

УДК 621.941-229.2:62-553:519.87

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРОСУППОРТА СТАНКА С БЕЗЫНЕРЦИОННЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

¹Кадыров И.Ш., ²Давлятов У.Р., ¹Турусбеков Б.С.

¹КНАУ им. К.И. Скрябина, Бишкек, e-mail: bgtu_kg@mail.com, tbs200618@gmail.com;

²КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, e-mail: uluk-2000@mail.ru

В статье обоснована актуальность исследований объекта управления, имеющего безынерционный регулятор расхода, поступающего в рабочую полость цилиндра гидросуппорта. Отмечено, что улучшения технико-экономических показателей и расширения функциональных возможностей гидропривода на современном этапе развития можно добиться в основном за счет улучшения систем его управления, что обеспечивает широкие возможности качественного перевооружения промышленности, быстрой переналадки производства при высоком уровне автоматизации. Рассмотрены уравнения объекта гидросуппорта, безынерционного регулятора расхода, общее дифференциальное уравнение автоматической системы, характеристическое уравнение переходного процесса, решение дифференциального уравнения объекта без регулятора, установившееся значение регулируемой величины, полное решение дифференциального уравнения автоматической системы – объект + регулятор, неустойчивая система с безынерционным регулятором. Построены кривые случая мгновенного скачкообразного воздействия на систему, переходных процессов гидросуппорта с регулятором и без нее. Представлены материалы по разработке математической модели гидросуппорта станка с безынерционным регулятором. Проведена сравнительная оценка их статических и динамических характеристик, в результате чего доказано, что присоединение к объекту регулятора является важным при применении их в управлении технологическими процессами металлорежущих станков различного назначения. Выведенные математические модели позволяют производить расчеты по определению параметров для проектирования и создания автоматических систем управления режимами работ не только токарного станка, но и других станков при их модернизации и создании нового оборудования.

Ключевые слова: безынерционный регулятор, гидросуппорт, гидроавтоматика, токарный станок, дифференциальное уравнение, переходный процесс, динамика и статика

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A HYDRAULIC SUPPORT FOR A MACHINE WITH AN INERTIAL CONTROLLER

¹Kadyrov I.Sh., ²Davlyatov U.R., ¹Turusbekov B.S.

¹KNAU named after K.I. Scryabin, Bishkek, e-mail: bgtu_kg@mail.com, tbs200618@gmail.com;

²KSTU I. Razzakov, Bishkek, e-mail: uluk-2000@mail.ru

The article substantiates the relevance of research of the control object, which has an inertialess flow regulator entering the working cavity of the hydraulic support cylinder. It was noted that improving technical and economic indicators and expanding the hydraulic drive's functional capabilities at the present stage of development can be achieved mainly by improving its control systems, which provides wide opportunities for high-quality re-equipment of the industry, quick readjustment of production with a high level of automation. The equations of the hydrosupport object, the inertialess flow controller, the general differential equation of the automatic system, the characteristic equation of the transition process, the solution of the differential equation of the object without the controller, the steady-state value of the controlled variable, the complete solution of the differential equation of the automatic system – the object + controller, an unstable system with the inertialess controller are considered. The curves of the case of instantaneous spasmodic effects on the system, transient hydraulic support with and without a regulator are constructed. Materials are presented on the development of a mathematical model of the hydraulic support of the machine with an inertia-free controller. A comparative assessment of their static and dynamic characteristics has been carried out, which has been proved that attaching a regulator to an object is important when using them in the control of technological processes of metal cutting machines for various purposes. The derived mathematical models allow calculations to be made to determine the parameters for the design and creation of automatic control systems for the operating modes of not only a lathe, but also other machines during their modernization and the creation of new equipment.

Keywords: inertialess controller, hydraulic support, hydraulic, lathe, differential equation, transient, dynamics and statics

В современном машиностроительном производстве вопросы комплексной автоматизации технологических процессов невозможно решить в полной мере, если для технологических установок не обеспечены такие технические параметры, как надёжность, долговечность и производительность. Перечисленные выше параметры в значительной степени определяются динамическими качествами системы гидроприводов отдельных механизмов каждого технологического узла металлорежущих

станков. Улучшения технико-экономических показателей и расширения функциональных возможностей гидропривода на современном этапе развития можно добиться в основном за счет улучшения систем его управления. Важнейшим требованием к замкнутым системам управления является возможность гибкой настройки их параметров, а также быстрого программирования и перепрограммирования алгоритмов управления гидроприводов в зависимости от конкретных эксплуатационных условий.

Такой подход обеспечивает широкие возможности качественного перевооружения промышленности, быстрой переналадки производства при высоком уровне автоматизации, повышает производительность труда за счет снижения продолжительности производственного цикла, снижает потребность в квалифицированных рабочих вследствие сокращения ручных операций, то есть ориентирован на комплексную автоматизацию единичного и серийного производства при минимальном участии человека в этом процессе.

Технический уровень и эксплуатационные показатели современной автоматизированной машины однозначно определяются параметрами и характеристиками его привода, который является энергетической основой всех технологических и производственных процессов.

Наиболее полно эти требования можно выполнить только за счет применения автоматических систем стабилизации сил резания, т.е. поддерживать силы резания на постоянном уровне при любых проявлениях возмущающего воздействия, за счет которого одновременно повышается надежность функционирования оборудования станков и инструментов [1, 2].

К известным возмущающим воздействиям сил резания при любом виде механической обработки в ходе изготовления детали относятся те возмущения, которые постоянно присутствуют по следующим причинам: изменения припуска и твердости материала по длине обработки детали, износа инструмента, температурных деформаций, что в конечном итоге технологическая система подвергается различным упругим деформациям, приводящим к появлению погрешностей обработки детали.

Возникает необходимость в применении к объекту регулирования, в данном случае автоматического регулятора, состоящая из следующих элементов: информационного устройства – датчика, измеряющего силу резания и преобразующего ее в электрический сигнал, сравнивающего элемента – сумматора, на вход которого поступают сигнал с выхода датчика и задающий сигнал с выхода программного устройства, выходной сигнал сумматора, являющийся сигналом рассогласования, усиливается по мощности усилителем, а также регулятора, оказывающего воздействие на объект регулирования, в данном случае – гидросуппорт подачи инструмента.

В связи с этим определенным интерес представляет теоретическое исследование объекта управления, имеющего безынерционный регулятор расхода, по-

ступающего в рабочую полость цилиндра гидросуппорта.

При построении систем автоматического управления нагрузка на валу рабочего органа, как правило, считается заданной (расчетной) и постоянной. Пределы ее изменения определяются параметрами и производственными характеристиками самой машины. Для обеспечения надежности и долговечности машины максимальная нагрузка должна быть ограничена допустимыми значениями момента, усилия и ускорения, развиваемой валом рабочего органа.

В замкнутой системе автоматического управления в формировании управляющего воздействия участвуют две информации: заданная и текущая. Текущая информация измеряется с помощью датчика регулируемого параметра и преобразуется им в электрический сигнал. Этот сигнал подается на вход управляющего устройства в качестве сигнала обратной связи.

Для исследования процессов, происходящих в системах автоматического управления, необходимо написать общее дифференциальное уравнение всей системы. При прочих равных условиях составление адекватного уравнения возможно только в том случае, если установлены взаимосвязи между входными и выходными параметрами каждого из элементов системы как в статическом, так и в динамическом режиме.

Дифференциальное уравнение объекта регулирования, работающего с малыми отклонениями от рабочей точки, целесообразно представлять от полных величин переменных S , Q , к отклонениям ΔS , ΔQ .

Тогда уравнение объекта гидросуппорта представляется в виде

$$T_0 \frac{d\Delta S}{dt} + \Delta S = K_0 \Delta Q + f(t), \quad (1)$$

где T_0 – постоянная времени, характеризующая инерционность гидросуппорта; $K_0 = 1/F$ – коэффициент усиления объекта; $f(t)$ – возмущающее воздействие.

Уравнение безынерционного регулятора расхода:

$$\Delta Q = -K_{\text{пер}} \cdot \Delta S, \quad (2)$$

где $K_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления регулятора, равен произведению всех коэффициентов усиления его элементов.

Тогда общее дифференциальное уравнение автоматической системы можно записать в виде

$$T_0 \frac{d\Delta S}{dt} + (1 + K_0 K_{\text{пер}}) \Delta S = f(t). \quad (3)$$

Как известно, процесс регулирования подачи инструмента состоит из двух частей: переходного процесса $\Delta S_{\text{пер}}(t)$ и установившегося процесса $\Delta S_{\text{уст}}(t)$.

$$\Delta S = \Delta S_{\text{пер}} + \Delta S_{\text{уст}} \quad (4)$$

Переходной процесс математически является общим решением дифференциального уравнения (2) при $f(t) = 0$.

$$T_0 \frac{d\Delta S_{\text{пер}}}{dt} + (1 + K_0 K_{\text{пер}}) \Delta S_{\text{пер}} = 0 \quad (5)$$

Характеристическое уравнение для (5) имеет вид: $T_0 p(1 + K_0 K_{\text{пер}}) = 0$.

Его корень равен $p = -(1 + K_0 K_{\text{пер}})/T_0$.

С учетом полученного корня характеристического уравнения переходная составляющая общего интеграла, как решение однородного уравнения равна [2–4]:

$$\Delta S_{\text{пер}} = C e^{-t(1+K_0 K_{\text{пер}})/T_0} \quad (6)$$

где C – произвольная постоянная, определяемая из заданных начальных условий.

Кривая переходного процесса (5) для положительного значения $C > 0$ показана на рис. 1.

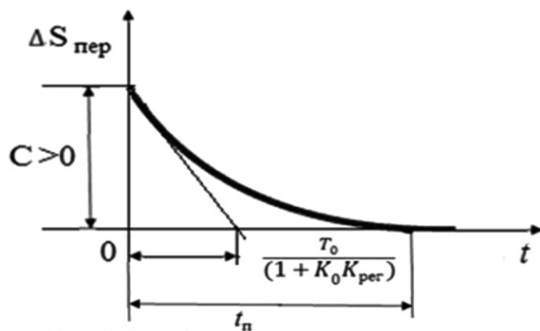


Рис. 1. График переходного процесса при $C > 0$ объекта с регулятором

Для сравнительной оценки переходных процессов гидросуппорта с безынерционным регулятором и без него, необходимо решить дифференциальное уравнение объекта без регулятора.

$$T_0 \frac{d\Delta S}{dt} + \Delta S = f(t) \quad (7)$$

Его характеристическое уравнение будет

$$T_0 p + 1 = 0; \quad p = -1/T_0 \quad (8)$$

Переходной процесс объекта без регулятора $\Delta S_{\text{пер}} = C_{\text{общ}} e^{-t/T_0}$, где $C_{\text{общ}} = \Delta U_{\text{пер}}$.

Кривая переходного процесса объекта без регулятора представлена на рис. 2.

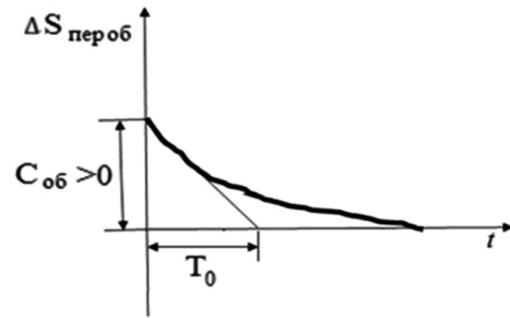


Рис. 2. График переходного процесса объекта без регулятора

Сравнивая переходные процессы объекта с регулятором (рис. 1) и без него (рис. 2), видим, что: $T_0/(1 + K_0 K_{\text{пер}}) < T_0$.

Отсюда вывод, что длительность переходного процесса объекта с безынерционным регулятором в $(1 + K_0 K_{\text{пер}})$ раз меньше, чем у объекта без регулятора, то есть

$$t_n = 3T_0/(1 + K_0 K_{\text{пер}}) \quad (9)$$

Установившийся процесс зависит, как было отмечено выше, от конкретного значения возмущающего воздействия $f(t)$.

Рассмотрим случай мгновенного скачкообразного воздействия на систему $f(t) = \text{const} = f_0$. График воздействия представлен на рис. 3.

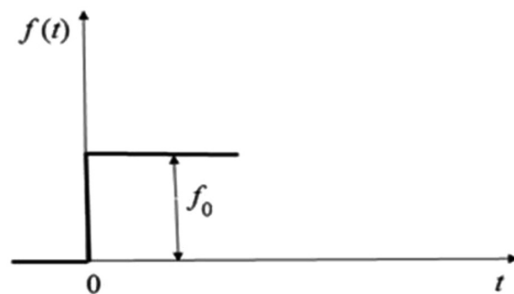


Рис. 3. Возмущающее воздействие на объект в виде $f_0 = \text{const}$

В этом случае установившееся значение регулируемой величины определяется из уравнения (3), когда $d\Delta S/dt = 0$ [2, 3]:

$$\Delta S_{\text{уст}} = f_0/(1 + K_0 K_{\text{пер}}) \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что для уменьшения автоматической ошибки регулирования надо брать по возможности большее значение коэффициента регулирования.

Объект без регулятора будет иметь установившееся значение:

$$\Delta S_{\text{устоб}} = f_0 \quad (11)$$

Сравнение формул (10) и (11) позволяет сделать вывод, что присоединение к объекту безынерционного регулятора уменьшает статическую ошибку в $(1 + K_0 K_{\text{пер}})$ раз.

Обычно по технологическим требованиям на проектирование автоматических систем всегда задается наибольшая возможная статическая ошибка регулирования при реальных возможных значениях f_0 , и из этого условия определяется коэффициент усиления $K_{\text{пер}}$.

Полное решение дифференциального уравнения автоматической системы – объект + регулятор складывается из общего и частного решений уравнения (3) [4, 5]:

$$\Delta S = C e^{-t/(1+K_0 K_{\text{пер}})/T_0} + \frac{f_0}{1 + K_0 K_{\text{пер}}}. \quad (12)$$

Постоянное интегрирование находится из начальных условий: при $t = 0$; $\Delta S = 0$.

Из (12) находим: $C = -f_0 / (1 + K_0 K_{\text{пер}})$.

Таким образом, процесс регулирования будет осуществляться по следующему закону:

$$\Delta S = \frac{f_0}{1 + K_0 K_{\text{пер}}} (1 - e^{-t/(1+K_0 K_{\text{пер}})/T_0}). \quad (13)$$

Объект без регулятора при тех же начальных условий будет иметь следующее решение:

$$\Delta S = f_0 (1 - e^{-t/T_0}). \quad (14)$$

На рис. 4 показаны переходные процессы гидросуппорта с регулятором и без него, наглядно демонстрирующие эффективность объекта с регулятором.

Следует отметить, что объекты с безынерционным регулятором и без него работают устойчиво, то есть переходные процессы являются затухающими, поскольку в левой части дифференциального уравнения коэффициенты при переменных постоянны и имеют положительный знак, а также корни характеристического уравнения являются действительными и отрицательными.

Более подробно исследуем устойчивость системы регулирования.

Система регулирования с затухающим процессом (рис. 4) называется устойчивой и в данном случае система регулирования будет устойчивой при любых значениях параметров объекта и регулятора, так как показатель степени e является отрицательным при любых значениях коэффициентов усиления системы (положительные числа).

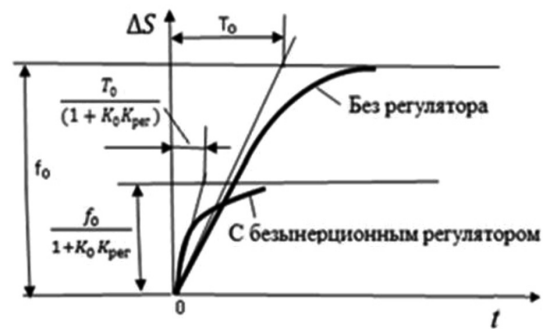


Рис. 4. Переходные процессы объекта с безынерционным регулятором и без него

Следует отметить, что правильное присоединение регулятора к объекту означает правые части уравнения регулятора и регулирующего объекта имели бы противоположные знаки при всех положительных коэффициентах обоих уравнений. Физически это значит, что регулятор при этом дает такое направление воздействия на объект, которое действительно направлено на уничтожение создавшегося отклонения регулируемой величины, или можно сказать иначе, что правильное присоединение регулятора в общем случае (при любых знаках коэффициентов в уравнении объекта) будут такими, которые делают положительными все коэффициенты левой части уравнения динамики системы регулирования в целом.

Рассмотрим случай, когда может получиться неустойчивая система с безынерционным регулятором – это случай регулирования неустойчивого объекта

$$T_0 \frac{d\Delta S}{dt} - \Delta S = k_0 \Delta Q + f(t). \quad (15)$$

Тогда уравнение системы будет

$$T_0 \frac{d\Delta S}{dt} + (1 + k_0 k_{\text{пер}} - 1) \Delta S = f(t). \quad (16)$$

Корень характеристического уравнения при этом

$$p = \frac{-(k_0 k_{\text{пер}} - 1)}{T_0}, \quad (17)$$

и система будет устойчивой только в случае $k_0 k_{\text{пер}} > 1$.

Следовательно, с помощью безынерционного автоматического регулятора неустойчивый объект можно сделать устойчивым.

Выводы

1. Рассмотрены общее дифференциальное уравнение автоматической системы

и дифференциальное уравнение объекта без регулятора.

2. Показано, что длительность переходного процесса объекта с безынерционным регулятором в $(1 + K_0 K_p)$ раз меньше по сравнению, когда объект без регулятора, что наглядно видно из графиков (рис. 4).

3. На рис. 4 показаны переходные процессы гидросуппорта с регулятором и без него, наглядно демонстрирующие эффективность объекта с регулятором. Объекты с безынерционным регулятором и без него работают устойчиво, то есть переходные процессы являются затухающими.

Список литературы

1. Муслимов А.П., Васильев В.Б. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2018. 221 с.
2. Ившин В.П., Петрухин М.Ю. Современная автоматика в системе управления технологическими процессами. М.: НИЦИНФРА-М, 2013. 400 с.
3. Музылева И.В. Элементарная теория линейных систем в задачах и упражнениях: учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 428 с.
4. Горбина Н.Н., Солопова А. С. Теория автоматического управления: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 2010. 201 с.
5. Башта Т.М. Гидравлические следящие приводы. Киев: Машгиз, 1990. 398 с.