

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОМАШИН ВЫСОКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ

*И.В. Николенко<sup>1</sup>*

Проектирование машин высокого технического уровня - комплексный и многоаспектный процесс, при котором обеспечивается достижение значений показателей, характеризующих техническое совершенство машины базовым значениям соответствующих показателей. Объемные гидравлические машины (ОГМ) представляют собой сложные технические системы, к показателям качества которых предъявляются различные, порой противоречивые требования [1, 2, 3]. Основы проектирования ОГМ положены в работах известных ученых Т.М. Башты, В.Н. Прокофьева, К.В. Фролова, А.В. Кулагина, Д.Н. Попова, С.А. Ермакова, А.Я. Рогова, Ю.Ф. Пономаренко, А.В. Докукина и др. Одним из эффективных направлений повышения технического уровня ОГМ является совершенствование методов расчета и конструкций, которые позволят в наибольшей степени реализовать преимущества гидромашин этого типа. Принцип работы и рабочий процесс в ОГМ определяют комплекс свойств, который необходим для обеспечения работоспособности их узлов и деталей, а также определяет базовые показатели технического уровня.

Общими принципами действия любой ОГМ являются:

- циклическое изменение объемов рабочих камер;
- наличие и разделение полостей, гидролиний и рабочих камер с высоким и низким давлением;
- перенос рабочей жидкости в рабочей камере из одной полости в другую;
- синхронизация циклического изменения объемов рабочих камер с их переносом.

С учетом этих принципов главным элементом ОГМ, в котором происходит рабочий процесс, является рабочая камера - изолированное пространство, образованное деталями агрегата, с периодически увеличивающимся или уменьшающимся при работе объемом и периодически сообщаемое с полостями и линиями высокого и низкого давления. Внешними факторами, действующими на элементы ОГМ, являются давление рабочей жидкости и нагрузки, которые обуславливаются взаимодействием деталей гидромашин и режимами работы привода.

Проектирование является основой формирования технического уровня производимой продукции, так как является началом ее жизненного цикла. В соответствии с действующей единой системой конструкторской документации этапами проектирования технического объекта любого вида являются: техническое предложение, эскизный проект и технический проект, которые показаны на схеме, изображенной на рис. 1. Исходными данными при проектировании являются техническое задание и ограничения по конструктивным и технологическим возможностям производителя, показатели технического уровня, которые представляются для ОГМ множествами концептуальных решений  $Q_i$ , абсолютных  $X_j(Q_i)$ , относительных  $Y_j(Q_i)$  и комплексных  $Z_j(Q_i)$  показателей. Теоретически каждый из этапов проектирования должен быть направлен на повышение технического уровня разрабатываемой машины. Отсутствие координации и согласования проектных процедур,

---

<sup>1</sup> Доктор техн. наук, Одесский национальный политехнический университет

иерархии целей является сдерживающим фактором традиционного подхода при проектировании гидромашин высокого технического уровня.

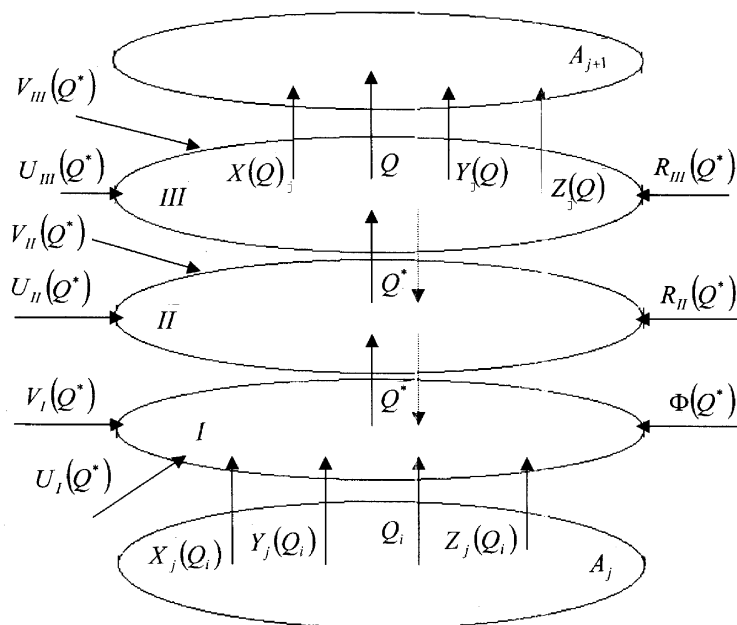


Рисунок 1 - Этапы проектирования технического объекта.  $A_j, A_{j+1}$  - множество показателей, характеризующих технический уровень конструкций;  $Q_i$  - конструктивные концепции;  $X_j(Q_i)$  - абсолютные показатели уровня  $A_j$ ;

$Y_j(Q_i)$  - относительные показатели уровня  $A_j$ ;  $Z_j(Q_i)$  - комплексные показатели, характеризующие технический уровень  $A_j$ ; I, II, III - этапы разработки технического объекта: I - техническое предложение, II - эскизный проект; III - технический проект;  $U_n(Q^*)$  - конструктивные условия на разных этапах проектирования;  $V_n(Q^*)$  - технологические условия на разных этапах проектирования;  $\Phi(Q^*)$  - техническое задание на разработку;

$R_n(Q^*)$  - прочие условия на разных этапах проектирования;

$Q$  - конструктивная концепция разработки;  $X_{j+1}(Q)$  - абсолютные показатели, характеризующие технический уровень разработки;  $Y_{j+1}(Q)$  - относительные показатели, характеризующие технический уровень разработки;  $Z_{j+1}(Q)$  - комплексные показатели, характеризующие технический уровень разработки

Системный подход в проектировании технических объектов – один из современных подходов, совмещающий в себе преимущества синтетического подхода, в котором объект представляется целиком, и аналитического, где объект представляется не как целое, а как совокупность частей, его составляющих [4, 5, 6]. Проектирование технических объектов в рамках системного подхода выполняется параллельно в трех плоскостях: в плоскости целостного представления

объекта при синтезе, в плоскости рассмотрения частей, узлов и элементов при анализе и в плоскости связей между элементами объекта, в чем состоит идея системного подхода [7]. Применение в проектировании системного подхода позволяет исследовать и оптимизировать объект проектирования с помощью его математической модели.

Системный подход позволяет разрабатывать элементы объекта с учетом заданных показателей его технического уровня, а свойства целого объекта устанавливать по свойствам составляющих его элементов. Управление техническим уровнем на стадии проектирования сводится к выбору рациональных параметров либо решению задач оптимизации, то есть выбору либо расчету параметров объекта проектирования или его компонентов по одному или нескольким критериям, которые признаны существенными для обеспечения требуемых значений показателей технического уровня при заданных ограничениях и условиях. Каждый из этапов проектирования состоит из последовательности работ, которые необходимо выполнить для достижения поставленной цели.

Системное проектирование устанавливает направление, последовательность работ и предполагает квантификацию исходной цели на множество подцелей до уровней, обеспечивающих их количественную измеримость [5,6]. Эффективные результаты при описании и исследовании сложных технических систем дает иерархический подход, предусматривающий разбиение системы на вертикально соподчиненные подсистемы разных уровней [7]. При этом обеспечивается вертикальная соподчиненность подсистем. Каждая подсистема, в свою очередь, может быть разбита на новые подсистемы, в результате образуется многоуровневая иерархическая система. Наиболее очевидным и распространенным является морфологический принцип декомпозиции системы, при котором структура модели соответствует физической структуре системы. В этом случае структура системы описывается в виде представления совокупности элементов этой системы и набора связей между элементами, необходимых для достижения целей ее функционирования. Морфологическое описание системы позволяет получить функциональное описание системы, т.е. описание законов взаимодействия элементов, а из нее – информационное описание системы, то есть описание информационных связей как системы с окружающей средой, так и подсистем внутри системы.

К первому уровню относятся подсистемы либо модели на их основе, для которых может быть выделен один доминирующий физический процесс, определяющий принцип работы всей системы. Этот уровень декомпозиции, как правило, не допускает дальнейшей декомпозиции, а поэтому отличается наибольшей точностью и достоверностью. При декомпозиции по морфологическому признаку ОГМ первым уровнем ее иерархической модели необходимо считать рабочую камеру, так как в ней происходит процесс, который является основой принципа работы объемной гидромашины.

В результате применения системного подхода формируется иерархическое дерево целей проектирования, в котором подцели предыдущего уровня образуют набор исходных параметров для последующего. Поэтому каждый этап проектирования на стадии эскизного проекта рассматривается как последовательность операций по определению рациональных параметров узлов машины. Выбор рациональных параметров подсистем на ранних стадиях проектирования технических объектов позволяет повысить их технический уровень, так как рассматриваются подсистемы, которые определяют основы функционирования, а исходными данными являются значения базовых показателей качества всей системы.

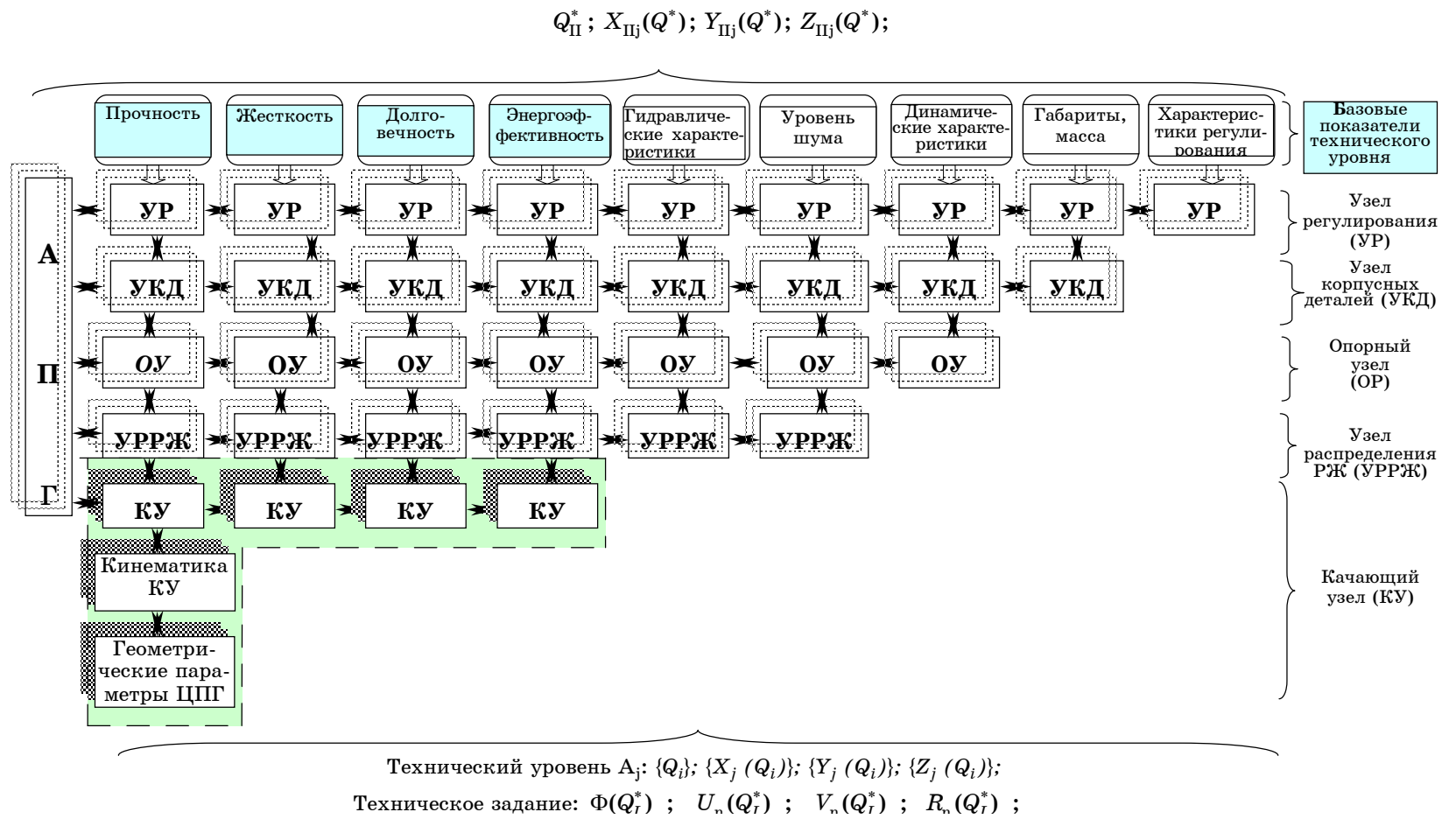


Рисунок 2 - Схема эскизного проектирования АПГ высокого технического уровня

Кроме того, сокращается время разработки, так как выбор рациональных параметров на ранних стадиях проектирования существенно уменьшает число вариантов рассматриваемых при последующих этапах синтеза.

В качестве примера применения системного подхода на рис. 2 представлена схема эскизного проектирования аксиально-поршневой гидромашины (АПГ) высокого технического уровня в виде ее многоуровневой иерархической модели, построенной на морфологическом принципе декомпозиции с установлением внутренних и межуровневых связей на основе базовых показателей технического уровня либо критериев работоспособности, которые признаны определяющими для данных связей.

Начальным этапом проектирования АПГ есть определение параметров цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) как основного элемента роторно-поршневой гидромашины любого типа, в котором происходит преобразование гидравлической энергии в механическую либо наоборот. В многопоршневых гидромашин ЦПГ образуют качающий узел (КУ). Для ОГМ при заданной кинематике основными свойствами, которые должен обеспечить КУ, являются прочность, жесткость, надежность и долговечность при высокой энергетической эффективности. Параметры КУ являются основой для проектирования узла распределения рабочей жидкости. Детали и элементы узла распределения должны обеспечить такие же свойства, как и детали КУ. Кроме того, конструкция и размеры узла распределения обуславливают процессы изменения давления в ЦПГ, которые влияют на пульсации давления и подачи рабочей жидкости, что определяет гидравлические процессы, а также частоты и уровень излучаемого шума. Заключительным этапом проектирования нерегулируемых АПГ является расчет опорных узлов и корпусных деталей. Величина и характер нагрузок на эти узлы определяются параметрами КУ и узла распределения. Основными свойствами, которые должен обеспечить опорные и корпусные узлы АПГ высокого технического уровня, также являются прочность, жесткость, надежность и долговечность при установленной энергетической эффективности. В результате получается эскизная компоновка АПГ, которую можно оценить по массогабаритным показателям. Для регулируемых АПГ заключительным этапом проектирования является расчет узла регулирования, который, кроме свойств прочности, жесткости, надежности и долговечности, должен дополнительно обеспечить выполнение ряда специфичных свойств, предъявляемых к системе регулирования: диапазон, точность, чувствительность и быстродействие регулирования, минимальные габариты, масса и энергопотребление.

Рабочий процесс в КУ поршневой объемной гидромашине, то есть преобразование механической энергии в гидравлическую, происходит в ЦПГ, которых, как правило, больше одной. Поэтому начальным этапом проектировочного расчета КУ является определение геометрических параметров ЦПГ, от конструкции и размеров которой зависят уровни рабочего давления, долговечность, КПД, масса и габариты гидромашины. На начальных стадиях проектирования формируется технический уровень создаваемой машины. Следовательно, наиболее эффективно повышается технический уровень АПГ при выборе рациональных параметров ЦПГ.

На основе предложенного системного подхода проектирования ОГМ разработана структурная схема эскизного проекта КУ АПГ высокого технического уровня, которая представлена на рис. 3. Исходными данными проектировочного расчета КУ являются значения показателей технического предложения и критериальные показатели технического уровня. Факторное пространство для эскизного проектирования АПГ высокого технического уровня описывается множествами

концептуальных решений серий АПГ проектируемого типа  $\{Q_i\}$ , рабочих объемов в типоразмерных рядах серий  $\{q_i\}$ , уровней рабочего давления (номинальное, максимальное) в сериях  $\{p_{im}\}$ , диапазонов частот вращения  $\{n_{ij}\}$ . Базовыми показателями технического уровня АПГ в сериях являются множества: значений мощности гидромашин (при различных уровнях давления и частотах вращения)  $\{N_{ijm}\}$ , показателей КПД в сериях  $\{\eta_{ik}\}$ , показателей ресурса  $\{H_{iu}\}$ , значений массы  $\{m_i\}$ , габаритов  $\{L_i\}$ ,  $\{D_i\}$  и стоимости  $\{C_i\}$ , множества удельных показателей  $\{\bar{m}_i\}$ ,  $\{\bar{E}_i\}$  и другие показатели, в которых может отражаться специфика гидромашин либо приводов, для которых они проектируются. Значения показателей технического предложения на проектирование АПГ высокого технического уровня представлены на рис. 3 в квадратных скобках. Для обеспечения высокого технического уровня ОГМ необходимо, чтобы показатели технического предложения входили во множества значений базовых показателей качества.

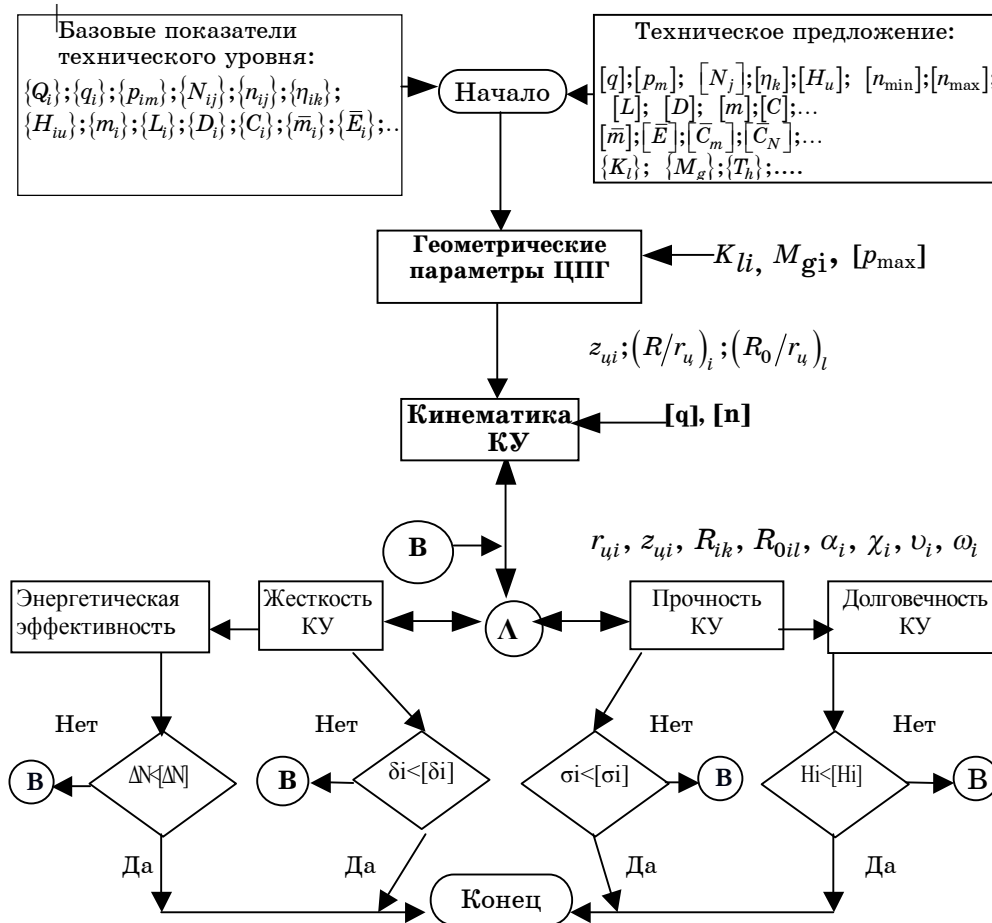


Рисунок 3 - Структурная схема эскизного проекта КУ АПГ

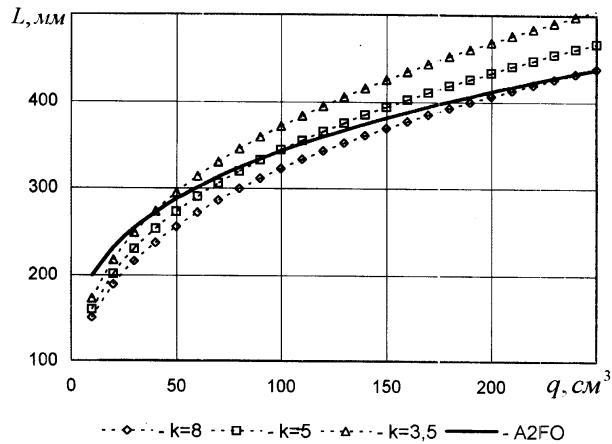
Для достижения базовых показателей технического уровня при заданном рабочем объеме  $[q] \in \{q_i^*\}$ , при заданных уровнях давления  $[p_m] \in \{p_{mi}^*\}$  и диапазонах частот вращения при проектировании необходимо обеспечить, чтобы показатели технического совершенства  $[N_j] \in \{N_j^*\}$ ,  $[\eta_k] \in \{\eta_k^*\}$ ,  $[L] \in \{L^*\}$ ,  $[D] \in \{D^*\}$  и т.д. В приведенных обозначениях индекс\* в показателях соответствует заданному типоразмеру гидромашины из соответствующего множества базовых показателей технического уровня АПГ. Значения показателей АПГ высокого технического уровня необходимо обеспечить с учетом ограничений, которые в техническом предложении представлены для конкретного изготовителя множествами конструкций КУ  $\{K_l\}$ , применяемых конструкционных материалов  $\{M_g\}$ , технологических процессов  $\{T_h\}$  и требований по условиям эксплуатации  $\{\mathcal{E}_p\}$ . Эти вышеуказанные показатели технического предложения с ограничениями по критериальным показателям технического уровня являются исходными при проектировании КУ и гидромашины в целом.

Проектирование КУ АПГ начинается с вычисления геометрических параметров ЦПГ, которые зависят от максимального давления  $p_{\max}$ , конструкций блока цилиндров АПГ -  $K_{li}$ , применяемых материалов  $M_{gi}$  и технологий  $T_{hi}$ . Из условия обеспечения прочности и жесткости БЦ определяются значения относительных радиусов размещения центров цилиндров  $(R/r_u)_{ki}$  и относительных радиусов наружной поверхности БЦ  $(R_0/r_u)_{ki}$  при различных значениях чисел цилиндров  $z_{u \min} \leq z_{uk} \leq z_{u \max}$ . Определение абсолютных размеров ЦПГ выполняется с учетом особенностей конструктивной схемы АПГ и ее кинематики. Исходными для расчета кинематики являются величина рабочего объема  $q$  и заданные частоты вращения  $n_i$ .

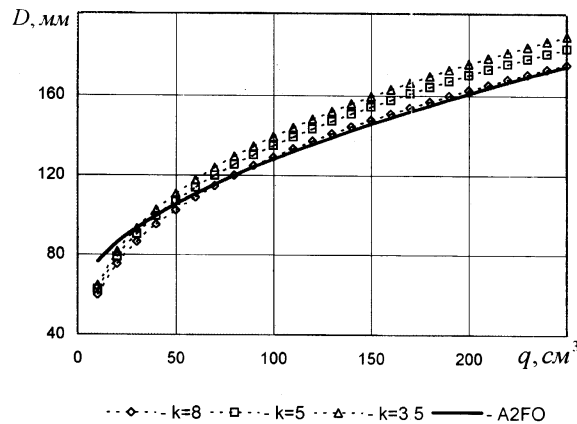
Расчеты кинематики совместно с геометрическими параметрами ЦПГ дают исходные данные для выполнения всего комплекса проектировочных расчетов по КУ, которые во многом определяют значения показателей технического уровня АПГ. Произвольный выбор геометрических параметров ЦПГ, а также их перебор для обеспечения заданного рабочего объема приводит к рассмотрению нескольких сотен вариантов параметров КУ, что в конце концов, не гарантирует получение рациональных параметров данного узла. Поэтому совершенствование методов расчета КУ должно быть направлено к применению методов, которые позволят определять рациональные размеры КУ из системного рассмотрения кинематики, условий прочности и жесткости, а также с учетом долговечности и энергетической эффективности, как показано на структурной схеме рис.3.

Для оценки уровня полученных результатов выполнен сравнительный анализ габаритов типоразмерного ряда серии АПГ А2FO (Bosch-Rexroth, Германия) с габаритами гидромашин, рассчитанных аналитически по предложенной методике. Серия нерегулируемых насосов с наклонным БЦ А2FO имеет минимальные габариты из всех выпускаемых типов АПГ. Результаты расчета габаритов АПГ с наклонным БЦ представлены на рис. 4 [8]. При расчете ЦПГ принимались параметры: число поршней  $z_u = 7$ , угол наклона БЦ

$\alpha = 40^{\circ}$ , коэффициенты концентрации напряжений материала БЦ  $k = 3,5; 5; 8$ . В результате сравнительного анализа полученных результатов установлено, что по предложенной методике расчета аналитически обосновываются габариты типоразмерного ряда серии АПГ, которая определяет наивысший технический уровень.



a



б

Рисунок 4 - Сравнение габаритов типоразмерных рядов АПГ с наклонным БЦ серии А2FO и определенными аналитически при различных коэффициентах концентрации напряжений материала БЦ: а – длина; б – диаметр

Таким образом, данная схема и последовательность проектного расчета АПГ созданы на базе ее многоуровневой иерархической модели (рис. 2), построенной на морфологическом принципе декомпозиции, с установлением внутренних и межуровневых связей на основе критериальных показателей технического уровня и условий работоспособности, которые признаны определяющими для данных связей. Для данной модели АПГ методологической основой ее проектирования является аналитическое определение рациональных параметров ЦПГ путем системного рассмотрения кинематики, условий прочности, жесткости, долговечности и высокой энергетической эффективности. Для обоснования методологии проектирования АПГ высокого технического уровня, с одной стороны, необходимо установить



аналитические условия выбора рациональных параметров ЦПГ в соответствии с главными критериями их работоспособности, а с другой стороны, определить значения базовых показателей качества, характеризующих техническое совершенство, которые признаны существенными для обеспечения требуемого уровня конкурентоспособности гидромашин из анализа показателей наилучших образцов.

## SUMMARY

*In article questions of application of the system approach in designing volumetric hydraulic machines of a high technological level are considered. For example, the methodology of designing axial piston hydromachines (APH) of a high technical level with application of the hierarchical multilevel model created on the basis of a morphological principle of decomposition with definition of connections inside levels and between levels on values of criterion parameters technical perfection and conditions of serviceability which are recognized determining for these connections is proved and developed. For this model APH the methodological basis of designing is analytical definition of rational parameters of the swinging unit by system consideration of kinematics, conditions of solidity, rigidity, durability and power efficiency.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Г. Беренгард, М.М. Гайцгори и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
2. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы./ Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
3. Основы теории и конструирования объемных гидропередач / А.В. Кулагин, Ю.С. Демидов, В.Н. Прокофьев, А.М. Кондаков. – М.: Высшая школа, 1967. – 399 с.
4. Гмошинский В.Г., Фторет Г.И. Теоретические основы инженерного прогнозирования. – М.: Наука, 1973. – 304 с.
5. Гутыря С.С. Системная оценка технического уровня и управление качеством передач зацеплением при проектировании: Дис... докт. техн. наук: 05.02.02. – Одесса, 2001. – 392 с.
6. Кіндрацький Б.І., Сулим Г.Т. Раціональне проектування машинобудівних конструкцій. – Львів: Кінпатрі лтд, 2003. – 280 с.
7. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
8. Николенко И.В. Обоснование осевых размеров качающего узла аксиально-поршневой гидромашин //Труды Одесского политехн. ун-та. – 2003. – Вып. 1(19). – С. 45 – 49.

*Поступила в редакцию 30 октября 2006 г.*