

УДК 62-82-112.6

## РАЗРАБОТКА КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНЫХ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ И ФОРМЫ МОНТАЖНОГО КОРПУСА

**В. В. ПИНЧУК, С. Ф. АНДРЕЕВ**

Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь

**В. К. ШЕЛЕГ**

Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск

### Введение

Для того чтобы сформулировать условия и требования к элементной базе агрегатно-модульных гидроблоков управления (ГУ), необходимо установить взаимосвязи между фазовыми переменными элементов подсистем на основе комбинированных моделей ГУ, включающих топологические модели ГУ подсистем и компоновочные их решения [1].

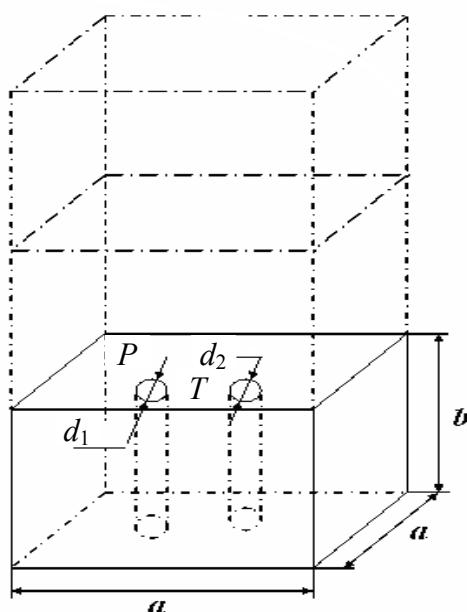


Рис. 1. Блок монтажных корпусов на основе многогранной призмы

Решение этой задачи требует разработки математической модели, отражающей схемные и компоновочные решения постановочных задач элементарных схем, что позволит нам выполнить исследования динамики изменения показателей качества ГУ на существующих конструкциях агрегатно-модульных ГУ, а также провести оценку, абстрагируясь от гидросхем, влияния порядка расположения гидроаппаратов в пространстве на эти показатели.

Целью настоящего исследования является определение оптимальной компоновки ГУ, устанавливающей расположение гидроаппаратов на монтажном корпусе.

### Постановка задачи

Учитывая конструктивную форму присоединительных плоскостей гидроаппаратов наиболее рациональным расположением гидроаппаратов в пространстве будет в том случае, если они будут расположены концентрично вокруг сквозных магистральных каналов подвода и слива рабочей жидкости, а с увеличением их количества, определяемого принципиальной гидросхемой (ПС), расположение их будет образовывать спираль вокруг указанных каналов.

В связи с этим в качестве формы монтажного корпуса ГУ можно принять блок монтажных корпусов на основе многогранной призмы (рис. 1), в основании которой лежит равносторонний многоугольник с длиной стороны  $a$ . Высота призмы равна  $b$ , т. е. на каждую грань  $a \times b$  может быть установлен один гидроаппарат. В призме выполнены сквозные магистральные каналы подвода рабочей жидкости  $P$  с диаметром  $d_1$  и слива  $T$  – с диаметром  $d_2$ .

Количество граней  $a \times b$  равно  $n$ . То есть при установке  $N$  гидроаппаратов на  $n$  граней в случае  $N > n$  потребуется  $K$  призм, соединенных между собой своими основаниями. Количество гидроаппаратов  $N$  зависит от сложности принципиальной гидросхемы. Для существующих технологических машин количество гидроаппаратов в гидросхемах может составлять от 3 до 30 [2]. Число призм  $K$  – функция Антье (целое) – можно определить из соотношения [2]:

$$K(n, N) = \left[ \frac{N-1}{n} + 1 \right]. \quad (1)$$

Из (1) следует, что то или иное количество гидроаппаратов ПС может быть скомпоновано в агрегатно-модульный ГУ путем увеличения кратности исходной призмы. Для оценки существующих конструкций ГУ призму с числом установочных площадок  $n$  можно с определенной степенью приближения рассматривать как монтажный корпус в виде прямоугольного параллелепипеда с установленными на его боковых гранях в одном уровне гидроаппаратами.

Для того чтобы установить оптимальное пространственное расположение гидроаппаратов при создании агрегатно-модульных ГУ, необходимо разработать математическую модель монтажного корпуса ГУ и провести исследования влияния формы корпуса на показатели качества ГУ. Для этого определим критерии оптимальности монтажного корпуса. Причем в расчетах будем учитывать различия по гидравлическим потерям давления только в магистральных каналах подвода и слива, условно приняв их равными в соединениях между гидроаппаратами (так как определить их можно только после установления свойств элементов подсистем на дальнейших этапах разработки ГУ). Тогда потери давления в каналах подвода и слива можно определить [2]:

$$\Delta p_N = \lambda_1 \frac{K(n, N)b}{d_1} \rho \frac{v_1^2}{2} + \lambda_2 \frac{K(n, N)b}{d_2} \rho \frac{v_2^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\Delta p_N$  – потери давления в магистральных каналах подвода и слива;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты Дарси, определяемые по известным формулам для различных режимов течения жидкости;  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно диаметры каналов подвода и слива;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости течения жидкости соответственно в каналах подвода и слива;  $\rho$  – плотность жидкости.

Площадь основания призмы определится как [2]:

$$S = \frac{a^2}{4 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)} n. \quad (3)$$

Тогда для изготовления ГУ по гидросхеме с числом гидроаппаратов  $N$  нам необходимо использовать монтажный корпус, объем  $V_N$  и полную поверхность  $S_N$  которого можно определить из выражений [2]:

$$V_N = \frac{a^2 nbK(n, N)}{4 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)}; \quad (4)$$

$$S_N = \frac{na^2 + 2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right) nabK(n, N)}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)}. \quad (5)$$

Для определения оптимальной формы монтажного корпуса необходимо привести многокритериальную задачу к экстремальной задаче. С этой целью предложено [2] вместо набора частных показателей эффективности  $T_i$  рассматривать целевую функцию вида

$$X = \sum_{i=1}^m C_i T_i(x), \quad (6)$$

где  $C_i$  – нормированные коэффициенты взаимной важности частных критериев ( $C_1 + C_2 + \dots + C_m = 1$ ). Они являются результатом экспертизы и отражают представление проектировщика о содержании компромисса, который он вынужден принять [2];  $x$  – вектор управляемых переменных.

Учитывая вышеизложенное и исходя из выражения (6), общий критерий оптимальности  $X$ , формы монтажного корпуса запишем в следующем виде:

$$X = \left( C_1 \frac{\Delta p_N}{\Delta p^*} + C_2 \frac{V_N}{V^*} + C_3 \frac{S_N}{S^*} \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

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

Подставив в (7) выражения (2), (4) и (5), после преобразования получим [2]:

$$X = \frac{1}{K(n, N)b} \left( C_1 \frac{2\Delta p^*}{\rho} \left( \frac{d_1}{\lambda_1 \vartheta_1^2} + \frac{d_2}{\lambda_2 \vartheta_2^2} \right) + C_2 \frac{4V^* \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)}{a^2 n} + C_3 \frac{2S^* \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)}{an \left[ a + 2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right) \right]} \right) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Для определения формы монтажного корпуса необходимо выполнить исследование модели (8), последовательно задавая коэффициенты важности критериев  $C_1$ – $C_3$ , число призм  $K$ , зависящее от количества гидроаппаратов в принципиальной гидро-

схеме, а также диаметры каналов  $d_1$  и  $d_2$ , исходя из расхода жидкости  $Q$  по каналам, полагая при этом, что размеры  $a$  и  $b$  призмы определяются размерами стыковой плоскости гидроаппаратов. На основе таких исследований можно установить пространственные компоновки гидроаппаратов в ГУ, так как во взаимосвязи с перечисленными выше параметрами в формуле (8) присутствует число граней монтажного корпуса  $n$ , которое определяет количество гидроаппаратов, расположенных в одном уровне монтажного корпуса, концентрично вокруг сквозных магистральных каналов подвода  $P$  и слива  $T$  рабочей жидкости. Кроме того, совместный анализ и синтез формы монтажного корпуса и графических моделей ГУ элементарных схем позволяют создать комбинированные модели, а также сформулировать условия и требования к стандартизированной элементной базе агрегатно-модульного конструирования ГУ.

Взаимодействие элементов ГУ определяется связями, которые соединяют элементы (гидроаппараты и монтажные корпуса) и признаки (занимаемый объем и масса; трудоемкость и соответственно стоимость изготовления; гидравлические потери давления в системе – энергетические характеристики; надежность; шумоизлучение; гидравлические утечки рабочей жидкости; возможность агрегатирования системы элементов и уровень их унификации в ГУ) в целом – множество инвариантных агрегатно-модульных ГУ. В первую очередь рассмотрим те связи, которые определяют процесс взаимодействия между элементами для достижения общей цели – соединения гидроаппаратов согласно принципиальной схеме при помощи монтажного корпуса. Множество связей между элементами (подсистемами), существующих при выполнении конкретных проектных операций (соединительных каналов в монтажном корпусе и гидроаппаратах, плоскостей для стыковки элементов между собой), составляет общую структуру ГУ. В свою очередь, общая структура ГУ состоит из структур элементов. Для разработки структуры монтажного корпуса, при помощи которого решается задача инвариантного соединения гидроаппаратов, согласно принципиальной гидросхеме воспользуемся приведенными в работе [3, с. 80] аксиомами.

**Аксиома 1.** Взаимодействие между элементами или подсистемами происходит по отдельным признакам. Конкретная связь может быть осуществлена только по одноименным признакам.

**Аксиома 2.** Между средствами (системами, подсистемами, элементами) существует связь, если:

- 1) они характеризуются хотя бы одним одинаковым признаком;
- 2) признаки имеют одинаковое значение (если изменение признака одного элемента приводит к изменению признака другого). Аналитически связь между средствами по признаку может быть определена в виде [3]:

$$g_i^{nk} \begin{cases} 1, \text{ если связь существует} \\ 0 \text{ в противном случае либо с учетом знака } (-1, 0, +1). \end{cases} \quad (9)$$

Процесс проектирования монтажного корпуса как переход от одного описания объекта к другому можно выразить как

$$O_o = \tilde{O}P_1 \Rightarrow \tilde{O}P_2 \Rightarrow \tilde{O}P_i, \quad (10)$$

где  $O_o$  – означает процесс проектирования;  $\tilde{O}P_1, \tilde{O}P_2, \dots, \tilde{O}P_i$  – описание объекта проектирования на разных этапах его разработки.

Описание монтажного корпуса, определяющее достигаемые с его созданием и использованием цели, назовем целевым:

$$\tilde{\text{ОП}}_1 = A_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, \quad (11)$$

где  $A_0$  – полученное описание монтажного корпуса на первом этапе;  $a_1, a_2, \dots, a_m$  – промежуточные результаты описания. Описанием объекта  $\text{ОП}_1$  на первом этапе будет форма монтажного корпуса, полученная на основе исследований выражения (8).

Ранее установлено, что оптимальные пространственные компоновки ГУ можно получить за счет использования монтажного корпуса 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 [2], [4], что нормирующие множители в формуле (8):  $\Delta p^*$  – гидравлические потери давления;  $V^*$  – объем монтажного корпуса и  $S^*$  – площадь наружной поверхности монтажного корпуса следует принимать  $V^*$  и  $S^*$  при  $n = 3$ , а  $\Delta p^*$  при  $n = 7$  (при указанных значениях  $n$  параметры  $\Delta p^*$ ,  $V^*$  и  $S^*$  будут иметь минимальные значения).

После подстановки в (8) нормирующих множителей  $\Delta p^*$ ,  $V^*$  и  $S^*$  и соответствующих преобразований получим [2, с. 119]:

$$X(N, n, b) = \left( \frac{0,33K(n, N)}{(N-1)/7+1} + \frac{0,33nK(n, N)}{4\text{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right)\sqrt{3}[(N-1)/3+1]} + \frac{\left[na/2\text{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right) + bnK(n, N)\right]0,33}{\sqrt{3a/2 + 3b}[(N-1)/3+1]} \right) \rightarrow \min. \quad (12)$$

### Методы исследований

По результатам численных исследований выражения (12) получена зависимость общего критерия оптимальности ГУ  $X$  от числа граней  $n$  монтажного корпуса. С увеличением количества гидроаппаратов в гидросхеме кратность размера  $b$  призмы учитывалась коэффициентом  $K$ .

Соотношение высоты призмы  $b$  к ее ширине  $a$  рассматривалось исходя из минимального числа гидроаппаратов в гидросхеме  $N = 3$ , в пределах  $b/a = 0,3, \dots, 0,9$ . В расчетах принимаем  $a = 1$ .

Число гидроаппаратов в принципиальной гидросхеме рассматривалось в пределах  $N = 3 - N_{\max}$ . В нашем случае  $N_{\max} = 30$ .

На рис. 2 представлен график расчетных значений целевой функции при варьировании числа граней монтажного корпуса (площадок) для  $b = 0,6, n = 3, \dots, n_{\max}, n_{\max} = 8$ .

По оси абсцисс на рис. 2 отложены значения  $N$  – число гидроаппаратов.

По оси ординат отложены расчетные значения  $X(N, n, b)$  – общего критерия оптимальности ГУ, используемых для установки гидроаппаратов в процессе разработки ГУ, и  $b = 0,6$ .

Аналогично строятся графики функции  $X(N, n, b)$  для остальных значений числа  $b$ .

Для расчета параметров оптимальной компоновки агрегатно-модульных ГУ применяем выборочный метод в статистических исследованиях.

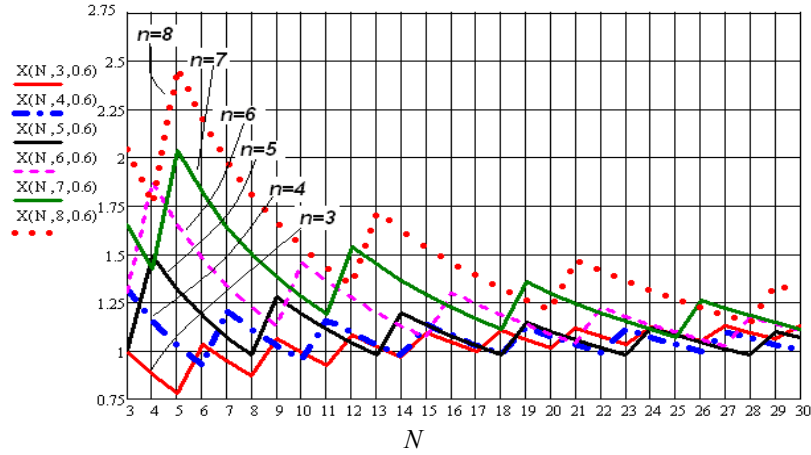


Рис. 2. График расчетных значений целевой функции  $X(N, n, b)$  для  $n = 3-8$  и  $b = 0,6$

Полученные графики целевой функции  $X(N, n, b)$  позволяют провести выборку чисел  $x_i$  и  $y_j$ , ( $i = 3, \dots, N_{\max}, j = 3, n_{\max}$ ), удовлетворяющих условию  $X(N, n, b) \rightarrow \min$ .

Здесь  $x_i$  – выборочные значения числа граней многогранной призмы монтажно-го корпуса ГУ;  $y_j$  – выборочные значения числа гидроаппаратов.

Оптимизацию компоновки агрегатно-модульных ГУ по числу граней монтажно-го корпуса осуществим с помощью функции плотности нормального распределения по параметру  $n$  [5, с. 49]:

$$fn(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_n}} \exp\left(-\frac{1}{2D_n}(n - m_n)^2\right). \quad (13)$$

Двумерная функция плотности нормального распределения [5, с. 71]:

$$f(n, N) = \frac{1}{2\pi\sqrt{D_n D_N (1 - R^2)}} e^{-\left[\frac{1}{2(1-R^2)}\left(\frac{(n-m_n)^2}{D_n} - \frac{2R(n-m_n)(N-m_N)}{\sqrt{D_n D_N}} + \frac{(N-m_N)^2}{D_N}\right)\right]} \quad (14)$$

позволяет оптимизировать компоновку агрегатно-модульных ГУ по двум параметрам  $n$  и  $N$ .

В формулах (13) и (14) имеем:

– математическое ожидание:  $m_n = \frac{1}{N_{\max} - 2} \sum_{i=3}^{N_{\max}} x_i$  и  $m_N = \frac{1}{n_{\max} - 2} \sum_{j=3}^{n_{\max}} y_j$ ;

– дисперсия:  $D_n = \frac{1}{N_{\max} - 2} \sum_{i=3}^{N_{\max}} (x_i - m_n)^2$  и  $D_N = \frac{1}{n_{\max} - 2} \sum_{j=3}^{n_{\max}} (y_j - m_N)^2$ ;

– коэффициент корреляции, учитывающий взаимосвязь параметров:

$$R = \frac{\sum_{i=3}^{N_{\max}} \sum_{j=3}^{n_{\max}} (x_i - m_n)(y_j - m_N) v_{i,j}}{\sqrt{D_n D_N}}. \quad (15)$$

В формуле (15) для определения вероятностей  $v_{i,j}$  [5, с. 65] оптимальных значений  $n$  и  $N$  используем формулу (1), устанавливающую взаимосвязь этих параметров:

$$v_{i,j} = \frac{K_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_{\max}-2} \sum_{j=1}^{n_{\max}-2} K_{i,j}}. \quad (16)$$

В формуле (16) должно выполняться условие нормировки двумерных вероятностей [5, с. 57]:

$$\sum_{i=1}^{N_{\max}-2} \sum_{j=1}^{n_{\max}-2} v_{i,j} = 1.$$

Здесь  $K_{i,j}$  – элементы матрицы двумерной функции Антье.

В нашем случае  $R = -0,00792$  (отрицательное значение), следовательно, для двумерного нормального распределения с увеличением числа граней  $n$  происходит уменьшение числа гидроаппаратов  $N$ .

На рис. 3 показан график функции плотности нормального распределения оптимального числа граней  $n$  многогранной призмы агрегатно-модульного ГУ.

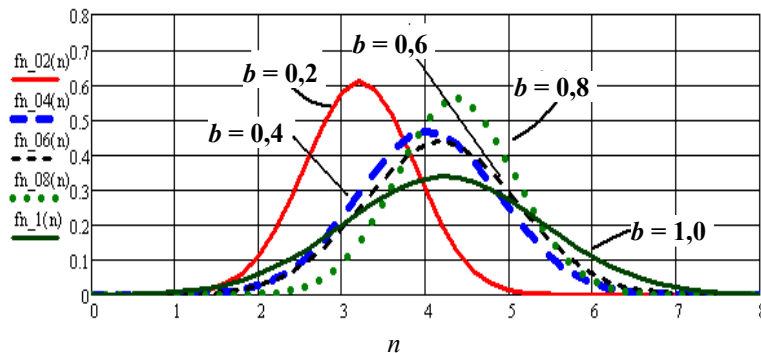


Рис. 3. График функции плотности нормального распределения числа граней  $n$  для  $X(N, n, b) \rightarrow \min$

Из анализа графика функции  $f_n(n)$ , представленного на рис. 3, следует, что оптимальная компоновка агрегатно-модульного ГУ может быть получена при количестве граней монтажного корпуса  $n = 4$ .

На рис. 4 представлен график двумерной функции  $f(n, N)$  плотности нормального распределения общего критерия оптимальности компоновки агрегатно-модульных ГУ по параметрам  $n$  и  $N$  для  $b = 0,8$ .

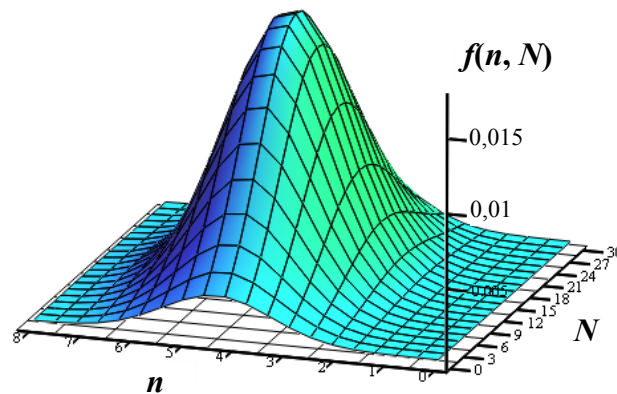


Рис. 4. Двумерная функция плотности распределения общего критерия оптимальности от числа граней монтажного корпуса  $n$  и числа гидроаппаратов  $N$

Из анализа графика, представленного на рис. 4, следует, что оптимальная компоновка агрегатно-модульных ГУ соответствует значениям: количество граней монтажного корпуса  $n = 4$ ; число гидроаппаратов  $N = 20$ .

### **Заключение**

Таким образом, можно утверждать, что оптимальная компоновка ГУ достигается в случае расположения гидроаппаратов на монтажном корпусе модульного исполнения, имеющем сквозные магистральные каналы подвода и слива рабочей жидкости, форма которого позволяет установить в одном горизонтальном уровне четыре гидроаппарата.

Указанная компоновка системы компонентов агрегатно-модульных ГУ была использована при разработке конструкций унифицированных функциональных блоков, внедренных в производство на Гомельском заводе «Гидропривод».

### **Литература**

1. Пинчук, В. В. Способы монтажа гидроблоков управления / В. В. Пинчук // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2004. – № 5. – С. 47–50.
2. 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.
3. Быков, В. П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении / В. П. Быков. – Л. : Машиностроение, 1989. – 255 с.
4. Пинчук, В. В. Синтез гидроблоков управления на основе унифицированной элементной базы / В. В. Пинчук. – Минск : Технопринт, 2001. – 140 с.
5. Лисьев, В. П. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики. – М. : Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики, 2006. – 199 с.

*Получено 01.10.2015 г.*