



ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**9
2007**

Орган информации

МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ЭНЕРГЕТИКИ РФ

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Алексейчук Г.П., **Алешин Н.П.**, **Братухин А.Г.**,
Воронцов А.Л., **Гусейнов А.Г.**, **Дмитриев А.М.**
(председатель секции обработки материалов без
снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.**, **Древаль А.Е.**
(председатель секции технологии машинострое-
ния), **Дроздов Ю.Н.** (председатель секции кон-
струирования и расчета машин), **Кутин А.А.**,
Логунов А.В., **Омельченко И.Н.** (председатель
секции организации и экономики производства),
Пименов А.Ф., **Попов Д.Н.**, **Салтыков М.А.**,
Трегубов Г.П., **Цыганкова И.А.** (ответственный
секретарь)

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

*Журнал входит в перечень утвержденных
ВАК РФ изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней*

Журнал переводится на английский язык,
переиздается и распространяется
во всем мире фирмой
"Аллертон Пресс" (США)

Ордена Трудового Красного Знамени
ОАО «Издательство "Машиностроение"»
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Адрес редакции:

129626, Москва,
проспект Мира, д. 106, а/я 78.
Телефоны: (495) 687-63-37, (495) 682-77-11
E-mail: vestmash@mashin.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за
№ 77-12421 в Комитете Российской Федерации по
печати

Учредитель: А.И. Савкин

Индексы: **70120** ("Роспечать"),
27841 ("Пресса России"),
60264 ("Почта России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Подольская периодика",
142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

- Яковлев В. В. — Конструктивная прочность изделий в свете теорий устойчивости процесса деформирования и пластичности 3
- Кулиш Е. В., Турыгин Ю. В. — Методика расчета прессовых полисоединений 9
- Бирюков В. И. — Методика расчета амплитуды и частоты автоколебаний в камере ЖРД с термическим разложением гидразина 12
- Мамедов А. Ф. — Кинематический анализ движения ведомого цилиндрического зубчатого колеса с прямыми зубьями 15
- Александров И. К. — Энергетический КПД машины с частичной рекуперацией энергии 17

Цикл статей

"Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки"

- Колесников В. И., Сычев А. П., Сергиенко В. П., Купреев А. В. — Тепловые эффекты и структурные изменения материалов в маслоохлаждаемых фрикционных парах трения 19

Металлургическое оборудование и прокатное производство

- Поляков Б. Н. — Напряженно-деформированные состояния и оптимальные конструктивные параметры станин заготовочных и листовых прокатных станов 23

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

- Кутин А. А., Пирогов В. В. — Методы обеспечения требуемой точности обработки сложных деталей с учетом технологических особенностей многокоординатного фрезерования 29
- Бахареv В. П., Куликов М. Ю., Верещака А. С. — Регулирование микродоводочных процессов финишной обработки минералокерамики путем применения эффективных СОТС 35
- Еренков О. Ю. — Химико-механический подход к обработке полимерных материалов резанием 40
- Кабалдин Ю. Г., Биленко С. В., Муравьев С. Н. — Информационная модель самоуправления синтеза наноматериалов 43
- Коротаев Д. Н. — Выбор оптимального способа упрочнения прецизионных поверхностей трения 50
- Латышев В. Н., Наумов А. Г., Раднюк В. С., Подгорков В. В. — К вопросу о проникновении СОТС на контактные площадки при резании металлов 53

Обработка материалов без снятия стружки

- Воронцов А. Л. — Новая теория осадки цилиндрической заготовки 55

ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

- Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. — Метод эволюционного синтеза сложных технических объектов с использованием экспертных знаний 65
- Омельченко И. Н., Лазаренко А. Г. — Графоаналитическое решение логистической задачи о максимальном сетевом потоке минимальной стоимости 71
- Меньшиков В. В., Козлов Г. В., Ерошин С. Е. — Метод построения рейтинговой системы оценок эффективной деятельности 73

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л., Обакшин П. А., Змызгова Т. Р. — Особенности фильтрации цифровых изображений реакции датчиков деформаций интегрального типа для оценки поврежденности деталей и конструкции машин 77
- Иванов А. Н. — Выставка "Мир инструмента-2007" 78
- Иванов А. Н. — Выставка "Интерлакокраска-2007" 81

История науки и техники

- Шелест П. А. — От паровой машины Д. Уатта до газовой турбины А. Н. Шелеста 83
- Потапова Г. С. — Обзорные зарубежные изданий 93
- Реклама 52, 64
- Вниманию читателей 76

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

- Yakovlev V. V. — Product mechanical strength from the standpoint of the stability theory of the deformation and ductility process
- Koulishev Ye. V., Turygin Yu. V. — Press poly-joints design procedure
- Biryukov V. I. — Calculation technique of the amplitude of self-oscillations and vibration frequency in the liquid-fuel rocket engine chamber with hydrazine thermal decomposition
- Mamedov A. F. — Kinematic analysis of the driven spur gear
- Alexandrov I. K. — Energy efficiency of a machine with energy partial recuperation

Series of articles

"Problems of tribology — friction, wearing away and lubrication"

- Kolesnikov V. I., Sychev A. P., Sergiyenko V. P., Koupreev A. V. — Materials thermal effects and structural changes in oil-cooled frictional pairs

Metallurgical equipment and rolling

- Polyakov B. N. — Deflected mode and optimal and design factor of the billet and sheet mills stands

MANUFACTURING TECHNOLOGY

- Kutin A. A., Pirogov V. V. — Assurance of the working accuracy requirement for complex components considering multicoordinate milling process features
- Bakharev V. P., Koulikov M. Yu., Vereschaka A. S. — Control of the operational microdeveloping processes at ceramic mineral final polishing by applying effective cooling lubricants
- Yerenkov O. Yu. — Chemical-mechanical approach to cutting polymeric materials
- Kabalidin Yu. G., Bilenko S. V., Mouraviov S. N. — Information models of nano-materials self-controlled synthesis
- Korotayev D. N. — Precision rubbing surface optimal strengthening decision
- Latyshev V. N., Naumov A. G., Radnyuk V. S., Podgorkov V. V. — On the problem of the cooling lubricants penetration onto contact areas at metal cutting

Chipless materials working

- Vorontsov A. L. — New theory of the cylindrical blanks upsetting

PRODUCTION ORGANIZATION AND ECONOMICS

- Andreychikov A. V., Andreychikova O. N. — Evolutionary synthesis procedure of complex technical objects by using expertise
- Omelchenko I. N., Lazarenko A. G. — Graphic-analytical logistic task solution on maximal network flow of minimum value
- Menshikov V. V., Kozlov G. V., Yeroshin S. Ye. — Method of building effectiveness rating system

TECHNICAL INFORMATION

- Syzrantsev V. N., Golofast S. L., Obakshin P. A., Zmyzgova T. R. — Characteristic properties of digital image filtering of the strain integral gauge response to estimate failure rate of components and machine hardware
- Ivanov A. N. — "ISET (Tool World)'2007" exhibition
- Ivanov A. N. — The "Interlakokraska'2007" exhibition

History of science and engineering

- Shelest P. A. — From D. Watt's steam-engine to A. N. Shelest's gas turbine
- Potapova G. S. — Review of foreign journals

Художественный редактор Т. Н. Галицына
Технический редактор О. А. Ефремова
Корректор М. Г. Джавадян

Сдано в набор 02.07.2007. Подписано в печать 16.08.2007.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11,76. Уч.-изд. л. 14,59. Заказ 122.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

УДК 303.82.001.63.007.62

А. В. АНДРЕЙЧИКОВ, О. Н. АНДРЕЙЧИКОВА, доктора технических наук (Волгоградский ГТУ)

Метод эволюционного синтеза сложных технических объектов с использованием экспертных знаний¹

Описан новый подход к структурному синтезу многомерных инновационных решений, основанный на применении механизмов естественной эволюции для соединения элементов и отбора жизнеспособных решений. Техническое решение генерируется из множества элементов только в том случае, если удовлетворяются их взаимные внутренние требования. Для формирования описаний порождаемых конструкций используются знания экспертов, представленные в виде правил и функций. Лучшие решения отбираются на основе обобщенной меры сходства с техническим заданием. Метод позволяет генерировать решения, не имеющие внутренних противоречий и удовлетворяющие внешним требованиям.

A new approach to the structural synthesis of multivariate innovative solutions is described, based on the application of natural evolution mechanisms to join elements and select viable decisions. Technical decision is generated from a member set only in case if mutual internal requirements meet. In order to form descriptions of the borne structures experts' knowledge in the form of rules and functions is used. The best decisions are sorted out on the base of generalized measure of similarities to the preliminary specifications. The method allows for generating solutions which do not have internal contradiction and meet external requirements.

Процессы развития в естественных системах послужили аналогами разработанных методов обработки информации в искусственных системах. Рассмотрим эволюционный подход к решению задачи концептуального проектирования сложных объектов, заключающейся в создании модели некоторой системы, реализация которой будет способна выполнять предписанные функции с заданным уровнем качества. Требования, предъявляемые к объекту проектирования, формируются в метасистеме более высокого уровня, которая является антропогенной развивающейся системой. В связи с этим цели и требования к системе более низкого уровня (подсистеме) могут изменяться с течением времени. Поэтому задачи концептуального проектирования технических инноваций, производственных или других систем можно отнести к динамическим задачам принятия проектных решений в условиях неопределенности. В данном случае неопределенность характеризуется многовариантностью, многокритериальностью, открытостью в плане постоянного обмена информацией с внешней средой и способностью изменять свои свой-

ства и структуру при изменении факторов внешнего окружения, т. е. адаптивностью. Эффективное решение подобных задач основано на применении эволюционного подхода к задачам проектирования. Схема эволюционного проектирования показана на рис. 1.

Информация об изменениях внешней среды используется для построения модели поведения. Результаты моделирования позволяют сформировать вектор $R(t)$ требований к проектируемой системе, изменяющийся во времени, на основе которого синтезируются варианты системы ($S_1, S_2, S_3 \dots, S_n$) и выбирается вариант, имеющий совокупность свойств $P_1 = F(S_1)$, $P_2 = F(S_2)$, $P_3 = F(S_3)$, которые являются функцией структуры, наилучшим образом удовлетворяющей внешним требованиям $R(t)$.

В процессе построения конфигурации целостной системы из более простых частей учитываются факторы внешней среды, при этом структура и состав элементов системы подбираются так, чтобы обеспечить максимальное удовлетворение внешним требованиям. Таким способом реализуется один из основных принципов эволюционного подхода — *естественный отбор*. В процессе синтеза происходит соединение отдельных элементов, результатом которого являются более крупные объекты, обладающие новыми свойствами и наследующие некоторые свойства элементов "родителей". При этом могут использоваться механизмы *наследования*,

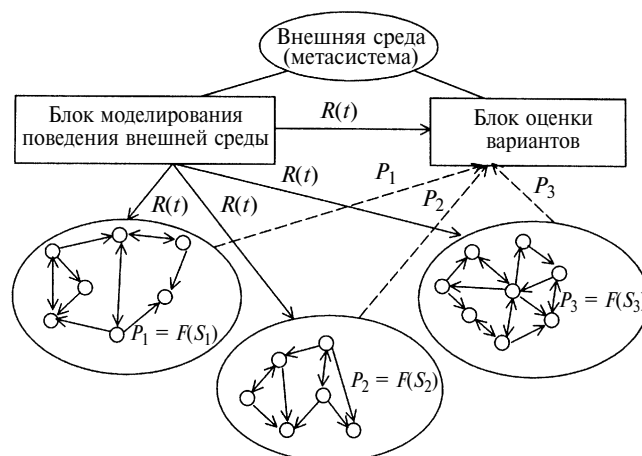


Рис. 1. Схема эволюционного проектирования

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, номера проектов 05-68-01466, 05-08-01470.

мутации и межвидовой рекомбинации, поскольку объединяемые в систему элементы могут описываться различными наборами свойств. Из множества возможных элементов на каждом шаге отбираются только те, в которых отсутствуют внутренние противоречия и имеются высокие шансы "выживания" во внешней среде.

Задачи синтеза сложных систем существенно отличаются от оптимизационных (таблица), поэтому для их решения необходима существенная модификация известных генетических алгоритмов [1–3].

Это связано с тем, что в синтезе сложной системы участвуют объекты с различными структурами описаний, в то время как в процессе оптимизации рассматриваются объекты с идентичными описаниями. Другими словами, состав "популяций" объектов синтеза разнороден, т. е. содержит множество видов, а в процессе

синтеза возможно межвидовое скрещивание (рекомбинация). Кроме того, описания объектов синтеза представляют собой наборы структурированных данных различных типов, а не двоичные цепочки генов, которые используются в алгоритмах оптимизации. Поэтому в процессе синтеза возникают проблемы формирования структур описаний потомков и выбора претендентов для скрещивания, так как это возможно только между определенными видами, присутствующими в популяции. В известных генетических алгоритмах проблемы отбора родителей и формирования описаний потомков успешно решаются с использованием механизмов случайного выбора. В задачах синтеза применение случайного отбора и комбинирования ограничено.

Основные этапы эволюционного подхода к синтезу сложного технического объекта (ТО):

1. Создание популяции исходных объектов синтеза, которая представляет собой множество альтернативных реализаций функциональных подсистем (ФПС), наделенных определенными свойствами и имеющих требования к своему окружению внутри системы. Формирование множества ФПС осуществляется на основе функционально-структурного или морфологического анализа рассматриваемого класса [4]. Результат декомпозиции может представлять собой множество ФПС или иерархию таких множеств.

2. Формирование набора обобщенных требований к синтезируемому объекту, отражающего его жизнеспособность или эффективность. Если структура ТО задана иерархией, то формулируются также требования к подсистемам, имеющим внутреннее строение.

3. Формирование функции ценности вариантов проектируемого ТО, позволяющей оценивать степень соответствия сгенерированных объектов заданному набору внешних требований. При иерархическом представлении задается набор таких функций.

4. Выбор претендентов и реализация оператора скрещивания, с помощью которого из объектов исходной популяции создаются новые объекты-представители следующей популяции и формируются их описания.

5. Вычисление значений функции ценности сгенерированных вариантов и отбор на их основе лучших вариантов из новой популяции.

6. Проверка условий завершения процесса синтеза.

Представление знаний об объектах синтеза

Рассмотрим представление знаний, используемых в процессе синтеза систем на основе эволюционного подхода. Допустим, структура синтезируемой системы S задана графом (рис. 2).

Варианты целостной системы могут содержать не более N элементов S_i , где $i = 1, 2, \dots, N$. Вариант целостной системы V_q может содержать $N_i < N$ элементов в том случае, если в конструкцию входят многофункциональные элементы. Набор информации, используемой для синтеза, может включать в себя различные характеристики, представленные совокупностью свойств каждой подсистемы S_i : $P_i = \{Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iK_i}\}$, где K_i — число свойств i -й подсистемы, $i = 1, \dots, N$. Эти харак-

Отличия алгоритмов эволюционного синтеза от генетических алгоритмов оптимизации

Термин	Оптимизация	Синтез
Объект популяции	Решения, заданные координатами точек в N -мерном пространстве	Элементы технической (производственной и т. п.) системы, описанные произвольными наборами структурированных данных
Структура описания объектов популяции	Одинаковая	Различная
Характер описания объектов	Количественный	Количественный, качественный, нечеткий и т. д.
Возможность скрещивания	Между любыми объектами одной популяции	Только тех объектов, которые удовлетворяют определенным условиям
Структура потомков, появляющихся в результате скрещивания	Аналогична структуре описания обоих родителей	Формируется новая структура, описывающая объект-потомка, которая отличается от структуры, описывающей родителей
Число родителей, порождающих потомка	Два	Не менее двух
Число потомков, появляющихся в результате скрещивания	Два	Один
Способ формирования описания потомка	Обмен участками описаний (хромосом) родителей	Заданные процедуры вычисления и/или вывода свойств потомка из свойств родителей
Способ отбора лучших представителей популяции	На основе сравнения значений произвольной целевой функции	На основе целевой функции, отражающей степень удовлетворения синтезированных объектов заданным требованиям

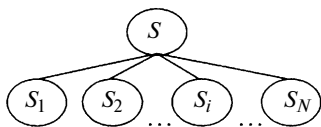


Рис. 2. Структура синтезируемой системы

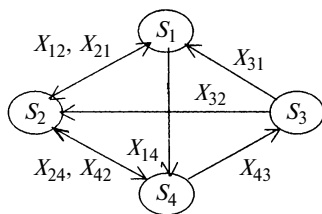


Рис. 3. Граф взаимных требований подсистемы

теристики можно взять, например, из баз знаний по техническим решениям [4]. В отличие от традиционных бинарных цепочек генов свойства ФПС могут быть представлены целыми или вещественными числами, а также символьными строками или нечеткими множествами. Кроме набора свойств каждая подсистема S_i описывается набором требований к ее внутреннему окружению (к другим элементам): $R_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iM_i}\}$, где M_i — число требований i -й подсистемы к другим подсистемам.

Порядок взаимных требований подсистем можно задать с помощью графа (рис. 3).

В матрице B , представляющей граф, приведенный на рис. 2, элементы соответствуют числу требований, которые предъявляет элемент системы S_i , указанный в i -й строке, к элементу системы S_j , указанному в j -м столбце. Первый индекс любого требования X_{ij} совпадает с индексом подсистемы (элемента системы), которая выдвигает это требование. Второй индекс является порядковым номером требования в списке требований R_i .

Важным моментом является установление соответствия между свойствами ФПС и требованиями, которые к ней предъявляются со стороны других подсистем. С этой целью заполняются матрицы соответствия C_i для каждой ФПС S_i , которые являются промежуточным представлением объектов синтеза, удобным для дальнейшей обработки.

Пример матрицы соответствия для S_1 :

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}; C_1 = \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \dots \\ S_N \\ S_1^* \end{matrix} \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1K1} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & - \\ X_{31} & - & \dots & - \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ - & - & - & - \\ X_{11}^* & X_{12}^* & \dots & X_{1K1}^* \end{vmatrix}.$$

В первой строке матрицы соответствия записываются наименования свойств i -й подсистемы, в последующих $(N - 1)$ строках — наименования требований, которые другие подсистемы предъявляют к соответствующим свойствам S_i . В последней строке матрицы C_i , $i = 1, 2, \dots, N$, записываются результаты объединения всех требований, предъявляемых к j -му свойству i -й подсистемы (X_{ij}^*), вычисляемые после подстановки конкретных значений в переменные X_{ij} , которая осуществляется в процессе синтеза. Альтернативные реализации каждой ФПС описываются двумя таблицами, в которых хранятся конкретные значения свойств (y_{ikj}) и

требований (x_{ikj}). Значениями свойств являются числа или текстовые данные, значениями требований — ограничения в виде равенств или неравенств. При таком представлении принимается допущение: все альтернативные реализации i -й подсистемы описываются одинаковым числом свойств (K_i) и одинаковым числом внутренних требований (M_i). Общее число свойств или требований каждой подсистемы можно получить путем объединения соответствующих характеристик альтернативных реализаций A_{ij} .

Описания альтернативных реализаций ФПС удобно представить с помощью матриц вида:

$$PA_i = \begin{matrix} S_i & Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{iK_i} \\ A_{i1} & y_{11} & y_{21} & \dots & y_{K11} \\ A_{i2} & y_{12} & y_{22} & \dots & y_{K12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{iL_i} & y_{1L_i} & y_{2L_i} & \dots & y_{K1L_i} \end{matrix};$$

$$RA_i = \begin{matrix} S_i & X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{iM_i} \\ A_{i1} & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{M11} \\ A_{i2} & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{M12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{iL_i} & x_{1L_i} & x_{2L_i} & \dots & x_{M1L_i} \end{matrix}.$$

Таким образом, совокупность знаний для эволюционного синтеза включает в себя знания:

о ФПС, из которых синтезируется объект (векторы P_i , R_i , $i = 1, 2, \dots, N$, матрица B , матрицы соответствия C_i , $i = 1, 2, \dots, N$);

о конкретных реализациях ФПС, представленных свойствами и требованиями к внутреннему окружению (наборы матриц PA_i , RA_i , $i = 1, 2, \dots, N$), набором внешних требований к синтезируемому объекту $R_G = \{R_{G1}, R_{G2}, \dots, R_{GM}\}$ (где M — число внешних требований) и множеством правил и процедур формирования описаний порождаемых объектов-потомков.

Значения свойств целостной системы, которые должны удовлетворять внешним требованиям, можно получить разными способами. Характеристики, представленные количественными оценками при морфологическом подходе к синтезу, можно получить с помощью аддитивной и мультипликативной сверток [4, 5]. Логический подход к синтезу предусматривает применение формул логики предикатов (правил) для формирования характеристик целостного объекта на основе свойств элементов, что расширяет возможности представления знаний, но требует дополнительной информации [6]. Эволюционный подход к синтезу допускает применение разных способов получения параметров. Это могут быть математические и алгоритмические функции, правила, а также комбинированное представление. Выбор конкретного способа зависит от количества доступной информации. При недостатке знаний для вычисления параметров может использоваться аддитивный или мультипликативный обобщенный критерий

рий. Процедура вычисления компонент вектора $P_G = \{P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GK}\}$ для варианта целостной системы V_q может иметь вид:

$$P_{G1} = Y_{11}; P_{G2} = \max_{Si \in V_q} (Y_{i2}); P_{G3} = \sum_{i=1}^N Y_{i3};$$

$$(P_{G4} = \lambda_1) \rightarrow (Y_{21} \leq \lambda_2) \wedge (Y_{31} = \lambda_3); \dots, \dots$$

где λ_i — константы, определяемые техническим заданием на синтез.

Реализация оператора скрещивания

Рассмотрим процедуру соединения N элементов с различными описаниями, соответствующую оператору скрещивания в генетических методах поиска оптимальных решений. Заметим, что в данном случае потомок происходит от N родителей. Отбор кандидатов для скрещивания основан на вычислении степени удовлетворения взаимных требований соединяемых элементов. Для каждого элемента (ФПС) синтезируемого объекта вычисляется мера удовлетворения требованиям остальных элементов, претендующих войти в q -ю комбинацию, в соответствии с формулами:

$$G_{qi} = \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} L(X_{ij}^*, Y_{ij}) \text{ или}$$

$$G_{qi} = \sum_{j=1}^{K_i} w_j L(X_{ij}^*, Y_{ij}),$$

где $L(X_{ij}^*, Y_{ij})$ — мера сходства j -го свойства i -й ФПС Y_{ij} с объединенным набором требований к ней со стороны остальных элементов X_{ij}^* ; w_j — нормированные весовые коэффициенты требований к j -му свойству i -й ФПС; K_i — число свойств i -й ФПС.

Способ вычисления меры сходства зависит от вида описания свойств (дескриптивный, количественный, нечеткий) и от вида требований (равенство, неравенство, интервал), что подробно описано в работе [7].

Обобщенная оценка степени удовлетворения взаимных требований элементов в q -м варианте системы вычисляется либо как среднее арифметическое, либо как среднее геометрическое в зависимости от выбранного принципа компромисса:

$$G_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{qi} \text{ или } G_q = \left[\prod_{i=1}^N G_{qi} \right]^{1/N}.$$

Аддитивная функция G_q принимает нулевое значение только в том случае, если все ФПС, вошедшие в q -й вариант, не удовлетворяют требованиям остальных элементов. Мультипликативная функция принимает нулевое значение, когда в комбинацию входит хотя бы один элемент, для которого $G_{qi} = 0$. Поэтому вторая функция является более эффективной для поиска вариантов с высокой степенью совместимости ФПС. При использовании аддитивной функции проверку на наличие

внутренних противоречий следует проводить с использованием некоторого порога Δ , $G_q \geq \Delta$. В случае мультипликативной функции проверка может выполняться по условию $G_q > 0$.

Таким образом, для любого генерируемого варианта системы $V_q = \{A_{1i}, A_{2j}, A_{3k}, \dots, A_{Nz}\}$ вычисляется значение функции G_q и на его основе принимается решение о возможности существования данной комбинации ФПС. Если это решение отрицательное, то вариант V_q не порождается и не включается в новую популяцию. В противном случае формируется описание полученного варианта с использованием соответствующей процедуры вывода интегральных свойств объекта, который будет участвовать в последующем отборе на основе значений функции F_q , отражающей жизнеспособность целостного объекта во внешней среде. Таким образом выполняется скрещивание N разнородных объектов с учетом их совместимости в рамках единой конструкции. В данном случае не происходит никакого обмена фрагментами "хромосом", как в генетических алгоритмах, поскольку описания элементов являются структурированными и разнородными, взаимный обмен фрагментами таких описаний лишен какого-либо смысла.

Описание потомка, полученного от N родителей, формируется с помощью специальных процедур вычисления свойств, заложенных в базу знаний. Если соединение выбранных реализаций ФПС ($S_1, S_2, \dots, S_N$) является допустимым ($G_q > 0$), то образование потомка V_q можно представить грамматическим правилом вида:

$$S(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GK})$$

$$\rightarrow S_1(Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1K1}), S_2(Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2K2}), \dots,$$

$$S_N(Y_{N1}, Y_{N2}, \dots, Y_{NK_N}), \{P_1 = Y_{11}; P_2 = \max(Y_{1j}, Y_{2j});$$

$$P_3 = \sum_i Y_{i3}, \dots, (P_L = \lambda_r) \rightarrow (Y_{3K3} < \lambda_u) \wedge (Y_{NK} = \lambda_g)\}$$

$$\rightarrow S_1(Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1K1}), S_2(Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2K2}), \dots,$$

$$S_3(Y_{31}, Y_{32}, \dots, Y_{3K3}), \{P_1 = Y_{11}; P_2 = \max(Y_{1j}, Y_{2j});$$

$$P_3 = \sum_i Y_{i3}, \dots, (P_L = \lambda_r) \rightarrow (Y_{3K3} < \lambda_g)\}$$

$\rightarrow \dots$

Здесь в фигурных скобках показаны примеры процедур вычисления свойств целостного объекта на основе параметров элементов. С помощью правил представлены знания о структуре описаний потомков. В случае иерархического синтеза следует сформулировать правила формирования описаний потомков для каждой популяции. При недостатке знаний для построения правил можно осуществить объединение качественных признаков и суммирование значений одноименных количественных признаков объектов-родителей.

Отбор жизнеспособных вариантов

После того как сформирована процедура получения значений параметров целостной системы, значения функции ценности вариантов можно вычислить как меру сходства вектора внешних требований R_G со свойствами конкретного варианта $P_G(V_q)$. Функция ценности

должна отражать жизнеспособность синтезированных вариантов системы во внешней среде. Для ее построения необходимо сформулировать требования окружения к объекту проектирования $R_G = \{R_{G1}, R_{G2}, \dots, R_{GM}\}$, где M — число внешних требований. Эти требования обычно сопряжены с выполнением определенного набора функций и заданным уровнем качества ТО. Требования к синтезируемому объекту могут представлять собой равенства или неравенства, в которые входят свойства сгенерированного объекта $R_G = \{R_{G1}, R_{G2}, \dots, R_{GK}\}$ и константы $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_H\}$, выражающие специфику технического задания на синтез.

Обобщенную оценку удовлетворения внешних требований можно построить как аддитивную или мультипликативную комбинацию мер сходства:

$$F_q = \sum_{j=1}^L w_j L(R_{Gj}, P_{Gj}^q) \text{ или}$$

$$F_q = \prod_{j=1}^L [L(R_{Gj}, P_{Gj}^q)]^{w_j},$$

где w_j — нормированные весовые коэффициенты внешних требований; P_{Gj}^q — значение j -го свойства q -го варианта системы.

Множество жизнеспособных вариантов формируется с использованием задаваемого порога Δ , а лучшие варианты определяются по максимальным значениям: $F^* = \max_{q \in \Omega} F_q$, где Ω — множество синтезированных вариантов ТО.

Если структура проектируемой системы задана иерархией, необходимо сформировать функции ценности для всех подсистем, имеющих сложную внутреннюю структуру.

Алгоритмы эволюционного синтеза

В зависимости от объема знаний о проектируемой системе и от ее сложности эволюционный синтез можно проводить в различной последовательности. В случае одноуровневого представления проектируемой системы алгоритм синтеза включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Подготовка и ввод исходной информации, содержащей описание ФПС в виде набора свойств и требований, граф взаимных требований ФПС и матрицы соответствия требований свойствам. В базу знаний системы эволюционного синтеза помещается процедура (грамматика) вычисления параметров синтезируемой системы через параметры составляющих элементов. Пользователь должен также сформировать набор внешних требований к синтезируемой системе.

Шаг 2. Генерируется вариант V_q из N реализаций функциональных подсистем, выбранных случайным образом из соответствующих множеств. При небольшой мощности множеств альтернативных реализаций ФПС генерируется множество всех возможных вариантов целостной системы путем полного перебора.

Шаг 3. Вычисляются оценки меры удовлетворения требований для каждой подсистемы G_{qi} и обобщенная оценка для варианта G_q .

Шаг 4. Если $G_q \geq \Delta$, то формируется описание варианта $V_q(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GM})$ с использованием заданной процедуры вычисления свойств целостного объекта. Если $G_q < \Delta$, то вариант исключается из популяции и происходит возврат на шаг 2.

Шаг 5. Вычисляется значение функции ценности варианта F_q , которое используется для отбора жизнеспособных вариантов. Отбор может проводиться по условию $F_q \geq \Delta$ или путем запоминания заданного числа вариантов с наилучшими значениями F_q .

Шаг 6. Повторяются шаги 2–5 до тех пор, пока не будет выполнено условие завершения синтеза. Синтез заканчивается, когда значения F_q перестают улучшаться либо достигается заданное число шагов.

В данном алгоритме формируется единственная популяция, членами которой являются варианты системы, полученные от N родителей и содержащие N ФПС. При большом числе альтернативных реализаций ФПС этот алгоритм может включать в себя процедуру предварительного отбора родителей. Следует иметь в виду, что родители имеют различные описания, поэтому для их оценки надо применять либо разные оценочные функции, либо усредненные оценки по множеству критериев качества.

В приведенном алгоритме не учитывалось наличие подсистем, способных выполнять несколько функций. При наличии таких подсистем варианты проектируемой системы могут содержать число элементов $N_1 < N$. Список выполняемых функций включается в множество свойств объектов синтеза. Функции, выполняемые целостной системой, могут отличаться от объединенного набора функций, которые выполняют подсистемы. Поэтому в набор правил формирования свойств целостной системы (грамматику) необходимо добавить правила вывода функций целостной системы.

В приведенном алгоритме не учитывалось наличие многофункциональных элементов. Если такие элементы входят в состав системы, то число ее компонентов может быть уменьшено. Для синтеза объектов с переменным числом элементов в описание объектов синтеза включаются списки выполняемых ими функций. Если в этом списке появляются одноименные функции, то элементы, обеспечивающие дублирование функций, можно исключить из конструкции. В списке требований к проектируемому объекту отмечаются функции, выполнение которых является обязательным. При исключении элементов из состава устройства осуществляется контроль за сохранением обязательных функций. Эти действия выполняются на втором шаге приведенного алгоритма. При этом порождается не один, а несколько вариантов, отличающихся числом элементов. Таким образом, объекты синтеза заменяются схемами, в которых свободными переменными являются необязательные функции.

Приведенный алгоритм синтеза основан на одновременном скрещивании N элементов и одношаговой процедуре порождения потомков. Рассмотрим меха-

низм эволюционного синтеза, основанный на последовательном соединении элементов. В этом случае в процессе синтеза участвуют исходная популяция базовых объектов и множество популяций потомков. Алгоритм последовательного синтеза включает в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Подготовка и ввод исходной информации.

Шаг 2. Формирование начальной популяции объектов синтеза с использованием или без использования процедуры предварительного отбора.

Шаг 3. Образование новых объектов, включающих два элемента. Управление процессом соединения элементов осуществляется с использованием графа взаимных внутренних требований. Два объекта соединяются, если между ними есть связь. В случае если граф требований является несвязным, то вершины, не имеющие связей, участвуют в синтезе на самом последнем этапе. Для задач небольшой размерности осуществляется синтез всех комбинаций. При большом числе элементов случайным образом генерируется популяция ограниченного размера.

Шаг 4. Проверка на совпадение функций, выполняемых элементами в полученной комбинации. Если множество функций, выполняемых одним элементом, является подмножеством функций другого, комбинация заменяется этим элементом и управление передается на шаг 7. В противном случае формируется список функций, выполняемых новым объектом. Если имеется частичное совпадение функций, выполняемых соединяющимися элементами, то дублирующиеся функции помечаются в списке специальной меткой.

Шаг 5. Вычисление шести оценок степени удовлетворения требований для каждой подсистемы G_q , входящей в полученную комбинацию, и обобщенной оценки G_q , вычисляемой путем перемножения. Если $G_q > 0$, то формируется описание комбинации V_q путем объединения описаний элементов. В описание также включаются индексы вошедших подсистем. Значение G_q включается в описание комбинации. Если $G_q = 0$, комбинация исключается из рассмотрения и осуществляется возврат на шаг 3.

Шаг 6. Формирование свойств нового объекта с использованием заданных правил и набора его требований к окружению путем объединения требований родителей.

Шаг 7. Варианты, прошедшие проверку на шаге 5, включаются в новую популяцию. При этом возможно применение дополнительного условия отбора на основе обобщенной оценки по критериям качества.

Шаг 8. Проверка на выполнение требований объектов новой популяции к внутреннему окружению. Если не все требования удовлетворены, объект участвует в дальнейшем синтезе. Осуществляется переход на шаг 3, где происходит поиск кандидатов для скрещивания, управляемый невыполненными требованиями, в противном случае — переход к шагу 9.

Шаг 9. Проверка на полноту функций, которые должна выполнять синтезируемая система. Если описание сгенерированного варианта содержит все заданные функции, описание полученного объекта включается в популяцию готовых вариантов и осуществляется переход на шаг 12, в противном случае — переход на шаг 7.

Шаг 10. Возврат к шагу 3, где генерируются новые объекты путем присоединения элементов исходной популяции к членам новой популяции (процесс управляется графом требований).

Шаг 11. Повторение шагов 3–10 до выполнения условия окончания синтеза. Таким условием является завершение обхода графа требований, включая отдельные вершины.

Шаг 12. Отбор вариантов из популяции целостных систем на основе значений функции ценности F_q . Если $F_q \geq \Delta$, то описание варианта V_q записывается в файл результатов. В задачах небольшой размерности имеет смысл сделать полный перебор, в противном случае осуществляется случайный отбор заданного числа вариантов с максимальными значениями функции F_q .

Выводы

1. Предложен метод эволюционного синтеза многомерных инновационных решений, основанный на применении механизмов естественной эволюции для соединения элементов и отбора жизнеспособных решений, особенность которого состоит в том, что описания порождаемых конструкций формируются на основе знаний экспертов, представленных в виде правил и функций. Лучшие решения отбираются на основе обобщенной меры сходства с техническим заданием. Генерируемые решения не имеют внутренних противоречий и удовлетворяют внешним требованиям.

2. Метод эволюционного синтеза инвариантен к объекту проектирования.

3. Применение метода наиболее предпочтительно на начальных стадиях проектирования (стадиях исследовательского проектирования).

4. Знания экспертов, закладываемые для решения задач проектирования определенного функционального класса технических систем, могут неоднократно использоваться при разных исходных технических заданиях.

5. Компьютерный вариант метода эволюционного синтеза позволяет получать работоспособные и оригинальные решения за короткое время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стецюра Г. С.** Эволюционные методы в задачах управления, выбора и оптимизации // Приборы и системы управления. 1998. № 3. С. 54–62.
2. **Норенков И. П., Косачевский О. Т.** Генетические алгоритмы комбинирования эвристик в задачах дискретной оптимизации // Информационные технологии. 1999. № 2. С. 2–7.
3. **Курейчик В. М.** Генетические алгоритмы. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 242 с.
4. **Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения). М.: Машиностроение, 1998. 476 с.
5. **Андрейчиков А. В., Киселев А. С.** Эволюционный синтез новых технических систем на основе морфологических таблиц // Известия вузов. 2002. № 2–3. С. 44–48.
6. **Андрейчиков А. В.** Интеллектуальный метод синтеза технологических инноваций // Известия вузов. 2003. № 10. С. 47–62.
7. **Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** Интеллектуальные информационные системы. М.: Финансы и статистика, 2004. 464 с.