

УДК 62-82-112.6(083.13)

О.К. ГУРБАН; М.А. ЯНКОВЕЦ; В.В. ПИНЧУК, д-р техн. наук, проф.

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Определено, что при внедрении в практику проектирования гидроблоков управления (ГУ) приводов технологического оборудования необходима разработка математической модели их монтажного корпуса с учетом влияния формы корпуса. Установлено, что показатели качества с учетом гидравлических потерь давления, зависят от конструктивной схемы присоединительных плоскостей гидроаппаратов. По результатам проведенных численных исследований получена зависимость общего критерия оптимальности ГУ от показателей качества монтажного корпуса. Созданная математическая модель монтажного корпуса, включающая уравнения, описывающие поток жидкости через каждый элемент корпуса, позволяет рассчитывать общие гидравлические потери давления в магистральных каналах, используя численные методы. Проведенный анализ различных вариантов форм корпуса и их влияния на гидравлические потери давления позволяет определить оптимальную форму корпуса, которая обеспечит минимальные потери давления при работе монтажного корпуса ГУ. Такой подход помогает сократить энергопотребление и повысить эффективность работы системы в целом.

Ключевые слова: приводы технологического оборудования, гидроблоки управления, технологические машины, гидроаппараты, критерий оптимальности

Введение. В процессе создания гидроприводов технологических машин разрабатывают ГУ, состоящие из соединенных между собой гидроаппаратов согласно принципиальным гидросхемам. ГУ являются сложной и дорогостоящей подсистемой гидроприводов технологического оборудования, а затраты на их создание, как правило, многократно превышают стоимость используемых при разработке гидроаппаратов, поэтому задача повышения качества функционирования ГУ является актуальной для любого машиностроительного предприятия. Согласно определению качества функциональной оценки состояния гидросистемы по ГОСТ 31177-2003 и ее функциональные параметры (давление, расход, коэффициент полезного действия, скорость) должны соответствовать входным воздействиям на систему. ГУ включают в себя соотношение «большая мощность на единицу массы привода».

Большое количество требований при постановке задачи, а также многочисленные граничные условия и воздействующие факторы, исходящие от используемых в гидроблоках управления аппаратов и устройств при их функционировании, вынуждают разработчиков становиться на путь системного подхода. В связи с этим при проектировании гидроблоков управления возникают многочисленные варианты технических решений, которые должны быть проанализированы с целью выбора оптимального.

Постановка задачи и методы исследований. Целью предлагаемых исследований является повышение эффективности проектирования путем интеграции автономных модулей, которые будут формировать структуру создаваемых объектов и процессов на уровне инновационных результатов (изобретений) на ранних стадиях проектирования ГУ приводов технологического оборудования.

Стабильность и надежность гидравлической системы управления напрямую влияют на общие динамические характеристики технологического оборудования. Анализ гидравлической системы управления имеет тео-

ретическое и практическое значение для улучшения характеристик ГУ приводов технологического оборудования и его структурной конструкции. Процесс получения инновационного результата при проектировании нового гидроблока управления представим в виде последовательного решения задачи, разбив на три этапа.

На первом этапе необходимо сформулировать потребности в новом объекте, его функции и место в иерархии других объектов. Это позволяет установить цели и критерии для дальнейшей работы. На втором этапе задача разделяется на более мелкие, относительно независимые части, которые характеризуются определенными свойствами (признаками) создаваемого объекта. Важно указать множество альтернатив реализации каждого признака, что формирует многомерное поисковое пространство. Третий этап включает в себя «свертку поискового пространства», образованного в результате декомпозиции, осуществляется выбор для каждого свойства варианта реализации из множества альтернатив [1].

Обобщенная схема инвариантности в проектировании гидроблоков управления (рисунок 1) предполагает использование принципа инвариантности для создания систем, нечувствительных к внешним возмущениям и изменениям параметров. Это достигается путем применения обратной связи для компенсации нежелательных эффектов, например, перепадов давления или температуры, обеспечивая тем самым стабильность и точность выполнения технологических операций в гидравлической системе.

При проектировании анализируются различные варианты принципиальной гидросхемы. При этом решаются вопросы техники безопасности, в том числе при различных нарушениях в работе гидрооборудования (случайные падения давления, сгорание обмотки электромагнита, засорение малых отверстий); вводятся блокировки, исключающие возможность несовместимых движений, падения вертикально расположенных рабочих органов, включения движений при отсутствии смазки; обеспечивается необходимый минимум регулировок.

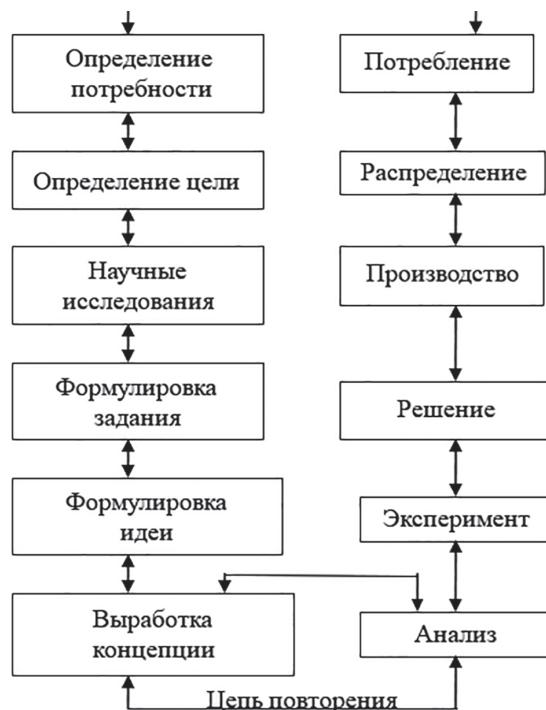


Рисунок 1 — Обобщенная схема инвариантности в проектировании гидроблоков управления технологического оборудования

После составления принципиальной схемы приступают к подбору гидроаппаратов и других узлов гидропривода по их функциональному назначению и величине условного прохода, рассчитывают проходные сечения трубопроводов в зависимости от расхода масла, проходящего по тому или иному участку гидросистемы, и рекомендуемой скорости потока рабочей жидкости.

На основе принципиальной гидросхемы и выбранных гидроаппаратов и узлов выполняют проектирование гидропривода. При этом гидравлические схемы приводов современных машин, как правило, составляются из нормализованных аппаратов и агрегатов, серийно изготавливаемых специализированными заводами, что позволяет упростить процесс проектирования, монтаж гидравлических систем и их эксплуатацию.

Для получения конструкции, обеспечивающей минимум затрат на ее изготовление и эксплуатацию при удовлетворительных значениях надежности, математическую модель гидроблоков управления W можно выразить формулой (1):

$$W = \langle x, D, X \rangle, \quad (1)$$

где x — вектор управляемых переменных; D — множество допустимых вариантов проектируемой конструкции (т. е. конкретное значение x , определяемое некоторым числом ограничений); X — функционал цели, описывющий эффект от выбора того или иного варианта проектируемого ГУ.

Задача оптимизации ГУ состоит в определении значения X , удовлетворяющего условию: $X \rightarrow \text{extr}$.

ГУ является сложной технической системой, включающей гидроаппараты и монтажные корпуса, каждый из которых характеризуется своими признаками, которые могут быть как качественными, так и количественными.

По способу определения они могут быть измеряемыми и оцениваемыми в баллах. К измеряемым показа-

телям относятся размерные (габаритные размеры всего ГУ и его составных частей), массовые (конструктивная масса, общая масса). К показателям, оцениваемым в баллах, относятся способ монтажа, демонтажа [2].

Отработка конструкции ГУ на технологичность связана со снижением трудоемкости и себестоимости его изготовления, технического обслуживания и ремонта. Некоторые из приведенных показателей могут иметь абсолютные значения, другие — относительные и удельные.

Установленные признаки ГУ в процессе проектирования вступают в бинарные отношения с целями разработки. Описание, включающее цели и признаки, является концептуальным. Оно сводится к построению подмножества признаков, элементы которого вступают в бинарные отношения с элементами выбранного подмножества целей.

В настоящее время процедура определения основных признаков выполняется опытным конструктором, хорошо ориентирующимся в признаковом пространстве объектов конкретной области техники, и совмещается с разработкой технического задания.

На основе учета результатов исследований конструктивных решений установлены следующие признаки ГУ:

- занимаемый объем и его масса;
- трудоемкость и, соответственно, стоимость изготовления;
- гидравлические потери давления в системе (энергетические характеристики);
- надежность;
- шумоизлучение;
- герметичность ГУ, т. е. гидравлические утечки рабочей жидкости;
- способ монтажа системы элементов и уровень их унификации.

Следует отметить, что приведенный перечень признаков оптимизации ГУ не включает в себя целый ряд показателей, вызванных изменением ПС, а также функциональными особенностями существующих приводов. Это связано с тем, что данные вопросы решаются на уровне оптимизации принципа действия привода и учитываются при разработке ГУ гидроприводов, т. е. оптимизацию гидроблоков управления рассматриваем на уровнях структуры и параметров. Так как элементная база ГУ еще не определена и сведения о ее возможностях и свойствах носят предположительный характер, то на этапе разработки структуры ГУ оценивать первый показатель в приведенном перечне можем, используя подход исходящего проектирования, таким параметром, как объем V монтажных корпусов (учитывая конструктивное устройство гидроблоков управления, которое не содержит других элементов, кроме гидроаппаратов и монтажных корпусов). В этом случае оптимальным параметрам гидроблоков управления будет отвечать минимальное значение V . Трудоемкость же изготовления гидроблоков управления, которую можно учитывать на этом этапе разработки, зависит от размеров поверхностей S монтажных корпусов, обрабатываемых в процессе их изготовления. От размера поверхностей S зависит и шумоизлучение, т. е. для удовлетворения требованиям минимальных значений стоимости и шумоизлучения размеры поверхностей монтажных корпусов также должны быть минимальны.

Оптимальные пространственные компоновки ГУ можно получить за счет использования монтажного кор-

пуса в виде многогранной призмы с различным числом n площадок для установки гидроаппаратов, концентрично расположенных вокруг сквозных магистральных каналов подвода и слива рабочей жидкости.

Установлено также [3], что нормирующими множителями при расчетах пространственной компоновки ГУ будут гидравлические потери давления Δp^* , объем монтажного корпуса V^* и площадь наружной поверхности монтажного корпуса S^* , равные числу n . Параметры Δp^* , V^* и S^* будут иметь минимальные значения.

$$X = \left(\frac{0,33K}{(N-1)/7+1} + \frac{0,33nK}{4\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)\sqrt{3}\left[(N-1)/3+1\right]} + \frac{\left[na/2\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)+bnK\right]0,33}{\sqrt{3}a/2+3b\left[(N-1)/3+1\right]} \right) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Гидравлические потери давления Δp при проходе жидкости по каналу с диаметром d определим по известной формуле Дарси [4]:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

где λ — коэффициент Дарси; l — длина канала; ρ — плотность жидкости; $v = 4Q/\pi d^2$ — средняя скорость течения жидкости по каналу; Q — расход жидкости по каналу.

Если увеличивать расход рабочей жидкости в гидросистеме то, как следует из уравнения (4), потери давления в ГУ уменьшаются с увеличением диаметров каналов, а объем и размеры поверхностей монтажных корпусов будут увеличиваться, что требует поиска компромисно-оптимальных вариантов.

Повышение давления в гидросистеме также увеличивает объем и размеры поверхностей монтажных корпусов, т. к. безотказность для блочных способов монтажа проектировщики рассчитывают из условия достаточной прочности крепежных элементов (шпилек, болтов) при подаче в каналы ГУ рабочей жидкости под давлением, а также конструктивно задаваемых размеров стенок между смежными каналами в корпусах.

Оптимизация параметров и вычисление присоединительных размеров ГУ на основе таких критериев, как объем и масса, гидравлические потери давления, трудоемкость и стоимость изготовления, позволяет выполнить параметрический структурный синтез агрегатно-модульных гидроблоков. Вместе с тем получить одновременно оптимальные значения всех перечисленных ранее признаков ГУ невозможно из-за противоречия параметров, возникающих по следующим причинам:

- габаритные и присоединительные размеры компонентов должны обеспечивать собираемость агрегатно-модульных ГУ, что не позволяет минимизировать все их размеры без исключения;
- с повышением давления в гидросистеме, а также улучшением энергетических характеристик ГУ увеличиваются их габаритные размеры и вес, повышается трудоемкость изготовления.

Установлено [5, 6], что разработка и обоснование параметров присоединительных размеров агрегатно-модульных гидроблоков позволяет выполнить проектиров-

ование гаммы компонентов агрегатно-модульных ГУ: соединительно-монтажных модулей (СММ), замыкающих блоков (БЗ), блоков распределителей (БР) и присоединительных блоков (БП). Таким образом, оптимизация параметров присоединительных размеров агрегатно-модульных гидроблоков на основе критериев (объем и масса, гидравлические потери давления, трудоемкость и стоимость изготовления) позволяет выполнить параметрический синтез агрегатно-модульных ГУ. Параметры формулы (4) имеют разные размерности, но для упрощения расчета приведем их к стоимостному выражению. Объем заготовки V будем отражать как стоимость использованного металла Π_m . Площадь S обработанной поверхности СММ также отразим как стоимость обработки поверхностей Π_o , используя стоимость нормочаса операций: 1 — вертикально фрезерной (черновой); 2 — горизонтально фрезерной (черновой); 3 — шлифовальной (черновой); 4 — сверлильной; 5 — шлифовальной (чистовой). Потери мощности при проходе рабочей жидкости по каналам СММ, связанные с гидравлическими потерями давления, определим как стоимость энергии Π_g , используя стоимость единицы мощности (например кВт/ч электроэнергии):

$$X = \left(C_1 \frac{V}{V^*} + C_2 \frac{S}{S^*} + C_3 \frac{\Delta P_b}{\Delta P_b^*} + C_4 \frac{\Delta P_r}{\Delta P_r^*} \right) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где C_1-C_4 — коэффициенты взаимной важности критериев, назначаемые экспертным путем; ΔP_b — потери давления в вертикальных каналах СММ; ΔP_r — потери давления в горизонтальных каналах СММ; V и S — объем и площадь поверхности СММ соответственно; ΔP_b^* , ΔP_r^* , V^* , S^* — нормирующие множители.

Таким образом, выражение (5), если учесть перечисленные признаки гидроблоков управления будет содержать параметры, между которыми необходим поиск оптимально-компромиссных решений.

Однако общий критерий оптимальности монтажных корпусов лишь служит допустимое множество вариантов проектируемой конструкции соединительно-монтажного модуля, задавая в нем множество компромиссно-оптимальных проектов — область Парето. Получается, что оптимизировать параметры монтажных корпусов возможно на основе исследований общего критерия оптимальности X , используя в качестве варьируемых параметров коэффициенты важности критериев C_1-C_4 и соотношения диаметров вертикальных d_b и горизонтальных d_r каналов, d_b/d_r [7–10]. Результаты таких исследований критерия X позволяют разработать алгоритм проектирования компонентов ГУ для машин с различными условиями эксплуатации. Вместе с тем процесс оптимизации параметров монтажных корпусов при таком подходе, без учета технологии его изготовления, существенно затруднен, т. к. в этом случае приходится рассматривать чрезмерно большое количество значений критерия оптимальности X .

В связи с этим необходимо исследование критерия оптимальности X (4), который можно представить как совокупность элементов, обеспечивающих надежное крепление и герметизацию гидравлических компонентов, а также оптимальное распределение потоков рабочей жидкости для эффективного функционирования всей системы. Для расчета таких корпусов учитываются механические нагрузки, давление рабочей жидкости, что позволяет определить необходимые размеры, кон-

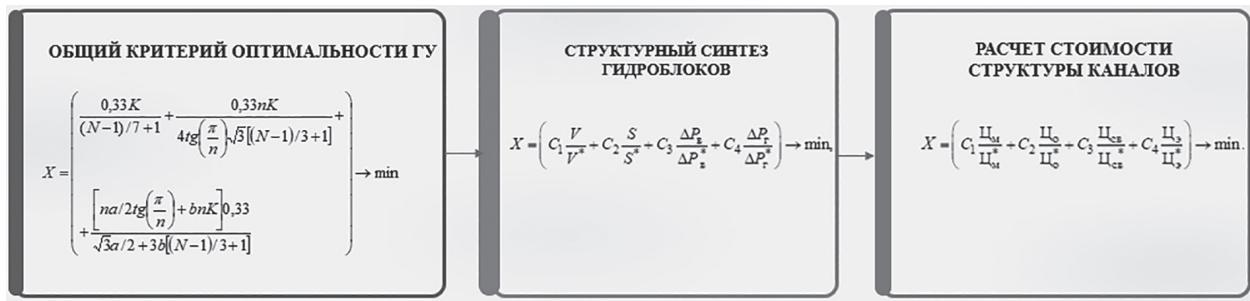


Рисунок 2 — Модель расчета функциональных показателей гидроблоков управления приводов технологического оборудования при их проектировании

структурные особенности корпуса. Эти исследования его распространяются на анализ и оптимизацию гидродинамических характеристик, что обеспечивает повышение надежности и долговечности гидравлического оборудования. Анализ общего критерия оптимальности необходимо проводить с учетом техпроцесса (ТП) его изготовления, который в общем случае включает следующие операции: 1 — вертикально фрезерную (черновую); 2 — горизонтально фрезерную (черновую); 3 — шлифовальную (черновую); 4 — сверлильную; 5 — шлифовальную (чистовую).

Параметры формулы (5) имеют разные размерности, но для упрощения расчета приведем их к стоимостному выражению. Объем заготовки V будем отражать как стоимость использованного металла Π_M . Площадь S обработанной поверхности монтажного корпуса также отразим как стоимость обработки поверхностей Π_O , используя стоимость нормочаса операций 1–3, 5 ТП изготовления монтажного корпуса. Потери мощности при проходе рабочей жидкости по каналам монтажного корпуса, связанные с гидравлическими потерями давления

$\frac{\Delta P_B}{\Delta P_B^*} + \frac{\Delta P_T}{\Delta P_T^*}$, определим как стоимость энергии Π_{\varnothing} , ис-

пользуя стоимость единицы мощности (например кВт/ч электроэнергии).

Учитывая ТП изготовления монтажного корпуса, нам необходимо учесть операцию 4 (сверлильную). Для этого введем понятие «структура каналов», учитывающее ТП его изготовления и включающее стоимость сверления каналов Π_{CB} , которую можно определить на основе учета конфигурации каналов монтажного корпуса, полученной при расчетах минимальных гидравлических потерь давления, т. е. в дальнейшем будем рассматривать как:

- $\frac{\Pi_V}{\Pi_V^*}$ — отношение стоимостей объема первоначальной заготовки;

- $\frac{\Pi_S}{\Pi_S^*}$ — отношение стоимостей площадей обработанных поверхностей монтажного корпуса;

- $\frac{\Pi_{CB}}{\Pi_{CB}^*} + \frac{\Pi_{\varnothing}}{\Pi_{\varnothing}^*}$ — стоимость структуры каналов монтажного корпуса (включает стоимость потерь энергии при проходе рабочей жидкости по каналам монтажного корпуса и стоимость сверления этих каналов).

Таким образом, рубль будет являться единым параметром для всех частей уравнения (5), а оптимизация

будет сводиться к расчету минимальной стоимости готового изделия. Формула (5) примет следующий вид:

$$X = \left(C_1 \frac{\Pi_M}{\Pi_M^*} + C_2 \frac{\Pi_O}{\Pi_O^*} + C_3 \frac{\Pi_{CB}}{\Pi_{CB}^*} + C_4 \frac{\Pi_{\varnothing}}{\Pi_{\varnothing}^*} \right) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где Π_M — стоимость материала, руб.; Π_O — стоимость обработки, операции фрезеровки и шлифовки, руб.; Π_{CB} — стоимость операции сверления каналов СММ, руб.; Π_{\varnothing} — цена затраченной энергии на гидравлические потери давления в каналах СММ, руб.

Анализ формулы (5) показывает, что определение первых двух слагаемых затруднений не вызывает, т. к. стоимость материала, из которого предполагается изготовление СММ, и трудоемкость, а, следовательно, стоимость обработки его поверхностей является широко распространенной информацией, которую можно легко получить из общедоступных справочников. В то же время оптимизация стоимости структуры каналов вызывает определенные затруднения из-за ее вариативности. Оценка работы математической модели проведена на основе схематичного конструктивного устройства (рисунок 2).

Выводы и рекомендации. На начальных этапах эксплуатации монтажного корпуса расходы на сверление каналов Π_{CB}^y превосходят расходы на затраты энергии Π_{\varnothing}^y в пределах 10–30 раз, однако если учитывать весь срок эксплуатации изделия, то даже за год эксплуатации при двухсменной работе оборудования (годовой фонд рабочего времени — 4018 часов) соотношение Π_{\varnothing}^y против Π_{CB}^y резко изменяется в сторону увеличения свыше 300 раз. Получается, что при назначении коэффициентов важности критерии C_1 – C_4 по формуле (5), учитывая длительность срока эксплуатации монтажных корпусов, которая может достигать 10 лет и более, затратами на стоимость материала (которая находится на уровне затрат на обработку) и обработки заготовки монтажных корпусов можно пренебречь, а расчет и выбор оптимальной конструкции монтажных корпусов вести исключительно на основе учета Π_{\varnothing}^y .

Использование математической модели монтажного корпуса (4), (5) позволяет выполнить расчет ГУ, обеспечив при этом повышение качества их функционирования уже на стадии проектирования. Для этого необходимо внедрить результаты расчетов в процессы проектирования и производства для повышения надежности и долговечности гидравлического оборудования.

Список литературы

1. Mathematical model & methodology for optimal hydraulic design of labyrinth spillway / B.V. Khode, N. Vaidya, S.D. Ghod-

mare, P. Wadhai // proc. of the 2nd Online Int. Conf. on research frontiers in sciences, Nagpur, 21–22 July 2023. — Nagpur, 2024.. — 2024. — DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0224522>.

2. Пинчук, В.В. Расчет присоединительных размеров компонентов агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроаппаратов технологических машин / В.В. Пинчук, А.В. Мархуленко, Д.Г. Ворочкин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. — 2013. — № 1. — С. 20–25.
3. Гурбан, О.К. Выбор критерия оптимальности гидроблоков управления технологического оборудования / О.К. Гурбан, В.В. Пинчук, А.А. Гинзбург // Актуальные вопросы машиностроения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2023. — Вып. 12. — С. 71–74.
4. Пинчук, В.В. Оптимизация гидроблоков управления приводов технологического оборудования при их проектировании / В.В. Пинчук, А.А. Гинзбург, О.К. Гурбан // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе сегодня и завтра: сб. науч. ст. 7-й междунар. науч.-практич. конф.: в 2 ч., Гомель, 17 нояб. 2023 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш» — Гомель, 2023. — Ч. 2. — С. 68–73.
5. Гурбан, О.К. Оптимизация критерии при расчете и проектировании монтажных корпусов гидроблоков управления / О.К. Гурбан, В.В. Пинчук, А.А. Гинзбург // Актуальные вопросы машиностроения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2024. — Вып. 13. — С. 131–133.
6. Пинчук, В.В. Минимизация гидравлических потерь давления в каналах соединительно-монтажного модуля при построении структурных схем агрегатно-модульных гидроблоков управления технологического оборудования / В.В. Пинчук, С.Ф. Андреев, Е.В. Иноzemцева // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. — 2016. — № 4(67). — С. 41–45.
7. Пинчук, В.В. Расчет и конструирование агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроприводов технологических машин / В.В. Пинчук, В.К. Шелег. — Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2010. — 270 с.
8. Орлов, Е.В. Автоматизированная программа расчета гидравлических параметров трубопровода при реновации альтернативных покрытий / Е.В. Орлов, Д.И. Шлычков, В.А. Орлов // Вестник МГСУ. — 2010. — Вып. 1. — С. 231–234.
9. Коханенко, В.Н. Модель расчета параметров потока на входе в расширение / В.Н. Коханенко, И.В. Папченко, Н.Г. Папченко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2008. — № 4. — С. 140–143.
10. Мрочек, В.И. Инженерная методика моделирования гидропривода / В.И. Мрочек // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2008. — № 3(20). — С. 14–20.

Gurban O.K., Yankovets M.A., Pinchuk V.V.

Improving the quality of operation of hydraulic control units for technological equipment drives during their design

It has been established that the implementation of control hydraulic units (CHU) for technological equipment drives requires the development of a mathematical model of the mounting body of the control hydraulic units, taking into account the influence of the body shape. It has been found that quality indicators, considering hydraulic pressure losses, depend on the structural scheme of the connection planes of hydraulic devices. As a result of conducted numerical studies, a relationship has been obtained between the overall optimality criterion of the CHU and the quality indicators of the mounting body. The mathematical model of the mounting body, which includes equations describing the flow of fluid through each element of the body, makes it possible to calculate total hydraulic pressure losses in the main channels using numerical methods. By analyzing various body shapes and their influence on hydraulic pressure losses, it is possible to determine the optimal shape of the body that will ensure minimal pressure losses during the operation of the CHU mounting body. This approach allows for a reduction in energy consumption and an increase in the overall efficiency of the system.

Поступила в редакцию 15.09.2025.