

УДК 05.13.11

Автоматизация решения задач оптимизации при проектировании аэрокосмической техники

Бродский А.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail:brodski1954@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена актуальным вопросам разработки программных компонент САПР. Предлагается подход, который на основе анализа структурных свойств математической модели проектируемого изделия позволяет обеспечить переход от вербального описания исходной задачи к ее формальной постановке и оценить ее корректность. Рассмотрены этапы процесса решения задач оптимизации, сформулированы требования к средствам их автоматизации, выделены основные операторы и сформирована схема их функционирования.

Ключевые слова: процесс проектирования, САПР, задача оптимизации, метод оптимизации, математическая модель, структурные свойства, операторная схема

Задачи оптимизации являются одними из наиболее часто решаемых в процессе проектирования изделий аэрокосмической техники. Это определяется тем, что по своей сути проектирование представляет собой поиск технических решений, удовлетворяющих техническому заданию и обеспечивающих экстремальные

значения некоторых оценивающих качество проектов критериев, т.е. оптимальных решений.

Определение всей совокупности решений, составляющих проекты таких сложных изделий как летательные аппараты, не может быть реализовано как решение единой задачи вследствие ее чрезвычайно большой размерности. Поэтому проектирование изделий аэрокосмической техники сводится к выполнению многоэтапной последовательности действий, состоящих из автономного выполнения взаимосвязанной совокупности проектных процедур и согласования получающихся при этом результатов. При этом автономное выполнение проектных процедур связано, в основном, с выбором проектных решений и сводится, в общем случае, либо к управляемому построению точек Парето, базирующемуся на решении задач скалярной оптимизации, либо к непосредственному решению задач такого рода. Задачи согласования результатов автономного выполнения проектных процедур в значительной части также носят оптимизационный характер[1].

Среди вспомогательных задач, которые требуется решать в процессе проектирования, задачи оптимизации также занимают одно из центральных мест. Например, задача параметрической идентификации, решение которой обеспечивает соответствие используемых при проектировании математических моделей известным экспериментальным данным.

В то же время имеется ряд факторов, препятствующих широкому и эффективному использованию достаточно хорошо разработанного аппарата решения задач оптимизации в практике проектирования. Одним из основных можно

назвать то, что, начиная от момента постановки задачи и кончая получением результатов, процесс решения практических задач оптимизации основывается на неразрывной связи между знаниями в области проектируемого изделия и области математических методов оптимизации. А, учитывая, что подавляющее большинство практических задач допускает исключительно численное решение, еще и знаниями в области программирования. Это означает, что или проектировщик должен обладать достаточными знаниями во всех трех названных областях, или к решению каждой практической задачи помимо проектировщика должны привлекаться математик и программист, что в свою очередь определяет необходимость организации их согласованной деятельности.

Выходом из создавшегося положения является создание средств автоматизации решения задач оптимизации (САРЗО). При этом целеполагающим условием разработки такого рода средств должны являться ориентация на использование их проектировщиками – непосредственными постановщиками практических задач, принимающими со всей мерой возложенной на них ответственности проектные решения по результатам выполнения этих задач. Исходя из названного условия, рассмотрим основные этапы решения задачи оптимизации, определим характер производимых при их выполнении действий, а также требования, предъявляемые к средствам автоматизации выполнения этих этапов.

В общем случае процесс решения задач оптимизации состоит из шести этапов (рис.1).

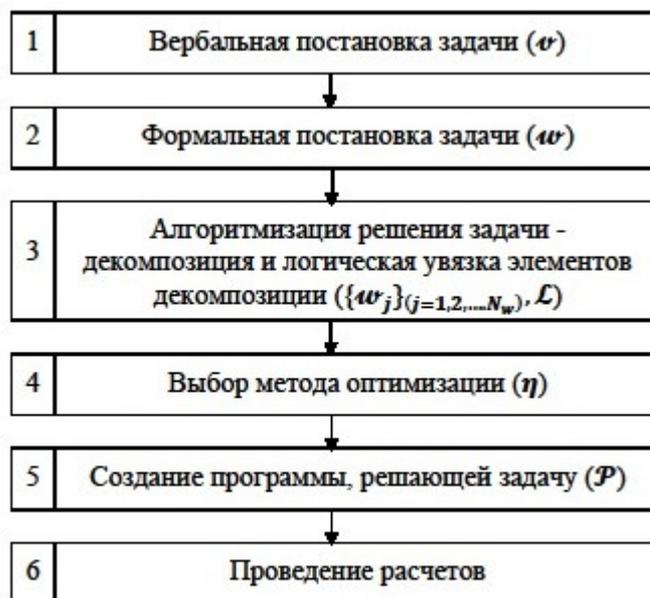


Рис. 1.- Этапы процесса решения задач оптимизации

Первый этап – вербальное описание задачи оптимизации на естественном языке с использованием инженерных наименований из рассматриваемой прикладной области. Например, найти эквивалентную толщину $s_{кр}$ и стреловидность δ крыла летательного аппарата (ЛА), которые обеспечивают минимум приведенных затрат $a_{пр}$ при заданных весе коммерческой нагрузки $G_{кн}$, расчетной дальности полета $L_{расч}$ и ограниченной нагрузке на крыло при взлете p_0 ($p_0 \leq \hat{p}_0$). Этот этап осуществляет непосредственно проектировщик, а его результаты, обозначаемые далее Ψ , являются основой для всех последующих этапов.

Следующий этап связан с переходом от вербального описания к формальной постановке задачи (далее будем ее обозначать W). Данный переход является необходимым для использования формальных методов решения поставленной задачи.

Формальная постановка задач оптимизации может быть определена следующими компонентами:

K – критерием;

X – вектором фиксированных параметров;

Y – вектором выбираемых параметров, которые называются также варьируемыми или управляемыми;

Z – вектором ограниченных параметров;

$\hat{X} = \{\hat{X}^1, \hat{X}^2, \dots, \hat{X}^{N_x}\}$ – принятым значением вектора фиксированных параметров, где \hat{X}^i – значение i -й компоненты вектора $X = \{X^1, X^2, \dots, X^{N_x}\}$, N_x – размерность вектора X ;

D_Y – множеством рассматриваемых значений варьируемых параметров, которое в силу взаимной независимости этих параметров задается в виде: $D_Y = \prod_{t=1}^{N_Y} [Y^{t_1}, Y^{t_2}]$, где Y^{t_1}, Y^{t_2} – нижняя и верхняя границы, соответственно, рассматриваемых значений t -ой компоненты вектора $Y = \{Y^1, Y^2, \dots, Y^{N_Y}\}$, N_Y – размерность вектора Y ;

D_Z – множеством допустимых значений ограниченных параметров $Z = \{Z^1, Z^2, \dots, Z^{N_Z}\}$, задаваемым, как правило, в виде $D_Z = \prod_{t=1}^{N_Z} [Z^{t_1}, Z^{t_2}]$, где Z^{t_1}, Z^{t_2} – определяется аналогично Y^{t_1}, Y^{t_2} , N^Z – размерность вектора Z ;

$f(X, Y)$ – функцией, определяющей значения критерия (целевая функция);

$h(X, Y, Z)$ – вектором ограничений типа равенств.

При этом без нарушения общности параметрические ограничения типа неравенств вида $g(X, Y) \leq 0$ могут быть приведены к ограничениям типа равенства $h(X, Y, Z) = g(X, Y) + a = 0$ и ограничениям на параметр: $a \geq 0, a \in Z$

В общем случае

$$w = \langle K, X, Y, Z, \hat{X}, D_y, D_z, f, h \rangle. \quad (1)$$

Переход от вербальной к формальной постановке задачи состоит в соответствующем назначении приведенных в (1) компонент. При этом компоненты $K, X, Y, Z, \hat{X}, D_y, D_z$ непосредственно присутствуют, возможно в синтаксически иной форме, в вербальном описании задачи и несложно определяются из него. Так, для приведенного выше примера: $K = a_{пр}$, $X = \{G_{кн}, L_{расч}\}$, $Y = \{c_{кр}, x\}$, $Z = p_0$, $\hat{X} = \{\hat{G}_{кн}, \hat{L}_{расч}\}$, $D_y = [0, \hat{c}_{кр}] \otimes [0, \hat{x}]$, $D_z = [0, \hat{p}_0]$.

В дальнейшем для простоты изложения будем считать

$$v = \langle K, X, Y, Z, \hat{X}, D_y, D_z \rangle \quad (2)$$

и представлять задание вербального описания проектировщиком как оператор S1.

Другая группа компонент – целевая функция и параметрические ограничения – непосредственно вытекает из физических законов функционирования и практики проектирования изделий рассматриваемого класса и назначения, технического задания на проектирование и существующих нормативных документов. Другими словами, данные компоненты определяются спецификой проектируемых изделий (в приведенном примере – спецификой ЛА). Их назначение в настоящее время является прерогативой проектировщика и основывается на использовании накопленного опыта и знаний в области, относящейся к проектируемому изделию.

Формальная постановка задачи w должна удовлетворять ряду определенных математических правил. Например, варьируемые переменные должны быть независимы, область значений этих переменных, удовлетворяющих наложенным

ограничениям, должна быть непустой и т.п. В основе этих правил лежит ряд формальных условий, что позволяет рассчитывать на автоматизацию процедуры перехода к формальным постановкам.

С другой стороны их нарушение означает, что задача в сформулированной постановке оказывается некорректной. При этом, как правило, имеется несколько вариантов ее корректировки. Например, при выявлении взаимозависимости некоторой пары варьируемых переменных любая из них должна быть выведена из состава варьируемых. Выбор этой переменной, безусловно, должен производиться из проектных соображений. Но в то же время, на этот выбор в ряде случаев должны влиять и соображения по обеспечению разумной трудоемкости решения поставленной задачи. Данное обстоятельство связано с тем, что для задач, не отличающихся в их практическом содержании, но отличающихся в их формальном представлении, возможно применение различных методов и алгоритмов. В частности, одни из возможных вариантов коррекции могут приводить к задачам условной оптимизации, а другие – к задачам безусловной оптимизации, трудоемкость решения которых сильно отличается. Оценка различных вариантов формальных постановок задачи с точки зрения организации их рационального решения также базируется на определенных формальных правилах и поэтому может быть возложена на средства автоматизации.

Таким образом, формализация вербальных постановок задач оптимизации представляет собой достаточно сложную процедуру. Результаты выполнения этой процедуры в значительной степени определяют как трудоемкость, так и

практическую полезность результатов решения формируемой формальной задачи. Реализация данной процедуры основывается на знаниях в области конкретного проектируемого изделия и в области теории оптимизации и нуждается в ее автоматизации, при которой знания в области оптимизации в виде соответствующих правил определяют алгоритмы функционирования средств автоматизации.

Исходя из сказанного и учитывая целеполагающее условие ориентации САРЗО на проектировщиков, можно сформулировать следующие требования:

требование 1 - возможность автоматического формирования формальных задач оптимизации по их вербальному описанию;

требование 2 – возможность диагностирования некорректностей в вербальных описаниях задач и представление в виде, ориентированном на проектировщиков, информации об обнаруженных некорректностях, а также о вариантах их устранения с оценками предпочтительности выбора каждого из этих вариантов с точки зрения вычислительной трудоемкости решения задачи, получаемой при соответствующей корректировке.

Рассмотрим содержание этих требований. Учитывая (1) и (2), из которых следует $v \subset w, w \setminus v = \{f, h\}$, получаем, что в основе формирования формальной постановки задач оптимизации по их вербальному описанию лежит дополнение компонент $K, X, Y, Z, \hat{X}, D_Y, D_Z$, непосредственно вытекающих из вербального описания, целевой функцией $f(X, Y)$ и параметрическими ограничениями $h(X, Y, Z) = 0$, которые описывают взаимосвязи между этими

компонентами. Данные взаимосвязи, как уже отмечалось, отражают накопленные знания и опыт в области проектируемых изделий.

Тогда, обозначив знания и опыт в области проектируемых изделий через m , можно считать, что $\{f, h\} \subseteq m$, а рассматриваемую процедуру получения формальной постановки представить как реализацию некоторого оператора

$$A1: \{v, m\} \Rightarrow w.$$

Для реализации данного оператора необходимо, чтобы информация m была доступна САРЗО. В предлагаемом подходе это условие обеспечивается тем, что в ней данные средства рассматриваются как компонента САПР, неизменными составляющими которых являются присутствующие в «машинном» виде (например, в виде пакетов прикладных программ) математические модели, отражающие знания и опыт в области исследования различного рода аналогов проектируемых изделий[2]. При этом пополнение и модификация m не исключаются, но возлагаются не на САРЗО, а на другие средства САПР. В результате на этапе функционирования САРЗО доступная информация m является неизменной.

В дальнейшем полагаем, что отношения, входящие в m , содержат достаточную и непротиворечивую информацию о проектируемом изделии. Тогда, опираясь на правильность функционирования оператора $A1$, для введенного выше требования 2 можно заключить, что возможная некорректность постановки формальной задачи w связана с некорректностью ее исходного вербального описания v . В этом случае требуется предоставить проектировщику информацию об источниках некорректности в сформулированном им вербальном описании и о

вариантах устранения этих некорректностей с оценкой предпочтительности выбора каждого из вариантов. Выполнение требования 2 будем представлять как реализацию некоторых рассматриваемых ниже операторов A2, A3, A4, в результате функционирования которых получается корректная формальная постановка задачи, обозначаемая далее \bar{w} .

Оператор A2 должен проверять корректность формальной задачи оптимизации:

$$A2: w \Rightarrow \beta,$$

где β — логическая переменная. Если β принимает значение «истина», то $\bar{w} = w$.

Операторы A3 и A4 должны выполняться только, если формальная задача некорректна. При этом оператор A3 должен выделять из w те компоненты, которые нуждаются в корректировке (обозначим их Δ):

$$A3: (v, w) \Rightarrow \Delta, \Delta \subseteq v.$$

Оператор A4 должен формировать множество возможных вариантов корректировки исходного вербального описания задач оптимизации:

$$A4: (v, m, \Delta) \Rightarrow \{Q_\ell, \pi_\ell\}_{(\ell=1,2,\dots,N_Q)},$$

где Q_ℓ — ℓ -й вариант корректировки задачи; π_ℓ — оценка предпочтительности ℓ -го варианта корректировки; N_Q — число вариантов корректировки.

Имеется в виду, что выбор конечного варианта на основе полученной информации должен производить проектировщик, действия которого в этом случае будем представлять как функционирование некоторого оператора

$$S2: (v, \{Q_\ell, \pi_\ell\}_{\ell=1,2,\dots,N_Q}) \Rightarrow \hat{w}.$$

В итоге функционирования названных операторов выполняется этап формирования корректной формальной постановки задачи оптимизации по ее вербальному описанию.

Следующий этап решения задач оптимизации связан с алгоритмизацией процедур решения этих задач. Одной из основных проблем при этом является определение возможности решения исходной задачи по частям. Такая потребность связана с тем, что в ряде случаев исходная задача может быть сведена к решению совокупности задач меньшей размерности. Также всегда полезно, например, вывести часть требующихся расчетов из циклов оптимизации.

Составление алгоритма, в котором правильно учтены указанные возможности, в значительной степени определяет вычислительную эффективность решения задач оптимизации и основывается на формальных правилах разложения исходной задачи на ее составляющие. Эти правила, в основном, также могут быть формализованы, что позволяет определить следующее требование к САРЗО:

требование 3 – возможность проведения декомпозиции исходной задачи оптимизации и построения алгоритма, обеспечивающего эффективное решение поставленной задачи. В данном случае требуется представить исходную задачу \hat{w} в виде пары $(\{\omega_j\}, \mathcal{L})$, где $\{\omega_j\}_{j=1,2,\dots,N_w}$ – множество отдельно решаемых задач, часть из которых может иметь расчетный, а часть – оптимизационный характер; \mathcal{L} – логика перехода от решения одной задачи из $\{\omega_j\}$ к другой.

В дальнейшем процессе алгоритмизации исходной задачи \tilde{w} будем представлять как реализацию оператора

$$A5: (\tilde{w}, m) \Rightarrow (\{w_j\}_{j=1,2,\dots,N_w}, L).$$

Необходимо отметить, что выбор того или иного варианта корректировки исходного вербального описания задачи приводит к различным формальным постановкам, для каждой из которых может быть построен свой алгоритм решения. Поэтому, строго говоря, наиболее полная информация о предпочтениях различных вариантов корректировки, т.е. данные $\{\pi_\ell\}_{\ell=1,2,\dots,N_Q}$, может быть получена только после выполнения оператора A5.

Четвертым этапом решения задач оптимизации является выбор метода решения сформированной задачи. Этот этап связан с тем, что методы оптимизации вряд ли когда-нибудь достигнут уровня методов линейной алгебры, в которых, например, заранее можно дать конкретные гарантии относительно результатов. Поэтому при использовании методов оптимизации всегда необходимо уметь разумно интерпретировать получаемые результаты, оценивая тем самым пригодность используемого метода. При этом предполагается, что для решения конкретной задачи всегда существует несколько пригодных методов.

В дальнейшем множество методов, применимых для решаемой задачи оптимизации, будем обозначать через $H = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{N_H}\}$, а выполнение рассматриваемого этапа решения задач оптимизации будем рассматривать как реализацию оператора

$$A6: (w_\ell, H) \Rightarrow \eta_\ell, \eta_\ell \in H.$$

Можно выделить ряд критериев, наиболее важных для сравнения альтернативных методов оптимизации[3]. Однако, оценки этих критериев носят, в основном, экспертный характер и основываются на знании как особенностей методов оптимизации, так и характера влияния варьируемых переменных и ограничений на значения критериев. Данное обстоятельство еще раз подчеркивает, что для выбора метода оптимизации при решении конкретной практической задачи, так же как и для формализации этой задачи требуются знания как в области методов оптимизации, так и в области проектируемого изделия.

В идеале реализация оператора А6 возможна путем использования адаптивных (автоматических) систем оптимизации, включающих в себя различные алгоритмы оптимизации, вызываемые поочередно на основе анализа накапливаемой в процессе решения задачи информации. Однако трудности, препятствующие эффективному использованию как методов оптимизации вообще, так и, в частности, адаптивных систем оптимизации, приводят к рекомендациям применять в общем случае интерактивный режим решения задачи, под которым понимается такой подход, когда проектировщик на любом этапе этого процесса может изменить не только настроечные параметры метода или сам метод, но и математическую формулировку решаемой задачи (вид критерия оптимальности, значения ограничений, накладываемых на параметры; число и тип варьируемых переменных). Такой подход позволяет сочетать алгоритмические процедуры решения экстремальных задач с плохо формализуемыми приемами принятия оптимальных решений.

Основываясь на этих предложениях, можно сформулировать

требование 4 – возможность смены в процессе решения задач оптимизации как используемых методов, так и их настроечных параметров под управлением проектировщика или формальных алгоритмов.

Пятым этапом при решении задач оптимизации является создание программы, адекватно отражающей сформулированную задачу и выбранный метод ее решения. На данном этапе в роли исходных данных для каждой из отдельно решаемых задач выступает ее формальная постановка (w_j) и выбранный метод оптимизации (η_j). Результатом его выполнения является программа, обозначаемая далее \mathcal{P} , в которой взаимосвязаны названные компоненты с учетом их специфики. Будем считать, что оператор

$$A7: (\{w_j, \eta_j\}_{j=1,2,\dots,N_w}, \mathcal{L}) \Rightarrow \mathcal{P}$$

реализует рассматриваемый этап решения исходной задачи оптимизации.

Соответствующее требование к средствам автоматизации выполнения этого этапа связано с исключением программистской деятельности из процесса решения задач оптимизации. Фактически оно может быть сведено к тому, чтобы оператор A7 реализовывался в автоматическом режиме, а интерактивный режим взаимодействия проектировщика со средствами автоматизации на всех этапах решения задачи не требовал от проектировщика знания языков программирования и схожих с ними языков:

требование 5 – исключение необходимости знания языков программирования или аналогичных им в процессе решения задач оптимизации.

И, наконец, шестым – заключительным этапом решения задач оптимизации является непосредственная реализация расчетов на базе созданной программы:

$$A8: \mathcal{P} \Rightarrow (\hat{K}, \hat{Y}, \hat{Z}),$$

где $\hat{K}, \hat{Y}, \hat{Z}$ – полученные значения критерия, варьируемых и ограниченных параметров.

При реализации данного этапа возможно как получение законченного решения исходной задачи, так и выявление погрешностей, допущенных при выполнении предшествующих этапов. Выявление этих погрешностей и их целенаправленное устранение основывается на анализе (оператор S3) получаемых численных результатов, которые представляются неправдоподобными. Сама по себе проблема проведения такого анализа является весьма существенной, а средства и аппарат для ее решения практически не разработаны.

В результате оценка правдоподобности полученных результатов и определение их причин основываются на знании закономерностей, свойственных проектируемым изделиям. Это фактически обуславливает следующее:

требование 6 – предоставление проектировщику возможности ознакомления с промежуточными результатами решения задачи в произвольный момент времени и внесения корректив в исходную информацию, заданную им на любом из этапов решения задачи, включая возможность перехода в другие режимы работы, в частности, обеспечивающие пополнение и модификацию *т*.

Итак, сформулированные требования к САРЗО ориентированы на их использование проектировщиками. Удовлетворение этим требованиям позволяет

формировать в САПР автоматизированные процедуры для поиска оптимальных проектных решений (рис.2), обеспечивая им высокую эффективность.

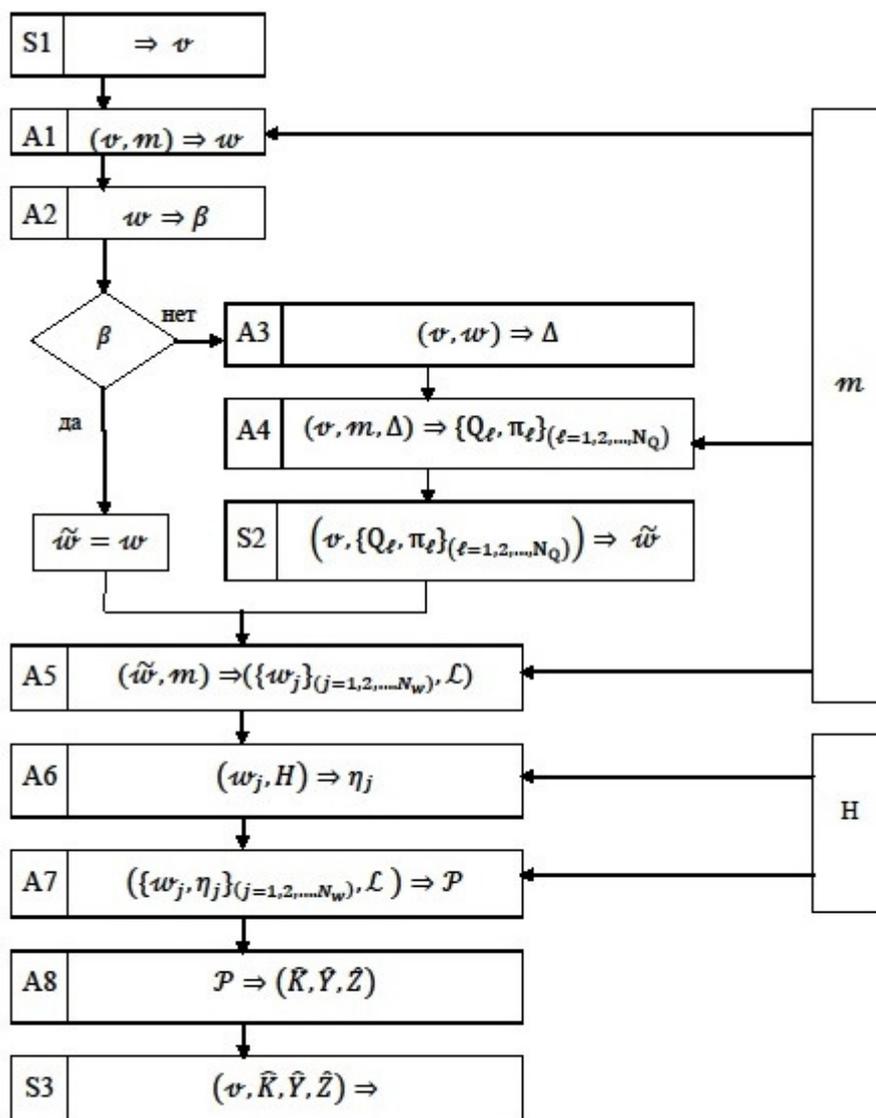


Рис. 2.- Операторная схема функционирования САРЗО в САПР

Библиографический список

1. Смирнов О.Л., Падалко С.Н., Пиявский С.А. САПР: формирование и функционирование проектных модулей. - М.: Машиностроение, 1987. – 272с.
2. Тамм Б.Г., Тыгу Э.Х. Применение знаний в автоматизированных системах проектирования и управления. – В кн.: Прикладная информатика. – М.: Финансы и статистика, 1985, вып.1. – с.5-25.

3. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн.2
Пер. с англ. – М.: Мир, 1986 – 320с.