

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМ СИНТЕЗОМ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Раков Д.Л.¹, Барденхаген А.², Печейкина М.А.³, Тодоров В.Т.²

¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;*

²*Берлинский технический университет, Берлин, Германия;*

³*Московский энергетический институт, Москва, Россия*

Ключевые слова: концептуальное проектирование, морфологический анализ, структурный синтез, параметрическая оптимизация, системный анализ.

Аннотация. В статье рассмотрены две составляющие концептуального проектирования, а именно структурный синтез и параметрическая оптимизация технических решений. Структурный синтез отвечает за выбор рациональной конфигурации системы, а моделирование и параметрическая оптимизация позволяет уточнить параметры выбранной структуры для достижения наилучших показателей работы. Для решения задач синтеза рассматривается улучшенный морфологический подход. Предложенный метод является мощным инструментом для генерации новых технических решений и анализа сложных систем.

RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL SYNTHESIS AND PARAMETRIC OPTIMIZATION BY THE DESIGN OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS

Rakov D.L.¹, Bardenhagen A.², Pecheykina M.A.³, Todorov V.T.²

¹*Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow, Russia;*

²*Technische Universität Berlin, Berlin, Germany;*

³*Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia*

Keywords: conceptual design, advanced morphological analysis, structural synthesis, parametric optimization, system analysis.

Abstract. The paper considers two components of conceptual design, namely structural synthesis and parametric optimization of engineering solutions. Structural synthesis is responsible for selecting a rational system configuration, while modeling and parametric optimization allows to refine the parameters of the selected structure to achieve the best performance. An advanced morphological approach is considered to solve the structure synthesis problems. The proposed method is a powerful tool for generating new engineering solutions and analyzing complex systems.

Концептуальный дизайн играет ключевую роль в проектировании сложных технических систем (ТС), так как именно на этом этапе закладываются основы будущей разработки. Он позволяет определить наиболее рациональные технические решения ТР, учесть функциональные и экономические ограничения, а также минимизировать риски, связанные с ошибками проектирования. На этом этапе разрабатываются базовые схемы взаимодействия компонентов ТС, что упрощает последующие этапы проектирования и снижает вероятность внесения изменений на поздних стадиях. Кроме того, этот этап способствует оптимизации затрат и ресурсов,

так как позволяет на ранней стадии выявить потенциальные недостатки и устранить их с минимальными затратами. Таким образом, концептуальный дизайн является неотъемлемым элементом успешного проектирования ТС, обеспечивая их эффективность, надёжность и соответствие требованиям конечного пользователя. На данном этапе принимаются решения, определяющие дальнейший процесс проектирования и производства.

В работе [1] рассматриваются три уровня оптимизации генерации новых ТС (Рисунок 1). Под первым уровнем понимается выбор руководящей технической идеи или принципа действия. Второй уровень оптимизации заключается в поиске рациональной структуры и третий уровень – определение наилучших значений параметров для выбранной структуры. При структурном синтезе технико-экономические показатели улучшаются в среднем на 30-35%, а в отдельных случаях в несколько раз, а на третьем в среднем на 10-15%.

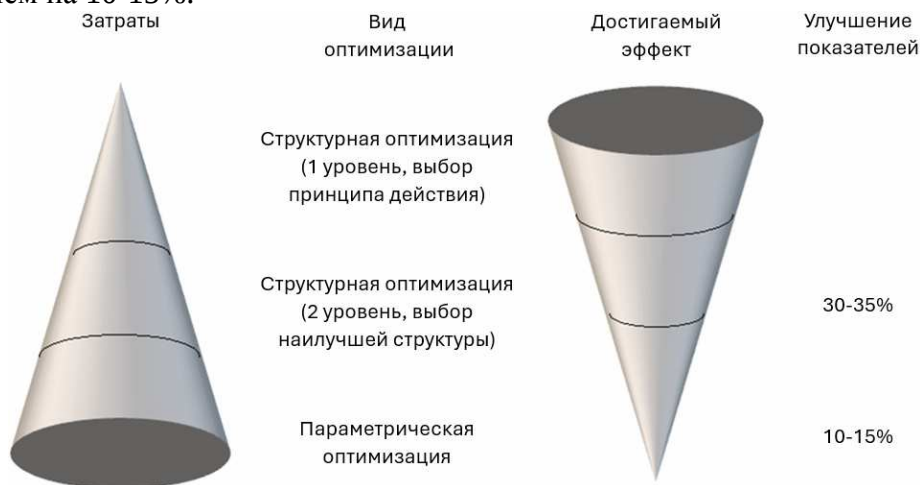


Рис. 1. Трехуровневая схема оптимизации технических систем

В современном мире инженерия постоянно сталкивается с необходимостью поиска инновационных ТР для сложных технических задач на этапе концептуального дизайна. В условиях сложных инженерных, технических и управленческих задач возникает необходимость в систематическом подходе к анализу возможных решений. Одним из эффективных инструментов, позволяющих проводить такой анализ и генерировать новые решения, является морфологический анализ (МА). Этот метод широко применяется в проектировании технических систем, научных исследованиях и стратегическом планировании. МА позволяет структурировать проблему, выявить все возможные варианты решений и выбрать наиболее оптимальные. МА – это метод систематического исследования структуры проблемы путем разложения ее на составляющие элементы и комбинирования различных решений для каждого из них. МА предложен швейцарским астрофизиком Фрицем Цвикки в середине XX века и с тех пор активно используется в инженерии, дизайне и других сферах [2].

МА представляет собой универсальный инструмент, применимый в самых разных сферах деятельности – от науки и техники до бизнеса и безопасности. Его способность систематизировать знания и находить нестандартные решения делает его актуальным в условиях стремительного технологического прогресса. Метод основан на декомпозиции сложной ТС на ряд атрибутов и опций и систематическом изучении возможных их комбинаций.

Применение МА начинается с определения ключевых параметров задачи, которые могут влиять на конечное ТР. Затем для каждого параметра формируется множество возможных вариантов ТР, после чего создается морфологическая матрица. Комбинируя различные элементы матрицы, можно получить разнообразные концепции решения задачи. Морфологический анализ обладает рядом достоинств:

- систематизированный подход к решению задач;
- генерация большого количества возможных ТР;
- возможность применения в различных отраслях инженерии и науки.

Однако у метода МА есть и ограничения:

- требует значительных временных затрат на построение морфологической матрицы;
- не гарантирует однозначного оптимального решения, а лишь предлагает множество вариантов ТР;
- эффективность зависит от квалификации специалистов, проводящих анализ.

Для устранения вышеуказанных недостатков был разработан метод усовершенствованного МА, позволяющим построить морфологическое пространство ТР, в котором ТР $X_{m1}, \dots, X_{mn}$ «дрейфуют» в зависимости от изменения временных параметров (рис. 2). Предложенный метод основан на теории множеств, кластерном анализе и комбинаторном подходе [3, 4].

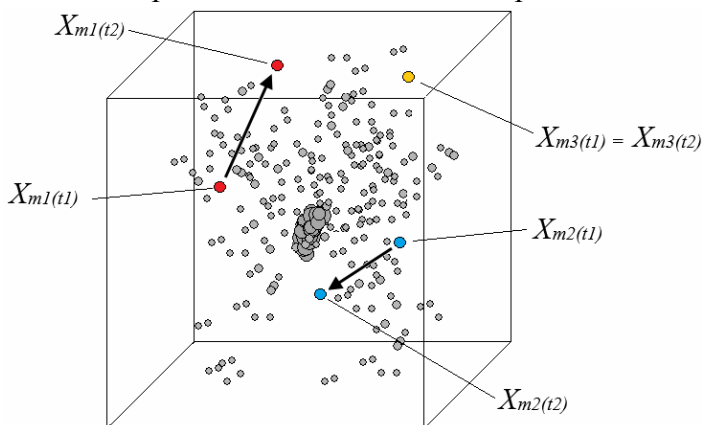


Рис. 2. Морфологическое пространство ТР (экранная форма)

Структурный синтез и параметрическая оптимизация играют ключевые роли в проектировании сложных ТС. Параметрическая оптимизация не может быть эффективной без предварительного структурного синтеза, так как нерационально подобранная структура не даст возможности достигнуть

оптимальных ТР. С другой стороны, хорошо спроектированная структура может быть улучшена параметрической оптимизацией для достижения лучшей производительности.

Использование усовершенствованного МА на стадии структурного синтеза позволяет оптимизировать ключевые параметры разрабатываемой ТС, что приводит к значительному улучшению её технико-экономических характеристик. В отличие от использования только параметрической оптимизации, усовершенствованный МА учитывает не только отдельные параметры, но и их взаимосвязь в рамках всей структуры системы, что обеспечивает более глубокий и всесторонний анализ.

В целом это позволяет сократить издержки на разработку и производство, а также повысить надежность и эффективность работы ТС. Данный подход может быть успешно использован в различных прикладных областях, от машиностроения до разработки сложных информационных систем, что делает его универсальным инструментом дизайна. Для стадии структурного синтеза целесообразно использовать усовершенствованный МА, позволяющий значительно улучшить технико-экономические показатели разрабатываемой ТС по сравнению с параметрической оптимизацией.

Дальнейшее совершенствование методов структурного синтеза на основе МА, включая интеграцию с искусственным интеллектом и алгоритмами машинного обучения, может привести к еще более значительным улучшениям в процессе разработки сложных технических систем. Дальнейшее развитие метода, в том числе интеграция с цифровыми технологиями, открывает новые возможности для его использования.

Список литературы / References

1. Половинкин А.И. Алгоритмы оптимизации проектных решений. – М.: Энергия, 1976. – 264 с.
1. Polovinkin A.I. Algorithms for optimization of design decisions. – M.: Energy, 1976. – 264 p.
2. Zwicky F. Discovery, Invention Research – Through the Morphological Approach. – Toronto: The Macmillan Company, 1969. – 276 p.
3. Rakov D., Timoshina A. Structure synthesis of prospective technical systems // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2010, vol. 25, iss. 2, pp. 4-10.
4. Todorov V.T., Rakov D., Bardenhagen A. Structured Expert Judgment Elicitation in Conceptual Aircraft Design // Aerospace. 2023, no. 10, pp. 1-27.

Раков Дмитрий Леонидович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Rakov Dmitry Leonidovich – candidate of technical sciences, senior researcher
Барденхаген Андреас – доктор, профессор института аэронавтики и астронавтики	Bardenhagen Andreas – doctor, professor of institute of aeronautics and astronautics
Печейкина Марина Анатольевна – старший преподаватель	Pecheykina Marina Anatolievna – senior lecturer
Тодоров Владислав Тихомиров – докторант	Todorov Vladislav Tihomirov – doctoral student
rdl@mail.ru	

Received 20.02.2025