

УДК 681.32

О.Е. ФЕДОРОВИЧ, Л.Д. ГРЕКОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТНОГО ПОДХОДА**

Предложена методология синтеза архитектуры сложной системы управления с использованием компонентного подхода. Построены основные составляющие методологии, связанные со структурным анализом и моделированием компонентной архитектуры распределенной иерархической системы управления.

**компонентная архитектура системы управления, перечисление вариантов, многоуровневый состав компонент**

**Введение**

Сложность создания распределенных иерархических систем управления (ИСУ) привела к необходимости широкого внедрения и использования современной компонентной технологии проектирования аппаратно-программных средств компьютерных комплексов. Благодаря аккумуляции опыта разработчиков в виде созданных компонент повторного использования (КПИ) резко сократились сроки разработки и снизилась стоимость создания системы. Однако построить ИСУ только из одних компонент повторного использования практически невозможно. Появление новых задач управления сложным распределенным производством требует создания новых компонент, что удорожает стоимость системы и приводит к увеличению рисков, связанных с проектированием новых компонент. Анализ показал, что в реальной практике создания ИСУ присутствуют три типа компонент [1]:

- компоненты повторного использования (КПИ);
- модернизируемые КПИ;
- новые компоненты.

Поэтому актуальным является создание методологии структурного анализа и синтеза архитектуры ИСУ, построенной на компонентной технологии.

**Постановка проблемы**

В работе представлена методология структурного анализа и синтеза иерархических систем управления на основе дальнейшего развития методов и средств компонентного подхода.

Предлагаемая методология включает в себя две связанные части:

- 1) структурный анализ и синтез компонентной архитектуры ИСУ;
- 2) динамический анализ ИСУ.

Структурный анализ проводится для исследования и оценки многообразия вариантов компонентной архитектуры ИСУ. С помощью эффективного использования методов теории перечисления и разработанных методов формирования компонентной архитектуры ИСУ построены методики структурного анализа и порождения возможных вариантов ИСУ, учитывающие разнообразие типов компонент при формировании состава и структур, параллельные процессы функционирования, иерархичность и распределенность систем. Оценка и выбор рациональных вариантов архитектуры на этом этапе осуществляется с помощью структурной оптимизации на основе разработанных многокритериальных моделей. Использование структурного анализа наиболее целесообразно на предпроектном исследовании

при формировании целей и задач проектируемой ИСУ. Полученные варианты компонентной архитектуры ИСУ на первом этапе конкретизируются и оцениваются с помощью динамического анализа. Второй этап служит для подробной имитации функционирования будущей системы. Здесь на основе дальнейшего развития методов и средств имитационного моделирования разработана принципиальная новая концепция, которая связана с системным моделированием компонентной архитектуры ИСУ, созданием экспертных систем имитационного моделирования. С помощью виртуального макета компонентной архитектуры ИСУ рассчитывается ряд системных характеристик, соответствующих требованиям технического задания на проектируемую ИСУ. Использование динамического анализа на этапах предварительного и частично эскизного проектирования, формирования предложений по техническому заданию, а также на стадии эксплуатации в задачах реструктуризации и модернизации (реинжинеринга) позволяет автоматизировать перечисленные работы, сократить сроки разработки и получать рациональные решения по обоснованию и выбору компонентной архитектуры ИСУ.

### Решение проблемы

Разработка качественно нового подхода для системного анализа и моделирования компонентной архитектуры ИСУ требует постановки и решения следующих задач:

1. Анализ и классификация компонентных архитектур ИСУ.
2. Теоретико-множественное представление, исследование и перечисления вариантов ИСУ с учетом функциональных задач управления, структуры комплекса технических средств и типов компонент.
3. Создание многокритериальных оптимизационных моделей для выбора рациональной компонентной архитектуры ИСУ.
4. Разработка основ и инструментария модели-

рования компонентной архитектуры ИСУ, на основе знаниеориентированных моделей.

5. Моделирование компонентной архитектуры ИСУ с помощью разработанных имитационных моделей.

6. Проведение исследования и расчетов сложных проектируемых ИСУ.

Разнообразие процессов, протекающих в распределенных объектах управления, а также требования адаптивности, гибкости, возможности быстрой перестройки при переходе на новые задачи управления усложняют синтез компонентной архитектуры ИСУ.

Многоуровневый состав, сложная топология внутренних информационных связей в системе, параллелизм в управлении распределенными объектами, универсальность и специализация компонент ИСУ приводит к тому, что управление одним и тем же материальным потоком распределенного производства может осуществляться разнообразным сочетанием функциональных компонент, так что непосредственный анализ и сравнение всех вариантов компонентной архитектуры системы эвристически методами становится труднодоступным. Поэтому актуальны методы, позволяющие количественно оценить множество вариантов компонентной архитектуры ИСУ, формировать возможные структуры для детального анализа и оптимизации.

В работе дано теоретико-множественное представление ИСУ с учетом типов компонент и многослойности. Проведен комбинаторный анализ ИСУ с использованием основных положений теории перечисления [2]. Получены аналитические выражения, с помощью которых можно количественно оценить множество возможных архитектур ИСУ с ограничением на число типов и количество компонент для каждого структурного элемента ИСУ. Рассмотрены различные постановки задач количественного анализа: однородный состав ИСУ (использование универсальных компонент), разнородный состав, сме-

шанный случай (новые компоненты и КПИ).

Накопление опыта в проектировании ИСУ позволяет конкретизировать состав и структуру системы путем создания межуровневых связей между компонентами, что упрощает подсчет возможных вариантов и позволяет получить для частных случаев относительно простые расчетные формулы.

Характерной чертой современных ИСУ является многообразие возможных компоновочных решений. Проектирование таких систем в настоящее время в основном базируется на опыте и интуиции разработчика, его знании прикладной области.

Учитывая многообразие вариантов, построение компонентной архитектуры, сложность топологии внутренних связей между компонентами, различные режимы функционирования, необходимо автоматизировано формировать возможные варианты архитектуры ИСУ, что сводится к задачам комбинаторного анализа и теории перечисления.

Один из основных принципов, принятых при проектировании современных ИСУ – это многоуровневая компонентная архитектура. Компоненты присутствуют на различных уровнях детализации ИСУ, начиная от уровня подсистем (сложные компоненты) и заканчивая отдельными элементами (простые компоненты). Для оценки множества возможных вариантов компонентной архитектуры ИСУ выделим следующие этапы:

1) подсчет возможных вариантов компонентной архитектуры ИСУ;

2) формирование компоновочных решений для синтеза ИСУ.

Здесь следует отметить, что при небольшом числе вариантов путем полного перебора состава компонент и структуры комплекса можно определить лучший вариант архитектуры системы. Трудности возникают, когда число альтернативных вариантов достаточно велико так, что перебор невозможен и требуется использовать методы перечисления и оптимизации.

На первом этапе осуществляется переход от архитектурных свойств системы к теоретико-множественному представлению. Это множество компонент, функций управления и т.д. Одно множество отображается в другое, например, компоненты в подсистемы ИСУ.

На этом же этапе необходимо перейти к группам, которые являются отражением вводимой эквивалентности (одинаковости) вариантов и позволяют воспользоваться основными теоремами теории перечисления [2].

Далее осуществляется подсчет возможных классов эквивалентности (вариантов) с помощью теории Пойа и де Брейна [2].

Обозначим исходное множество компонент через  $D$ ,  $|D| = m$ , а множества подсистем ИСУ в которое происходит отображение, через  $R$ ,  $|R| = n$ .

Тогда перечень классов эквивалентности можно представить в виде:

$$\sum_F W(F) = Z(G; \sum_{r \in R} \omega(r), \sum_{r \in R} [\omega(r)]^2, \sum_{r \in R} [\omega(r)]^3, \dots),$$

где  $F$  – отдельный класс эквивалентности, индуцированный группой  $G$ , действующей на множестве  $D$ ;  $Z(G, \dots)$  – цикловой индекс группы  $G$ ;  $\omega(r)$  – «вес» компонента  $r \in R$ .

В частности, если веса выбраны равными 1, то можно определить число классов эквивалентности (вариантов структур ИСУ):

$$N = Z(G; |R|; |R|, |R|, \dots).$$

Общее число классов эквивалентности (эквивалентность индуцируется группами подстановок  $G$  и  $H$  множеств  $D$  и  $R$  соответственно):

$$K = [Z(G; \frac{\partial}{\partial Z_1}, \frac{\partial}{\partial Z_2}, \dots) \times Z(H; e^{Z_1+Z_2+\dots}, e^{2(Z_2+Z_4+\dots)}, \dots)]_{Z_1=Z_2=\dots=0}$$

или

$$K = |H|^{-1} \sum Z(G; \dots, \sum_{j/i} j C_j, \dots),$$

где  $\{C_1, C_2, \dots\}$  – тип элемента  $h \in H$ .

Последнее выражение можно использовать для практических расчетов вариантов компонентной архитектуры ИСУ.

Будем представлять компонентную архитектуру ИСУ в виде графа, где вершинами являются компоненты системы, а ребра – внутренние информационные связи.

Любой граф  $G$  можно представить в виде:

$$G = n_1 G_1 \cup \dots \cup n_r G_r,$$

где  $n_i$  – число компонент графа изоморфных  $G_i$ .

Тогда групповые свойства графа  $G$ :

$$\Gamma(G) \equiv S_{n_1}[\Gamma(G_1)] + S_{n_2}[\Gamma(G_2)] + \dots + S_{n_r}[\Gamma(G_r)],$$

где  $S_{n_i}[\Gamma(G_i)]$  – композиция групп  $S_{n_i}$  и  $\Gamma(G_i)$ ;  $n_i$  – количество одинаковых подграфов  $G_i$  в  $G$ .

Рассмотрим многоуровневую компонентную архитектуру ИСУ. Пусть задано число уровней компонентной архитектуры и выполняется условие  $r_1 \leq r_2 \leq \dots \leq r_Q$ , где  $r_i$  – максимально допустимое количество компонент  $i$ -го уровня детализации,  $i = \overline{1, Q}$ . Для начальных стадий проектирования обычно известен состав компонентов только самого нижнего  $Q$ -го уровня, из которых строится система. Обозначим этот факт через  $r_Q = n_Q$ , где  $n_Q = |B^Q|$ ,  $B^Q$  – множество исходных компонент  $Q$ -го уровня детализации ИСУ:

$$\sum_{\mu=1}^{l_Q} P_{\mu Q} = n_Q,$$

где  $P_{\mu Q}$  – число компонент  $\mu$ -го типа  $Q$ -го уровня.

Компоненты  $(Q-1)$ -го уровня образуются из компонент  $Q$ -го уровня путем отображения множества  $B^Q$  в  $R^{Q-1}$ , где  $R^{Q-1}$  – множество узлов системы для компонент  $Q-1$ -го уровня,  $r_{Q-1} = |R^{Q-1}|$ . Множество элементов компонентного состава  $(Q-1)$ -го уровня является множеством всех отображений  $B^Q$  в  $R^{Q-1}$ .

Осуществляя последовательные отображения множества компонент  $i$ -го уровня в множество компонент  $(i-1)$ -го уровня, получим множество компонентного состава для всех уровней детализации

ИСУ (рис. 1). Случай на рис. 2 соответствует наличию множества исходных компонент не только на нижнем  $Q$ -м уровне.

Поэтому необходимо учитывать наличие таких компонент:

$$r_i = r'_i + n_i$$

где  $n_i$  – число компонент  $i$ -го уровня;  $r'_i$  – число компонент  $i$ -го уровня, которые построены из компонент  $i+1, i+2, \dots$  уровней. Переменный состав  $i$ -го уровня определяется компонентом  $r'_i$ .

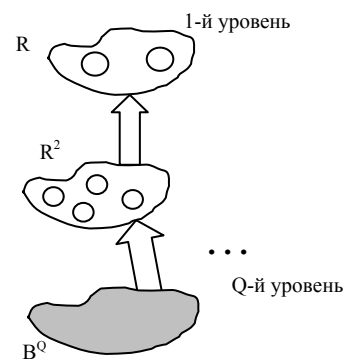


Рис. 1. Множество компонент на нижнем уровне детализации ИСУ

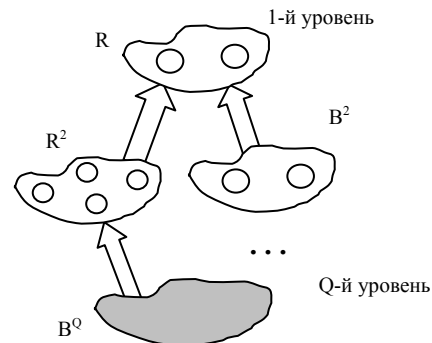


Рис. 2. Множества компонент на разных уровнях детализации ИСУ

Знание целевого назначения ИСУ и накопление опыта проектирования приводит к конкретизации компонентного состава в виде задания характеристик компонент на каждом уровне компонентной архитектуры.

Пусть проектировщику ИСУ известно, сколько компонент  $(i+1)$ -го уровня находится в каждом компоненте  $i$ -го уровня (рис. 3).

Многообразие возможных составов ИСУ определяется не только множеством отображений  $B^Q$  в  $R^Q$ , но и связями компонент  $R^Q$  с компонентами  $R^{Q-1}$ ,  $R^{Q-2}$  и т.д. Случай на рис. 4 соответствует наличию исходных компонент на различных уровнях детализации.

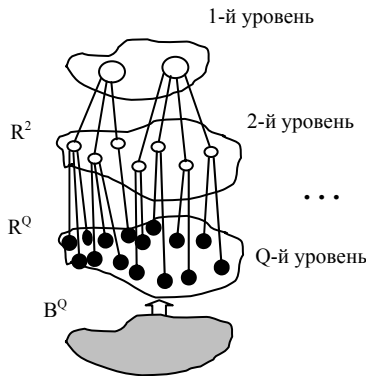


Рис. 3. Множество компонент  $(i+1)$ -го уровня детализации ИСУ

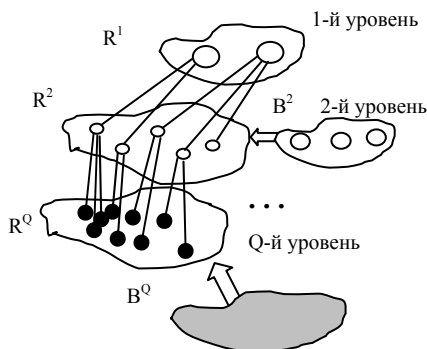


Рис. 4. Исходные компоненты на различных уровнях детализации ИСУ

Рассмотрим детализацию структуры ИСУ. Пусть известны конфигурации внутренних связей между отдельными компонентами на каждом уровне детализации ИСУ. Представим эти связи графом  $G^i, i = \overline{1, Q}$ , который является объединением подграфов:

$$G^i = \bigcup_{ji} G_{ji}^i,$$

где  $G_{ji}^i$  –  $j$ -й подграф  $i$ -го уровня.

Определим состав компонент на  $Q$ -м уровне. Необходимо построить всевозможные варианты компонентной структуры ИСУ.

Отобразим множество компонент  $B^Q$  в множество вершин графа  $G^Q$ , таким образом, чтобы в каждой вершине графа было по одному компоненту множества  $B^Q$ . Множество таких отображений определяет множество вариантов структуры ИСУ для  $Q$ -го уровня детализации структуры. В результате получим множество помеченных подграфов  $M_{B^Q}$  для каждого варианта отображений  $t_{B^Q} \in T^Q$ . Далее отобразим множество вершин графа  $G^{Q-1}$  в множество  $M_{B^Q}$  для всех  $t_{B^Q}$ . Последовательно осуществляя процесс отображений (рис. 5), по уровням получим все варианты компонентной структуры ИСУ.

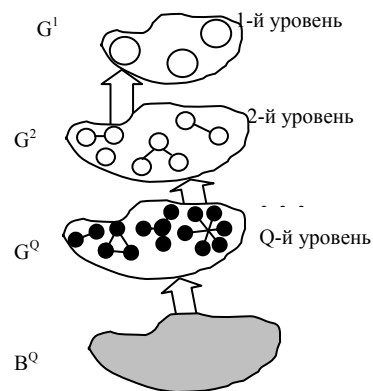


Рис.5. Процесс отображений по уровням детализации ИСУ

Случай (рис. 6) соответствует наличию множеств исходных компонент, из которых конструируется ИСУ, на нескольких уровнях детализации.

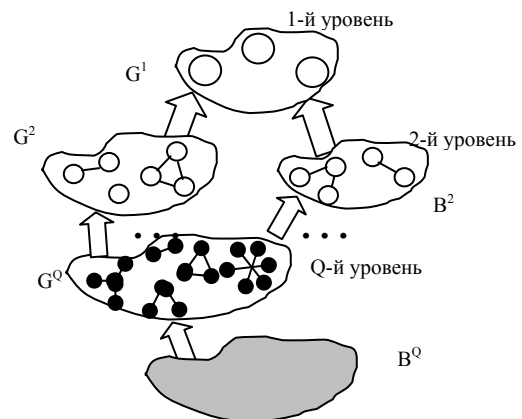


Рис. 6. Множество исходных компонент для проектирования ИСУ

Поэтому при отображениях необходимо учитывать множества помеченных подграфов  $M_{B^i}$  и множество исходных компонент  $B^i$ ,  $i = \overline{1, Q}$ .

Предположим, что в результате накопления опыта в проектировании ИСУ, компонентная архитектура конкретизируется путем задания межуровневых связей между отдельными компонентами на различных уровнях детализации (рис. 7). В этом случае многообразие структур ИСУ определяется множеством отображений  $B^Q$  в  $G^Q$ , с учетом связей подграфов  $G^Q$  с вершинами графов  $G^{Q-1}$ , подграфов графа  $G^{Q-1}$  с вершинами графа  $G^{Q-1}$  и т.д.

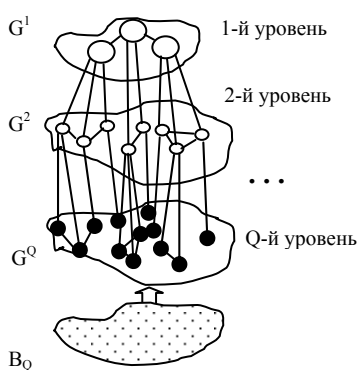


Рис. 7. Задания межуровневых связей между отдельными компонентами на различных уровнях детализации ИСУ

Случай, когда имеется множество исходных компонент  $B_i$  на различных уровнях детализации структуры, изображен на рис. 8.

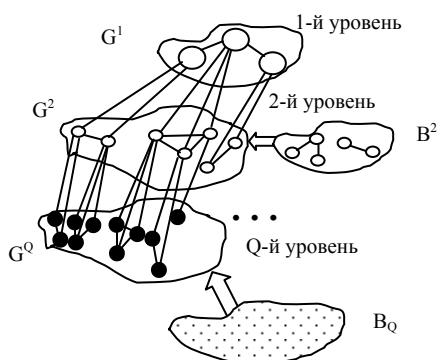


Рис. 8. Множество исходных компонент  $B_i$  на различных уровнях детализации структуры ИСУ

## Выводы

Предложенная компонентная методология синтеза ИСУ позволяет на ранних этапах проектирования сложных систем управления обосновать и выбрать рациональную архитектуру аппаратно-программного комплекса.

Для этого используется компонентный подход, который основан на выделении трех основных типов компонент иерархических систем управления:

- компонент повторного использования;
- модернизируемых компонент повторного использования;
- новых компонент.

Исходное множество компонент отображается в узлы проектируемой распределенной иерархической системы управления, что приводит к возникновению возможных вариантов компонентной архитектуры системы.

Разработаны методы анализа множества возможных архитектур системы и построена интерактивная процедура формирования многоуровневого компонентного состава иерархических систем управления.

## Литература

1. Федорович О.Е., Плохов С.С. Формирование компонент повторного использования в проектах создания сложной техники // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 1(13). – С. 124-128.
2. Н. Дж. де Брейн. Теория перечисления Пойа // *Прикладная комбинаторная математика*. Сб. статей. Пер с англ., под ред. Э. Беккенбаха. – М.: Мир, 1968. – С. 61-106.

Поступила в редакцию 17.05.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.Б. Сироджа, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.