

# СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

*Розроблена математична модель обладнання для механічної обробки матеріалів з гідроприводом обертової дії як об'єкту автоматичного керування. Представлені передатні функції процесу регулювання робочого об'єму насоса та силової частини приводу, структурна схема математичної моделі. Запропонована система автоматичного керування обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження*

*Ключові слова: гідропривід, математична модель, передатна функція, структурна схема, система автоматичного керування*

*Разработана математическая модель оборудования для механической обработки материалов с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления. Представлены передаточные функции процесса регулирования рабочего объема насоса и силовой части привода, структурная схема математической модели. Предложена система автоматического управления оборудованием, учитывающая стохастическое возмущение и шум наблюдения*

*Ключевые слова: гидропривод, математическая модель, передаточная функция, блок-схема, автоматическая система управления*

**Я. В. Соколова**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра экономической кибернетики\*

E-mail: ya.v.sokolova@inbox.ru

**Н. Г. Азаренко**

Аспирант

Кафедра процессов обработки материалов,  
станки и инструменты\*

E-mail: stanki@snu.edu.ua

**В. И. Соколов**

Доктор технических наук, декан факультета  
машиноведения\*

E-mail: sokolov\_vi@net.lg.ua

\*Восточноевропейский национальный университет им.  
Владимира Даля  
кв. Молодежный, 20 а, г. Луганск, Украина, 91034

## 1. Введение

Достижение произвольной кинематики рабочих органов оборудования для механической обработки материалов, возможность программной реализации оптимальных законов движения обеспечивается применением автоматических электрогидравлических приводов (ЭГП) и, в частности, автоматических электрогидравлических приводов (ЭГП) с объемным регулированием в оборудовании мощностью свыше 8 кВт. Расширение функциональных возможностей и повышение эффективности оборудования для механической обработки может быть достигнуто разработкой и применением систем автоматического управления (САУ) [1, 2].

В этой связи актуальной задачей для синтеза и исследования систем автоматического управления является разработка достоверных математических моделей рабочих процессов, протекающих в ЭГП и учитывающих особенности технологического назначения оборудования.

## 2. Анализ последних исследований и публикаций

Проблематика математического моделирования характеристик автоматических ЭГП машиностроительного оборудования достаточно широко представлена в литературе [1 – 3]. Исследование рабочих процессов в оборудовании основано на фундаментальных уравнениях гидромеханики, механики твердого тела, электротехники; а для исследования устойчивости и качества регулирования таких систем, для их корректирования применяют методы теории автоматического управления и регулирования.

При математическом моделировании динамических характеристик оборудования для механической обработки материалов возникают определенные трудности с описанием нестационарных гидромеханических процессов, протекающих в них. В динамике гидросистем имеются особенности, обусловленные взаимодействием гидравлических элементов, а также наличием движения рабочей среды по трубопроводам, щелям и каналам с местными сопротивлениями. Кро-

ме процессов, возникающих при выполнении системами запланированных операций в гидроприводе, имеют место колебания давлений, расходов, отдельных деталей вследствие сжимаемости рабочей среды и воздействия рабочей среды на регулирующие устройства [3, 4]. Сочетание всех этих явлений приводит к сложным нестационарным гидромеханическим процессам, которые необходимо учитывать при проектировании машиностроительного оборудования с гидроприводом.

Вместе с тем, расширение функциональных возможностей и повышение эффективности оборудования для механической обработки материалов за счет разработки и применения систем автоматического управления требует негромоздких достоверных математических моделей рабочих процессов, протекающих в приводах и достаточно полно учитывающих особенности технологического назначения оборудования.

Следует отметить, что известные подходы к описанию рабочих процессов в оборудовании для механической обработки используют упрощенные математические модели характеристик, не учитывают стохастическое возмущающее действие и шум наблюдения [4 – 6], вследствие чего отсутствуют возможности дальнейшего совершенствования оборудования.

### 3. Цель работы

Целью данной работы является синтез системы автоматического управления оборудованием для механической обработки материалов с гидроприводом вращательного действия.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать математическую модель оборудования как объекта автоматического управления, получить передаточные функции процесса регулирования рабочего объема насоса и силовой части привода, предложить систему автоматического управления оборудованием, учитывающую стохастическое возмущение и шум наблюдения.

### 4. Синтез системы автоматического управления оборудованием

Схема гидропривода вращательного действия оборудования для механической обработки с объемным регулированием представлена на рис. 1, где показаны две аксиально-поршневые гидромашины: основной насос 2 и гидромотор 5. Вал насоса приводится во вращение от асинхронного электродвигателя 1. Подача насоса регулируется изменением угла наклона блока цилиндров (или угла наклона шайбы) с помощью механизма 3, которым может быть также гидроусилитель, состоящий из гидроцилиндра и золотника. Насос двумя трубопроводами 4 соединен с гидромотором. Вал гидромотора через редуктор 6 соединен с объектом управления 7. Для восполнения утечек рабочей жидкости служит вспомогательный насос (обычно шестеренный или пластинчатый) 13, приводимый во вращение от вала основного насоса. Если угол наклона блока цилиндров (угла наклона шайбы) основного насоса регулируется с помощью гидроусилителя, то вспомогательный насос используется также для

питания гидроусилителя жидкостью под давлением. Давление в напорной магистрали вспомогательного насоса поддерживается переливным клапаном 10. Эта магистраль через два подпиточных клапана 9 подключена к трубопроводам, соединяющим основной насос и гидромотор. При падении давления в одном из трубопроводов ниже допустимого значения соответствующий подпиточный клапан открывается и пропускает жидкость под давлением из напорной магистрали вспомогательного насоса до тех пор, пока в трубопроводе не восстановится необходимый уровень давления.

После этого подпиточный клапан под действием давления в трубопроводе закрывается. Подпиточные клапаны должны поддерживать в трубопроводе такое минимальное давление, чтобы в основном насосе не возникла кавитация. Для этого устанавливается необходимое давление в напорной магистрали вспомогательного насоса путем регулирования натяжения пружины (давления срабатывания) переливного клапана 10.

От возникновения чрезмерно высокого давления трубопроводы гидропривода защищены двумя предохранительными клапанами 8. При недопустимом повышении давления в одном из трубопроводов открывается соответствующий предохранительный клапан, пропускающий жидкость в другой трубопровод с низким давлением. В линии нагнетания вспомогательного насоса также имеется предохранительный клапан 12, который защищает насос от повышения давления при засорении фильтра 11.

На рис. 1 отмечены следующие обозначения гидромашин и гидроаппаратов: Н1...Н2 – насосы; ГМ – гидромотор; КО1...КО2 – клапаны обратные; КП1...КП4 – клапаны предохранительные; Ф – фильтр.

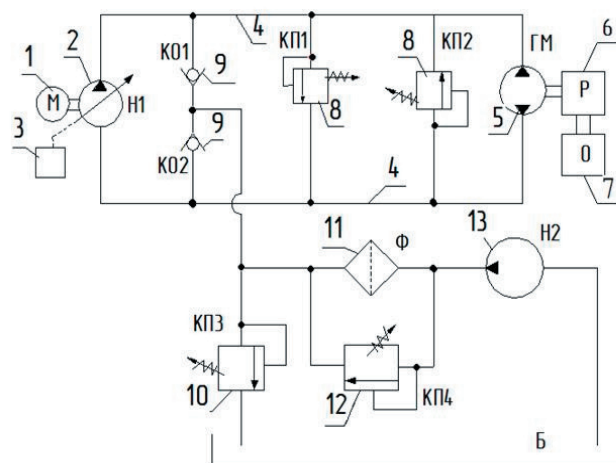


Рис. 1. Схема типового гидропривода с объемным регулированием: 1 – асинхронный электродвигатель; 2 – основной насос; 3 – механизм регулирования рабочего объема насоса; 4 – трубопроводы; 5 – гидромотор; 6 – редуктор; 7 – объект управления; 8 – предохранительные клапаны; 9 – подпиточные клапаны; 10 – переливные клапаны; 12 – предохранительный клапан; 13 – вспомогательный насос

При разработке схемных решений автоматических ЭГП машиностроительного оборудования для исполь-

зования преимуществ объемного способа регулирования важным является правильный выбор системы управления рабочим объемом насоса. Анализ систем различного назначения показывает [1, 2, 6], что применение электрогидравлических усилителей (ЭГУ) позволяет в полном мере реализовать функциональные требования к оборудованию.

Регулируемые аксиально-поршневые насосы с наклонной шайбой чаще всего в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как гидроагрегаты со встроенным ЭГУ [4, 5]. С использованием паспортных данных можно построить динамическую модель второго порядка процесса регулирования угла наклона шайбы насоса  $\gamma$  по управляющему напряжению  $U$

$$T_{2y}^2 \frac{d^2\gamma}{dt^2} + T_{1y} \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = k_{\gamma U} U, \tag{1}$$

где  $k_{\gamma U}$  – коэффициент передачи, который можно определить по номинальному управляющему напряжению  $U_{ном}$  и номинальному углу наклона шайбы аксиально-поршневого насоса  $\gamma_{ном}$

$$k_{\gamma U} = \frac{\gamma_{ном}}{U_{ном}}. \tag{2}$$

Постоянные времени  $T_{2y}$ ,  $T_{1y}$  известным образом определяются по частотам  $\nu_1, \nu_2$  сдвига по фазе соответственно на  $-45^\circ$  и  $-90^\circ$  [1, 5]:

$$T_{2y} = \frac{1}{2\pi\nu_2}; T_{1y} = \frac{1}{2\pi\nu_1} - \frac{2\pi\nu_1}{(2\pi\nu_2)^2}. \tag{3}$$

Данный подход к построению динамической модели автоматического управления углом наклона шайбы аксиально-поршневого насоса вполне применим и в случае использования ЭГУ как самостоятельного устройства, которые в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как дросселирующие гидрораспределители или распределители с пропорциональным управлением [1, 7].

Следует отметить, что регулирование подачи насоса может осуществляться не только изменением угла наклона шайбы, а и другими способами, например, изменением угла наклона блока цилиндров.

Нетрудно убедиться, что и в данном случае динамическая модель процесса регулирования угла наклона люльки блока цилиндров будет иметь подобный вид.

Таким образом, передаточная функция процесса регулирования угла наклона шайбы (блока цилиндров) в соответствии с (1) имеет вид

$$W_{np}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{2y}^2 s^2 + T_{1y} s + 1}, \tag{4}$$

где  $s$  – переменная Лапласа.

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, а также анализ характеристик ЭГУ, используемых в регулируемых насосах, передаточную функцию процесса регулирования рабочего объема насоса можно рассматривать как апериодическое звено первого порядка

$$W_{np}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{1y} s + 1}, \tag{5}$$

где  $T_{1y}$  – постоянная времени процесса регулирования

$$T_{1y} = \frac{1}{2\pi\nu_1}. \tag{6}$$

В работах авторов [2, 7, 8] получена передаточная функция силовой части ЭГП с объемным регулированием для угла поворота вала гидромотора  $\alpha$  по углу наклона блока цилиндров (или шайбы)  $\gamma$

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{гп} s (T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \tag{7}$$

где  $T_{гп}$  – постоянная времени гидропривода;

$T_m$  – постоянная времени гидромотора;

$\zeta_m$  – коэффициент относительного демпфирования гидромотора.

Для построения математической модели ЭГП с объемным регулированием как объекта автоматического управления передаточную функцию для угла поворота вала по углу наклона шайбы (блока цилиндров) привода (7) перепишем в виде

$$\begin{aligned} W_{\alpha\gamma}(s) &= \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{\alpha(s)}{\Omega(s)} \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \\ &= \frac{1}{s} W_{\alpha\Omega}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{s (T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \end{aligned} \tag{8}$$

где  $W_{\alpha\Omega}(s)$  – введенная в рассмотрение передаточная функция силовой части привода (передаточная функция для угловой скорости вращения вала гидромотора по углу наклона шайбы или блока цилиндров)

$$W_{\alpha\Omega}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1}, \tag{9}$$

где  $k_{\Omega\gamma}$  – коэффициент передачи силовой привода, который в соответствии с [1, 2] можно определить по выражению

$$k_{\Omega\gamma} = \frac{2\pi k_{Q\gamma}}{q_m}. \tag{10}$$

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, а также анализ характеристик реальных приводов оборудования для механической обработки материалов, передаточную функцию силовой части привода (9) допустимо упрощенно рассматривать как апериодическое звено первого порядка

$$W_{\alpha\Omega}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_{сп} s + 1}, \tag{11}$$

где  $T_{сп}$  – постоянная времени силовой части привода, значение которой можно определить согласно

теоретическим зависимостям, а также на основе экспериментальной оценки динамических характеристик привода [2, 9].

Необходимо отметить следующее. Угловая скорость вращения вала гидромотора, в общем случае, определяется не только рабочим объемом насоса, но и величиной нагружающего момента  $M$  на валу мотора. Степень влияние устанавливается для конкретного привода, причем увеличение нагружающего момента однозначно приводит к уменьшению угловой скорости вращения, что в линейном приближении может быть отражено передаточной функцией

$$W_{\Omega M}(s) = \frac{\Omega(s)}{M(s)} = -k_{\Omega M}, \quad (12)$$

где  $k_{\Omega M}$  – коэффициент передачи для угловой скорости вращения по нагружающему моменту, величина которого можно оценить по статическим характеристикам объемного гидравлического привода [2, 7].

Таким образом, учитывая принцип суперпозиции

$$\Omega(s) = W_{cn}(s)\gamma(s) + W_{\Omega M}(s)M(s), \quad (13)$$

математическую модель оборудования для механической обработки с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 2.

Проверка адекватности полученных математических моделей проведена на автоматизированном стенде экспериментальных исследований [8].

Математическая модель оборудования для механической обработки материалов с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления положена в основу разработки САУ, учитывающая стохастическое возмущение и шум наблюдения.

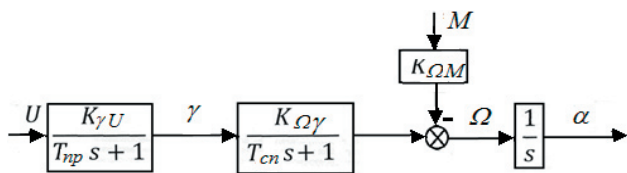


Рис. 2. Структурная схема математической модели оборудования как объекта автоматического управления

В пространстве состояния уравнения объекта управления были представлены в матричной форме

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_0(t), \quad (14)$$

$$y = Cx + V_n(t), \quad (15)$$

где  $x$  – фазовый вектор переменных состояния объекта автоматического управления;  $u$  – управляющее воздействие;  $y$  – выходная переменная;  $A$  – матрица параметров объекта управления;  $B$  – матрица входных параметров;  $C$  – матрица выходных параметров;  $V_0(t)$  – «цветной шум» объекта,  $V_n(t)$  – шум наблюдения.

Для формирования «цветного шума» объекта рассмотрен формирующий фильтр с передаточной функцией

$$W_{\phi}(s) = \frac{b_0^* s + b_1^*}{a_0^* s^2 + a_1^* s + a_2^*}, \quad (16)$$

на вход которого подается стационарный стохастический сигнал  $V(t)$  типа «белый шум» со спектральной плотностью  $S_V(\omega) = L_V$ .

В связи с тем, что стохастическое возбуждающее воздействие, которое приложено к объекту управления, проявляет себя независимо от управляющего сигнала, то синтез САУ оборудованием для механической обработки с гидроприводом вращательного действия выполнен с учетом аддитивной помехи. Поэтому, решение задачи стохастической оптимальной системы при неполной информации о состоянии в соответствии с методом разделения было разбито на две: задачу синтеза оптимального наблюдателя и детерминированную задачу синтеза оптимальной системы [9, 10].

Критерий оптимальности управления рассматривался в виде

$$J = \int_0^{t_f} (\tilde{Q}x^2(t) + \tilde{R}u^2(t)) dt \rightarrow \min, \quad (17)$$

где  $\tilde{Q}$  – положительно-определенная матрица, характеризующая качество управления;  $\tilde{R}$  – величина ограничения управляющего воздействия.

Для синтеза оптимального линейного регулятора в соответствии с поставленной задачей использован метод динамического программирования. Функциональное уравнение Белмана рассматривалось в виде

$$\tilde{Q}x^2 + \tilde{R}u^2 + \frac{\partial S}{\partial x}(Ax + Bu) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (18)$$

$$2\tilde{R}u + \frac{\partial S}{\partial x}B = 0. \quad (19)$$

Из уравнения (19) принято выражение для оптимального управления

$$u = -\frac{1}{2} \tilde{R}^{-1} B \frac{\partial S}{\partial x}. \quad (20)$$

С учетом положительной определенности функции Белмана для оптимального управления оборудованием для механической обработки материалов с гидравлическим приводом получено уравнение

$$u = -(K_1'' x_1 + K_2'' x_2 + K_3'' x_3), \quad (21)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – фазовые переменные;  $K_1'', K_2'', K_3''$  – коэффициенты усиления обратной связи.

Структурная схема стохастической оптимальной САУ приведена на рис. 3.

В структурной схеме системы автоматического управления отражены следующие основные элементы: модель объекта управления, модель формирователя «цветного шума объекта», фильтр Калмана-Бьюси с коэффициентами  $K_1', K_2', K_3'$  и оптимальный линейный регулятор с коэффициентами усиления обратной связи  $K_1'', K_2'', K_3''$ .

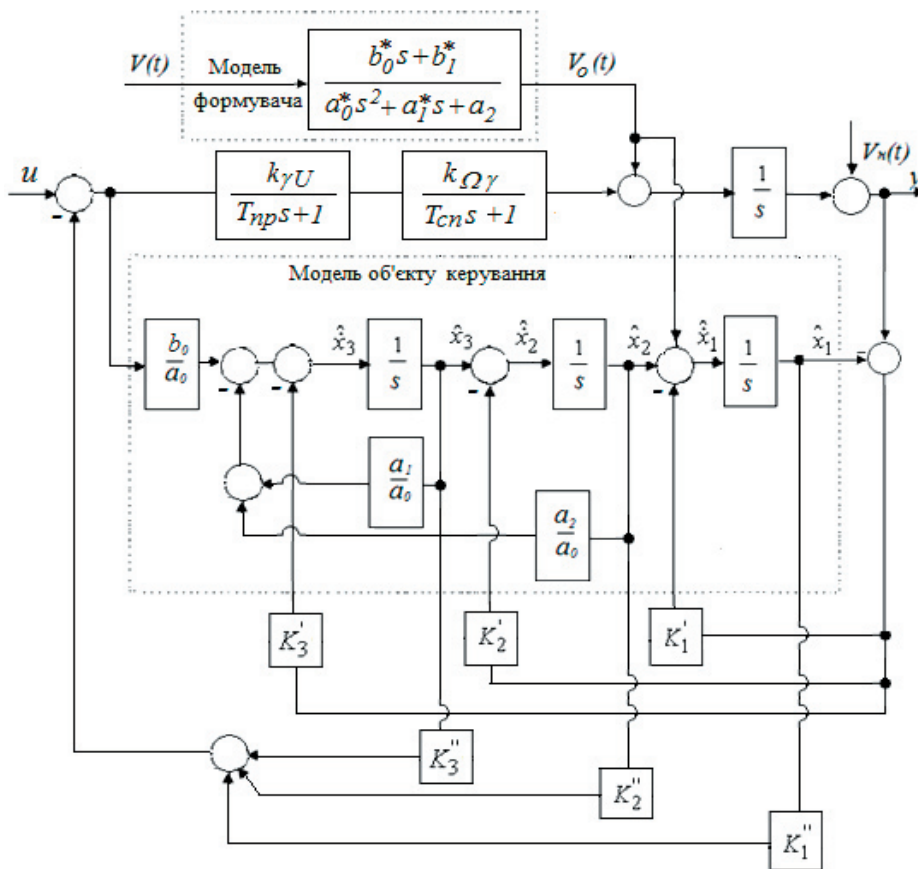


Рис. 3. Структурная схема оптимальной САУ

**5. Выводы**

На основании проведенных исследований разработана математическая модель оборудования для механической обработки материалов с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления, которая включает передаточные функции процесса регулирования рабочего объема насоса и силовой части привода.

Синтезирована оптимальная система автоматического управления оборудованием, которая в отличие от известных систем учитывает стохастическое возмущение и шум наблюдения. Стохастическая система автоматического управления включает модель объекта управления, модель формирователя «цветного шума объекта», фильтр Калмана-Бьюси и оптимальный линейный регулятор.

Литература

1. Навроцкий, К. Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов [Текст] / К. Л. Навроцкий. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
2. Соколова, Я. В. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования: монография [Текст] / Я. В. Соколова, Н.Г.Азаренко, Д.С. Грешной. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2014. – 100 с.
3. Sokolov, V. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation [Text] / V. Sokolov, N. Azarenko, Ya. Sokolova // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – 2012. – Vol. 12, № 4. – P. 268–273.
4. Братан, С. М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования [Текст] / С. М. Братан, Е. А. Владецкая // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 35. – С. 13–22.
5. Новосёлов, Ю. К. Стохастическая диагностика взаимодействия инструмента и заготовки при круглом наружном шлифовании [Текст] : сб. науч. статей / Ю. К. Новосёлов, С. М. Братан // Сучасні технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – С. 91–102.
6. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмоцистами [Текст] / Д. Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
7. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы: справочник [Текст] / В. К. Свешников, А. А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
8. Азаренко, Н. Г. Экспериментальный стенд для исследования статических и динамических характеристик автоматических электрогидравлических приводов [Текст] / Н. Г. Азаренко // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 3 (192), Ч. 1. – С. 5–9.
9. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие [Текст] : Т. 2 / Д. П. Ким. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
10. Плохотников, К. Э. Вычислительные методы. Теория и практика в среде MATLAB [Текст] / К. Э. Плохотников. – К.: Изд-во «Горячая Линия – Телеком», 2009. – 496 с.