

УДК 621.22.01

## МЕТОД СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Б.К. ГРАНКИН, В.В. КОЗЛОВ

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Никоновым В.В.**

Излагается метод синтеза функциональной структуры гидравлических систем. Метод основан на представлении объектов синтеза как управляющих систем по отношению к рабочей среде (жидкости) как объекту управления. Синтез основан на процедурах формализации функциональных требований матричными числовыми кодами и их декомпозиции до уровня функций элементов. Метод адресуется специалистам по автоматизированному проектированию гидравлических систем различного назначения, в том числе систем подачи жидкого топлива в авиационных и ракетных двигателях, водоснабжения, заправки, пожаротушения и др.

**Ключевые слова:** метод синтеза, гидравлическая система.

### Введение

Гидравлические системы (ГС) применяются во многих областях техники для подачи топлива в двигательных установках, терморегулирования, пожаротушения и т.п. В настоящее время при выборе схемных решений ГС в проектировании преобладают эвристические [1] и морфологические [8] методы, эффективность которых зависит от искусства проектировщиков и квалификации экспертов. Из формализованных методов синтеза функциональных структур ГС известна работа А.В. Перекрестова [9], в которой исследуется узкий класс систем гидроавтоматики, рассматриваемых как релейные системы. Однако в общем случае ГС отличаются от релейных систем более сложными функциями преобразования рабочей жидкости, возможностью существования внутренних циклов. Эти особенности не позволяют использовать аппарат булевой алгебры для описания функций ГС и соответствующего им синтеза функциональной структуры.

Предлагаемый метод основан на представлении ГС как управляющих систем в трактовке С.В. Яблонского [11], смысл функционирования которых можно представить как передачу жидкости, называемой далее рабочей средой (РС), от источников к потребителям с преобразованием свойств РС.

Объектом моделирования и исследования в данной работе является функциональная структура ГС, под которой понимается модель, отражающая состав и связи функциональных элементов. Элемент описывается только функцией преобразования РС при передаче ее от входов к выходам элементов.

В общем случае в состав ГС как управляющих систем входят:

- внешние терминальные элементы, через которые система обменивается с внешней средой (входные и выходные штуцеры);
- внутренние терминальные элементы (емкости, в которых накапливается РС, из которых начинаются и в которых заканчиваются потоки РС в системе);
- движители (насосы, передающие энергию для перемещения РС);
- коммутаторы (запорные устройства, клапаны, вентили);
- преобразователи (теплообменники, фильтры, изменяющие свойства РС);
- коммуникации (трубопроводы и коллекторы).

Далее рассматриваются постановка задачи и процедуры синтеза функциональной структуры ГС.

### 1. Постановка задачи синтеза структуры гидравлических систем

Под синтезом структуры будем понимать определение состава и схем соединения элементов по заданным требованиям к функционированию системы. В состав исходных данных для решения задачи синтеза должны входить следующие сведения:

а) описание назначения системы с указанием преобразуемых параметров РС. Для конкретности изложения приведем простой пример. Пусть синтезируется структура системы, которая имеет источник 1 (входной штуцер), две емкости 2 и 3 для хранения жидкости и потребитель 4 (выходной штуцер). Система предназначена для подачи РС от источника в емкости и из емкостей в потребитель с преобразованием параметров давления, температуры и наличия механических примесей.

Для математического описания функций введем в рассмотрение множество  $Q(\omega)$  кодов преобразований свойств РС, определяемых по соотношению

$$q(\omega) = 2^{\omega_1} \cdot 3^{\omega_2} \cdot 5^{\omega_3} \cdot 7^{\omega_4} \cdot 11^{\omega_5} \dots, \quad (1)$$

где  $i$  – порядковый номер параметра РС, простое число соответствует основанию кода параметра, а  $\omega_i$  принимают значения 1, если соответствующий параметр преобразуется, и 0, если параметр не преобразуется. Тогда множество функций преобразований РС в системе может быть перечислено множеством значений кодов преобразований: (0, 1, 2, 3, 5, 6, 10, 15, 30). Среди этих кодов есть и «элементарные» преобразования, которые выполняются функциональными элементами. Для рассматриваемого примера имеем: отсутствию потока РС на выходе из элемента (функции коммутатора в нерабочем положении) соответствует логическая константа 0, наличию потока без преобразования параметров РС в элементе (функция коммутатора в «открытом положении») соответствует 1, повышению давления РС в элементе (функции насоса) соответствует значение 2, код преобразователей температуры (теплообменников) равен 3, и код фильтра равен 5. Остальные коды соответствуют сложным преобразованиям РС, реализуемым соединениями элементов в их возможных комбинациях;

б) перечень выполняемых системой операций. Пусть в примере это операции:

- насосной подачи жидкости из источника 1 в емкость 2 и потребитель 4 с терморегулированием, т.е. с кодом преобразования, равным 6;
- подачи жидкости насосом из источника 1 в емкость 3 с терморегулированием и очисткой (код преобразования равен 30);
- терморегулирования РС в емкости 2 путем перекачивания РС насосом через теплообменник по замкнутому контуру (код преобразования равен 6);
- подачи из емкости 2 в емкость 3 насосом с фильтрацией (код равен 10);
- подачи из емкости 2 к потребителю 4 выдавливаем с терморегулированием и фильтрацией (код равен 15);
- подачи из емкости 3 в емкости 2 и 3 насосом с фильтрацией (код равен 10);
- подачи насосом из 3 в 4 с подогревом и фильтрацией (код равен 30).

По этим данным строится функциональная модель заданных операций в виде «терминальной» матрицы. Строки матрицы соответствуют источнику и емкостям, столбцы соответствуют емкостям и потребителю. Ячейки содержат коды  $q_{ij}(\omega)$  преобразований РС,  $i$  - номер источника, а  $j$  - номер потребителя. Заданные операции отражены в диаграмме графа [2] на рис. 1, вершины графа соответствуют терминальным элементам, а дуги – операциям передачи и преобразования РС. Терминальная матрица показана на рис. 2.

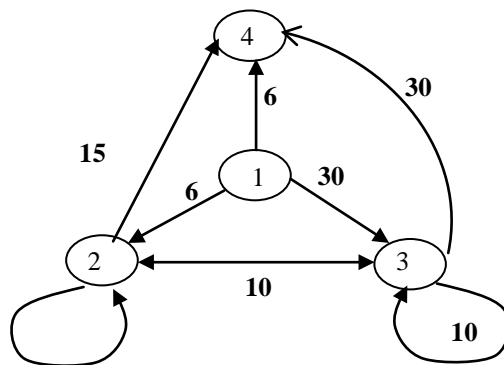


Рис. 1. Терминальный граф

	1	2	3	4
1		6	30	6
2		6	10	15
3		10	10	30
4				

**Рис. 2.** Терминальная матрица

Задача синтеза решается путем преобразований терминальной матрицы в матрицу структуры. Смысл такого преобразования состоит в декомпозиции [5; 7] кодов операций до уровня кодов функциональных элементов с сохранением связей и соблюдением специальных условий реализуемости.

## 2. Условия реализуемости

Условия реализуемости отражают специфику физической природы РС, элементов, типовых процессов функционирования и эксплуатации.

*Условие 1.* Матрица структуры должна отражать связи между элементами, выполняющими «элементарные» преобразования. Поскольку в требованиях, записанных в терминальной матрице, содержатся сложные функции, то в результате синтеза матрица должна быть преобразована в матрицу, в которой в одной ячейке должны помещаться преобразования РС в элементах (для рассматриваемого примера это коды 1, 2, 3, 5).

*Условие 2.* Выходы преобразователей, дающих при выходе различные значения параметров РС, должны быть разделены по выходам коммутаторами для исключения перемешивания РС с различными параметрами. Формализованная трактовка этого требования состоит в том, что коды преобразователей должны размещаться в разных столбцах матрицы структуры.

Кроме этих общих условий для различных классов систем существуют специфические условия физической реализуемости, вытекающие из объективных закономерностей, нормативных требований, из обобщенного опыта предыдущего проектирования и эксплуатации. Так в ГС емкости, содержащие РС под давлением, по требованиям безопасности должны быть разобщены с коммуникациями с помощью коммутаторов (вентилей), что формально соответствует отсутствию кодов преобразований в строках и столбцах, соответствующих терминальным элементам.

Преобразования матрицы терминального графа выполняются с применением процедур, описываемых ниже.

## 3. Процедуры синтеза

Основным методом выполнения условий реализуемости является декомпозиция функций путем введения промежуточных вершин [3]. Идея метода состоит в декомпозиции кодов операций до уровня кодов элементов и введении в граф промежуточных вершин, что соответствует введению дополнительных пар строк и столбцов. В методе используются следующие процедуры.

*Процедура 1.* Введение коммутаторов. Смысл процедуры объясняется на рис. 3. В верхней части показана процедура преобразования диаграммы графа, а ниже – их матричные представления, где  $i, k$  – номера источника и стоки;  $l, m$  – номера вводимых последовательно промежуточных вершин;  $q$  – коды преобразований, определяемые по соотношению (1).

Для изоляции вершины  $i$  от вершины  $k$  коммутатором дугу с кодом  $q$  заменяем дугами с кодами  $l$  и  $q$ , между которыми вводится промежуточная вершина  $l$ . Заметим, что коммутатор не меняет вида преобразования ( $q = q \cdot l$ ). На матрице процедура соответствует введению столбца и строки, соответствующих вводимой вершине  $l$ . Сложный код преобразования ( $l \cdot q$ ), размещенный в ячейке  $(i, k)$  выносится по частям в ячейки  $(i, l)$  и  $(l, k)$ , а ячейка « $ik$ » освобождается, как это видно на матрицах (рис. 3).

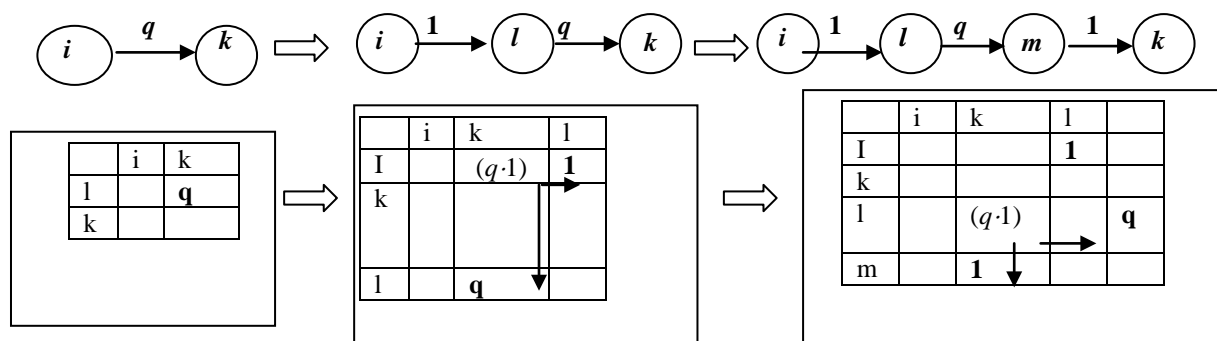


Рис. 3. Процедура введения коммутаторов

Для двухсторонней изоляции вершины коммутаторами следует ввести еще одну вершину. Из рис. 3 видно, что с помощью этой процедуры начальная и конечная вершины оказались изолированными от преобразователя. Эта процедура обеспечивает выполнение условия 2 физической реализуемости - изоляцию терминальных вершин.

*Процедура 2.* Декомпозиция сложной функции преобразования на функции элементов представлена на рис. 4. Сложная функция с кодом 30 заменяется последовательно на две функции с кодами 2 и 15, а затем функция с кодом 15 представляется произведением кодов 3 и 5 с введением при каждом разделении функций промежуточных вершин. Из рис. 4 видно, что последняя матрица содержит лишь коды элементов, а это соответствует выполнению условия 1 физической реализуемости.

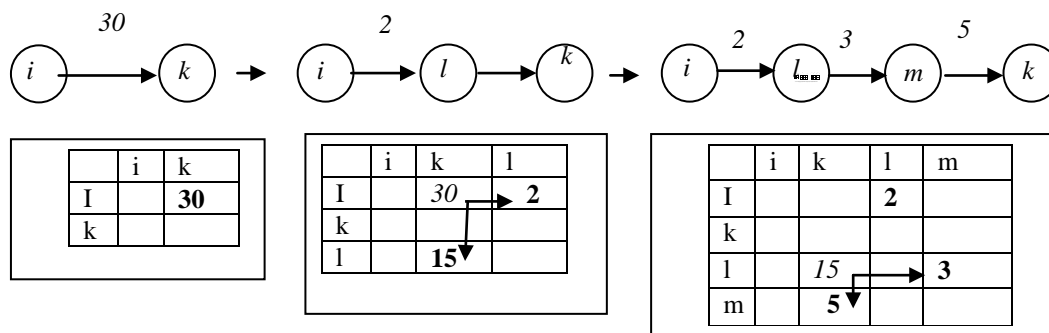


Рис. 4. Процедура декомпозиции функций преобразования РС

*Процедура 3.* Минимизация числа смежных преобразователей, что представлено на рис. 5. Здесь видно, что два элемента с кодами “q” примыкают к одной вершине, в матрице такие коды размещены в одной строке или в одном столбце. Если при введении промежуточной вершины провести замену функций так, как это показано в графах на рис. 5, то те же функции система выполнит с одним преобразователем.

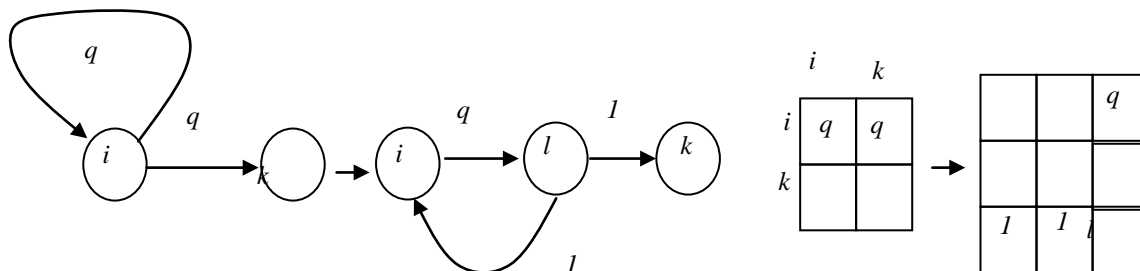
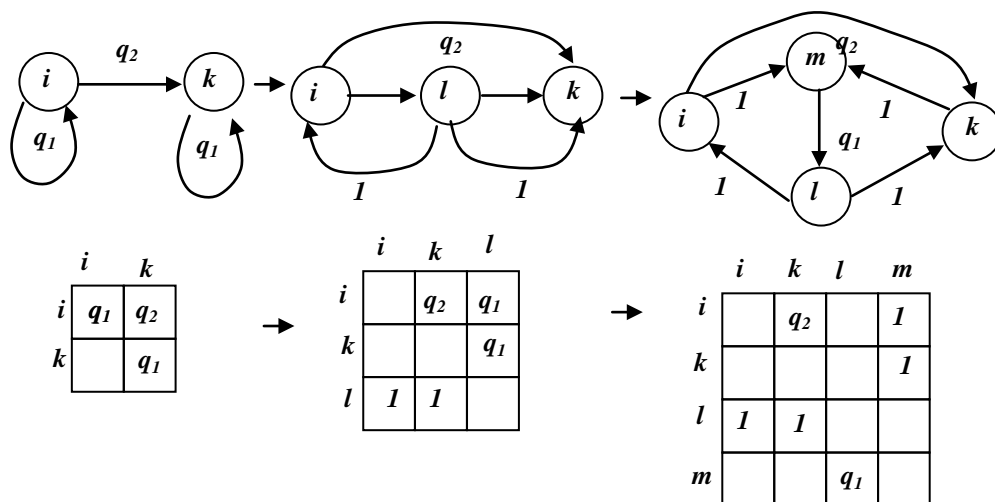


Рис. 5. Процедура минимизации смежных преобразователей РС

*Процедура 4.* Минимизация числа несмежных преобразователей, что представлено на рис. 6. Для замены двух несмежных преобразователей, имеющих одинаковые функции необходимо ввести последовательно две промежуточные вершины. Из рисунка видно, что вместо двух преобразователей с кодом  $q_1$  схема содержит один преобразователь с кодом  $q_1$ .



**Рис. 6.** Процедура минимизации несмежных преобразователей

Применение процедур позволяет за конечное число шагов получить схему, реализующую заданные операции. Следует заметить, что при введении промежуточных вершин могут быть различные варианты разбиения кодов преобразований и последовательности минимизации элементов. Однако, независимо от выбранного варианта в результате синтеза получается модель функциональной структуры, обеспечивающей выполнение заданных операций.

#### 4. Пример синтеза

Рассмотрим пример синтеза для исходных данных, представленных в виде матрицы и графа, показанных на рис. 1 и 2. Декомпозиция сложных функций преобразований показана на рис. 7. Из матрицы видно, в ее ячейках содержатся коды как смежных, так и несмежных преобразователей, поэтому необходимо применить последовательно этапы введения промежуточных вершин с целью минимизации одинаковых преобразователей.

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>1</b>		$2 * 3$	$2*3*5$	$2 * 3$
<b>2</b>		$2 * 3$	$2 * 5$	$3 * 5$
<b>3</b>		$2 * 5$	$2 * 5$	$2*3*5$
<b>4</b>				

**Рис. 7.** Терминальная матрица

	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	
<b>1</b>		$2 * 3$	$2*3*5$	$2 * 3$	<b>2</b>
<b>2</b>		$2 * 3$	$2 * 5$	$3 * 5$	<b>2</b>
<b>3</b>		$2 * 5$	$2 * 5$	$2*3*5$	<b>2</b>
<b>4</b>					
<b>5</b>		$3, 5$	$3*5, 5$	$3, 3*5$	

**Рис. 8.** Введение промежуточной вершины 5

Пусть первым для минимизации выбран преобразователь с кодом «2». Прделаем процедуру 2 с введением вершины 5. В результате ее выполнения терминальная матрица принимает вид, представленный на рис. 8, где удаляемые из ячеек коды выделены курсивом. Представляя в пятом столбце все коды как произведения «2·1», минимизируем преобразователи введением шестой вершины по процедуре 1 (рис. 9).

Аналогично проводим процедуры 2 и 1 для преобразователей с кодами 3 и 5 с введением вершин 7, 8 и для преобразователей с кодами 5, для которых необходимо ввести вершины 9 и 10 (рис. 10).

	1	2	3	4	5	6
1					2	1
2				<i>3*5</i>	2	1
3					2	1
4						
5		3, 5	3*5, 5	3, 5, 3*5		
6					2	

Рис. 9. Введение промежуточной вершины 6

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1						<b>1</b>		<b>1</b>		<b>1</b>
2						<b>1</b>		<b>1</b>		<b>1</b>
3						<b>1</b>				<b>1</b>
4										
5										
6					<b>2</b>					
7										
8							<b>3</b>			
9										
10									<b>5</b>	

Рис. 10. Итоговая матрица

Учитывая, что выбор исходного преобразователя для выполнения условий реализуемости в процессе синтеза, а также выбор последовательности выполнения процедур синтеза могут быть произвольны, то на первом шаге число вариантов равно числу преобразователей (в примере - три), на втором этапе для каждого из них число вариантов уменьшается на один и т.д. Перебор вариантов при необходимости может быть организован по тривиальным алгоритмам построения «дерева перебора», тупиковые вершины которого и определяют множество возможных вариантов синтеза. Вместе с тем независимо от порядка перебора каждый из алгоритмов приводит к функциональной структуре, удовлетворяющей заданным требованиям к функционированию.

По полученной матрице структуры могут быть построены диаграмма графа и принципиальная схема соединений функциональных элементов в системе.

Построение диаграмм и схем связано с решением задачи обоснования приемлемого варианта размещения из условий удобства восприятия исследователями или операторами пультов управления наглядной модели ГС. Методы решения этой задачи представлены в [6; 10].

Вариант представления принципиальной схемы, полученной в приведенном выше примере показан на рис. 11.

## Заключение

Представленные метод и процедуры синтеза не требуют специальных программных средств и могут быть реализованы в стандартных машинных языках для проектирования дискретных устройств.

Статья выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта 12-08-146а «Методология, модели и методы структурно-функциональных исследований сложных объектов с произвольной физической природой элементов».

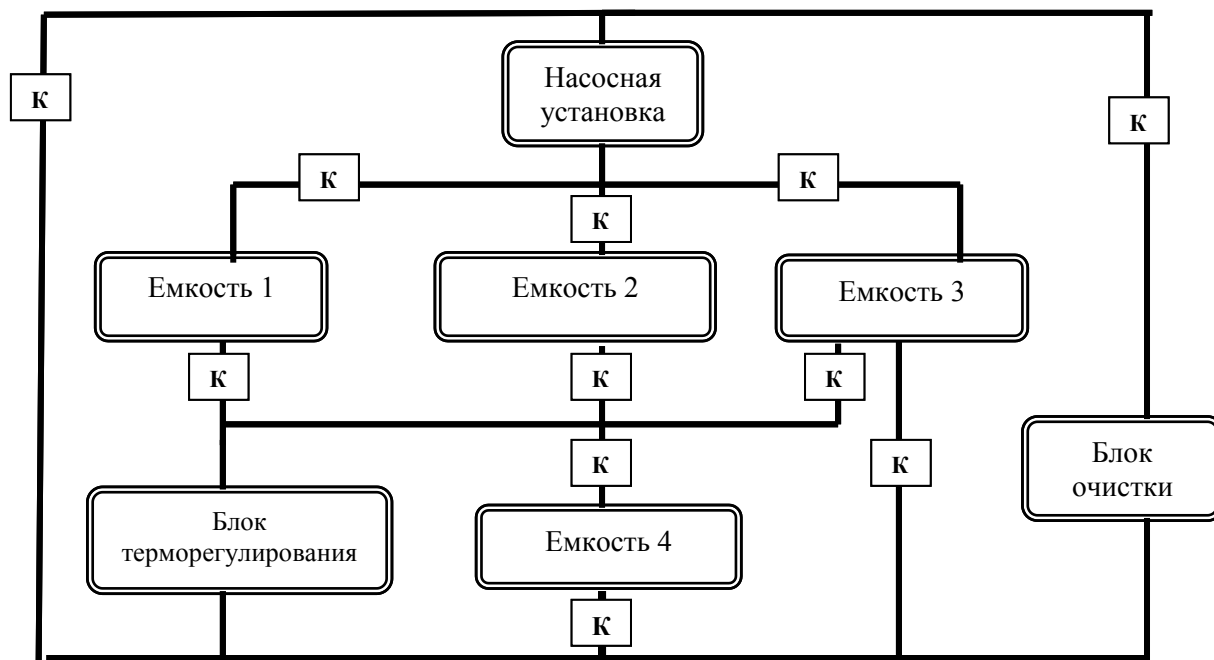


Рис. 11. Вариант синтезированной схемы: К – блок запорной арматуры

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андрейчиков А.В., Костерин В.В. Эвристический автоматизированный морфологический синтез сложных технических систем // Программные продукты и системы. - 1991. - № 1.
2. Берж К. Теория графов и ее применения. - М.: ИЛ, 1962.
3. Голиков И.О., Гранкин Б.К. Структурные методы проектирования технологического оборудования: учеб. пособие. - СПб.: ВИКИ, 1994.
4. Гранкин Б.К., Даров В.А., Ронжин О.В. Построение принципиальных схем с учетом требований ЕСКД // Стандарты и качество. - 1978. - № 5.
5. Гранкин Б.К., Козлов В.В., Лысенко И.В. Принципы декомпозиции в проектных исследованиях сложных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2008. - Вып. 6.
6. Гранкин Б.К., Макаров Ю.С., Ронжин О.В. О выборе мнемосхем энергетических комплексов // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт. - 1971. - № 4.
7. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. - М.: Наука, 1972.
8. Одрин В.М. Морфологический синтез систем: постановка задачи, классификация методов, морфологические методы "конструирования" // Препринт АН УССР. Ин-т кибернетики, 86-3. - Киев, 1986.
9. Перекрестов А.В. Построение релейных схем гидроавтоматики. - М., - Л.: Энергия, 1963.
10. Степанов М.И., Воробьев А.М., Гранкин Б.К. Комплексы заправки ракетносителей и космических аппаратов. - СПб.: ОМ-ПрессЮ, 2004.
11. Яблонский С.В. Основные понятия кибернетики // Проблемы кибернетики. - М., 1959. - Вып. 2.

#### SYNTHESIS METHOD OF THE FUNCTIONAL STRUCTURE HYDRAULIC SYSTEMS

Grankin B.K., Kozlov V.V.

The synthesis method of the functional structure hydraulic systems are deal with in the paper. The method is based on the representation of synthesis objects as a control system in relation to the working environment as an object management. Synthesis provides the procedures for formalizing the functional requirement in a matrix of numerical codes and their decomposition to the level of function elements. The method is addressed to specialists in computer-aided projecting of hydraulic systems for various applications, including systems of water supply, refueling, fire systems, etc.

**Keywords:** synthesis method, hydraulic systems.

### Сведения об авторах

**Гранкин Борис Константинович**, 1936 г.р., окончил ЛКВВИА им. А.Ф. Можайского (1960), доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационно-аналитических технологий в экономике СПИИРАН, автор более 150 научных работ, область научных интересов – системотехника технических комплексов.

**Козлов Владимир Владимирович**, 1953 г.р., окончил ЛКВВИА им. А.Ф. Можайского (1976), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории информационно-аналитических технологий в экономике СПИИРАН, автор 175 научных работ, область научных интересов – системотехника технических комплексов.