

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

Ю.В. Дудукалов, доцент, к.т.н., Н.Э. Тернюк, профессор, д.т.н.,
Н.Н. Гладкая, аспирант, ХНАДУ

Аннотация. Рассмотрены методы оптимизации технологических систем. Выявлены структурные отличия между эвристическими, эволюционными, комбинаторными и регулярными методами формирования возможных вариантов решений. Показана возможность выполнения полной комплексной оптимизации сложных систем на основе учета границ познанных социально-гуманитарными и естественными научными дисциплинами.

Ключевые слова: методы оптимизации, жизненный цикл, технологическая система, классификация методов.

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Ю.В. Дудукалов, доцент, к.т.н., М.Е. Тернюк, профессор, д.т.н.,
Н.М. Гладка, аспірант, ХНАДУ

Анотація. Розглянуто методи оптимізації транспортних систем. Виявлено структурні відмінності між евристичними, еволюційними, комбінаторними та регулярними методами формування можливих варіантів рішень. Показано можливість виконання повної комплексної оптимізації складних систем на основі врахування меж пізнаного соціально-гуманітарними і природничими науковими дисциплінами.

Ключові слова: методи оптимізації, життєвий цикл, технологічна система, класифікація методів.

METHODS OF OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF VEHICLES MAINTENANCE AND REPAIR

Y. Dudukalov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, N. Ternyuk,
Professor, Doctor of Technical Science, N. Hladka, postgraduate, KhNAHU

Abstract. The methods of technological systems optimization are considered. The structural differences between the heuristic, evolutionary, combinatorial and regular methods of possible solutions formation are revealed. The possibility of implementation of full complex optimization of sophisticated systems on the basis of account of acquired knowledge within the limits of socio-humanitarian and natural sciences disciplines is shown.

Key words: optimization methods, life cycle, process system, classification methods.

Введение

Технологические системы (ТС) технического обслуживания и ремонта (ТС ТО и Р) являются основой организации и функционирования производительных сил в ремонтном производстве. Поэтому обеспечение высшей эффективности и качества работы таких систем

остается важной функцией их создателей и специалистов по эксплуатации.

Выполнение этой функции на этапе проектирования ТС обеспечивается путем постановки и решения общих или локальных задач оптимизационного синтеза технических средств, а на этапе эксплуатации – выработ-

кой и реализацией наиболее эффективных алгоритмов поведения. Указанное предполагает применение методов структурно-параметрической оптимизации для ТС.

Анализ публикаций

Получение оптимальных организационных и технических решений для сложных систем базируется на теории этих объектов. Для ТС и их элементов имеется большое количество публикаций, излагающих разнообразные вопросы теории [1–3].

В научной постановке общая схема получения оптимальных в некотором смысле решений выработана в [4], исходя из общей теории систем [5, 6]. Существуют также методы синтеза конструкций [7], решения задач оптимального проектирования применительно к элементам и ТС машиностроительного назначения [8]. Вместе с тем, до настоящего времени не разработаны общие вопросы методологии комплексной оптимизации ТС, позволяющие получать предельно эффективные решения на рубеже последних достижений социально-гуманитарных и естественных наук, не определены структурные отличия методов оптимизации и не проведена классификация этих методов, не установлены рациональные области их применения.

Цель и постановка задачи

Цель данной статьи – разработка методов комплексной оптимизации ТС. Для этого необходимо решить следующие задачи: определить схему получения предельно эффективных решений, установить структурные

представления ТС, влияющие на результаты оптимизации, разработать методику комплексной оптимизации и рекомендации по её применению.

Общая схема получения предельно эффективных решений

В основу методов комплексной оптимизации можно положить общую схему получения предельно эффективных решений, приведенную в [6], которая применительно к рассматриваемой проблеме может выглядеть, как показано на рис.1, при наличии информации о презентативном представлении атрибутов системы.

Согласно схеме, приведенной на рис. 1, решение задачи синтеза предельно эффективной системы может осуществляться с помощью процедуры поэтапного системно-алгоритмического поиска решений. Сначала проводится поиск и реализация путей обеспечения комплексно-оптимальных решений, включая определение основ оценки, создание методик синтеза, осуществление поиска и осмысление возможностей. Далее проводится выбор общих и частных критериев оптимальности, а также синтез полной (всей) области возможных решений по структуре и параметрам. Из этой области путём сравнения значений критериев оптимальности для различных решений определяется искомое оптимальное решение.

Структурная схема презентативного представления атрибутов системы приведена на рис. 2. Отражена связанность главных внутренних атрибутов системы и может быть вы-

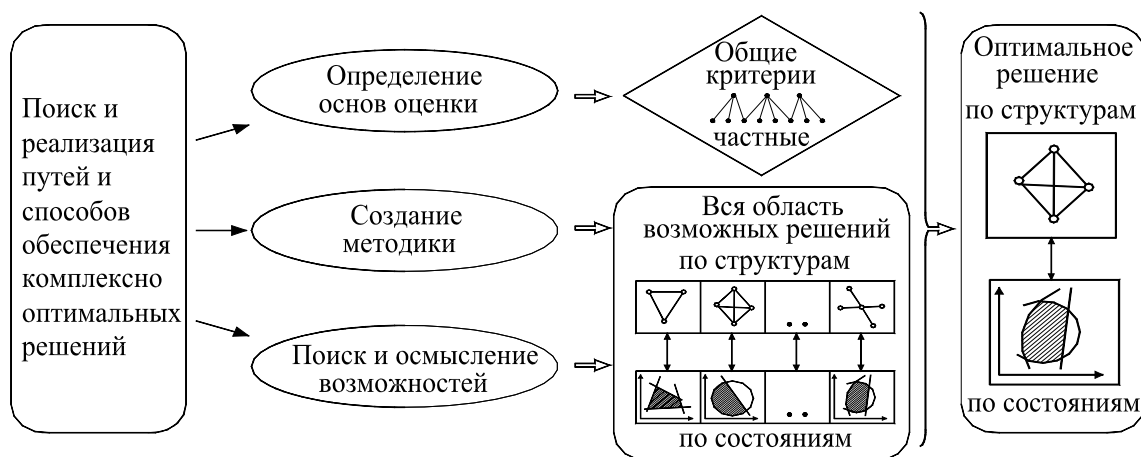


Рис. 1. Общая схема получения предельно эффективных решений

делено ядро, заштрихованные проекции которого показаны на гранях куба. Ядро соответствует иерархическому уровню собственно системы и её основным функциям в настоящем времени, определяет вид системы и задаёт тем самым её основной отличительный признак.

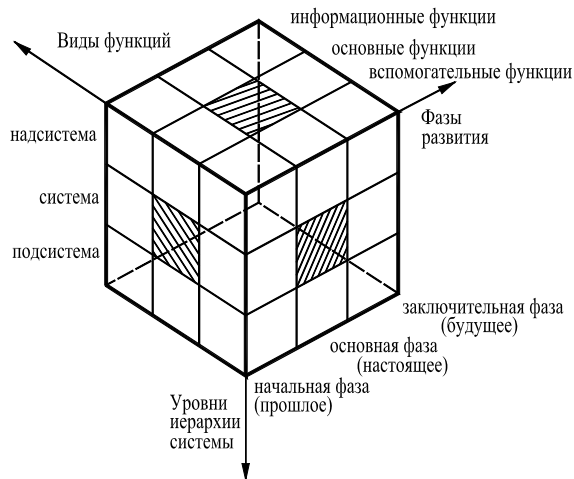


Рис. 2. Структурная схема презентативного представления атрибутов ТС

Такое представление структуры главных атрибутов системы применимо для решения различных задач, связанных с анализом, синтезом и оптимизацией систем.

Следовательно, можно установить, что:

- система позиционируется своим ядром в общей иерархии техносферы;
- атрибуты системы связываются со временем (циклами функционирования и развития), с иерархией по отношению к объектам техносферы и с функциональностью.

Полнота области возможных решений по иерархии структурных элементов

Принципиальными вопросами при выполнении оптимизации являются мера полноты области возможных решений и способ её определения. Очевидно, что значения критериев оптимальности могут существенно зависеть от этих факторов. Для определения области возможных решений рассмотрим влияющие на неё структурные элементы.

На рис. 3 приведена иерархическая схема учёта структурных элементов оптимизации, соответствующая процедуре направленного синтеза сложных систем [9] с учетом наличия существенно влияющего на эффектив-

ность работы системы этапа функционирования ТС ТО и Р, на котором реализуется определенный, подлежащий оптимизации алгоритм действия.

Исходя из рис. 3, можно представить такую совокупность методов оптимизации по структурным элементам объекта:

- 1) по сфере применения;
- 2) по предназначенности;
- 3) по функциям системы;
- 4) по кластерам применяемых физических и химических эффектов;
- 5) по структурам технологий;
- 6) по уровням технизации функций;
- 7) по структурам элементов системы;
- 8) по нерегулируемым параметрам системы;
- 9) по алгоритмам поведения;
- 10) по видам операционных модулей.

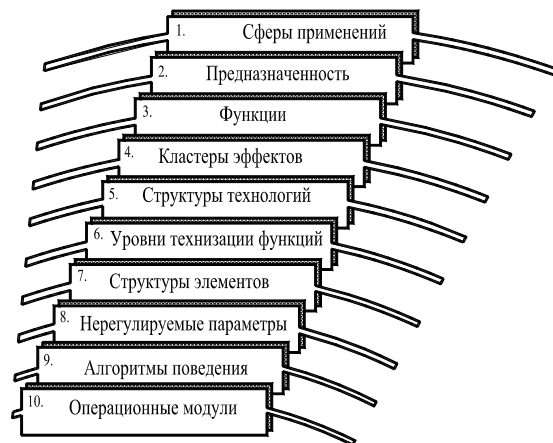


Рис. 3. Иерархическая схема структурных элементов оптимизации

Если в действительности не все указанные методы оптимизации могут быть использованы для объекта, то полнота охвата областей возможных решений снижается. Для оценки степени полноты охвата области возможных решений следует ввести группу коэффициентов $K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_m$, число которых определяется количеством рассматриваемых структурных элементов m . Индексы i обозначают принадлежность коэффициентов (рис. 3) соответственно к: K_1 – сфере применения, K_2 – предназначенности, K_3 – функциям, K_4 – кластерам физических и химических эффектов, K_5 – структурам технологий, K_6 – уровням технизации функций, K_7 – структурам элементов системы, K_8 – нерегулируемым параметрам системы, K_9 – алгоритмам поведения, K_{10} – операционным модулям.

Общий коэффициент $K_{об}$ устанавливает степень полноты охвата области возможных решений, которая соответствует пределу познания и учтенного при оптимизации. Значение коэффициента $K_{об}$ рассчитывается как сумма указанных коэффициентов, относящихся к отдельным атрибутам. Суммарная величина $K_{об}$ может находиться в пределах от 0 до 1. Таким образом, при расчете по одному измерению

$$K_{об1} = \sum_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

где K_i – коэффициент учета i -го атрибута при значениях $i = \overline{1, m}$.

Соответственно доле значения K_i определяются:

$$K_i = \begin{cases} \frac{1}{m}, & \text{если область атрибута учтена,} \\ 0, & \text{если область атрибута не учтена.} \end{cases} \quad (2)$$

Значения $K_{об}$ могут дифференцироваться по степени учета в областях возможных значений атрибутов различных структурных составляющих, отражающих время, качество и другие факторы.

Структура жизненного цикла ТС

Период времени, на протяжении которого оптимизируется система, может изменяться в различных пределах и включать в себя различные этапы существования системы. Для его учёта нужна специальная методика. Можно использовать подход, основанный на представлении триадных фрагментов структур, достаточно адекватно отражающих объекты с учетом фаз развития систем, их иерархического строения и условий осуществимости вещественно-энергетически-информационных преобразований. Он также учитывает, что преобразование идей в реальных системах проходит три разнородных взаимосвязанных пространства: мыслительное, знаковое (семиотическое), физическое [10] и осуществляется циклически.

Цикл определяется как совокупность явлений и процессов, создающих кругооборот на протяжении заданного промежутка времени. Это совокупность процессов в системе явлений. Главная особенность цикла – периоди-

ческая повторяемость. Определяющей характеристикой цикла является его продолжительность – промежуток времени от начала до окончания цикла.

Для ТС ТО и Р, реализующих комплексные технологии, основными являются два вида циклов. Первый связан с развитием системы – цикл развития, второй с её функционированием – цикл функционирования. Оба вида циклов имеют иерархические структуры.

Общая модель структуры циклов развития ТС изображена на рис. 4. Самым продолжительным является полихронный цикл, в котором появляются, развиваются, функционируют и ликвидируются совокупности ТС определенных видов.

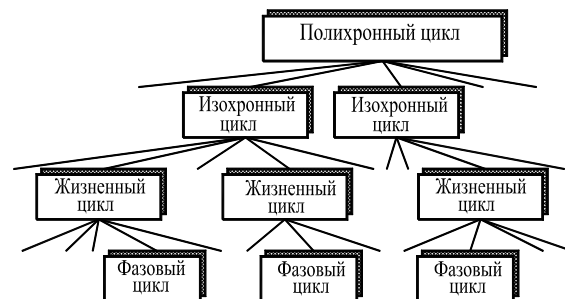


Рис. 4. Общая модель структуры циклов развития ТС

Составляющими полихронного цикла являются изохронные циклы, на протяжении которых реализуют свое предназначение отдельные виды ТС. В пределах каждого изохронного цикла выделяются жизненные циклы (ЖЦ) конкретных образцов ТС, их искусственных образований – технических средств ТО и Р. Типовой жизненный цикл ТС начинается с момента выдачи задания на её проектирование и заканчивается утилизацией.

Все три указанных цикла имеют триадную структуру, отражающую различные фазы развития: начальную, срединную (основную) и заключительную. Составляющими ЖЦ являются фазовые циклы, детализирующие указанные три фазы развития и отличающиеся между собой характером функций, которые на них реализуются в соответствии с общей закономерностью появления, развития, функционирования и ликвидации искусственных образований.

Для ТС возможны такие ЖЦ с учетом взаимного проведения этапов: линейный, цикличе-

ский (с повторяющимися фазовыми циклами, что особенно характерно для ТО и Р), разветвленный (с параллельными этапами). В зависимости от предмета изучения может рассматриваться различная структура цикла по степени детализации. Могут рассматриваться ЖЦ различных объектов. На рис. 5 в форме графо-аналитической модели представлены варианты ЖЦ: для средств транспорта – ЖЦИ, для технологических систем изготовления средств транспорта – ЖЦ ТС Изг, для технологических систем технического обслуживания и ремонта – ЖЦ ТС ТО и Р. ЖЦ этих объектов содержат аналогичные фазовые циклы и типовую структуру. Пунктирной линией охвачены взаимодействующие фазовые циклы при производстве средств транспорта, их техническом обслуживании, ремонте и модернизации.

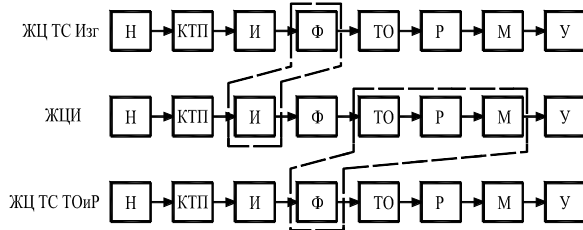


Рис. 5. Модели структур ЖЦ и взаимодействия в них

Типовыми являются фазовые циклы, в которых вначале реализуются функции, связанные с интеллектуальной деятельностью, проведением маркетинга и научно-исследовательских работ (Н) (мыслительное пространство). Затем следует сквозная конструкторско-технологическая подготовка (КТП) (знаковое пространство) и изготовление (И), включая сертификацию, сбыт, наладку и обучение. Функционирование (Ф), а также последующие фазовые циклы технического обслуживания (ТО), ремонта (Р), модернизации (М) и утилизации (У) происходят в физическом пространстве.

Для представленных ЖЦ целевым фазовым циклом является цикл Ф. Его реализация обеспечивает достижение цели создания средств транспорта и соответствующих ТС по их производству, техническому обслуживанию и ремонту, как систем машин и технологического оборудования.

По условиям осуществимости вещественно-энергетически-информационных преобразова-

ний одновременно с основными действиями реализуются работы, образующие обеспечивающий цикл (Об), на котором выполняются действия, называемые вспомогательными. Это связано с потребностями первичных затрат и пополнения ресурсов. Кроме того, во всех циклах проводится управление (Уп) – реализуется информационно-управленческий цикл. С учетом разделения процесса развития на три этапа, общую структуру циклов можно представить политриадной. В наиболее общем виде логическая схема цикла (Ц) может быть описана следующей моделью:

$$\text{Ц} = (\text{НЭ} \oplus \text{ОЭ} \oplus \text{ЗЭ}) \otimes \text{Уп} \otimes \text{Об}, \quad (3)$$

где НЭ, ОЭ, ЗЭ – начальный (подготовительный), основной и заключительный этапы целевого цикла; знак \oplus означает последовательное, а знак \otimes – параллельное исполнение циклов.

Структура каждого из этапов, как и всего цикла какого-либо иерархического уровня, может конкретизироваться. Для ЖЦИ средств транспорта фазовые циклы Н, КТП, И, а в период эксплуатации для восстановления работоспособного состояния циклы ТО, Р, М реализуют подготовительный этап. В пределах этих циклов осуществляется переход от замысла к реально существующему, функционирующему образцу в работоспособном состоянии последовательно в пространствах мышления, семиотики и физическом. Отметим, что в ЖЦИ средств транспорта могут дополнительно возникнуть фазовые циклы Н и КТП, предшествующие циклам Р и М. Фазовый цикл У является заключительным. Его введение в модель отражает функциональную замкнутость ЖЦ. Целевой фазовый цикл Ф, как правило, является многоразовым. Другие фазовые циклы могут быть как многоразовыми (циклы ТО, Р, М), так и однократными (циклы И, У). Структура (3) ЖЦ в соответствии с введенными обозначениями может конкретизироваться следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} \text{ЖЦ} = & (\text{Н} \oplus \text{КТП} \oplus \text{И} \oplus \text{Ф} \oplus \text{ТО} \oplus \dots \\ & \text{Ф} \oplus \text{ТО} \oplus \text{Р} \oplus \dots \text{Ф} \oplus \text{ТО} \oplus \text{Р} \oplus \text{М} \oplus \dots \\ & \text{Ф} \oplus \text{ТО} \oplus \text{Р} \oplus \text{М} \oplus \text{У}) \otimes \text{Уп} \otimes \text{Об} \quad (4) \end{aligned}$$

Символом ... обозначены возможные повторения целостных фрагментов ЖЦ, например, типа $\text{Ф} \oplus \text{ТО} \oplus \text{Р}$. С учетом того, что обеспечивающий и управленческий циклы на каж-

дом из фазовых циклов изменяют свой характер, зависимость (4) можно детализировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ЖЦ} = & (\text{Н} \otimes \text{У}_\text{н} \otimes \text{Об}_\text{н}) \oplus \\ & (\text{КТП} \otimes \text{У}_\text{КТП} \otimes \text{Об}_\text{КТП}) \oplus (\text{И} \otimes \text{У}_\text{пИ} \otimes \text{Об}_\text{И}) \oplus \\ & (\text{Ф} \otimes \text{У}_\text{пФ} \otimes \text{Об}_\text{Ф}) \oplus (\text{ТО} \otimes \text{У}_\text{пТО} \otimes \text{Об}_\text{ТО}) \oplus \dots \\ & (\text{Ф} \otimes \text{У}_\text{пФ} \otimes \text{Об}_\text{Ф}) \oplus (\text{ТО} \otimes \text{У}_\text{пТО} \otimes \text{Об}_\text{ТО}) \oplus \\ & (\text{Р} \otimes \text{У}_\text{пР} \otimes \text{Об}_\text{Р}) \oplus \dots (\text{Ф} \otimes \text{У}_\text{пФ} \otimes \text{Об}_\text{Ф}) \oplus \\ & (\text{ТО} \otimes \text{У}_\text{пТО} \otimes \text{Об}_\text{ТО}) \oplus (\text{Р} \otimes \text{У}_\text{пР} \otimes \text{Об}_\text{Р}) \oplus \\ & (\text{М} \otimes \text{У}_\text{пМ} \otimes \text{Об}_\text{М}) \oplus \dots (\text{Ф} \otimes \text{У}_\text{пФ} \otimes \text{Об}_\text{Ф}) \oplus \\ & (\text{ТО} \otimes \text{У}_\text{пТО} \otimes \text{Об}_\text{ТО}) \oplus (\text{Р} \otimes \text{У}_\text{пР} \otimes \text{Об}_\text{Р}) \oplus \\ & (\hat{\text{I}} \otimes \hat{\text{O}}\hat{\text{I}}_{\hat{\text{I}}} \otimes \hat{\text{I}} \hat{\text{a}}_{\hat{\text{I}}}) \oplus (\hat{\text{O}} \otimes \hat{\text{O}}\hat{\text{I}}_{\hat{\text{O}}} \otimes \hat{\text{I}} \hat{\text{a}}_{\hat{\text{O}}}); \end{aligned} \quad (5)$$

В зависимости (5) составляющие циклов **Об** и **Уп** выделены нижними индексами, которые совпадают с обозначениями фазовых циклов.

Цикл **Уп**, также имея триадную структуру, может делиться на ряд своих составных циклов: формирование целей (критериев) управления, управление состоянием и управление процессом.

Цикл **Об** по своему характеру может быть разделен на циклы нижнего по отношению к нему иерархического уровня. В состав этих циклов могут входить циклы обслуживания, ресурсообеспечения, оптимизации и другие. Каждый из циклов на всех иерархических уровнях должен быть подготовлен к реализации, и его структура должна отвечать зависимости (3). Из нее следует, что каждому целевому циклу предшествует подготовительный цикл. Каждому подготовительному циклу – свой подготовительный цикл и т.д.

Цикл **Ф** является составной частью ЖЦ ТС. Следовательно, он должен относиться к циклам развития. В то же время этот цикл является циклом функционирования системы. В его пределах выделяется множество рабочих циклов. На протяжении каждого рабочего цикла выполняется относительно законченный объем работ – реализация целевой функции. Каждой целевой функции отвечает своя система функций, отражающая процессы развития и функционирования системы.

Классификация методов оптимизации ТС

С учётом структурной схемы ТС, приведенной на рис. 2, зависимость (1) можно представить в конкретизированном виде, при котором дифференцированно учитывается сте-

пень охвата области возможных решений. К первому измерению по атрибутам структурных элементов добавляется второе измерение – по принадлежности к управленческим, основным и вспомогательным действиям:

$$K_{\text{об}2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k K_{ij}, \quad (6)$$

где K_{ij} – коэффициент учета сочетания атрибутов при значениях $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, k}$.

Соответственно долевые значения K_{ij} определяются:

$$K_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если область сочетания} \\ m+k & \text{атрибутов учтена,} \\ 0, & \text{если не учтена.} \end{cases} \quad (7)$$

При расчете по трем измерениями в области возможных решений учитываются циклы функционирования (4), по атрибутам которых зависимость (2) примет вид:

$$K_{\text{об}3} = \sum_{\gamma=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k K_{\gamma ij}, \quad (8)$$

где $K_{\gamma ij}$ – коэффициент учета сочетания атрибутов при значениях $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, k}$, $\gamma = \overline{1, n}$.

Соответственно долевые значения $K_{\gamma ij}$ определяются:

$$K_{\gamma ij} = \begin{cases} 1 & \text{если область сочетания} \\ m+k+n & \text{атрибутов учтена,} \\ 0, & \text{если не учтена.} \end{cases} \quad (9)$$

Сфера применения ТС оптимизируется с учетом выполнения всех трех классов функций (основных, управленческих и вспомогательных), поскольку разные классы функций могут реализоваться в разных пространствах.

Очевидно, что методы обеспечения поиска области возможных решений могут давать различные результаты. Основными широко применяемыми при аналитическом проектировании методами поиска структурных решений являются эвристический, композиционный, эволюционный. Также используются специальные методы, основанные на регулярных процедурах, учитывающих особен-

ности строения и развития ТС [11], и смешанные методы, предусматривающие использование комбинаций из указанных методов.

В зависимости от значений $K_{об}$ можно составить классификацию методов оптимизации. Вариант классификации представлен в табл. 1.

Таблица 1 Классификация методов оптимизации ТС по степени охвата области возможных решений

№ п/п	Значение коэффициента $K_{об}$	Название метода
1	$K_{об} = 1$	С полным охватом области возможных значений
2	$0 < K_{об} < 1$	С частичным охватом области возможных значений
3	$K_{об} = 0$	Оптимизация отсутствует

Каждый из указанных методов имеет свои возможности. Для $0 < K_{об} < 1$, т.е. для оптимизации с частичным охватом области возможных решений могут применяться все указанные методы. Для случая полной комплексной оптимизации, соответствующей $K_{об} = 1$, нужны полные множества структурных и полные области возможных параметрических решений. При наличии этого с использованием общих или частичных критериев выбирается полное комплексно-оптимальное решение. Особые требования к полноте области возможных решений требуют применения специальных логико-алгоритмических процедур, которые осуществляются поэтапно:

- 1) создаются общие базовые модели системы, способные определять полные множества возможных структурных решений на всех иерархических уровнях;
- 2) конкретизируются структуры и параметризуются их элементы;
- 3) разрабатываются требования к надсистеме;
- 4) проводится синтез основных элементов системы;
- 5) оптимизируются эти элементы, определяются оптимальные значения параметров;
- 6) выполняется экспериментальная проверка полученных результатов и оценка их эффективности;

7) при необходимости вносятся коррективы в систему.

При этом выбор наиболее эффективных структур производится после параметризации и параметрической оптимизации системы и её элементов. Последнее обеспечивается многообразными методами параметрической оптимизации, степень целесообразности применения которых зависит от видов и типов логико-математических зависимостей, описывающих вещественные, энергетические и информационные преобразования в системе. Указанные методы структурно-параметрической оптимизации относятся к новым методам проектирования и в настоящее время получают всё большее распространение. Современная компьютерная техника позволяет обеспечивать необходимые при этом поисковые и вычислительные процедуры.

Выводы

Методы оптимизации ТС в общем виде должны предусматривать получение возможных решений с учетом атрибутов системы, связанных со временем (фазами развития), функциональностью и иерархией структурных элементов. При выборе этих атрибутов из полных множеств возможных решений, соответствующих границам познанного социально-гуманитарными и естественными научными дисциплинами, обеспечивается полная комплексная оптимизация ТС.

Структурные различия методов оптимизации позволяют создавать их классификации, которые могут быть использованы при выборе наиболее эффективных методов в процессе решения задач проектного синтеза. Дальнейшее развитие проведенных исследований целесообразно провести в направлении оценки аппаратной и сущностной эффективности разнообразных методов оптимизации при создании транспортных систем различного назначения и иерархического уровня.

Литература

1. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство / Хокс Барри ; пер. с англ. Веденева Д.Е., Волкова Д.В. ; под ред. Мартынюка В.В. – М. : Мир, 1991. – 296 с.
2. Тернюк Н.Э. Основы комплексной автоматизации технологических систем для

- производства зубчатых колес : автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук : 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструмент» / Р.Э. Тернюк. – Тула, 1983. – 415 с.
3. Дабагян А.В. Принципы автоматизированного проектирования систем машин и технологических процессов : учеб. пособие / А.В. Дабагян. – Харьков : Изд-во ХПИ, 1987. – 66 с.
 4. Дитрих Я. Проектирование и конструирование : Системный подход / Я. Дитрих ; пер. с польск. Л.В. Левицкого, Ю.А. Иванова ; под ред. В.М. Бродянского. – М. : Мир, 1981. – 456 с.
 5. Уёмов А.И. Системный подход и общая теория систем / А.И. Уёмов. – М. : Мысль, 1978. – 272 с.
 6. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахага ; пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума ; под ред. С.В. Емельянова. – М. : Мир, 1978. – 311 с.
 7. Минович Л. О методе синтеза конструкций из подсистем / Л. Минович, А.Л. Хейл // Ракетная техника и космонавтика, 1981. – № 9. – С. 128–139.
 8. Артоболевский И.И. Постановка и решение задач оптимального проектирования машин / И.И. Артоболевский, М.Д. Генкин, В.И. Сергеев // Машиноведение. – 1977. – №5. – С. 15–23.
 9. Сорокин В.Ф. Направленный синтез гибких технологических систем высокой и сверхвысокой производительности / В.Ф. Сорокин, Н.Э. Тернюк // Вопросы проектирования и производства, конструирования летательных аппаратов. Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении» : сб. научн. тр. НАКУ «ХАИ»: – Харьков, 2008. – №3 (54). – С. 110–115.
 10. Каменев А.Ф. Закономерности развития техники / А.Ф. Каменев. – М. : Наука, 1981. – 425 с.
 11. Беловол А.В. Структурные отличия жёстких, гибких и трансформерных технологических систем / А.В. Беловол, Н.Э. Тернюк, Ф.В. Хунг // Вісті Академії інженерних наук України. Спец. вип. «Машинобудування та прогресивні технології». – К. : Антиква, 2005. – №3 (26). – С. 108–112.
- Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 16 мая 2011 г.
-