

УДК 62-82-112.6(083.13)

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

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

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Повышение эффективности проектирования гидроблоков управления приводов технологического оборудования через внедрение автономных модулей и декомпозиционных методов анализа задач позволит не только оптимизировать проектные процессы, но и улучшить качество, надежность и экономическую эффективность гидроблоков управления приводов технологического оборудования. В работе рассматриваются методы оптимизации, учитывающие многомерные цели, такие как качество и минимизация затрат. Создание специализированных алгоритмов и программного обеспечения для автоматической генерации проектных решений обеспечит более высокую производительность и качество в проектировании. Предлагаемый подход включает три этапа: формулирование потребностей и целей нового объекта, декомпозиция задач на более простые компоненты, а также выбор оптимальных решений из множества альтернатив. Исследование также акцентирует внимание на важности системного подхода и применения научных принципов в процессе проектирования. Реализация разработанных методов на конкретных примерах гидроблоков управления позволит проверить их эффективность и обеспечить постоянное совершенствование проектных процессов.

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

Введение. Основная тенденция современных промышленных производств — постоянное совершенствование и обновление выпускаемой продукции, постоянное совершенствование технологий ее изготовления и методов проектирования как самой продукции, так и средств оснащения производства. Успех решения этих задач обеспечивается, прежде всего, на стадиях проектирования и подготовки выпуска новых изделий, что требует выдачи данными системами инновационных изобретательских решений по всему производственному циклу. Существующие и создаваемые системы обеспечивают подготовку производств лишь на уровне рабочего параметрического проектирования. Выполняя значительные объемы рутинных работ, они, как правило, не имеют в своем составе подсистем (модулей) поиска новых решений на уровне изобретений и ноу-хау [1].

Проектирование гидроприводов в машиностроении осуществляется многими проектными организациями. Накоплен значительный опыт в данной области и разработано множество гидравлических схем для решения определенных задач в приводе.

Создание конструкций гидроблоков управления (ГУ) машин и механизмов на основе гидравлической схемы привода является одной из основных задач при его проектировании. Решение данной задачи на современном этапе развития народного хозяйства страны должно предусматривать как обеспечение выпуска стабильных по качеству устройств, так и сокращение периодов и сроков их создания и постановки на производство. Эта научно-техническая задача может быть успешно решена только при условии применения новых, более прогрессивных методов в организации проектирования и производства ГУ.

В связи с этим появилась необходимость и актуальность решения задач системного совмещения проектирования ГУ для применения на завершающих стадиях подготовки производства с поисково-структурным про-

ектированием, позволяющим формировать инновационные структурные решения на начальных стадиях их создания.

Постановка задачи и цели исследования. Рациональное проектирование является предпосылкой того, чтобы ГУ, с одной стороны, мог выполнять свои задачи, а с другой — функционировал с необходимой эксплуатационной надежностью. Большое количество требований при постановке задачи, а также многочисленные граничные условия и действующие факторы, исходящие от используемых в ГУ аппаратов и устройств при их функционировании, вынуждают становиться на путь системного подхода. В связи с чем, естественно, при проектировании ГУ имеются различные варианты, которые необходимо выбирать.

Методике оптимального проектирования технических систем уделяется большое внимание со стороны различных ученых [2, 3].

Проведенный нами литературный обзор по методам конструирования технических систем и в частности ГУ показал: интерес к эвристическим методам решения задач поиска оптимальных технических решений и, в частности, к комбинаторике в настоящее время сильно возрос. Идеи комбинаторики нашли отражение в широком известном методе «морфологического анализа» [4].

Область возможных решений может быть обследована, тогда любой новый ГУ окажется новой комбинацией известных компонентов (гидроаппаратов и монтажных корпусов).

Как следует из анализа способов монтажа ГУ, проблема их оптимального проектирования, как и любой другой технической системы, заключается в отыскании оптимальных структур на основе комбинаций составляющих ее элементов.

Определенный интерес представляет направление работ, называемое «семиотическим моделированием». В память ЭВМ в форме базы данных закладываются

основные понятия и конструкции из них, используемые в процессе проектирования, создавая тем самым базу знаний. Семиотические программы должны реализовать специальную систему управления комплексом фиксированных знаний и обеспечить возможность логического вывода. В основу разработки таких программ для ГУ может быть положена гипотеза о наличии в данной области интеллектуальной деятельности некоторых инвариантных структур, называемых фреймами. Если фрейм наполнить конкретными объектами, то образуется определенная композиция (структура ГУ).

Системный подход, многокритериальная оптимизация и вычислительные методы выполнения проектных процедур и операций составили основу для автоматизации проектирования.

В работе [5] приведены основные аксиомы системного проектирования.

Аксиома 1. Из неразрешимости общей задачи проектирования вытекает необходимость ее декомпозиции на совокупность локальных задач, упорядоченных многоуровневой параллельно-последовательной логической схемой проектирования.

Аксиома 2. Из неопределенности исходных данных и ограничений в общей задаче проектирования вытекает необходимость их прогнозирования и обмена проектными решениями между функциональными ячейками системы проектирования в соответствии с определенной логической схемой.

Аксиома 3. Из логической противоречивости общей задачи проектирования вытекает необходимость организации итерационных циклов, которые определяют сходимость системных решающих процедур.

Аксиома 4. Из невозможности сконструировать априори «сквозное» правило предпочтения следует необходимость «индивидуального» построения многоуровневого критерия оценки проектных решений, который может быть получен эвристически только в конце итерационного цикла (не раньше осуществления первой итерации).

Таким образом:

- существующие принципы проектирования во многом опираются на такие человеческие свойства, как интуиция и воображение, описать и проанализировать которые пока не удалось;
- традиционное проектирование не способно обеспечить кардинального сокращения сроков разработки и повышения качества ГУ;
- основными подходами современных методик являются системность и оптимизационность, широкое использование ЭВМ в актах принятия и исполнения проектных решений;
- эвристический подход разработки ГУ технологических машин порождает большое их разнообразие, существенно снижает эффективность разработок;
- формирование структуры при проектировании ГУ может быть решено на основе системного подхода, включающего в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение параметров, анализ внешних условий.

Учитывая вышеизложенное, необходимо:

- определить основные формы связи методологических принципов создания ГУ приводов машин, позволяющие решить задачу их конструирования;
- составить математические модели оптимизации конструкций ГУ;

- сформулировать условия создания структурированного процесса проектирования ГУ.

Методы исследования. Проектирование технического объекта в соответствии с общепринятым определением — это создание, преобразование и представление в принятой форме образа этого еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами.

Для решения задачи синтеза оптимальных структур ГУ авторами разработана схема (рисунок), позволяющая установить алгоритмическую последовательность ее этапов.

Интерпретация и конкретизация системного подхода имеют место в ряде известных подходов. Таковыми являются структурный и блочно-иерархический подходы [6].

При структурном подходе как разновидности системного требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов. Идеи структурного подхода (см. рисунок) нашли выражение в последовательностях этапов: схематические варианты структурного решения → анализ структурного решения → элементарные схемы структурного решения → элементная база структурного решения → теоретические и экспериментальные исследования структурного решения → обобщенные математические модели структурного решения → методология формирования структурного решения → методика расчета и рекомендации; принципы создания структурного решения → анализ методов создания структурного решения → аналитические исследования структурного решения; комбинированные модели → агрегатирование структурного решения при проектировании; синтез структурного решения → агрегатирование структурного решения при проектировании.

Объект проектирования при выборе его математической модели на макроуровне рассматривается состоящим из подсистем (элементов). В литературе [5, 6], приводится метод построения макромоделей объекта проектирования на основе эквивалентных схем, отражающих наиболее общие закономерности процессов, происходящих в подсистемах независимо от физической природы. Данный метод предполагает прежде всего выделение подсистем. Эта неформальная информация выполняется конструктором. При этом он руководствуется следующими основными принципами.

1. Каждая выделяемая подсистема должна быть физически однородной (механической, электрической, гидравлической, тепловой).

2. Состояние подсистемы описывается множеством фазовых переменных, относящихся к потоку или потенциальному. Множество фазовых переменных для каждой подсистемы конечно. В этом проявляется дискретизация пространства при переходе к макроуровню.

3. Структура подсистемы представляется множеством элементов и связей между ними. Эти компоненты отражаются на графе вершинами и ребрами соответственно.

Элементы подсистемы могут быть простыми и сложными. Простые представляются на графике одним ребром, сложные — двумя и более.

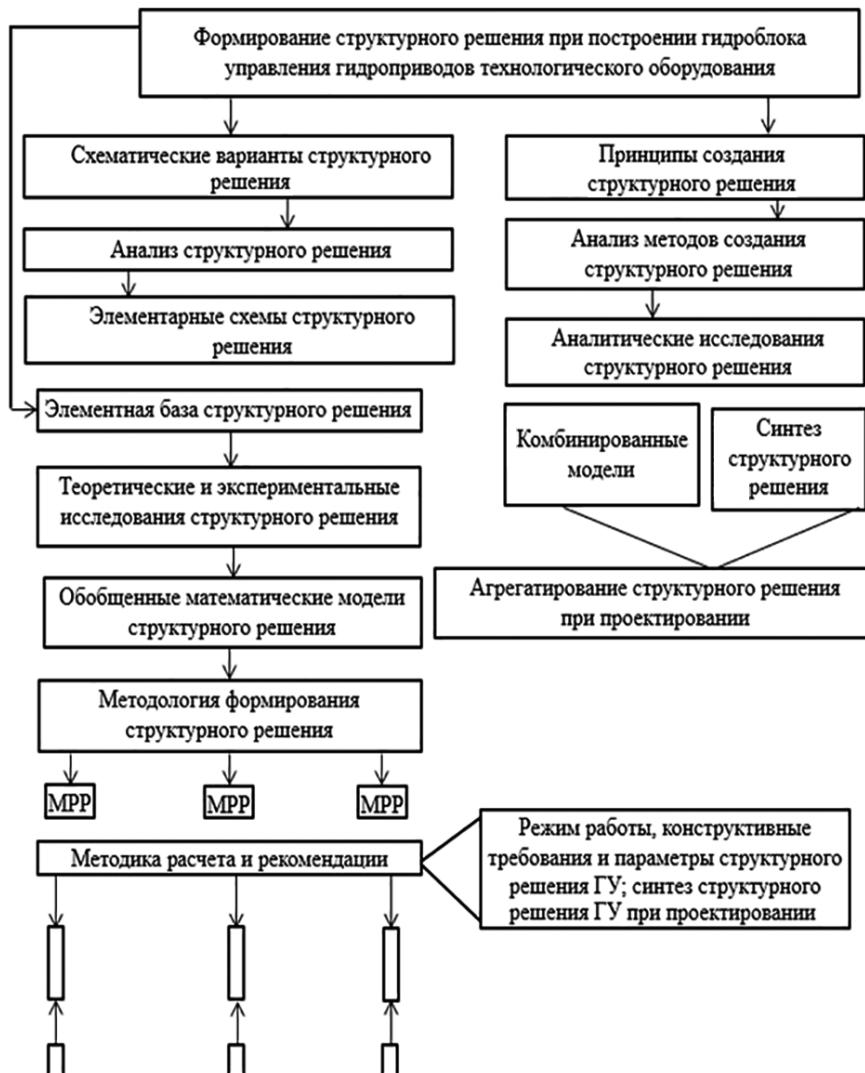


Рисунок — Структурная схема этапов решения задачи формирования структуры гидроблока управления привода технологического оборудования

4. Каждое ребро характеризуется двумя фазовыми переменными типа потока I_i и типа потенциала U_i (i — номер ребра). Каждый узел, связывающий ребра, характеризуется одной фазовой переменной типа потенциала φ_j (j — номер узла). Для ребра между узлами a и b свойства элемента выражаются взаимозависимостью между фазовыми переменными и представляются так называемыми компонентными уравнениями. В отличие от них уравнения, отражающие связи элементов, носят название топологических.

5. Математическая модель объекта на макроуровне выражается системой компонентных и топологических уравнений. Для представления свойств элементов и их связей используются обыкновенные дифференциальные уравнения. Форма их с точностью до обозначений физических величин оказывается одинаковой для элементов с различной физической природой. В этом проявляется аналогия, свойственная природе. Использование этой закономерности позволяет создать инвариантную методику построения математических моделей простых и сложных элементов.

Топологические уравнения отражают принцип Даламбера (аналог первого закона Кирхгофа). Для гидравлических и пневматических систем в качестве элемен-

тов выбираются участки трубопровода, распределители, ресиверы, предохранительные клапаны, дроссели и др. Фазовые переменные — расход жидкости или воздуха g и давление P .

Топологические уравнения $\sum g_k = 0$ и $\sum P_i = 0$ означают, что сумма потоков в любом узле и сумма давлений вдоль любого контура равны нулю.

Целью исследования на первом этапе в соответствии со структурной схемой является проведение анализа схемных и компоновочных решений ГУ и выбор лучших из них в качестве базового прототипа для дальнейшего проектирования.

Так как при создании конструкции конкретного ГУ достаточными условиями, позволяющими начать процесс проектирования, являются наличие принципиальной гидросхемы (ПС) и технических требований к изделию, очевидно, что ПС в данном случае является постановочной задачей, которую требуется представить в формализованном виде.

На начальных этапах синтеза структуры ГУ необходимо сформулировать требования к разрабатываемой системе и построить альтернативные структурные схемы графы, формализующие взаимосвязи функциональных элементов и задач системы.

В общем случае исходным требованием при проектировании ГУ является получение конструкции, обеспечивающей минимум затрат на ее изготовление и эксплуатацию при удовлетворительных значениях надежности и прочности. Оптимальность конструкции ГУ выражается формулой:

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

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

Задача оптимизации состоит в определении наилучшего значения F , т. е.

$$F \rightarrow \text{extr}; \quad x \in D. \quad (2)$$

Модель оптимизации (2) является интегральным критерием оптимальности, согласно которому оптимальным параметрам ГУ отвечает наилучшее значение F .

Так как конструктивное устройство ГУ предусматривает в общем случае смонтированные на монтажном корпусе гидроаппараты и других элементов в нем нет, а гидроаппараты уже оптимизированы по параметрам, для определения оптимальной формы монтажного корпуса общий критерий оптимальности X , исходя из выражения (2), можно записать в следующем виде:

$$X = \left(C_1 \frac{\Delta p_N}{\Delta p^*} + C_2 \frac{V_N}{V^*} + C_3 \frac{S_N}{S^*} \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где C_1, C_2, C_3 — коэффициенты важности критериев, назначаемые экспертным путем; $\Delta p^*, V^*, S^*$ — нормирующие множители.

Зависимость (3) является математической моделью формы монтажного корпуса, исследование которой позволяет установить оптимальные пространственные компоновки ГУ. Кроме того, синтез формы и математических моделей элементарных схем позволяет создать комбинированные модели.

Целью этапа инженерного синтеза «Обобщенные математические модели структурного решения» является поиск оптимальных компоновочных решений ГУ на основе стандартизированной элементной базы с учетом конструктивных особенностей входящих элементов, а также требований со стороны гидрофицированной машины.

Гидропривод любой гидрофицированной машины чаще всего состоит из трех составляющих: насосной установки, ГУ и исполнительных органов. Каждая из которых представляет собой в той или иной степени сложную систему, функциональные качества которой влияют на работу гидропривода в целом. Одной из самых важных частей гидропривода является ГУ, так как от его работы зависит функционирование исполнительных органов и, как следствие, функциональность всего гидропривода.

Наиболее распространенной на сегодняшний день является следующая последовательность разработки гидропривода:

- по исходным данным (циклограмме работы привода или другим параметрам) разрабатывается ПС;
- проводится расчет рабочих параметров привода: расхода рабочей жидкости, рабочего давления, мощности, КПД;

- по рассчитанным параметрам проводится выбор гидроаппаратов, приведенных на ПС;
- разрабатывается комплект технической документации (рабочие чертежи, технические условия, технологические процессы, эксплуатационная документация) и изготавливаются образцы гидропривода.

По сравнению с остальными этапами самыми сложными являются разработка ПС и рабочих чертежей ГУ по ПС. В связи с этим основную часть работы при проектировании гидроприводов составляет разработка ГУ работой исполнительных органов по заданным техническим требованиям.

Создание структурированного процесса проектирования ГУ позволит свести к минимуму материальные и временные затраты на подготовку и постановку на производство гидроприводов различных машин. Такой процесс проектирования ГУ представляет собой определенную последовательность действий, позволяющих максимально упростить получение сборочных чертежей ГУ.

Принципиальная гидросхема привода в нашем случае является постановочной задачей и своего рода алгоритмом проектирования ГУ, которую необходимо представить в формализованном виде.

В данном случае необходима разработка методики, позволяющей синтезировать топологические модели конкретных исполнений ГУ в виде обобщенных моделей, учитывающих параметры системы.

Среди всех операций проектирования ГУ можно выделить широкий класс алгоритмических операций, для которых уже созданы или могут быть созданы формальные модели. К ним относятся все расчеты, выполненные по стандартам: расчет деталей на прочность, надежность, а также гидравлические расчеты и динамический анализ. Сюда же можно отнести и расчеты по частным методикам. Однако алгоритмические операции и процедуры составляют лишь часть процесса проектирования. Кроме них в нем применяются и эвристические операции и процедуры, отличающиеся от алгоритмических неопределенностью в постановке задачи, методе решения и в окончательном результате. К таким процедурам можно отнести, например, поиск вариантов технических решений и выбор из них оптимального.

Для решения подобных задач в настоящее время широко используется метапроцедура декомпозиции [7].

Декомпозиция означает разделение задачи на подзадачи. В практике проектирования (разработка проектной документации, необходимой и достаточной для изготовления объекта) задача разбивается на подзадачи, составляющие стадии разработки: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, рабочая документация. Каждая стадия разработки связана с определенным этапом проектирования.

Развитие методики приводит к дальнейшей декомпозиции задач, теперь уже на отдельных этапах. Декомпозиция способствует тому, что на определенной ее ступени задачи переходят в разряд алгоритмических.

Как установлено ранее [2], ПС различного вида оборудования можно формализовать в виде топологических моделей, которые могут быть преобразованы в комбинированные, отображающие в том числе пространственные компоновки ГУ. Очевидно, что комбинированные модели позволяют синтезировать структурную модель ГУ, так как комбинированные модели представляют собой структур-

ные решения ПС [7]. Устанавливается следующая алгоритмическая последовательность этапов решения задачи структурного синтеза ГУ: ПС → топологические модели принципиальных гидросхем → комбинированные модели → синтез структурного решения ГУ.

Заключение. Предложена алгоритмическая последовательность решения задачи формирования структурных решений ГУ при их проектировании, включающая следующие методологические подходы:

- под оптимальным решением задачи многокритериальной оптимизации ГУ следует понимать одно из эффективных Парето-оптимальных решений;
- метод эквивалентных схем, заключающийся в упрощении исходных схем до вида тех соединений, которые становятся абсолютно понятными и наглядными. Соединения в схеме необходимо представить в виде последовательных или параллельных участков цепи, где необходимые характеристики можно рассчитать уже без особых затруднений;
- семиотическое моделирование, позволяющее положить в основу разработки ГУ некоторые инвариантные структуры, называемые фреймами. Если фрейм наполнить конкретными объектами, то образуется определенная композиция (структура ГУ).

Список литературы

1. Быков, В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении / В.П. Быков. — Л.: Машиностроение, 1989. — 255 с.
2. Козыков, А.В. Технические средства оснащения рабочих мест ИТР в машиностроении: каталог-справ. / А.В. Козыков. — Л.: Машиностроение, 1987. — 287 с.
3. Напалков, А.В. Мозг человека и искусственный интеллект / А.В. Напалков, Л.Л. Прагина. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 121 с.
4. Норенков, И.П. Автоматизированное проектирование / И.П. Норенков. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. — 359 с.
5. Прохоров, А.Ф. Конструктор и ЭВМ / А.Ф. Прохоров. — М.: Машиностроение, 1987. — 272 с.
6. Фролов, К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения / К.В. Фролов. — М.: Машиностроение, 1984. — 223 с.
7. Пинчук, В.В. Комбинированные модели гидроблоков управления / В.В. Пинчук // Вестник БНТУ. — 2006. — № 4. — С. 44–46.
8. Пинчук, В.В. Расчет и конструирование агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроприводов технологического оборудования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.02 / Пинчук Владимир Владимирович; БНТУ. — Минск, 2016. — 40 с.
9. Проектирование гидравлических систем машин / Г.М. Иванов, С.А. Ермаков, Б.Л. Коробочкин, Р.М. Пасынков; под общ. ред. Г.М. Иванова. — М.: Машиностроение, 1992. — 224 с.
10. Debolskaya, E.I. Evaluation of the thermal erosion of the river banks based on laboratory and numerical modelling / E.I. Debolskaya, I.I. Gritsuk, M.E. Doshina // Power Technology and Engineering. — 2024. — Vol. 58. — P. 65–71. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s10749-024-01777-z>.

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

Formation of structural solutions for hydraulic control units and drives of technological equipment during their design

Improving the efficiency of design of hydraulic control units for process equipment drives through the introduction of autonomous modules and decomposition methods of task analysis will not only optimize design processes, but also improve the quality, reliability and economic efficiency of hydraulic control units. The paper discusses optimization methods that consider multidimensional objectives such as quality and cost minimization. The creation of specialized algorithms and software for automatic generation of design solutions will provide higher productivity and quality in design. The proposed approach includes three steps: formulating the needs and goals of a new facility, decomposing the problems into simpler components, and selecting optimal solutions from a set of alternatives. The study also emphasizes the importance of the system approach and the application of scientific principles in the design process. The implementation of the developed methods on specific examples of hydraulic control units will make it possible to verify their effectiveness and ensure continuous improvement of design processes.

Поступила в редакцию 11.07.2025.