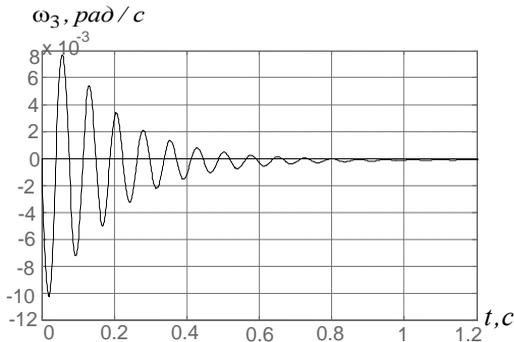


Рис.2. Переходный процесс скорости рабочего механизма по моменту сопротивления в робастной системе управления

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Таким образом, с помощью разработанной методики многокритериального синтеза робастных регуляторов удалось получить приемлемые показатели качества и удовлетворить техническим требованиям, предъявляемым к работе системы управления в различных режимах. Процедура многокритериального синтеза решена на основе концепции функционально-множественной принадлежности на элементах пространства состояний. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы управления как трехмассовой электромеханической системы.

Список литературы: 1. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В., Чаусов А.А. Проектирование взаимосвязанных систем управления. – К.: Техніка, 1994. – 232 с. 2. Богаенко И.Н., Новоселов Б.В., Кузнецов Б.И. Проектирование систем со сложными кинематическими цепями. – К.: Техніка, 1996. – 282 с. 3. Александров Е.Е., Кузнецов Б.И. Богаенко И.Н. Многоканальные системы оптимального управления. – К.: Техніка, 1995. – 281 с. 4. Новоселов Б.В., Морозов В.В., Потапов Л.Д. Плавность работы электромеханических приводов. – Владимир: ОСНТО, 1986. – 76 с. 5. Никитина Т.Б. Робастное управление многоканальными итерационными электроприводами по H^2 и H^∞ критериям. Электромашиностроения та електрообладнання. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Одеса. – 2006. – Вип. 67. – С. 13-17. 6. Никитина Т.Б. Синтез робастных регуляторов многоканальных итерационных систем // Радиоэлектроника и информатика. Научно-технический журнал. – Харьков: ХНУРЭ. – 2007. – № 4 (35). – С. 24-30.

Поступила в редколлегию 03.09.08