ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ [1]

В работе предлагается подход к решению задач оптимального управления, основывающийся на построении последовательности оптимизационных алгоритмов — многометодной процедуре оптимизации. Последовательность является новым оптимизационным алгоритмом, состоящим из некого набора базовых, выбор которых осуществляется экспертной системой на основе анализа задачи и алгоритмов, а также экспертных знаний о них. Описывается архитектура программного комплекса для реализации предлагаемого подхода.

1 Введение

Несмотря на то, что задача оптимального управления давно является классической и разработана масса методов и приемов для улучшения управления динамическими системами, работа по созданию новых алгоритмов не теряет своей актуальности. Этот факт можно объяснить тем, что сами задачи довольно разнообразны и невозможно предложить некоторый универсальный подход, который показал бы себя одинаково эффективно для всех возможных постановок. Более того, нередко для той или иной сложной задачи создавался свой уникальный метод решения. С другой стороны, часто прикладные задачи решаются неэффективными для них алгоритма-

[1]Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 00-01-00731

ми только потому, что для практика поиск и выбор наиболее подходящего для его задачи алгоритма — не менее сложная проблема, чем решение исходной, так как существует великое множество алгоритмов и их вариаций, зачастую различно формализованных, что усложняет их классификацию и отбор.

Очевидно, что на сегодняшнем этапе развития теории управления подобный экстенсивный подход неприемлем. Выход видится в создании интеллектуальных систем, позволяющих накапливать, описывать и далее выбирать и комбинировать различные методы в эффективных *многометодных* процедурах поиска. Отметим, что прежде предпринимались определенные усилия в этом направлении [1], [2], [3].

В данной статье предлагается архитектура Интеллектуальной Системы поддержки построения процедур Оптимизации Управления (ИСОУ), включающая классификацию задач и методов оптимального управления по признакам, существенным для генерирования процедур оптимизации, банк методических и тестовых задач для отладки отдельных методов и процедур в целом.

Интеллектуальные системы использовались ранее для генерирования алгоритмов в задачах распознавания образов [4], решения оптимизационных задач топологического синтеза методами генетического поиска [5]. Однако, применение интеллектуальных процедур для широкого класса оптимизационных задач, требующих использования разнообразных алгоритмов — задача более широкая и требует отдельного рассмотрения.

2 Архитектура ИСОУ

Архитектура предлагаемой интеллектуальной системы в целом и наиболее существенные ее детали представлены на рисунках 1 – 3.

Как видно из Рис. 1, она ориентирована на автоматизацию естественной схемы решения прикладной проблемы от формулировки соответствующей математической задачи до практической интерпретации решения последней. В целом она отражает неформальный, творческий процесс поиска решения, хотя и включает следующие компоненты:

- методика математической формализации исходной прикладной проблемы, включая составление паспорта задачи по классификационным признакам (рассчитана на конечных пользователей — "держателей прикладных задач");
- библиотека методов с паспортами;
- библиотека методических (тестовых) задач для настройки/отладки методов;
- процедура предварительного отбора группы методов, подходящих для данной задачи по формальным признакам (сопоставление паспортов задачи и методов);
- база знаний, содержащая наборы правил создания многометодных процедур;
- процедура настройки метода (выбора его параметров); Рисунок 1

– формализация исходной прикладной задачи и интерпретация решения формализованной задачи (выполняется конечным пользователем);

– построение окончательной процедуры оптимизации с выбором наилучших методов из отобранных (Рис. 2) (выполняется экспертной системой);

– накопление знаний на основе успешных решений задач, уточнение классификации задач и методов (производится конечным пользователем при инструментальной поддержке экспертной системы).

Рисунок 2

Предусматривается несколько уровней функционирования ИСОУ (Рис. 3) в зависимости от характера "элементарных операций"того или иного метода в применении к конкретной задаче. Так, типичной "элементарной операцией"для методов оптимального управления сосредоточенными системами служит конечномерная задача оптимизации (математического программирования). Она может оказаться достаточно сложной и потребовать определения стратегии решения на втором уровне с выбором подходящих методов.

Рисунок 3

Такая система позволяет, в частности, четко разделить функции "держателей прикладных задач"и "держателей методов". От первых здесь требуется только умение правильно поставить математическую задачу в принятой стандартной форме и указать ее классификационные признаки, от вторых — указание, для какого класса задач предлагаемый метод применим или наиболее эффективен, и как он должен быть настроен на конкретную задачу.

Например, такую классификацию задач можно построить по признакам, предлагаемым в [1].

1. Назначение
   1.1 Отладка методов, алгоритмов и отдельных модулей
   1.2 Сравнение эффективности готовых алгоритмов
   1.3 Тестирование, контроль методов и алгоритмов
   1.4 Имитация прикладных задач при настройке – адаптации алгоритмов
   1.5 Обучение Пользователя
2. Тип задачи
   2.1. Тип аргумента
      2.1.1. Размерность аргумента
         2.1.1.1. Одномерный аргумент (задача сосредоточенная)
         2.1.1.2. Многомерный аргумент (распределенная)
      2.1.2. Непрерывность аргумента
         2.1.2.1. Непрерывный
         2.1.2.2. Дискретный
         2.1.2.3. Комбинированный
   2.2. Особенности задачи
      2.2.1. Структурные особенности
         2.2.1.1. Линейная
         2.2.1.2. Линейно-квадратичная
         2.2.1.3. Выпуклая

2.2.1.4. Билинейная

2.2.1.5. Специальная

2.2.1.6. Общего типа

2.2.2. Характер ограничений

2.2.2.1. Со свободным правым концом

2.2.2.2. С терминальными ограничениями

2.2.2.3. Без ограничений на управление

2.2.2.4. С фазовыми ограничениями

2.2.2.5. Со смешанными ограничениями

2.2.2.6. Со специальными ограничениями

2.2.2.7. Общего типа

2.2.3. Вырожденность

2.2.3.1. С ограниченным множеством скоростей

2.2.3.2. С неограниченным множеством скоростей

2.2.4. Вычислительные особенности

2.2.4.1. Большой размерности

2.2.4.2. Со сложной структурой данных

2.2.4.5. Общего типа

Разумеется, данная классификация требует дальнейшей доработки и детализации, особенно в разделе 2.1.1.2. "Распределенные задачи", который представляет обширный круг разнообразных задач управления. Для него могут быть использованы результаты, полученные в [6].

3 Роль вычислительных экспериментов

Очевидно, что на всех этапах построения общей процедуры решения задачи — при выборе метода, его настройки, тестировании исключительно важную роль будет играть широкий методический вычислительный эксперимент. В значительной мере это связано с особенностями задач оптимального управления, заставляющими выделять их в особый класс вычислительных проблем поиска в функциональном пространстве по сравнению с другими задачами подобного рода, такими как решение дифференциальных или интегральных уравнений. Во-первых, для них характерно отсутствие решения в традиционном понимании как элемента того множества, в котором согласно постановке требуется вести поиск. Можно говорить о решении в терминах минимизирующей последовательности, подчас весьма сложной конструкции, такой как скользящий, импульсный или циклический скользящий режим [7]. Во-вторых, для многих задач типична вырожденность — присутствие в системе ограничений скрытых пассивных связей, что делает их нерегулярными с точки зрения наиболее известных общетеоретических методов, в частности некорректными по Тихонову [8]. В-третьих, если не считать сравнительно узкого класса линейных и выпуклых задач, не существует общих законченных алгоритмов поиска их решения хотя бы в принципе — даже если есть уверенность в его существовании; имеются лишь косвенные признаки решения, такие как необходимые условия локального минимума, которым наряду с искомым объектом могут отвечать и иные "паразитные", причем их множество может быть бесконечным или даже континуальным.

Ясно, что в такой пестрой и динамичной ситуации одних лишь качественных экспертных оценок при выборе методов, не говоря уже об их настройке, далеко недостаточно. Необходимы вычислительные эксперименты с использованием богатого набора методических и тестовых задач. Задачи, предназначенные для методических экспериментов, должны обладать, по крайней мере, тремя общими свойствами: отражать цель эксперимента, иметь известное решение и быть достаточно простыми или хотя бы не слишком трудоемкими. Отметим что один из возможных принципов выбора метода среди итерационных — по степени близости конкретной задачи к той базовой модели, которая лежит в основе метода, т.е. в которой он должен давать решение за одну итерацию. В этом смысле линейной задаче соответствует метод первого порядка, линейно-квадратической – метод второго порядка. Определение базовой модели может быть одной из целей экспериментального анализа в менее очевидных для теории случаях. Не менее важна в такой ситуации роль методических экспериментов в обеспечении доходчивости, наглядности материалов, передаваемых пользователю, в частности описаний и инструкций, обеспечении его пользователя. Хорошо подготовленный наглядный пример или набор примеров может быть намного информативнее какого-нибудь скрупулезного строгого трактата. Очевидно, требуется достаточно большое разнообразие методических задач и возможностей их генерирования и соответственно развитая система их ведения, т.е. хранения, пополнения и использования, если мы не хотим при организации методических вычислительных экспериментов каждый раз создавать заново экспериментальную базу. Таким образом, возникает представление о банке методических задач, который может быть построен на основе принятой классификации, пример которой представлен выше. Что касается его содержания, то на основании имеющегося опыта можно сказать, что одним из наиболее богатых источников материалов для построения методических задач служат многочисленные иллюстративные примеры из руководств и теоретических работ.

4 Пример многометодной процедуры

Для иллюстрации предлагаемого подхода, рассмотрим простейшую задачу оптимизации и построим многометодную процедуру её решения так, как бы построила ее интеллектуальная система. Заметим также, что хоть речь и шла о задаче оптимального управления, но даже для существенно более простой конечномерной задачи подход создания "составной"процедуры также применим и эффективен.

Пусть требуется найти минимум функции

$$f(x,y) = y^3 + 3x^2, \quad |x| \leq 10, \quad |y| \leq 10 \tag{1}$$

на заданном компакте с точностью $d = 0.01$. Очевидно, что минимум достигается на границе компакта в точке (0, -10).

Заметим, что функция (1) имеет в точке (0, 0) перегиб, поэтому для численных процедур, базирующихся на использовании первой производной, этот факт может помешать нахождению решения задачи. Покажем, как, используя ряд алгоритмов, которые в случае автономного использования не достаточно эффективны для решения поставленной задачи, могут успешно комбинироваться и приводить к решению.

Пусть банк методов состоит из трех следующих алгоритмов:

A1 — случайного поиска;

A2 — градиентного спуска;

A3 — перебора на сетке.

Выписывается система правил, при помощи которых будет построена многометодная процедура решения задачи (1).

Предлагается следующий набор правил.

Правило 1. (Начальное приближение)

Если начальное приближение не задано, то для его поиска используется алгоритм A1.

Правило 2. (Выбор алгоритма)

Проводится "конкурс алгоритмов"среди A2, A3. Производится их параллельный запуск и сравниваются результаты. Если улучшение произошло, то выбирается наиболее успешный.

Правило 3. (Проверка границ)

Если значение, полученное в результате предыдущей итерации выходит за границу, то процедура завершается, в качестве ответа возвращается значение функции на границе.

Правило 4. (Проверка точности)

Если значение функции на предыдущей и текущей итерациях различаются не более чем на d и никакой алгоритм не дает улучшения, то процедура завершается и текущее значение функции возвращается в качестве ответа.

Результаты вычислений приведены в следующей таблице. Таблица 1

Здесь в столбце "Алгоритм"отмечен алгоритм, использовавший на данной итерации, затем идет номер итерации, полученная точка и значение функции в ней. В ходе применения описанных выше правил строится многометодная процедура, в которой чередуются алгоритмы с A1 по A3. Использование алгоритма A3 (перебора на сетке) на 8 итерации обусловлено тем, что алгоритм A2 (градиентного спуска) "упирается"в точку перегиба, поэтому на "конкурсе алгоритмов"в данном случае лучшим является A3, не зависящий от значения производной. На 12 итерации найденная точка выходит за границу области и процедура завершается. В соответствии с Правилом 3 минимумом функции (1) на заданном компакте будет точка (0.0001, -10) по значением $f = -1000$.

Несмотря на простоту использованной схемы поведения, даже в таких элементарных действиях просматривается немалая гибкость, которая позволяет перечисленным базовым алгоритмам взаимодополнять друг друга и избегать присущих им каждому в отдельности ограничений. Очевидно, что исследователю предоставляется достаточная свобода при конструировании подобных многометодных процедур, варьируя как сами базовые алгоритмы, так и логику их использования, изменяя систему правил.

Вместе с системой правил, можно использовать и другие варианты построения процедур: жестко заданные схемы следования алгоритмов, с вариацией лишь параметров конкретных алгоритмов; выбор алгоритмов на основе классификации задач и методов их решения с присвоением задачам "паспорта"; выбор задач на основе экспертного анализа задачи и т.п.

Приведенный пример является простейшей модельной задачей, иллюстрирующей саму суть предлагаемого подхода, однако часть описанных принципов создания многометодных процедур в задачах оптимального управления уже прошли свою апробацию при нахождении оптимального управления для социо-эколого-экономической модели региона [9]. Был создан программный комплекс [10], занимающийся поиском оптимальной стратегии развития региона, причем поиск решения проводился в несколько этапов различными методами. Упоминаемый программный комплекс был не лишен недостатков, которые и призван устранить программных продукт, базирующийся на предлагаемых принципах.

5 Заключение

Все сказанное выше следует рассматривать как инициативу, обращенную к широкому кругу специалистов, прежде всего — в области оптимального управления — по решению весьма злободневной проблемы эффективного взаимодействия теоретиков и практиков. Как видно из описания предлагаемого подхода, его реализация должна вылиться в крупномасштабную и достаточно длительную программу работ с привлечением многих заинтересованных участников.

Предлагаемая методика позволит более эффективно распространять и использовать алгоритмы. От производителей алгоритмов будет требоваться только строгое следование определенным интерфейсным требованиям, определяющим процедуры взаимодействия методов. Распространение и обмен с использованием Интернет становится лишь вопросом создания ряда web-страниц, посвященных этому проекту. Данный подход может иметь большое будущее, так как его результатом будет свободно распространяемая открытая система, позволяющая вовлекать в работу по ее развитию самых разных специалистов. Для начала подобной работы нужно лишь четко описать архитектуру предлагаемого продукта и принципы его работы, после чего можно выполнять пробные реализации как основной системы, так и отдельных ее компонентов.

Что же до скепсиса по поводу скорости работы алгоритма, получаемого при таком подходе, то при нынешнем развитии вычислительной техники и параллельных вычислений, любая возможность разгрузить человека — есть повышение эффективности и скорости решения задачи, так как в отличие от способностей человека, мощности вычислительной техники неуклонно растут.

Разумеется, рассматриваемый подход относится не только к оптимальному управлению, но и к любой другой области, где используются математические модели и методы, и может быть применен в решении соответствующих задач.

Для расширения круга возможных участников обратим внимание на то, что предлагаемая система, независимо от ее продекларированного назначения как пользовательского инструмента для прикладников, неизбежно будет многофункциональной. Она может использоваться, например, как справочник методов и методических задач, экспериментальная база для активизации и отладки новых методов или обучающая система.

При этом отдельные ее функции реализуются поэтапно задолго до построения системы в целом. Важно также иметь в виду, что общая часть ИСОУ может рассматриваться как "оболочка"для аналогичных систем в других областях и при создании четко определить ее границу с предметной частью (банк методов и модельных задач, паспортизация и пр.). Для пополнения библиотеки методов и других содержательных материалов создаваемой системы могут служить регулярные аналитические обзоры публикаций и анкетирование участников программы. При создании экспертной системы потребуются более тесные контакты между участниками, реализуемые через прямые телекоммуникации и другие эффективные способы их взаимодействия с использованием возможностей и технологий Интернет. Современные Интернет- технологии обеспечат также эффективное использование готовой системы в целом или отдельных ее функций широким кругом пользователей.

Сложность системы и неизбежная длительность ее разработки предъявляют особые требования к программному комплексу — открытость и доступность его "ядра"для заинтересованных специалистов; обеспечение преемственности при разработке; простота в использовании и модификации. Эти особенности уже учитываются при проектировании системы, тем более развитие глобальных компьютерных сетей позволяет рассчитывать на то, что в случае грамотно спроектированной открытой системы к ее развитию смогут подключиться многие заинтересованные специалисты, пополняя библиотеку алгоритмов, описывая системы правил, проводя классификацию задач и методов их решения, предоставляя тестовые задачи и т.д. Мы надеемся, что эта работа вызовет интерес в университетской среде и позволит привлечь студентов и молодых ученых к активному участию в проекте.

Список литературы

[1] Методы улучшения в вычислительном эксперименте. — Новосибирск: Наука, 1988.

[2] Новые методы улучшения управления. — Новосибирск: Наука, 1987.

[3] Тятюшкин А.И. Численные методы и программные средства оптимизации управляемых систем. — Новосибирск: ВО "Наука", 1992.

[4] Журавлев Ю.И. Об алгебраических методах в задачах распознавания и классификации// Распознавание. Классификация. Прогноз. Математические методы и их применение. Вып. 1. - М.: Наука. 1989. С. - 9–16

[5] Лебедев Б.К. Методы поисковой адаптации для решения оптимизационных задач. // Новости искусственного интеллекта, М., 2000, №3, с. 202 – 207.

[6] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. — М: Наука, 1975.

[7] Гурман В.И. Принцип расширения в задачах управления.— М.: Наука.Физматлит, 1985, 1997.

[8] Вырожденные задачи оптимального управления. — М: Наука, 1977.

[9] Моделирование социо-эколого-экономической системы региона/Под ред. В.И. Гурмана, Е.В. Рюминой. — М: Наука, 2001.

[10] Белышев Д.В., Шевчук Е.В. Алгоритм и программный комплекс для поиска оптимального управления// Интеллектуальное управление: Новые интеллектуальные технологии в задачах управления (ICIT'99). - Труды Международной конференции, Переславль-Залесский, 6-9 декабря 1999. - М.: Наука, Физматлит, 1999. - С. 146 - 150.

Таблица 1

Алгоритм	**Итерация**	**Точка,** (x, y)	**Значение,** $f(x, y)$
(А1) Случайного поиска	1	(10, 2)	308
(А2) Градиентного спуска	2	(2.80, 0.56)	23.70
	3	(0.78, 0.44)	1.93
	4	(0.22, 0.37)	0.19
	5	(0.61, 0.32)	0.04
	6	(0.01, 0.28)	0.02
	7	(0.004, 0.25)	0.01
(А3) Перебор на сетке	8	(-0.005, -1.24)	-1.92
(А2) Градиентного спуска	9	(0.002, -1.7)	-5.0
	10	(0.0008, -2.58)	-17.2
	11	(0.0003, -5.57)	-96.0
	12	(0.0001, -10.8)	-1281.7

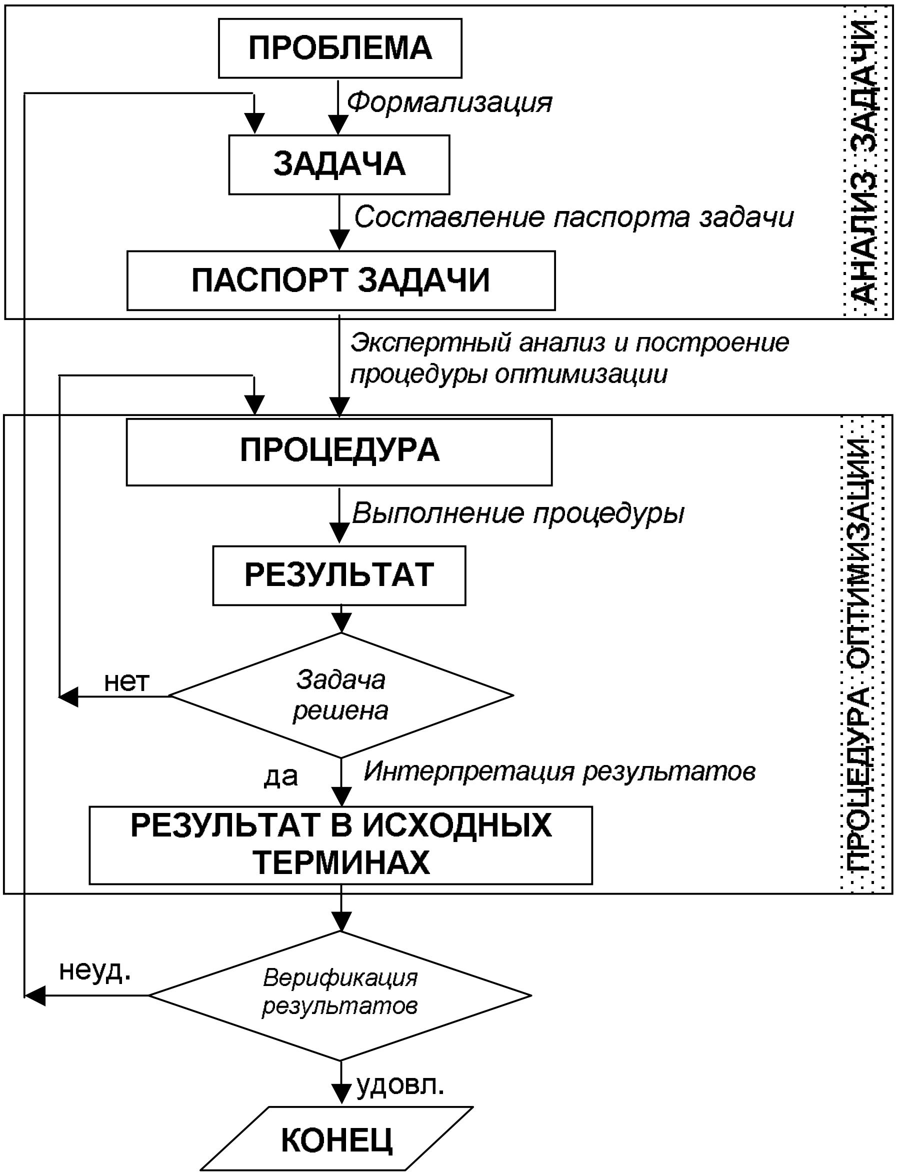

Рис 1. Архитектура ИСОУ

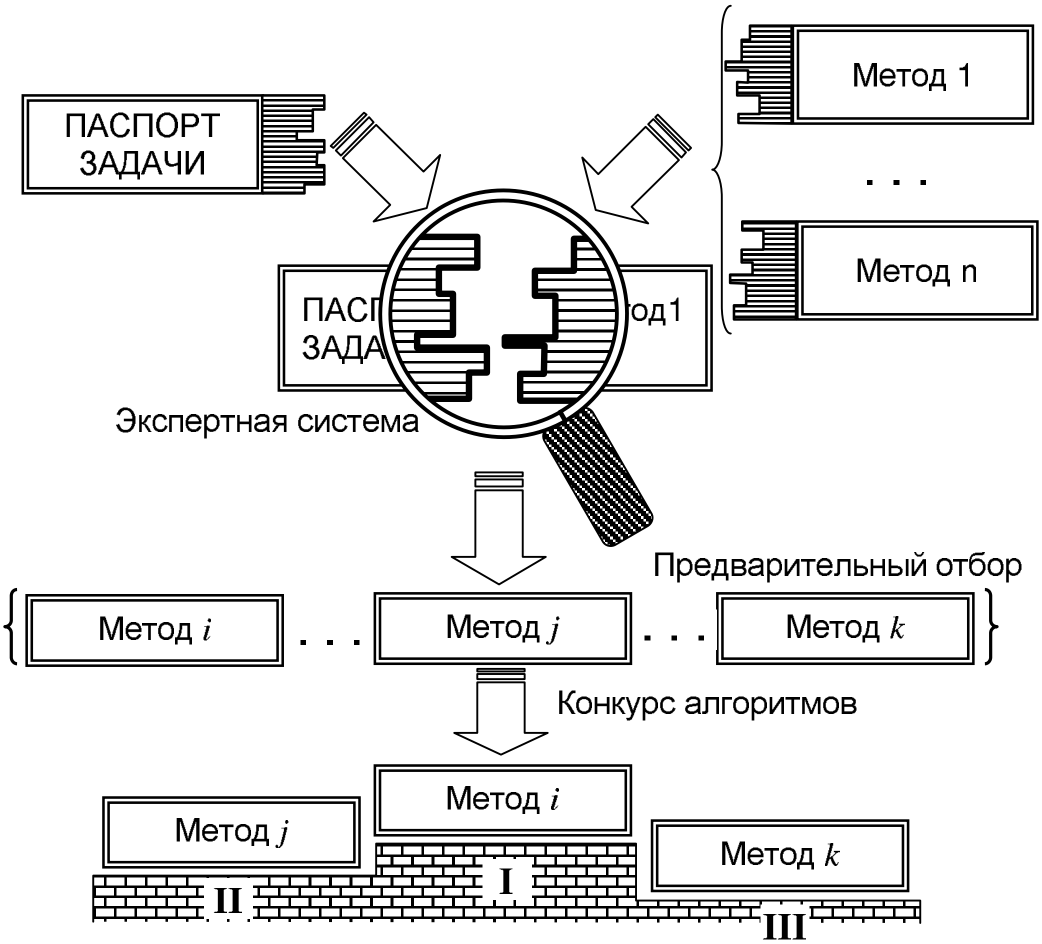

Рис 2. Отбор методов

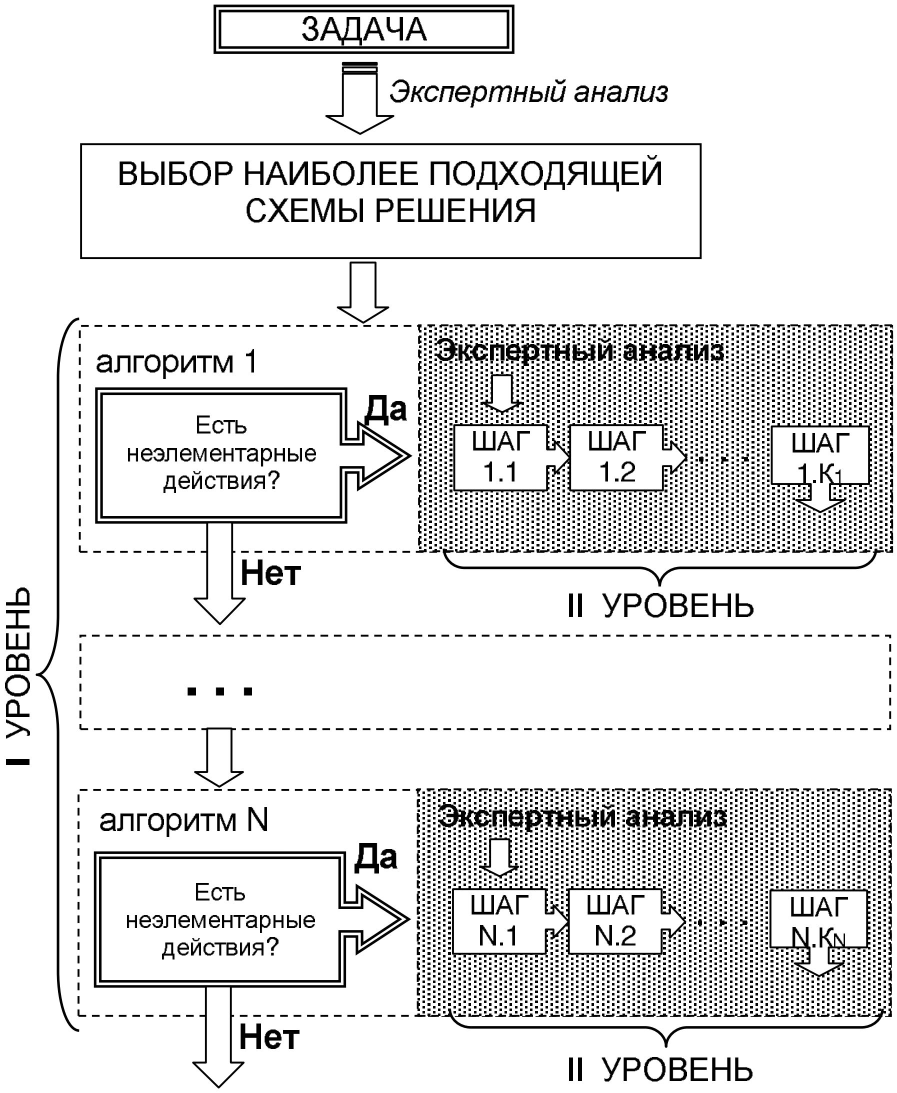

Рис 3. Схема многометодной процедуры оптимизации