

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВКЛЮЧЕНИЕМ ЗУБЧАТЫХ МУФТ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ

Проблема синтеза регуляторов является одной из центральных в теории автоматического управления. Разработано много методов синтеза регуляторов одномерных и многомерных систем. При создании систем управления моторно-трансмиссионными установками часто приходится решать задачи по выявлению требуемого характера изменения сигнала управления (преимущественно гидравлического) для обеспечения заданных выходных параметров динамической системы, с тем чтобы подобрать или спроектировать соответствующий регулятор. К задачам такого типа можно отнести, например, расчет таких характеристик устройств плавного включения фрикционных муфт переключения передач, при которых обеспечиваются продольные ускорения машины, не превышающие заданных; отыскание требуемого характера изменения давления рабочей жидкости в системе управления тормозом-синхронизатором (ТС) (рис. 1) гидромеханической трансмиссии (ГМТ). В схеме, представленной на рис. 1, включение зубчатой полумуфты механизма реверса характеризуется угловой скоростью, обеспечивающей бесшумное и безударное ее соединение с неподвижной полумуфтой.

Задачи указанного класса решают либо эвристически, подбирая и уточняя необходимый закон управления, либо используя оптимизационные алгоритмы, что не всегда рационально.

Так, задача обеспечения плавного включения зубчатых муфт решена путем перебора различных вариантов управления ТС [1], которые могут обеспечить необходимую для надежного включения относительную скорость вращения зубчатых полумуфт. Для этого проведены серии расчетов согласно математической модели процесса затормаживания турбинного вала ГМТ при давлении управления ТС, изменяемом в соответствии с характеристиками клапана плавности, и при импульсном изменении давления рабочей жидкости в ГМТ. Этот путь достаточно трудоемок, требует значительных затрат машинного времени, поскольку связан не с поиском оптимального алгоритма управления, а с от-

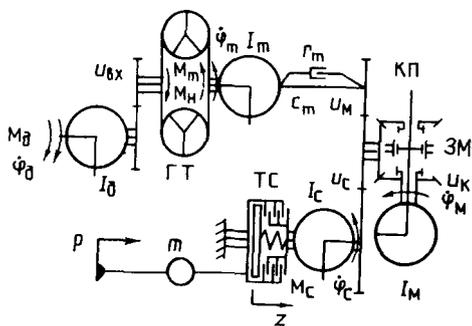


Рис. 1. Динамическая модель механизма реверса гидромеханической трансмиссии

бором результатов расчета с постепенным приближением их к требуемым выходным характеристикам динамической системы.

Рассмотренные выше задачи относятся к классу обратных задач динамики, в которых по известным характеристикам движения системы определяют активные силы, вызывающие это движение. Поэтому для синтеза систем оптимального управления необходимо сначала рассчитать параметры движения системы под действием заданных сил до перевода ее из исходного в требуемое состояние (прямая задача), после чего, задав оптимальные параметры движения, определить активные силы, при которых поддерживается заданное движение (обратная задача).

Преимущества указанного метода можно показать на примере решения задачи, рассмотренной в [1]. В соответствии со схемой ГМТ, приведенной на рис. 1, необходимо найти требуемый закон изменения давления в точке, расположенной на некотором удалении от ТС, обеспечивающий вращение включаемой полумуфты с угловой скоростью  $0,1 \text{ рад/с} < \omega_{\text{отн}} \leq 5 \text{ рад/с}$ . Решение этой задачи предполагает наличие математической модели процесса функционирования динамической системы двигатель—трансмиссия—тормоз и целевой функции.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение динамической системы, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 I_d \ddot{\varphi}_d &= M_d - M_H / (u_{\text{вх}} \eta_{\text{вх}}); \\
 I_T \ddot{\varphi}_T &= M_T - c_T (\varphi_T - \varphi_c u_M u_c) - r_T (\dot{\varphi}_T - \dot{\varphi}_c u_M u_c); \\
 (I_c + I_M (u_c / u_K)^2) \ddot{\varphi}_c &= c_T (\varphi_T - \varphi_c u_M u_c) u_M u_c + r_T (\dot{\varphi}_T - \dot{\varphi}_c u_M u_c) u_M u_c - \\
 &- (1 - \eta_M \eta_c) c_T (\varphi_T - \varphi_c u_M u_c) u_M u_c \text{sgn}(\varphi_T - \varphi_c u_M u_c) - M_c; \\
 A_1 \ddot{z} + A_2 \dot{z} + A_3 z^2 \text{sgn}(\dot{z}) &= p (S - A_{\text{ТР}} \text{sgn}(\dot{z}) - c_{\text{пр}} (z_1 + z) - \\
 &- c_{\text{ф}} (z - z_2)); \\
 M_d &= f(\dot{\varphi}_d, h_p); \\
 M_T &= f(\dot{\varphi}_d, i_{\text{Т.Н}}); \\
 M_c &= f(\dot{\varphi}_c, z),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $I_d, I_T, I_c, I_M$  — момент инерции вращающихся масс, приведенный соответственно к двигателю, турбинному колесу гидротрансформатора (ГТ), ТС и зубчатой муфте;  $r_T, c_T, c_{\text{ф}}, c_{\text{пр}}$  — коэффициенты демпфирования и жесткости упругих элементов ТС и трансмиссии;  $M_d, M_H, M_T$  — крутящий момент соответственно на валу двигателя, насосного и турбинного колес ГТ;  $M_c$  — момент, создаваемый ТС;  $u_{\text{вх}}, u_M, u_c, u_K, \eta_{\text{вх}}, \eta_M, \eta_c$  — передаточные числа и КПД приводов;  $i_{\text{Т.Н}}$  — передаточное отношение ГТ;  $A_i$  — коэффициент, характеризующий потери давления по длине магистрали управления, инерционные и местные;  $p$  — давление управления;  $A_{\text{ТР}}$  — коэффициент, учитывающий трение поршня ТС;  $\varphi$  — угловые координаты элементов системы;  $z, S$  —

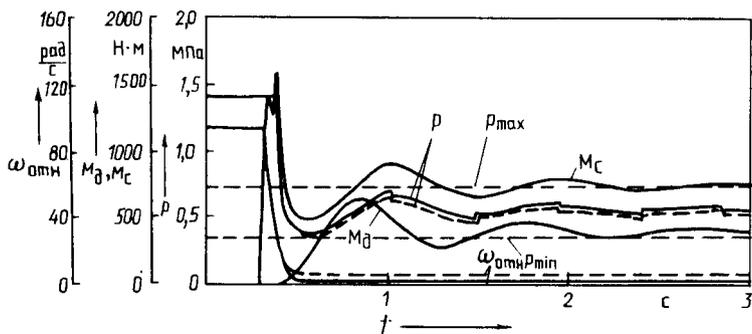


Рис. 2. Расчетные характеристики процесса непрерывного управления тормозом-синхронизатором

перемещение и площадь поршня ТС;  $z_1$  — предварительное сжатие пружины;  $z_2$  — начальная координата дисков;  $h_p$  — перемещение рейки топливного насоса.

В качестве целевой функции принимается относительная угловая скорость вращения зубчатых полумуфт  $\omega_{отн}$ , а максимальное давление управления ограничивается рабочим давлением в гидросистеме ГМТ. Все характеристики динамической системы рассматриваются как детерминированные функции. Решению задачи оптимального управления предшествует рассмотрение условий, при которых динамическую систему с помощью подходящим образом выбранного управления за конечный промежуток времени можно перевести из заданного в любое требуемое состояние, т.е. условий управляемости системы [2].

Расчет закона оптимального управления ТС, обеспечивающего бесшумное и безударное включение зубчатых муфт, выполнен следующим образом. Полагая давление в точке управления  $p = 1,4$  МПа, производили, интегрируя уравнения (1), анализ процесса затормаживания турбины ГТ тормозом до достижения скорости зубчатой полумуфты  $\dot{\varphi}_c = \omega_{отн} = 5$  рад/с. Фиксировали время, необходимое для перевода динамической системы из одного состояния в другое. Если оно не удовлетворяло разработчика, изменяли начальное давление рабочей жидкости. Затем, принимая  $\omega_{отн}$  постоянной и равной 0,1 или 5 рад/с, решали обратную задачу — по заданной  $\omega_{отн}$  находили  $p$ .

Переход динамической системы из одного состояния в другое должен осуществляться плавно, в противном случае в точках излома кривой  $\dot{\varphi}_c = f(t)$  вторая производная будет неопределенной. Поэтому регулирование давления необходимо начинать несколько раньше с плавным приближением к оптимальному значению  $\omega_{отн}$  по гладкой кривой, не имеющей разрывов второго рода. Наиболее приемлема в этом случае аппроксимация этого участка кубическим сплайном или соответствующим образом подобранной функцией, асимптотически приближающейся к требуемому значению  $\omega_{отн}$ .

На рис. 2 показаны графики изменения давления  $p$  в точке управления, при котором значение  $\omega_{отн}$  снижается от максимального до 0,1 и 5 рад/с, а также изменения крутящего момента на валу двигателя  $M_d$  и момента сопротивления  $M_c$  тормоза. Можно выделить три характерных этапа управления

динамической системой. Первый этап (перевод динамической системы из одного состояния в другое) соответствует высокому давлению в точке управления ТС, необходимому для создания  $M_c$ , способного погасить кинетическую энергию вращающихся масс деталей кинематической цепи от турбины ГТ до ТС. В это время  $M_d$  увеличивается. Второй этап — сброс давления, связанный с уменьшением передаваемого турбиной момента за счет снижения потенциальной энергии закрутки валов в трансмиссии. Третий этап — отслеживание (с некоторым запаздыванием) давлением управления изменений  $M_d$  из-за запаздывания срабатывания регулятора двигателя при компенсации отклонений частоты вращения его вала.

Подобрать устройство, обеспечивающее требуемое управление для первого и второго этапов, достаточно легко. Управление на третьем, наиболее важном этапе представляет значительно более сложную задачу, поскольку разность давлений управления (при значительных их амплитудах) на границах интервала очень мала. Это означает, что незначительные отклонения давления управления от расчетного приведут к существенному ухудшению качества процесса включения муфт.

Поскольку поиск алгоритма оптимального управления вели для детерминированных функций, а изменение параметров двигателя, ГТ, ТС носит вероятностный характер, полученный алгоритм зависит от некоторой функции математического ожидания процесса. Поэтому даже устройства, в точности обрабатывающие требуемый алгоритм непрерывного управления на всех рассмотренных этапах, не могут обеспечить устойчивости протекания процесса включения зубчатых муфт.

Таким образом, непрерывное управление тормозом-синхронизатором перспективно с точки зрения надежности включения зубчатых муфт ГМТ. Поэтому разработан алгоритм программного управления ТС с импульсным изменением управляющего сигнала.

Основные параметры импульсного сигнала управления — верхний  $p_{\max}$  и нижний  $p_{\min}$  уровни давления — определяют расчетом по рис. 2. Они должны соответствовать требуемому интервалу изменения  $\omega_{\text{отн}}$ . Частоту импульсов давления можно найти с помощью математической модели (1), заменив в ней  $p$  на  $p_{\max}$  при  $\dot{\varphi}_c \rightarrow 5$  рад/с и на  $p_{\min}$  при  $\dot{\varphi}_c \rightarrow 0,1$  рад/с.

Итак, совместным решением прямых и обратных задач динамики можно существенно упростить поиск алгоритма оптимального управления для различных регуляторов, необходимых при создании систем автоматического управления транспортными средствами.

#### Список литературы

1. Антипенко Г.Л. Исследование процессов управления зубчатыми муфтами гидромеханической трансмиссии // Конструирование и эксплуатация автомобилей и тракторов. Мн., 1988. № 3.
2. Болонкин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ // Алгоритмы и программы. М., 1986.