

УДК 621.8058-8

МЕТОД ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА С ВЫДЕЛЕНИЕМ КРИТЕРИЕВ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С.Ю. Мисюрин



**МИСЮРИН
Сергей
Юрьевич**

Кандидат технических наук, ученый секретарь Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Специалист в области робототехнических систем. Автор более 30 научных работ.

Введение

В ходе разработок сложных технических систем часто возникают задачи рационального выбора структуры и параметров устройств, состоящих из нескольких подсистем, динамические характеристики которых должны быть согласованы друг с другом оптимальным образом. Такие задачи возникают, в частности, при создании комплексов «двигатель–механизм–управление», предназначенных для перемещения и позиционирования объектов различного назначе-

ния. Подобно рода комплексы используются в автономном режиме или встраиваются в технологическое оборудование в качестве механизмов подачи, рабочих механизмов, транспортирующих устройств и т.п.

В научно-технической литературе обычно рассматриваются методы структурного и параметрического синтеза каждой из подсистем в отдельности. Однако при таком подходе трудно обеспечить высокую степень согласованности между характеристиками отдельных подсистем, например, двигателя и механизма с учетом возможностей управления. В результате, с одной стороны, возникают ситуации, когда для ликвидации недостатков, вызванных заниженной мощностью двигателя, приходится значительно усложнять алгоритм управления приводом. С другой стороны, завышение мощности двигателя несколько упрощает управление, но ухудшает габаритные, экономические и ценовые показатели привода.

Как правило, структуру, геометрические параметры передаточного механизма и тип двигателя (электрический, гидравлический, пневматический) задают предварительно, а затем переходят к выбору основных параметров двигателя. Структура системы управления определяет

ся на последней стадии в зависимости от особенностей поставленной задачи. В результате процесс параметрического синтеза сводится к анализу различных комбинаций параметров двигателя и системы управления при фиксированной структуре и параметрах механизма. В настоящей работе предлагается метод синтеза, основанный на динамическом анализе одновременно всех подсистем с учетом их взаимодействия друг с другом.

Механизм и его передаточная функция

Рассмотрим пример решения задачи перемещения груза (рис. 1) за заданное (или минимальное) время с остановкой в определенной позиции с заданной точностью. Исходными данными являются масса перемещаемого объекта m , сила сопротивления движению P_r , время перемещения и точность останова объекта в конечной позиции. Одновременно могут быть заданы некоторые ограничения на габариты механизма и двигателя, на усилие P_x , развиваемое двигателем, или другие условия. Таким образом, считаются заданными векторы оптимизации, критериев и ограничений.

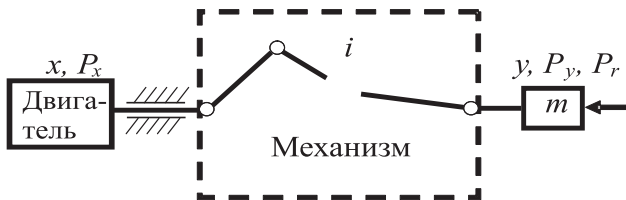


Рис. 1. Структурная схема механизма:
 x – координата исполнительного устройства (двигателя); y – координата перемещаемого объекта; P_x – сила, развиваемая двигателем; P_y – движущая сила на входном звене механизма; P_r – сила сопротивления

На первом этапе параметрического синтеза транспортирующего привода предлагается передаточный механизм заменить некоторой, по возможности простой, кинематической моделью – передаточной функцией i , выражающей закон изменения отношения скоростей на входе и выходе механизма. Функция i в общем случае является переменной, зависимой от положения механизма, и может быть задана, например, как функция y :

$$i = \frac{\dot{x}}{\dot{y}} = f(y). \quad (1)$$

В рассматриваемом примере $\dot{x}$ совпадает со скоростью двигателя, а $\dot{y}$ – со скоростью перемещаемого объекта.

Если $i = \text{const}$ (что характерно для зубчатых, винтовых и др. механизмов), то имеет место соотношение

$$i = x/y.$$

Для транспортирующего привода с ограниченным ходом рабочего органа

$$i = s_x/s_y,$$

где s_x и s_y – полные ходы соответственно двигателя и объекта.

В случае $i = \text{var}$ отношение полных ходов s_x/s_y двигателя и объекта характеризует среднеинтегральное значение i , поскольку

$$x = \int_0^y f(y) dy.$$

Поэтому отношение s_x/s_y называется далее эквивалентным передаточным отношением и обозначается i_e .

Представим передаточную функцию в виде

$$i = i_e \cdot I, \quad (2)$$

тогда

$$I = i/i_e = f(y)/i_e$$

представляет значения функции i относительно i_e .

Представление передаточной функции в виде (2) позволяет разделить процесс ее построения на два этапа. Первый этап – это выбор значения i_e . Величина отношения ходов двигателя и рабочего органа определяется конструктивными требованиями к приводу. Что касается $f(y)$, то, как показали предварительные исследования, для ее выбора можно использовать довольно широкий класс функций, в том числе функцию кусочно-линейного типа. Основное требование при выборе вида $f(y)$ – обеспечить ее минимум, достаточный для преодоления приложенной нагрузки.

Выделение критериев оптимизации

После выбора i_e выполняется параметрический синтез системы «двигатель-управление» с передаточным механизмом, представленным передаточной функцией. Эта задача решается в критериальном пространстве динамического поведения на основе исследования его особенностей с выделением областей допустимых решений.

Полученные при переходе к безразмерным соотношениям критерии подоби́я можно условно разделить на две группы. Критерии первой группы характеризуют динамические свойства собственно двигателя, критерии второй группы – особенности системы управления [3].

Из критериев первой группы выделено два базовых – критерий инерционности двигателя и критерий длительности динамического процесса. В качестве дополнительных использовались критерии сил сопротивления (трения), запаздывания в срабатывании распределительного устройства, критерии начального и конечного состояний привода. В число критериев второй группы входят безразмерные коэффициенты усиления в контурах обратной связи и параметры, характеризующие передаточную функцию механизма.

Рассмотрим, в качестве примера, систему с идеальным двигателем, под которым будем понимать двигатель с движущей силой, пропорциональной сигналу управления $P_x = P_{xL} \cdot \gamma$ ($P_{xL} = \max P$) и не зависящей от скорости. Система уравнений динамики механизма, изображенного на рис. 1, имеет вид

$$\begin{cases} m\dot{y} = P_y + P_r \\ P_y = P_x i \\ P_x = P_{xL} \gamma \\ \gamma = -K_{\dot{y}} \dot{y} + \operatorname{sgn}(y) \cdot K_Y |y|^{0.5}, \end{cases} \quad (3)$$

где P_y – движущая сила на входном звене механизма; P_{xL} – максимальная движущая сила привода; γ – закон управления; K_Y – коэффициент усиления в обратной связи по положению; $K_{\dot{y}}$ – коэффициент усиления в обратной связи по скорости.

Здесь взят за основу закон управления с параболической линией переключения, хотя в принципе можно использовать и другой тип управления. Систему уравнений (3) удобнее переписать в ином виде:

$$\begin{cases} m\dot{y} = P_y + P_r \\ P_y = P_x i \\ P_x = P_{xL} \gamma \\ \gamma = -K_{\dot{y}} \cdot (\dot{y} + \operatorname{sgn}(y) \cdot (2\ddot{y}_m |y|)^{0.5}) \end{cases}, \quad (3^*)$$

где $\dot{y}_m$ – условный параметр параболической линии переключения (расположенной на фазовой

плоскости $y, \dot{y}$), характеризующий равнозамедленное движение массы m с ускорением $\dot{y}_m$.

Величина $\dot{y}_m$ может быть представлена как отношение некоторой силы P_{xm} , действующей на массу m , к величине последней. При этом сила P_{ym} выражается через произведение P_x и i .

Далее, приводя уравнения к безразмерному виду, в качестве масштаба измерения P_{ym} будем использовать выражение $P_{ym}^* = P_{xL} i_e$.

Из условия $\gamma=0$ получаем уравнение линии переключения, определяющей смену знака γ :

$$\dot{y} + \operatorname{sgn}(y) \cdot (2\ddot{y}_m \cdot |y|)^{0.5} = 0.$$

Для выбора коэффициента обратной связи по скорости $K_{\dot{y}}$ воспользуемся условием, что при статическом смещении исполнительного звена механизма (т.е. массы m) от точки позиционирования на величину y_L управляющее воздействие $\gamma=1$, т.е. движущая сила двигателя достигает своего максимального значения $P_x = P_{xL}$. Тогда из уравнения системы (3*) имеем:

$$K_{\dot{y}} \cdot (2\dot{y}_m \cdot y_L)^{0.5} = 1$$

или

$$K_{\dot{y}} = 1 / (2\dot{y}_m \cdot y_L)^{0.5}.$$

В результате система уравнений (3*) примет вид:

$$\begin{cases} m\dot{y} = P_y + P_{ry} \\ P_y = P_x i \\ P_x = P_{xL} \gamma \\ \gamma = (-1 / (2\dot{y}_m y_L)^{0.5}) \cdot (\dot{y} + \operatorname{sgn}(y) \cdot (2\dot{y}_m \cdot |y|)^{0.5}). \end{cases} \quad (4)$$

Из выражения для γ могут быть получены уравнения линий насыщения, характеризующие условием $\gamma \pm 1$:

$$\dot{y} / (2\dot{y}_m y_L)^{0.5} = (\pm 1 + \operatorname{sgn}(y) \cdot (|y| / y_L)^{0.5}).$$

Для перевода системы уравнений (3*) в безразмерный вид воспользуемся соотношениями:

$$t = t^* \tau, \quad y = y^* v, \quad P_x = P_x^* \gamma; \quad i = i^* I. \quad (5)$$

Если принять

$$\begin{aligned} P_x^* &= P_{xL}, \quad y^* = s_y, \\ t^* &= (m s_y / P_{xL} \cdot i_{\text{экв}})^{0.5}, \quad i^* = i_{\text{экв}}, \end{aligned} \quad (6)$$

то получим безразмерный аналог системы (3*):

$$\begin{cases} \dot{v} = \delta_x \cdot I + \delta_{ry} \\ \delta_x = \gamma \\ \gamma = (-1 / (2\dot{v}_m v_L)^{0.5}) \cdot (\dot{v} + \operatorname{sgn}(v) \cdot (2\dot{v}_m |v|)^{0.5}), \end{cases}$$

$$I = i/i_e, \quad \delta_{ry} = P_r / (P_{xL} \cdot i_e), \quad v_L = y_L / s_y; \\ \dot{v}_m = \dot{y}_m \cdot (m / P_{xL} \cdot i_e). \quad (7)$$

Соответственно будем иметь:

- уравнение линии переключения

$$\dot{v} + \operatorname{sgn}(v) \cdot (2\ddot{v}_m \cdot |v|)^{0.5} = 0,$$

- уравнения линий насыщения

$$\ddot{v} / (2\ddot{v}_m v_L)^{0.5} = (\pm 1 + \operatorname{sgn}(v) \cdot (|v| / v_L)^{0.5}).$$

Уменьшение v_L повышает точность позиционирования массы m , но одновременно делает более резким переход от режима разгона к режиму торможения. Чтобы обеспечить достаточно высокую точность позиционирования и одновременно исключить резкий переход к режиму торможения, предлагается алгоритм управления, в котором параметр v_L изменяется по закону

$$v_L = v_{L0} + v_{L1} \cdot |v|,$$

где v_{L0} и $v_{L0} + v_{L1}$ – значения величины v_L соответственно в точке позиционирования ($v=0$) и в начальной точке ($|v|=1$).

В таком виде оптимизация системы (7) будет проходить независимо от конкретных типов двигателя и механизма, и параметры оптимального движения будут давать пространство реальных решений.

В качестве критериев оптимизации удобно использовать критерий длительности динамического процесса (в целях достижения минимального времени срабатывания или получения минимальной движущей силы двигателя при заданном времени), критерии качества отработки конечной позиции и др. Для поиска оптимального (рационального) решения воспользуемся методом многокритериальной и многопараметрической оптимизации [4].

Конечная цель этого этапа – выбор критериев первой и второй групп системы (7) для последующего перехода к определению реальных параметров двигателя – системы управления и передаточного механизма. Процедура такого перехода подробно рассматривалась в [1, 2].

Выбор параметров механизма

Остановимся на процессе перехода от передаточной функции к определению ее параметров,

состоящем в изменении длин звеньев механизма, координат положения точки связи механизма с основанием, точки подключения двигателя к механизму и начального состояния механизма в целях приближения реальной передаточной функции i к функции i^* , построенной на предыдущем этапе. Как показал численный эксперимент, функция i^* весьма чувствительна даже к небольшим изменениям параметров механизма, что позволило достаточно быстро найти приемлемое решение. Одновременно решалась задача обеспечения линейного движения объекта по траектории, близкой к прямой.

В качестве функции приближения I были выбраны достаточно близкие друг к другу V -образная кусочно-линейная, параболическая и синусоидальная функции. Было установлено, что при одном и том же ограничении по $I_{\min}$ результат (функция i^*) мало зависит от вида I . Оптимизация производилась при помощи ЭВМ из условия минимизации целевой функции с учетом принятых ограничений на механизм (вектора ограничений). Наиболее удобным в этом случае является метод «наилучшего приближения» (рис. 2).

Геометрически это означает, что график приближающей функции $P(x)$ оказывается заключенным между двумя кривыми, отстоящими от графика заданной функции $F(x)$ на величину $\pm L$ (в данном случае L есть целевая функция, подлежащая минимизации). Приближение является равномерным, поскольку отклонения от за-

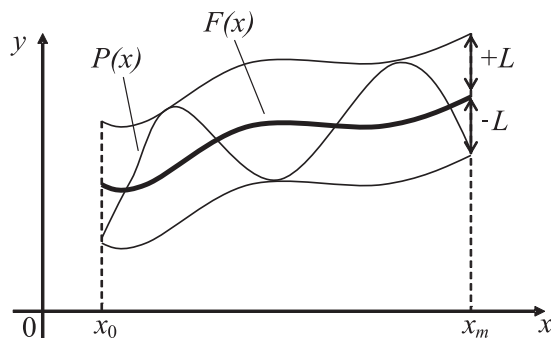


Рис. 2. Метод «наилучшего» приближения

данной функции равномерно достигают своих предельных значений.

Заключение

Представленный в статье метод выбора параметров (параметрический синтез) динамической системы «передаточное устройство – механизм управление» есть обобщение теоретических разработок автора, представленных в работах [1–3]. Замена механизма его передаточной функцией, не нарушая общности задачи, значительно упрощает синтез системы. Выбор параметров системы осуществляется при помощи численного моделирования с использованием программного пакета MOVI, логическая часть которого изложена в работе [4].

Список литературы

1. Крейнин Г.В., Мисюрин С.Ю., Яшина М.А. К синтезу позиционной системы с гидроприводом и механизмом передачи движения с переменным передаточным отношением // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 5. С. 17–23.
2. Крейнин Г.В., Мисюрин С.Ю., Яшина М.А. К синтезу позиционной системы с гидроприводом, механизмом передачи движения с переменным передаточным отношением и комбинированной нагрузкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 5. С. 3–10.
3. Крейнин Г.В., Кривц И.Л., Мисюрин С.Ю., Яшина М.А. Пневматический позиционный привод: оценка возможностей и перспектив применения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 1. С. 27–35.
4. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: ООО «Дрофа», 2006. – 170 с.

Уважаемые читатели!

Журнал «Машиностроение и инженерное образование» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степени доктора или кандидата наук.