

¹ Г. И. Канюк, д-р техн. наук,

² И. А. Бабенко

¹ А. Ю. Мезеря, канд. техн. наук

¹ М. Л. Козлова

¹ И. В. Сук

¹ А. В. Сердюк

¹ Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, e-mail: GraphMogu@yandex.ru

² Змиевская ТЭС ПАО «Центрэнерго», Харьковская обл., Змиевской р-н, e-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua

Ключові слова: термовакуумна установка, буре вугілля, нанодисперсний порошок, якість, екологія.

УДК 621.311

УНИФИЦИРОВАННАЯ СТРУКТУРА ПРЕЦИЗИОННЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

Розглянуті проблеми створення енергозберігаючих технологій. Дано визначення електрогідравлічної спостережної системи (ЕГСС) і складових її елементів. На підставі аналізу існуючих схемних розв'язків розроблений алгоритм роботи ЕГСС. Проведений цикл науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт з метою розв'язання проблем створення високодинамічних і надійних неповноповоротних гідродвигунів. Наведений алгоритм побудови математичних моделей для енергозберігаючого керування технологічними об'єктами.

Введение

Одной из основных глобальных проблем современной экономики, науки и техники является проблема энерго- и ресурсосбережения. Кардинальные решения этой проблемы связаны с созданием и внедрением новых эффективных технологий и технологических систем во всех, без исключения, отраслях техники: энергетике, металлургии, машиностроении, горнодобывающей, химической, военной промышленности.

Основу создания новых энерго- и ресурсосберегающих технологий составляют быстродействующие прецизионные автоматизированные устройства и системы, способные с максимальной скоростью и точностью выполнять заданные, порой достаточно сложные, последовательности технологических операций.

В этом плане наиболее эффективным и перспективным является класс т.н. «мехатронных» технических систем, которые построены на комплексе принципов и технических средств механики, электроники и информатики. Класс мехатронных систем сформировался в 80–90-х годах XX века на базе развития и широкого внедрения микроэлектроники и микропроцессорной техники и в настоящее время имеет приоритетное развитие в промышленно развитых странах (США, Германия, Япония): значение мехатроники среди других перспективных технологических систем постоянно растет. Это связано с тем, что мехатронные устройства, по сравнению с традиционными, обладают новыми функциями высшего порядка и позволяют создавать новые машины и механизмы с максимально эффективным использованием их энергетических возможностей, а также с широким использованием оригинальных алгоритмов управления, адаптации, слежения, обучения [1].

Особый научный и практический интерес представляют мехатронные системы со следящими электрогидравлическими исполнительными механизмами (ЭГИМ). Такие системы, совмещая в себе высокие удельные энергетические характеристики электрогидравлических механизмов с интеллектуальными и информационными возможностями управляющей микропроцессорной электроники, позволяют с высокой точностью и скоростью воспроизводить управляющие воздействия, которые изменяются по произвольным, в т. ч. и заранее неизвестным законам [2].

Мехатронные устройства со следящими электрогидравлическими исполнительными механизмами могут рассматриваться как наиболее перспективный в настоящее время подкласс мехатронных систем – электрогидравлические следящие системы (ЭГСС). При внедрении таких систем эффективно решаются важные и актуальные проблемы энерго- и ресурсосбережения в различных отраслях техники. Например, использование имитационных динамических испытательных стендов с ЭГСС, которые способны с высокой скоростью и точностью воспроизводить реальные и форсиро-

ванные режимы нагружения объектов, дает возможность в несколько раз сократить сроки и стоимость работ по созданию новой техники (за счет уменьшения количества длительных и дорогостоящих натурных испытаний); быстродействующие электронно-гидравлические регуляторы частоты вращения дизельных двигателей и паровых турбин обеспечивают повышение их КПД и качества рабочих процессов; прецизионные электрогидравлические нажимные устройства прокатных станов обеспечивают значительную экономию металла и повышение качества проката за счет снижения его разницы в толщине; использование ЭГСС в станкостроении позволяет повышать производительность станков, создавать эффективные и многофункциональные роботы и манипуляторы.

В связи с важностью и актуальностью проблемы разработкам и исследованиям ЭГСС посвящено значительное количество работ ряда научных школ и коллективов как в Украине, так и в ближнем и дальнем зарубежье.

Исходной научной базой для создания и исследования ЭГСС следует считать фундаментальные, универсального плана работы в области гидравлических приводов, теории автоматического управления, технической кибернетики. К таким работам могут быть отнесены труды Т. М. Башты, Н. С. Гамынина, В. А. Хохлова, В. С. Немирова, В. Н. Прокофьева, Д. Н. Попова, В. Ф. Казмиренко, Ю. И. Чупракова, В. А. Федорца в области теории гидравлических приводов; работы В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчеева, Н. Н. Иващенко, А. А. Воронова в области технической кибернетики и теории автоматического управления. Разноплановыми теоретическими и прикладными задачами в этой области занимаются научные школы МГТУ им. Н. Э. Баумана (Д. Н. Попов, В. Ф. Казмиренко), НТУ «КПИ» (В. А. Федорец, В. Б. Струтинский, В. В. Чкалов, О. М. Яхно), Национального авиационного университета, (Г. И. Зайончковский, В. П. Бочаров), НТУ «ХПИ» (П. М. Гладкий, В. П. Северин, Е. Е. Александров, Б. И. Кузнецов, З. Я. Лурье), Запорожского и Винницкого национальных технических университетов (А. Н. Склярский, Р. Д. Искович-Лотоцкий), Санкт-Петербургского политехнического института (В. А. Башарин).

Несмотря на большое количество разноплановых, интересных и полезных работ в этой области в настоящее время отсутствует достаточно систематизированная и универсальная теоретическая база для создания и исследования прецизионных быстродействующих ЭГСС, что затрудняет и замедляет процессы их разработки и внедрения. Существующие методы представляют собой либо общие метатеории, которые требуют конкретизации и наполнения конкретными прикладными методиками, математическими моделями и техническими решениями или направлены на решение частных задач: типовое конструкторское проектирование, проверочные расчеты и параметрическую оптимизацию уже существующих или спроектированных систем. В этом плане необходимы конкретизированные прикладные теории и методики, которые охватывали бы начальные, ключевые и наиболее наукоемкие этапы создания быстродействующих прецизионных ЭГСС: концептуальное проектирование, математическое моделирование, структурный синтез, (включая синтез эффективных регуляторов), динамический анализ, рациональный выбор параметров.

Основная научная проблема создания быстродействующих прецизионных ЭГСС заключается в эффективном синтезе научных методов и теорий, которые относятся к объектам и процессам разной физической природы, – механическим, гидравлическим, электрическим, электронным, информационным.

Эта проблема приводит к необходимости разработки на основе существующих общих методов и теорий специальной системной и конкретизированной теоретической базы, которая бы позволяла быстро и эффективно, с минимальными затратами времени и средств создавать ЭГСС с высокими показателями точности и быстродействия.

Целью настоящей работы является создание и представление унифицированной структуры прецизионных быстродействующих САУ и САР, которая может использоваться в энерго- и ресурсосберегающих технологических процессах различных отраслей промышленно-хозяйственного комплекса.

Основная часть

ЭГСС является разновидностью или подклассом общего класса мехатронных систем, построенных на основе синтеза элементов механики, электроники и технической кибернетики, в которой в

качестве исполнительного механизма используется электрогидравлический следящий привод (ЭГСП).

Основной функцией ЭГСС как замкнутой следящей системы автоматического управления является воспроизведение с заданной точностью входного (задающего) воздействия, которое в общем случае может изменяться по произвольному, в т. ч. заранее неизвестному закону.

ЭГСС представляет собой комплексное устройство, построенное на основе технических средств механики, гидравлики и электроники и предназначенное для эффективного управления движением управляемого объекта. ЭГСС в общем случае может включать в себя источники энергии, исполнительные механизмы, чувствительные элементы (датчики), управляющую ЭВМ, устройство связи с объектами (УСО) или интерфейсы, к которым относятся аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), устройства коммутации, усилители мощности, алгоритмы управления и обработки информации, а так же аппаратные и программные средства, обеспечивающие информационный обмен между ЭВМ и объектом управления. При этом неотъемлемым структурным элементом быстродействующих прецизионных ЭГСС является информационно-управляющий комплекс (алгоритм управления), поскольку ему принадлежит главная роль в обеспечении требуемых показателей точности и быстродействия. Информационно-управляющий комплекс, кроме реализации закона управления ЭГСП, может выполнять и более широкие информационные функции, не свойственные традиционным приводам: формирование режимов и программ работы, реализацию алгоритмов и программ диагностики, адаптации, слежения, обучения и др. Поскольку он реализуется в электронных (микропроцессорных) управляющих устройствах, то для выделения ЭГСС из других, более простых типов приводных систем, авторами введено в ряде публикаций название «электронно-гидравлические следящие системы» (с той же аббревиатурой – ЭГСС). Это название более точно идентифицирует данные системы как подкласс мехатронных систем с ЭГИМ.

Одним из основных элементов в структуре ЭГСС является электрогидравлический привод (ЭГП), включающий в себя источник гидравлической энергии, электрогидравлический усилитель и исполнительный гидродвигатель (рис. 1).

Общий принцип функционирования ЭГСС заключается в следующем. При подаче на вход системы внешнего (задающего) воздействия в электронном управляющем устройстве (управляющей ЭВМ) на основе заложенных алгоритмов формируется управляющее воздействие, обеспечивающее воспроизведение задающего воздействия с заданной точностью и скоростью. Это воздействие реализуется (отрабатывается) электрогидравлическим исполнительным механизмом (ЭГП) посредством преобразования в электрогидравлическом усилителе электрических сигналов управляющего воздействия в соответствующие законы изменения гидравлических параметров (расхода и давления) рабочей жидкости, поступающей в гидродвигатель от источника гидравлической энергии. Гидродвигатель обеспечивает требуемый закон движения объекта управления, параметры которого фиксируются чувствительными элементами (датчиками).

Связь между электронным управляющим устройством (управляющей ЭВМ с соответствующим алгоритмическим и программным обеспечением), с одной стороны, и исполнительным механизмом и объектом управления с другой – обеспечивается при помощи устройств связи с объектом (УСО), представляющими собой аппаратные средства общего интерфейса связи с объектом и включающих в себя ЦАП, АЦП, усилители мощности.

Авторами разработан достаточно простой алгоритм. Выполнен сравнительный анализ электрических и электрогидравлических механизмов: рассмотрены их достоинства, недостатки, определены преимущественные (предпочтительные) области применения. На основе этого анализа, а также с учетом рекомендаций, приведенных в [3], разработан достаточно простой алгоритм предварительной (без детального теоретического анализа) оценки предпочтительности типа привода для мехатронной системы (рис. 2) [4]. Определяющими показателями при этом являются значения номинальной мощности N_H и постоянной времени исполнительного механизма T_d , необходимое значение которой может быть оценено по заданным показателям быстродействия – времени регулирования (времени протекания переходного процесса) τ_p или полосе пропускания (частоте среза) ω_n : при апериодическом переходном процессе постоянная времени САУ составляет примерно третью часть общего времени протекания переходного процесса [3–5].

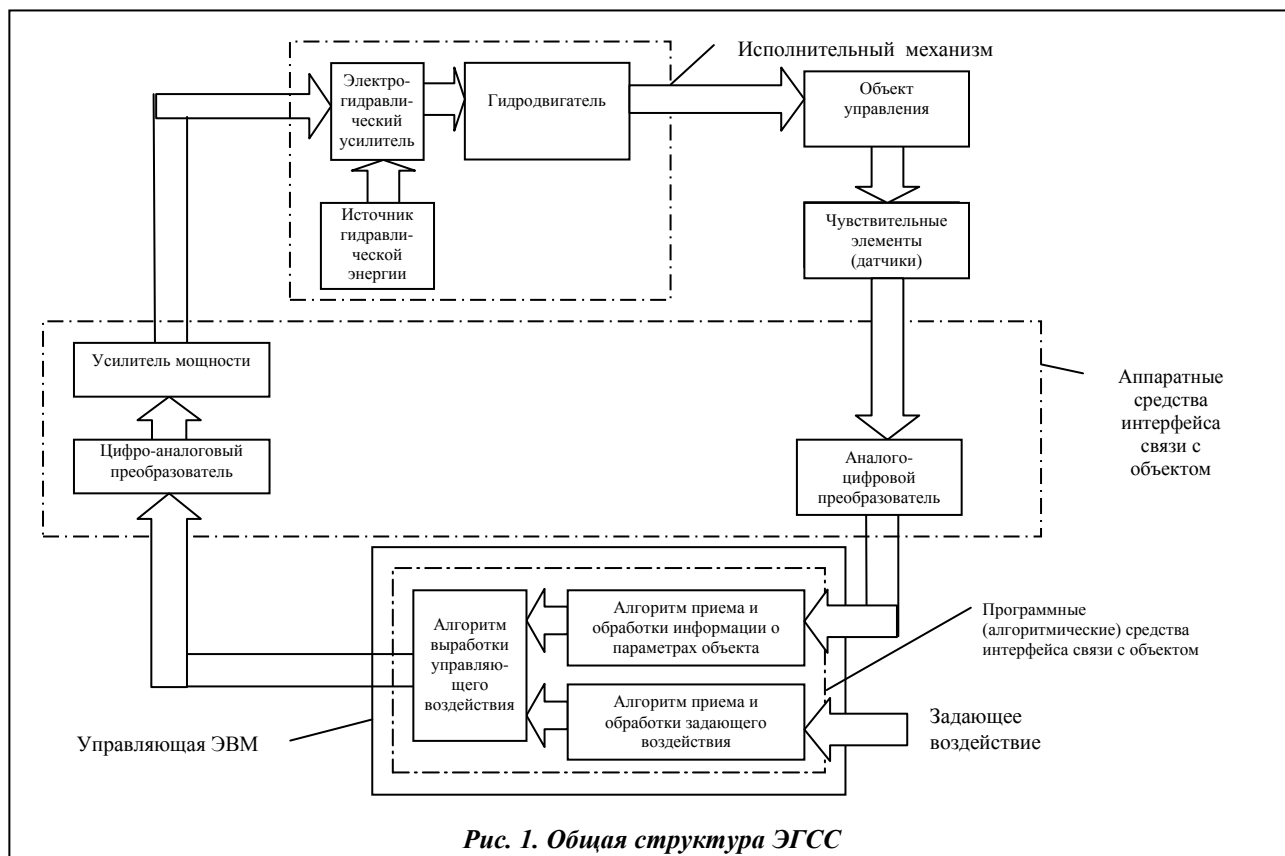


Рис. 1. Общая структура ЭГСС

Анализ существующих схемных решений ЭГП позволяет синтезировать наиболее эффективный типовой вариант принципиальной схемы для использования в быстродействующих прецизионных ЭГСС. Таким вариантом представляется одноканальный ЭГП раздельного исполнения с объемно-дрессельным регулированием скорости (в качестве дроссельного регулятора скорости используется пропорциональный электрогидравлический усилитель (сервоклапан) с электрогидравлическим управлением от аналогового или дискретного (цифрового) электронного регулятора (в частности – от широтно-импульсного модулятора), обеспечивающий дросселирование потоков рабочей жидкости как на входе, так и на выходе, с автономным (ограниченной мощности) насосно-аккумуляторным источником питания постоянного давления (с регулируемым аксиально-поршневым насосом, имеющим электрический вход), с объемным гидродвигателем поступательного поворотного или вращательного движения, с замкнутой (для привода вращательного движения) или разомкнутой (для приводов поступательного и поворотного движения) циркулирующей рабочей жидкости.

Такая схема представляется наиболее универсальной и эффективной: объемно-дрессельное регулирование, с одной стороны, обеспечивает три управляемых входа (насос, сервоклапан и гидроаккумулятор), что повышает возможности эффективного управления (дрессельное регулирование обеспечивает максимальную точность и быстродействие при работе в наиболее ответственных режимах, а объемное регулирование – энергетическую экономичность при работе в менее ответственных режимах). Наличие в системе питания гидравлического аккумулятора (при этом может использоваться гидроаккумулятор с элементом управления процессами зарядки и разрядки) повышает энергетическую эффективность привода, может увеличивать его быстродействие (особенно при преодолении кратковременных пиковых нагрузок), а также сглаживать пульсации давления в напорной линии.

Другие типы приводов (струйные, гидроимпульсные, волновые) [6–8] являются менее универсальными (могут применяться для воспроизведения ограниченных режимов движения и нагружения). Целесообразность использования таких приводов должна анализироваться в каждом конкретном случае.

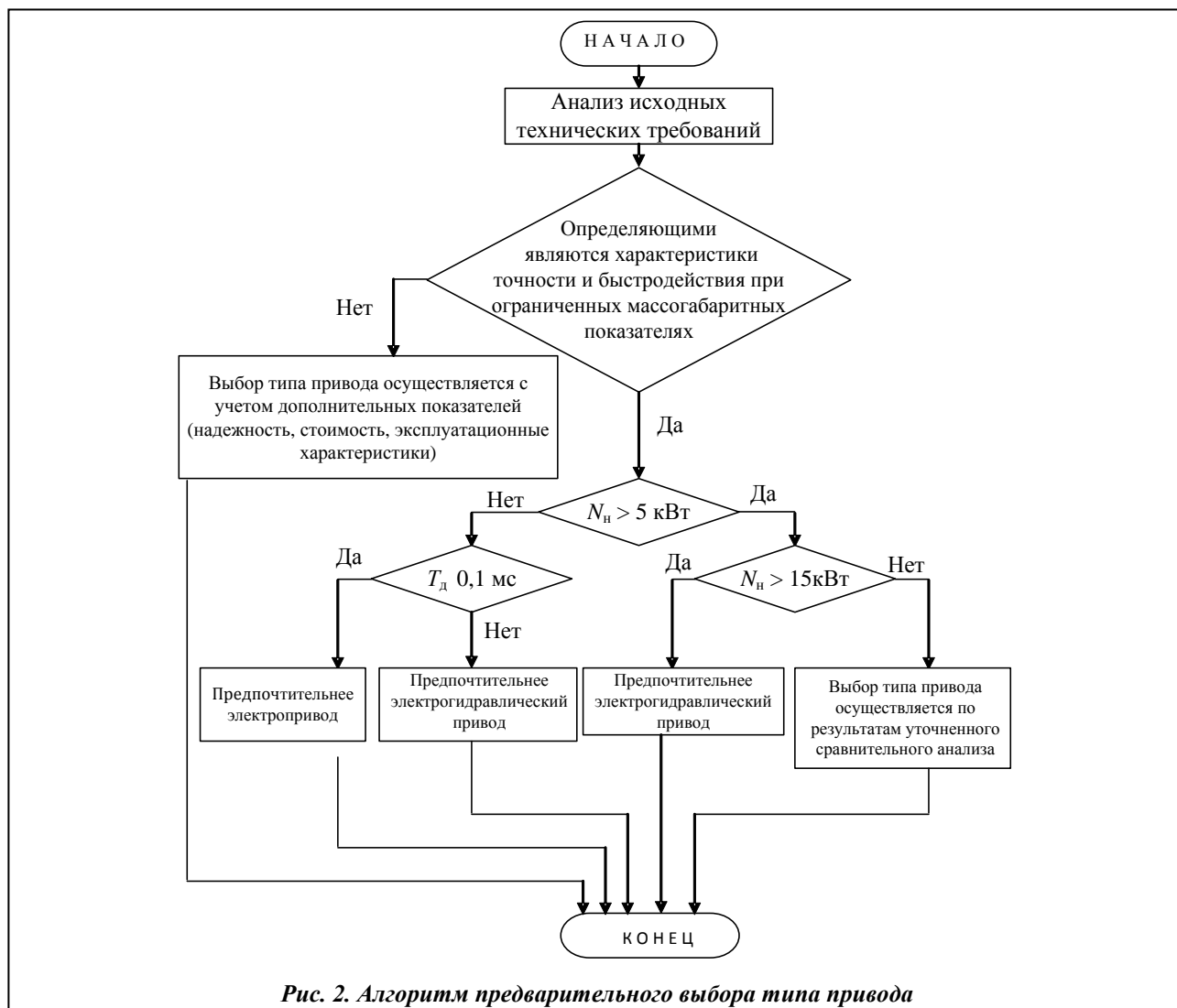


Рис. 2. Алгоритм предварительного выбора типа привода

Варианты обобщенной принципиальной схемы ЭГП с различными видами циркуляции приведены на рис. 3, 4.

Вспомогательные гидравлические устройства (баки, кондиционеры рабочей жидкости, фильтры, клапаны, аппаратура контроля и диагностики) должны обеспечивать надежную работу привода. С этой целью может использоваться унифицированная компактная насосная установка [9], включающая регулируемый аксиально-поршневой насос с гидравлической обратной связью по давлению, гидробак, находящийся под избыточным давлением (предпочтительнее с эластичным разделителем, обеспечивающим герметизацию рабочей жидкости от окружающего воздуха и газа, и пеногасящими насадками [10]) с сигнализаторами давления, уровня и температуры рабочей жидкости, переливной клапан, теплообменник, обеспечивающий охлаждение рабочей жидкости (теплообменник может включать собственный переливной клапан, исключающий его разрушение действием повышенного перепада давлений, и автоматический регулятор для поддержания температуры рабочей жидкости в заданных пределах), фильтры и контрольно-измерительную аппаратуру (манометры, расходомеры, реле давления). Для эффективной очистки жидкости и защиты гидравлической аппаратуры от загрязнений рекомендуется следующее расположение фильтров [10, 11] (см. рис.4): на входе и на выходе из насоса (последний может быть снабжен сигнализатором засорения и переливным клапаном, обеспечивающим подачу рабочей жидкости при засорении фильтра), в сливной линии, на входе в электрогидравлический усилитель (особый интерес в этом плане представляют самоочищающиеся фильтры, очистка которых производится непосредственно потоком рабочей жидкости).

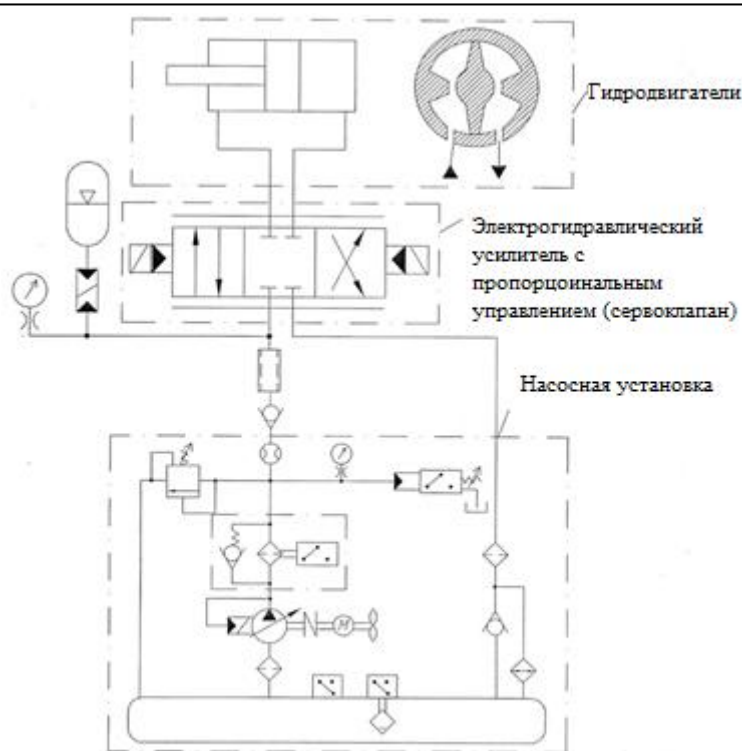


Рис. 3. Обобщенная принципиальная схема ЭГП с разомкнутой циркуляцией рабочей жидкости (для приводов поступательного поворотного движения)

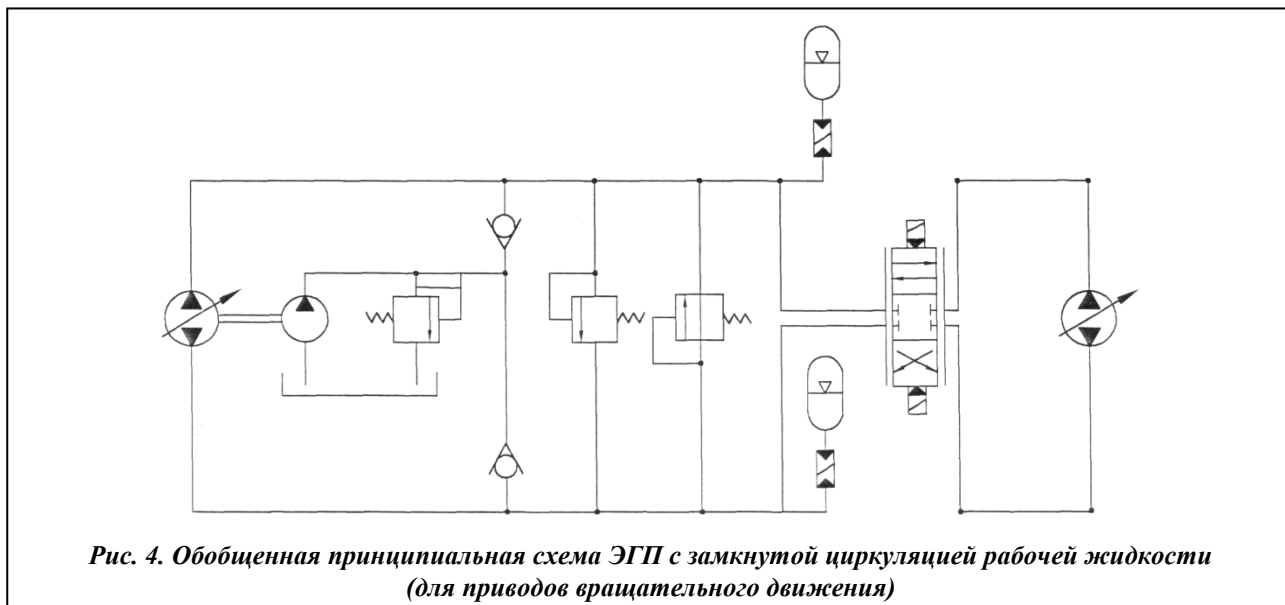
Гидроприводы поступательного и вращательного движения имеют достаточно развитую типовую элементную базу. Перечень, типоразмеры, технические характеристики и предприятия-производители всех элементов гидравлических исполнительных механизмов (гидравлические двигатели, насосные установки, распределительная, регулирующая и вспомогательная аппаратура), выпускаемых в странах СНГ, приведены в справочном каталоге [9].

Гидроприводы поворотного движения требуют, как правило, индивидуальной разработки. Во многих быстродействующих прецизионных электрогидравлических системах автоматического регулирования требуются неполноповоротные технологические перемещения без дополнительных передаточных механизмов (наличие таких механизмов уменьшает жесткость связи двигателя с рабочим органом и, как следствие, существенно снижает точность и быстродействие системы). Проблемы создания высокودинамичных и надежных неполноповоротных гидродвигателей связаны с конструктивными и технологическими особенностями моментных гидроцилиндров (проблемы прочности, точности изготовления сопряженных деталей, опор, уплотнений и т.п.).

Для решения отмеченных проблем в Харьковском комплексном инженерном центре Академии наук Украины при непосредственном участии автора настоящей работы проведен цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в результате которых созданы два типоразмера неполноповоротных гидродвигателей [12, 13], см. таблицу.

Характеристики неполноповоротных гидродвигателей

Параметры	НПГМ–050	НПГМ–100
удельный объем, м ³	690 · 10 ⁻⁶	2000 · 10 ⁻⁶
номинальный крутящий момент, Н·м (при P _{пит} = 20 МПа)	14000	40000
перетечки рабочей жидкости через уплотнение лопасти при перепаде давления 20 МПа, м ³ /с	160 · 10 ⁻⁶	250 · 10 ⁻⁶
масса, кг	120	160

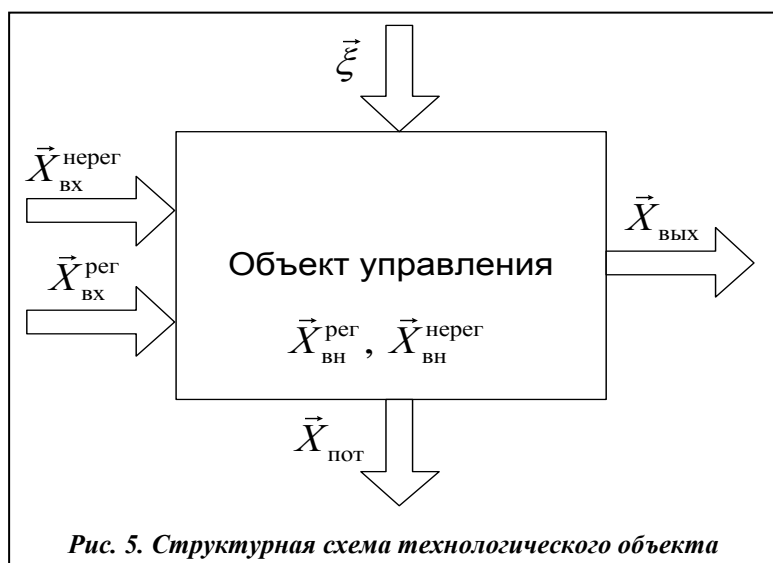


Одним из наиболее перспективных путей в решении проблемы энерго- и ресурсосбережения является разработка и широкое комплексное внедрение энергосберегающих систем автоматического управления технологическими объектами и процессами – как вновь создаваемыми (прежде всего), так и существующими. При этом целенаправленное и эффективное управление, основанное на методах системного анализа, математического моделирования, технической кибернетики, заключает в себе на системном уровне значительные резервы энерго- и ресурсосбережения, которые не могут быть выявлены, использованы и реализованы на уровне отдельных элементов, входящих в комплексную систему управления.

В настоящее время вопросами энергосберегающего управления занимается ряд известных научных школ и коллективов как в Украине, так и в ближнем и дальнем зарубежье. Из последних работ украинских ученых в этой области следует отметить [14–19]. Тем не менее, нужно признать и то, что, несмотря на успешное решение ряда частных научных задач в этой области, общая теория энергосберегающего автоматического управления технологическими объектами и процессами как новое научное направление находится пока еще в зачаточном состоянии и требует быстрого и интенсивного развития.

При этом следует первоочередно решить такие научные задачи:

- создание научных принципов и теоретических основ энергосберегающего управления технологическими объектами и процессами;
- создание моделей и методов структурного и параметрического синтеза энергосберегающих систем автоматического управления;
- опытная проверка и промышленное внедрение в различных областях техники ряда конкретных энергосберегающих САУ технологическими объектами (в частности – в энергетической отрасли).



Обобщенная векторная структурная схема произвольного технологического объекта пред-

ставлена на рис. 5.

При этом любой технологический объект может быть охарактеризован следующим набором векторов:

- вектор выходных (определяющих, контролируемых) параметров $\bar{X}_{\text{вых}}$;
- вектор входных параметров

$$\bar{X}_{\text{вн}} = \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}} + \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}$$

в т. ч. – нерегулируемых $\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}$ и регулируемых $\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}}$;

- вектор внутренних параметров $\bar{X}_{\text{вн}}$;
- вектор внешних возмущающих воздействий (в т.ч. – случайных) $\bar{\xi}$;
- вектор параметров, определяющих потери энергии (мощности) $\bar{X}_{\text{пот}}^{\text{упр}}$.

Общая процедура организации энергосберегающего автоматического управления объектом может быть представлена следующим образом.

1. Устанавливаются аналитические функциональные взаимосвязи между параметрами (математические модели):

- общая (исходная) модель

$$F(\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{пот}}; \bar{X}_{\text{вых}}; \bar{\xi}) = 0;$$

- модель управления (вектор выходных параметров)

$$\bar{X}_{\text{вых}} = f_{\text{вых}}(\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}; \bar{X}E; \bar{X}_{\text{пот}}; \bar{\xi});$$

- модель (функция) энергетических потерь

$$\bar{X}_{\text{пот}} = f_{\text{пот}}(\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}}; \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}; \bar{\xi}_-; \bar{\xi}_+);$$

- модель (функция) управляющего воздействия

$$\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}} = f_{\text{упр}}(\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \bar{X}_{\text{пот}}; \bar{\xi}).$$

При построении математических моделей сложных объектов важно выявить и отразить все основные наиболее существенные взаимосвязи и соотношения и не перегружать модели второстепенными и малозначительными факторами. Для упрощения процесса моделирования и обеспечения необходимой точности моделей могут использоваться математические методы приближения функций и аппроксимации экспериментальных характеристик.

2. Минимизируется функция (функционал) энергетических потерь

$$\Phi = \min\{\bar{X}_{\text{пот}}\};$$

в котором в качестве аргументов используется вектор регулируемых входных воздействий:

$$\bar{X}_{\text{пот}} = f_{\text{пот}}(\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}});$$

при заданных значениях вектора выходных параметров

$$\bar{X}_{\text{вых}} = \bar{X}_{\text{вых}}^{\text{зад}};$$

и заданных ограничениях на остальные параметры

$$\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}} = [\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}] \text{ или } \bar{X}_{\text{вн}} = [\bar{X}_{\text{вн}}];$$

$$\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}} = [\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}}].$$

3. Определяются функциональные соотношения для вектора регулируемых входных параметров, обеспечивающие минимальные значения потерь на всех основных режимах работы (при различных значениях вектора выходных параметров $\bar{X}_{\text{вых}}$)

$$\bar{X}_{\text{вн}}^{\text{рег}} = f_{\text{упр}}[\bar{X}_{\text{вых}}^{\text{зад}}; \bar{X}_{\text{вн}}^{\text{нерег}}; \bar{X}_{\text{вн}}; \min\{\bar{X}_{\text{пот}}\}; \bar{\xi}].$$

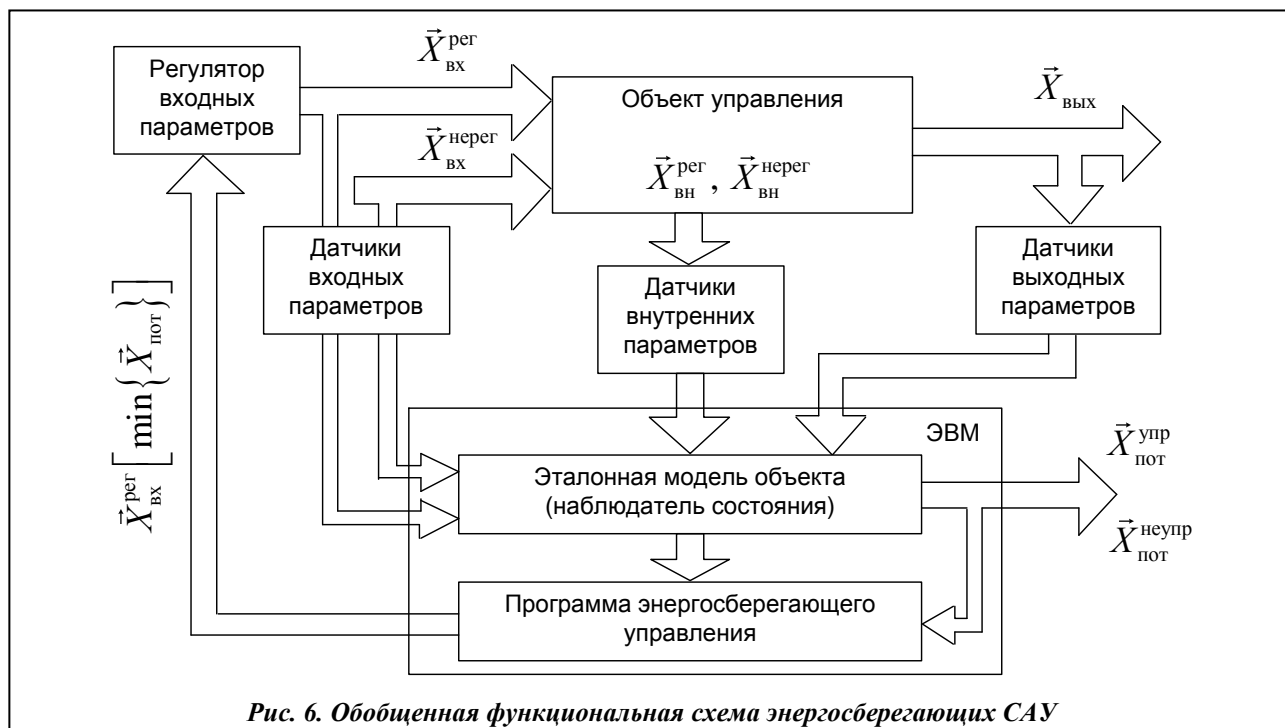


Рис. 6. Обобщенная функциональная схема энергосберегающих САУ

4. Исследуется влияние вариаций параметров, допускающих целенаправленное изменение ($\bar{X}_{вх}^{нерег}$, $\bar{X}_{вн}^{нерег}$) на функцию энергетических потерь.

5. Строятся функциональные и структурные схемы САУ, обеспечивающие техническую реализацию программы энергосберегающего управления. При этом представляется весьма эффективным использование в структуре САУ эталонной модели (наблюдатель состояния) объекта (рис. 6).

Далее следуют традиционные этапы – практическая реализация, испытания, доводка, сертификация и внедрение энергосберегающих САУ.

Выводы

Выполнен анализ существующих принципов построения и принципиальных схемных решений прецизионных быстродействующих САУ и САР и тенденций их перспективного развития. Показано, что наиболее эффективными и перспективными в этом плане являются мехатронные (в частности – электронно-гидравлические) следящие системы.

Сформулировано понятие ЭГСС как разновидности (подкласса) общего класса мехатронных систем, разработаны ее унифицированная структура и общие принципы взаимодействия отдельных структурных элементов (подсистем).

Проблема создания информационного обеспечения ЭГСС заключается, главным образом, в синтезе эффективных алгоритмов управления электрогидравлическими исполнительными механизмами, что обеспечивают требуемое качество регулирования рабочих процессов (быстродействие, точность, устойчивость, диапазон регулирования, энергетическая эффективность и т.п.). Эта проблема может быть решена путем развития и совершенствования методов общей прикладной теории оптимального управления динамическими системами и их адаптацией к конкретным особенностям используемых ЭГИМ.

Литература

1. *Мехатроника* / [Т. Исии, И. Симояпа, Х. Иноуз и др.]; пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
2. Канюк, Г. И. Перспективы использования электронно-гидравлических устройств в современных энерго- и ресурсосберегающих энергетических системах / Г. И. Канюк // Вестн. Харьков. политехн. ун-т. – Харьков, 1999. – № 44. – С. 39–40.
3. Топчев, Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю. И. Топчев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.

4. *К выбору* типа исполнительного механизма для мехатронных систем / Г. И. Канюк, А. Н. Шуванов, Е. Н. Близниченко, М. В. Логвинов // Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ». – Харьков, 2002. – Т. 2, № 7. – С. 120–125.
5. *Иващенко, Н. Н.* Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н. Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 98, 736.
6. *Федорец, В. А.* Анализ динамических свойств гидропривода, управляемого гидравлическим струйным усилителем высокого давления / В. А. Федорец, В. Б. Струтинский // Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – Киев, Техніка, 1981. – Вып. 17. – С. 44–48.
7. *Комиссаренко, Ю. Я.* Упругие характеристики вибровозбудителя с газогидравлическими аккумуляторами / Ю. Я. Комиссаренко // Там же. – 1988. – Вып. 27/К. – С. 25–29.
8. *Гидроимпульсный* привод / [Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев и др.] // Там же. – 1982. – Вып. 18. – С. 56–60.
9. *Гидро-* и пневмопривод и его элементы. Рынок продукции / [Коллектив составителей]. – М.: Машиностроение, 1992. – 232 с. (Каталог).
10. *Чупраков, Ю. И.* Гидропривод и средства гидропневмоавтоматики / Ю. И. Чупраков. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
11. *Машиностроительный* гидропривод / [Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – 495 с.
12. *Канюк, Г. И.* Модульный стенд для испытаний элементов трансмиссий автомобиля / Г. И. Канюк, А. Н. Шуванов, А. Г. Топчий, Е. Н. Близниченко [и др.] // Вестн. Харьк. политехн. ун-та. – Харьков, 1999. – № 45. – С. 52–54.
13. *Канюк, Г. И.* Создание электронно-гидравлических следящих систем имитационного динамического стенда / Г. И. Канюк // Вестн. Харьк. политехн. ун-та. – Харьков, 1999. – № 46. – С. 42–46.
14. *Рогачов, А. І.* Енергозберігаюче управління нестационарними режимами технологічних процесів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. І. Рогачов. – Харків, 2008. – 36 с.
15. *Дуель, М. О.* Автоматизовані системи управління технологічними процесами енергоблоків теплових електростанцій (розробка, дослідження, впровадження): Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М. О. Дуель. – Харків, 1998. – 36 с.
16. *Горелик, О. Х.* Удосконалення системи автоматизованого управління енергоблоків атомних і теплових електростанцій для підвищення їх експлуатаційної надійності: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О. Х. Горелик. – Харків, 2007. – 36 с.
17. *Рюмшин, М. О.* Синтез, розробка та впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами металургійного та прокатного виробництва: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М. О. Рюмшин. – Харків, 2007. – 36 с.
18. *Северин, В. П.* Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук В. П. Северин. – Харків, 2007. – 35 с.
19. *Канюк, Г. І.* Моделі і методи структурного і параметричного синтезу прецизійних електрогидравлічних слідуючих систем автоматизованих випробувальних стендів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Г. І. Канюк. – Харків, 2009. – 35 с.

Поступила в редакцію 10.04.16