

Академик НАН Украины,  
д-р техн. наук, проф. А.Ф. Булат  
(ИГТМ НАН Украины),  
канд. техн. наук О.В. Рублюк (ИФГНТУНГ),  
канд. техн. наук В.А. Иванов  
(ИГТМ НАН Украины)

## **КОНЦЕПЦИЯ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ, МАШИН И ИХ СИСТЕМ С КОМПЛЕКСНОЙ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКОЙ СИНТЕЗИРУЕМЫХ АЛЬТЕРНАТИВ**

Запропоновано метод структурного синтезу з оцінкою рейтингу привабливості застосування конструкцій, які синтезовані, і ранжуванням їх відповідно до величин рейтингів. Поряд з цим забезпечується оцінка їх новизни та отримання вербального опису, що використовується при патентуванні винаходів.

## **THE MACHINERY STRUCTURE SYNTHESIS CONCEPT WITH COMPLEX EVALUATION OF THE ALTERNATIVES**

There is proposed the method of structural synthesis with the preference evaluation in using the developed designs of new technical level and rank them according to the ratings. The method gives the novelty estimation of proposed designs with their description which is used in patent process.

Как известно [1], синтез механизмов – это мысленное соединение частей предмета, расчлененного в процессе анализа, установление взаимодействия и связи частей и познание этого процесса, как единого целого. Различают кинематический, динамический и структурный синтез механизмов. Получение принципиально новых прогрессивных конструктивных решений, обеспечивающих качественно новый уровень производительности, надежности, ресурса эксплуатации и т. п., может быть эффективно осуществлено лишь на базе методов структурного синтеза. Кинематический или динамический синтез может быть полезен лишь после выбора конкретного варианта конструкции механизма на этапе оптимизации его кинематических параметров, характеризующих распределение масс элементов.

В основе структурного синтеза лежит морфологический анализ функциональной системы, за которую в нашем случае будем принимать совокупность частей механизма, объединенных общей функцией. Сущность морфологического анализа состоит в том, что изучаемая система многократно расчленяется на подсистемы и элементы в соответствии с различными аспектами ее функционирования.

У истоков морфологического анализа стоит метод морфологического ящика, разработанный известным швейцарским астрономом Ф. Цвикки и с большим успехом реализованный им в 1942 году в проектах ракетостроительной фирмы «Аэроджет Инжиниринг Корпорейшн» (США) [2]. Сущность наиболее распространенной модификации морфологического ящика [3] заключается в предварительном формулировании требований к синтезируемому техническому объекту, затем в разделении этого объекта на структурные функциональные узлы и формулирование требований к этим узлам. После этого осуществляется для каждо-

го функционального узла перебор различных вариантов технической реализации и выполняется пересмотр всех возможных вариантов сочетаний функциональных узлов и выбор из них наилучшей альтернативы.

Положив в основу метод морфологического ящика, В.М. Одрин и С.С. Картаво [4] разработали методику построения морфологических таблиц, при реализации которых для синтеза новых технических решений потеря каких-либо важных свойств сводится к минимуму, а все множество признаков представлено в виде, удобном для поиска их комбинаций. Достаточно полный набор вариантов возможных решений, приведенный в стройную систему с учетом целей синтеза, позволяет не только существенно ускорить поиск нового решения, но и получить такие решения, которые при неупорядоченном исследовании возможных признаков синтезируемой системы вообще не были бы получены. При этом морфологическая таблица может быть записана в память компьютера с последующим полным или ограниченным перебором вариантов при случайном или детерминированном последовательном их рассмотрении.

Еще большие возможности могут быть реализованы при структурном синтезе на основе использования комбинаторных файлов в виде списковых структур, в которых учтены все возможные комбинанты признаков строения, известные на данный момент [1]

Структурный синтез представляет особый интерес, поскольку стимулирует эволюцию механизмов, машин и их систем не по параметрам, а по более высоким уровням – по конструкции и принципу действия. При этом можно сослаться на известный принцип перехода через предел [4], который постулирует закономерность реализации наиболее вероятных путей эволюции технических объектов в направлении приближения к глобальному экстремуму вначале по параметрам, затем по конструкции и, наконец, по принципу действия. Вследствие этого эволюция технических объектов с постоянной функцией, у которых технические решения уже приблизились к глобальному экстремуму, стабилизируется и прекращается, если не появляются новые физические эффекты, обеспечивающие создание конструкций с качественно новым улучшенным принципом действия.

Однако переход от простых к более сложным системам сопровождается настолько быстрым ростом количества возможных вариантов механизмов, машин и их систем, на которых мог бы остановить свое внимание конструктор, что даже вычисление этого количества становится самоцелью. Например, для таких систем, как насосы или квантовые генераторы, число вариантов доходит до  $10^{30}$ . А в таких семействах конструкций, как МГД-генераторы или ядерные реакторы, число возможных альтернатив превышает  $10^{100}$  [1]. Для сравнения в работе [5] количество атомов во всей видимой части Вселенной оценивается только в  $10^{73}$ .

Отсюда очевидна актуальность такой организации структурного синтеза, при которой, при полном переборе возможных альтернатив, каждой из них в автоматизированном режиме может быть поставлена рейтинговая оценка, в соответствии с которой осуществляется ранжирование полученного ряда и ограничение его обозримой совокупностью.

Согласно разработанному методу, на первом этапе по патентным материа-

лам и научно-технической литературе проводят укрупненное морфологическое исследование семейства конструкций механизмов, машин или их систем с целью выделения обобщенных агрегатов с подразделением последних на функциональные узлы.

Исходя из того, что функциональные узлы в любом механизме или машине могут иметь между собой только кинематические (подвижные) и конструктивные (неподвижные) связи, и обозначая их, как это принято [6], соответственно знаками «плюс» и «точка», в ряде случаев может быть осуществлен структурный синтез топологических типов механизмов, машин или их обобщенных агрегатов путем совмещения, сочленения и вырождения функциональных узлов с различными комбинациями связей между ними. При этом топологические типы формируются в виде буквенных выражений, в которых функциональные узлы, обозначенные буквами, связаны между собой знаками «плюс» или «точка». Указанный приём структурного синтеза, который рационален, прежде всего, при синтезе относительно простых механизмов и машин, обеспечивает получение в окрестности глобального экстремума набора альтернатив более совершенных не по параметрам, а по конструкции и принципу действия, то есть сразу затрагиваются более высокие уровни. Наряду с этим, представление механизмов или машин в виде упрощённых структурных выражений значительно облегчает выявление сходных конструкций и выбор наиболее приемлемых вариантов в качестве аналогов и прототипов при оформлении заявок на изобретение. На этапе синтеза указанных топологических типов механизмов и машин возможна их сравнительная рейтинговая оценка, методика которой приводится ниже.

На втором этапе на каждый функциональный узел разрабатывается комбинаторный файл путем последовательного и многократного применения идей Ф. Цвикки о морфологическом ящике [1], которые представляют в виде многоаспектных классификаторов конструктивных признаков семейства анализируемых конструкций, что, по сути, является комплексным портретом этого семейства конструкций с совпадающими идентичными и выделенными отличительными признаками.

В дополнение к этому, предлагаемый метод предусматривает введение в общий объем делимых при классификации понятий не только членов деления, отражающих по патентно-технической литературе уровень технических объектов в данной области техники, но и членов деления, отражающих передовой уровень решений в смежных областях техники, в том числе с использованием новых физических эффектов. Такие классификаторы, с одной стороны, аккумулируют накопленный инженерно-технический опыт, а с другой – являются базой для дальнейшего перспективного развития анализируемых конструкций с привлечением принципиально новых идей.

Многоаспектная классификация проводится по различным основаниям деления и с последовательной детализацией каждого агрегатного элемента. Полученные в результате классификаторы на каждый из множества агрегатных элементов представляют в виде отдельных древовидных графов, которые затем подвергают свертке в интегральный граф функционального узла, используемо-

го в качестве комбинаторного файла при синтезе узлов нового технического уровня. Такой приём структурного синтеза целесообразен только в тех случаях, когда предусматривается поузловое совершенствование изделия. Обычно древовидные графы на отдельные функциональные узлы целесообразно подвергнуть свёртке в интегральный граф всего механизма или машины. При этом уровни и вершины интегрального графа имеют индексацию требуемой значимости (в большинстве случаев достаточно двузначной индексации). Иногда в целях геометрического упорядочения структуры интегрального графа вводят фиктивные уровни, на которых размещают фиктивные вершины с той же индексацией. Принятая индексация уровней и вершин интегрального графа позволяет каждой синтезируемой конструкции функционального узла поставить в соответствие определенный шифр, что дает возможность проводить автоматизированный анализ соответствия вновь синтезируемых технических решений критерию «новизна» с противопоставлением комплексных и признаковых аналогов.

Сформированная таким образом база данных обладает еще и тем свойством, что она может непрерывно дополняться и расширяться, включая появляющиеся новые физические эффекты, предварительно трансформированные в необходимые технические структуры. В заключение формулируют ограничения и запреты на комбинантность различных структурных сочетаний.

Перед вводом интегрального графа в банк данных компьютера с помощью матрицы смежности его переводят в матричный эквивалент. При выводе же на печать матричный эквивалент для наглядности вновь преобразуют в древовидный граф.

Параллельно с созданием многоаспектного классификатора и представления его в виде интегрального древовидного графа на основе обобщения научно-технической и патентной литературы, а также производственного опыта эксплуатации конструкций, альтернативным синтезируемым конструкциям, формируют перечень исходных требований к последним с последующей оценкой их удельного веса влияния на потребительские качества. Для этих целей используют разработанный авторами и отлично зарекомендовавший себя матричный метод парных сравнений [7] с индексированными оценками (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0). Это особенно важно, т.к. согласно классической работе Г. Миллера [8] большинство экспертов не способно различать более 7 градаций, что ставит под сомнение обоснованность использования таких популярных шкал, как 10-ти балльная, а тем более 100-балльная.

Расчет удельного веса влияния исходных требований (критериев сравнения) на потребительские качества конструкции (функцию полезности) осуществляют путем суммирования сравнительных индексированных оценок в матрице парных сравнений построчно, а полученные значения выражают в процентах от общей суммы оценок. Наряду с расчетом сумм индексированных оценок (с пересчетом их в процентах), осуществляют оценку исходных требований и в рангах (также с соответствующим пересчетом их в процентах) с последующим определением средних значений оценок. Привлечение для оценки исходных требований наряду с индексированными оценками еще и оценок в рангах продик-

товано тем, что при индексированной оценке наименее весомый критерий может получить оценку «0», что не может отвечать реальным условиям. В то же время при оценке в рангах такого положения не может быть в принципе [7]. К тому же, как показали исследования [5], оперирование значениями средних оценок обеспечивает необходимую точность экспертной оценки.

Следует подчеркнуть, что, строго говоря, все исходные требования (критерии сравнения) должны удовлетворять довольно жесткому ограничивающему допущению, а именно, они попарно должны быть независимы по предпочтению. При этом из-за условий неопределенности невозможно воспользоваться менее ограничивающим допущением, например, о квазисепарабельности критериев сравнения, открывающем возможность реализации более надёжных в практике априорной статистики методов, например, метода сравнения многомерных исходов с привлечением квазисепарабельных функций полезности в соответствии с известной аксиомой фон Неймана и Моргенштерна о рациональном поведении [10]. Остается исходить из более жесткого допущения об аддитивности критериев.

Аддитивная функция полезности является частным случаем квазисепарабельной функции, и поэтому некоторая потеря в точности получаемых оценок, связанная с допущением об аддитивности функции полезности, компенсируется существенным упрощением самой процедуры экспертной оценки и математической обработки полученных результатов. В общем случае величину рейтинга в соответствии с теорией аддитивной полезности рассчитывают по выражению

$$R(W_1, W_2, \dots, W_n) = \sum_1^n R_i \cdot W_i, \quad (1)$$

где  $R$  – интегральный рейтинг синтезируемой конструкции,  $W$  – множество удельных весов ( $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ ) влияния исходных требований на потребительские качества синтезируемой конструкции,  $W_i \in W$  для каждого  $i$ ,  $n$  – количество исходных требований,  $R_i$  – рейтинг синтезируемой конструкции в обеспечении  $i$ -го исходного требования,  $i = 1, 2, 3, \dots$ .

При этом должно выполняться требование аддитивности, т.е. значение рейтинга любого исходного требования может быть подсчитано, когда значения рейтингов по всем другим исходным требованиям зафиксированы.

После завершения разработки многоаспектного классификатора непосредственно перед представлением его в виде интегрального графа на каждом уровне классификации осуществляют сравнительную рейтинговую оценку влияния каждого из расклассифицированных в соответствии с используемым основанием деления элементов конструкции на потребительские качества изделия в целом. При этом вначале для каждого уровня классификации, на основе матричного метода парных сравнений с использованием индексированных оценок [7], заполняют матрицы логического ранжирования, пример заполнения которых показан в табл. 1.

Таблица 1 – Матрица логического ранжирования элементов классификации ( $\mathcal{E}_i$ ) в обеспечении  $j$ -того исходного требования

| Обозначение элементов, $\mathcal{E}_i$ | $\mathcal{E}_1$ | $\mathcal{E}_2$ | $\mathcal{E}_3$ | $\mathcal{E}_4$ | Итого баллов, $B_j$ |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| $\mathcal{E}_1$                        |                 | 0               | 0,25            | 0               | 0,25                |
| $\mathcal{E}_2$                        | 1,0             |                 | 0,75            | 0,25            | 2,0                 |
| $\mathcal{E}_3$                        | 0,75            | 0,25            |                 | 0               | 1,0                 |
| $\mathcal{E}_4$                        | 1,0             | 0,75            | 1,0             |                 | 2,75                |

На основании матриц логического ранжирования, заполняемых для каждого уровня классификации, осуществляют комплексную оценку рейтинга элементов  $\mathcal{E}_i$  с учётом их влияния на все исходные требования по выражению

$$R_i = \sum_1^n B_j \cdot X_j, \quad (2)$$

где  $R_i$  – комплексный (суммарный) рейтинг (скалярная числовая величина) элемента  $\mathcal{E}_i$  в обеспечении всех исходных требований;  $B_j$  – рейтинг элемента ( $\mathcal{E}_i$ ) по табл. 1 (и подобным ей) в обеспечении  $j$ -того исходного требования;  $X_j$  – удельный вес влияния  $j$ -того исходного требования на потребительские качества синтезируемой конструкции;

В результате в каждой вершине интегрального графа указывается рейтинг удельного веса влияния элемента  $\mathcal{E}_i$  на потребительские качества конструкции в виде скалярного числового значения. В процессе синтеза при последовательном перемещении через вершины интегрального графа от корневой вершины к висячим осуществляют суммирование значений рейтингов, указанных в вершинах графа. При этом каждому синтезированному варианту в соответствие ставится определенная величина рейтинга, характеризующая предпочтительность варианта с точки зрения степени соответствия его исходным требованиям. Чем больше числовое значение рейтинга, тем более предпочтителен вариант конструкции.

Синтезированный таким образом ряд конструкций представляет собой множество высокого порядка, непосредственное оперирование которым практически невозможно. В этой связи решается задача автоматизированного ранжирования синтезированного ряда конструкций в соответствии с величинами их рейтингов с одновременным ограничением длины ряда предварительно заданными пределами.

Положенный в основу разработанного метода морфологический принцип поиска новых технических решений в отличие от широко используемого в настоящее время трансформационного принципа значительно увеличивает вероятность достижения положительного результата. Наиболее предпочтительные варианты синтезированных конструкций в рамках информативности интегрального многоаспектного классификатора в дополнение к рейтингам получают в распечатанном виде и сжатое вербальное описание, используемое при оформ-

лении патентов на изобретения.

### **Выводы.**

Основные преимущества разработанного метода перед отечественными и зарубежными аналогами заключаются в следующем. Метод впервые позволяет реализовать замену эвристического процесса создания новых технических решений на уровне изобретения на алгоритмический сравнительный анализ синтезированных альтернатив. Такая возможность обуславливается разработанным способом оценки совершенства изделий величиной рейтинга на основе обобщения и учета множества разнохарактерных количественных и качественных критериев. Объективность получаемой таким образом оценки была многократно проверена традиционными экспертными методами на целом ряде технических объектов [9]. Рейтинг не является раз и навсегда установленной, статичной величиной; он меняется в зависимости от конъюнктуры рынка, поэтому периодически исходные требования и их весомость корректируют, что ведёт к изменению ранжирования альтернатив.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Капустян В.М., Махотенко Ю.А. Конструктору о конструировании атомной техники (системно-морфологический подход в конструировании). – М.: Атомиздат, 1981. – 190 с.
2. Zwicky F. Morphology and nomenclature of jets engines. – Aeron. End. Rev. June, 1947, P. 16.
3. Антонов В.А., Половинкин А.И. Некоторые закономерности развития технических объектов (Автоматизация конструирования): Межвузовский сб., Горьковский гос. ун-т) – Горький 1978. – С. 3-8.
4. Одрин В.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем.- Киев: Наукова думка, 1974.-114 с.
5. Эшби У.Р. Несколько замечаний.-В сб.: Общая теория систем. Пер. с англ. М.: Мир,1966, с.171-178.
6. Горбунов В.Ф.,Эллер А.Ф. Структурные схемы проходки выработок и средств механизации. Изв. вузов, Горный журнал, №12, 1978, С. 19-21.
7. Булат А.Ф., Рублюк О.В., Иванов В.А., Печенкин В.И. Многокритериальная экспертная оценка альтернативных вариантов технических решений // Уголь Украины. – 1998. – № 2, С. 3-4.
8. Г. Миллер. Магическое число семь плюс минус два. Инженерная психология. – М.: Прогресс, 1964. – 165 с.
9. Обоснование алгоритма многокритериальной экспертной оценки качества альтернатив./Иванов В.А., Рублюк О.В. // Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. тр./ Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Днепропетровск, 1998. – вып. 5. – с. 132-137.
10. Озерный В.М. Принятие решений. – Автоматика и телемеханика, 1971, № 11, С. 22-29.