

Определение облика изделия с помощью программного комплекса pSeven в среде управления инженерными данными Teamcenter

В области автоматизации процессов проектирования вопросом высокой актуальности является проведение многодисциплинарных обликовых исследований и решение обратных (оптимизационных) конструкторских задач. В статье представлено комплексное решение этой проблемы, основанное на тесной интеграции программного комплекса (ПК) pSeven с системой управления расчетными данными PLM Teamcenter. В предложенной схеме ПК pSeven предоставляет исчерпывающий набор эффективных алгоритмов оптимизации и анализа данных, а также широкие интеграционные возможности, позволяющие легко включать в расчетные модели различные вычислительные модули (коммерческие и/или собственной разработки). При этом полное представление исходных данных и результатов всех проводимых расчетов, включая управление версиями и разграничение прав доступа, обеспечивается PLM Teamcenter. Эффективность предлагаемого решения продемонстрирована в задаче определения оптимального облика высокоточного боеприпаса, в которой применение автоматизированных средств проектирования не только существенно сокращает время разработки, но и позволяет найти принципиально новые конструкторские решения.

Опыт локальных военных конфликтов последнего времени свидетельствует о все более широком применении высокоточного оружия (ВТО). По эффективности поражения целей ВТО уже сейчас приближается к тактическому ядерному оружию, не создавая при этом негативных эффектов, сопутствующих использованию оружия массового поражения. Поэтому задача проектирования высокоточных боеприпасов (ВТБ) для ракетного вооружения и артиллерии (РВиА) является одной из приоритетных. При проектировании ВТБ наибольшие сложности связаны с выбором параметров системы управления полетом и характеристик планера ВТБ, обеспечивающих оптимальный угол подхода к цели, поскольку при этом должны выполняться противоречивые требования, например превышение по высоте зоны действия комплексов активной защиты (КАЗ) объектов бронетанковой техники (ОБТТ) и обеспечение требуемой дальности захвата цели в условиях низкой облачности.

Решение задач современного проектирования ВТБ невозможно без использования формализованных

методов автоматизированного поиска оптимальных проектных решений. Эта задача обладает достаточно большим числом проектных параметров, требует учета разнообразных физических процессов (аэродинамики, баллистики, динамики полета, прочности и др.) и, соответственно, использования различных математических моделей и соответствующих программных пакетов. Кроме этого, необходимо учитывать в том или ином приближении различные внешние факторы (погодные условия, движение цели и др.). Другими словами, рассматриваемая задача является многопараметрической многокритериальной оптимизационной задачей с ограничениями, рассматриваемой в условиях неопределенности. На детальном (рабочем) уровне проектирования степень технической сложности задачи еще более возрастает. Это означает, что без использования формализованных критериев и автоматизации всего процесса эффективное проектирование при современных предъявляемых требованиях невозможно ни на концептуальном, ни на рабочем уровне.

Успешное решение задачи совершенствования тактико-технических характеристик ВТБ РВиА зачастую требует многократного пересмотра структуры изделия как на концептуальном, так и на детальном уровне проектирования. Анализ этих задач показывает, что они имеют общий характер, при этом одной из наиболее сложных является задача определения оптимального облика и состава изделия на ранних этапах проектирования. Это связано прежде всего со следующими специфическими особенностями ВТБ:

- ▶ малыми габаритами, большими эксплуатационными нагрузками и высокой насыщенностью изделия различными функциональными элементами;
- ▶ наличием взаимодействующих между собой подсистем, что требует использования многодисциплинарного подхода к моделированию (необходимости одновременно учитывать аэродинамические, прочностные, баллистические характеристики, показатели эффективности и т.д.).

В настоящий момент не существует сколько-нибудь универсальных методик решения описанных выше задач. В этих условиях наиболее продуктивным путем представляется решение модельной многодисциплинарной

задачи поиска оптимальной компоновки ВТБ, удовлетворяющей целому ряду ограничений (показатели прогнозируемой эффективности применения, располагаемые перегрузки, технологические требования).

Необходимо подчеркнуть, что описываемая задача является модельной, постановка и ограничения которой преднамеренно искажены по соображениям конфиденциальности. Тем не менее, остальные аспекты исследования выдержаны максимально близкими к реалистичному сценарию, в котором такая работа выполнялась бы силами специалистов тульского АО «Конструкторское бюро приборостроения» (АО «КБП»). При этом ввиду большого числа привлекаемых специалистов, работающих в различных подразделениях предприятия, возникают специфические сложности крупномасштабного применения автоматизированных процессов проектирования. Например, подготовка задачи, выбор адекватных моделей и нахождение решения практически всегда является итеративным процессом, требующим взаимодействия многих людей (необходимо подготовить параметрическую модель изделия и соответствующие расчетные модели, связать модели в единую расчетную цепочку, отладить процесс ее исполнения, а также периодически вносить корректировки на всех стадиях по ходу отработки изделия). Процесс построения решения зачастую включает в себя различные виды вспомогательных исследований, которыми занимаются специалисты различных подразделений. Все это требует координации действия сотрудников, четкого разграничения прав доступа, надежного хранения расчетных моделей и вспомогательных материалов. В рамках большого предприятия это означает необходимость внедрения полноценной PLM-системы, которая не только позволяет разрешить означенные проблемы в масштабе всего предприятия, но одновременно с тем позволяет формализовать и автоматизировать процессы проектирования и сохранить опыт проведения таких исследований для будущих поколений конструкторов. Актуальность и ценность такой формализации трудно переоценить, учитывая все увеличивающийся разрыв в профессиональном опыте поколений на многих предприятиях ОПК.

В настоящем исследовании компания DATADVANCE совместно с компанией «Борлас» выполнила интеграцию программного комплекса для проведения различных видов оптимизационных расчетов rSeven с системой управления расчетными данными Teamcenter for Simulation (модуль PLM-системы Teamcenter). В данной работе помимо решения задачи поиска оптимальной компоновки также рассматривается вопрос о том, как происходит работа в такой интегрированной среде.

Постановка задачи

Рассматриваемая задача заключается в нахождении оптимальной аэродинамической компоновки противотанковой управляемой ракеты (ПТУР), обеспечивающей максимальную боевую эффективность при минимальном усложнении конструкции по сравнению с существующими изделиями. В такой общей постановке

задача, конечно же, не поддается решению, для этого необходимо количественно определить понятия «эффективности» и «степени усложнения». Используемые в данной работе упрощающие предположения сводятся к нижеследующему.

Эффективность

Предполагается, что максимальная боевая эффективность достигается при подходе ПТУР к ОБТ сверху, в обход зоны действия КАЗ, с конечным допустимым углом отклонения от вертикали. Траектория полета при этом представляет собой последовательность участков, схематично представленных на рис. 1: короткий стартовый участок 1, горизонтальный участок полета 2, «горка» (набор высоты с постоянной перегрузкой) – участок 3, прямолинейный набор высоты на участке 4 и пропорциональное сближение на участке 5.

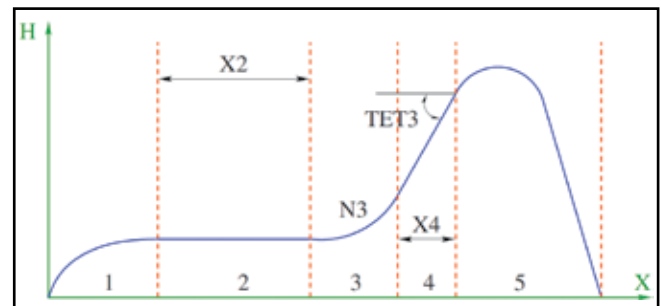


Рис. 1. Параметрическое представление траектории

Степень усложнения

Предполагается, что степень усложнения изделия останется приемлемо малой, если достижение максимальной эффективности не потребует введения дополнительных средств управления (интерцепторов, газовых рулей, устройства отклонения вектора тяги либо импульсных двигателей).

В сделанных предположениях критерием качества решения является время подлета T к цели, расположенной на заданном расстоянии от точки пуска (чем меньше потребное время, тем лучше).

В данной задаче общегеометрические параметры изделия (калибр и длина) считаются заданными и неизменными. В этих условиях количественное определение понятия «аэродинамическая компоновка» сводится к геометрии и расположению вдоль корпуса дестабилизаторов, крыльев и рулей (рис. 2), количество которых счита-

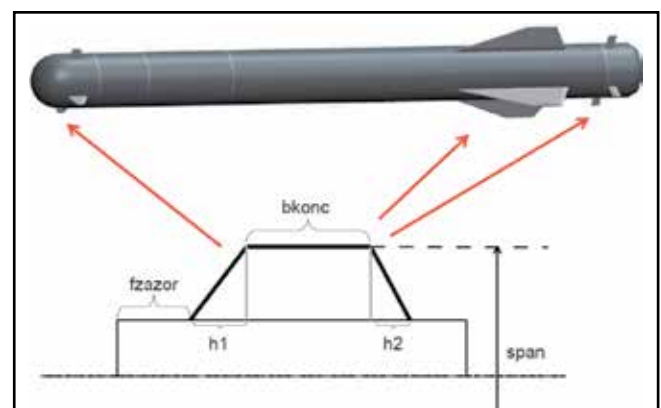


Рис. 2. Параметризованная геометрия рулевых элементов

ется фиксированным (по четыре элемента каждого типа, расположенных на одной линии вдоль оси изделия). При этом геометрия и положение каждого элемента задается пятью параметрами:

- ▶ fzazor – смещение элемента в соответствующем сегменте изделия;
- ▶ h1, h2 – определяют стреловидность элемента;
- ▶ bkons – длина боковой хорды;
- ▶ span – размах соответствующего элемента.

Таким образом, в рассматриваемой задаче аэродинамическая компоновка определяется $5 \times 3 = 15$ параметрами, изменяемыми в заранее заданных диапазонах, которые диктуются в свою очередь размерами отсеков и максимально технологически допустимыми удлинениями.

Переменные оптимизации не исчерпываются геометрией рулевых элементов, для достижения минимального времени полета к цели допускается также изменять законы управления и, соответственно, форму траектории. Закон управления параметризован четырьмя величинами (рис. 1):

- ▶ X2 – длина горизонтального участка траектории (участок 2);
- ▶ N3 – величина перегрузки при выходе на “горку” (участок 3), которая принимается постоянной на всем участке;
- ▶ TET3 – угол наклона траектории к горизонту на участке 4 прямолинейного набора высоты;
- ▶ X4 – длина участка 4 траектории.

Все параметры управления также изменяются в заранее заданных диапазонах.

Остальные ограничения задачи подразделяются на два типа: дополнительные ограничения на геометрию рулевых элементов, не сводящиеся к простым диапазонам изменения параметров, и ограничения на траекторию полета. Смысл первой группы ограничений прост: размеры дестабилизаторов, крыльев и рулей не должны превышать размеры соответствующих отсеков (3 линейных ограничения); в каждом элементе аэродинамического управления допустимые углы схождения передней и задней кромок ограничены (6 нелинейных ограничений); кроме того, для крыльев требуется, чтобы размер бортовой хорды был не меньше заданного (1 линейное ограничение).

Что касается траектории полета, то ее допустимость характеризуется следующими величинами (их вычисление обсуждается ниже):

- ▶ полная горизонтальная длина траектории X (расстояние до цели) с учетом начального 1 и терминального 5 участков (рис. 1) (лежит в заданном интервале);
- ▶ захват цели – горизонтальная длина X5 участка 5 (происходит на расстояниях не меньше заданного);
- ▶ располагаемая перегрузка в конце траектории (должна быть достаточно большой);

- ▶ частоты реагирования (не становятся слишком малы);
- ▶ угол полета к цели по отношению к вертикали (достаточно мал).

Таким образом, в рассматриваемом приближении задача поиска оптимальной аэродинамической компоновки ПТУР сводится к однокритериальной оптимизационной задаче следующего вида

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x}} T \\ \vec{x}_l \leq \vec{x} \leq \vec{x}_u \quad \vec{x} \in R^{19} \\ A\vec{x} \leq \vec{a} \quad \vec{a} \in R^4 \\ \vec{C}(\vec{x}) \leq 0 \quad \vec{C} \in R^{11} \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{x} , $\vec{x}_{l,u}$ обозначает множество оптимизируемых переменных и диапазоны их изменения, линейные ограничения выделены явно и \vec{C} обозначает множество ограничений общего вида.

Для полного определения задачи остается сформулировать способ вычисления нелинейных характеристик, составляющих ограничения общего вида \vec{C} . В общем случае расчет этих величин требует учета данных нескольких дисциплин (внешней аэродинамики, баллистики), для определения которых возможно использование различных физических моделей и соответствующих программных модулей. Обстоятельством, серьезно упрощающим решение описываемой задачи, явилось наличие адекватных валидированных расчетных программ на предприятии, что автоматически сняло вопросы о степени адекватности использованных моделей. С практической точки зрения при решении задачи использовались два расчетных модуля, разработанных специалистами АО “КБП”, и стандартная функциональность CAD-системы NX. Краткое описание функциональности каждого компонента удобно привести одновременно с описанием всей расчетной цепочки, реализованной в интеграционной платформе pSeven и представленной на рис. 3. Отметим, что каждый представленный на рисунке блок являет собой логически замкнутый функцио-

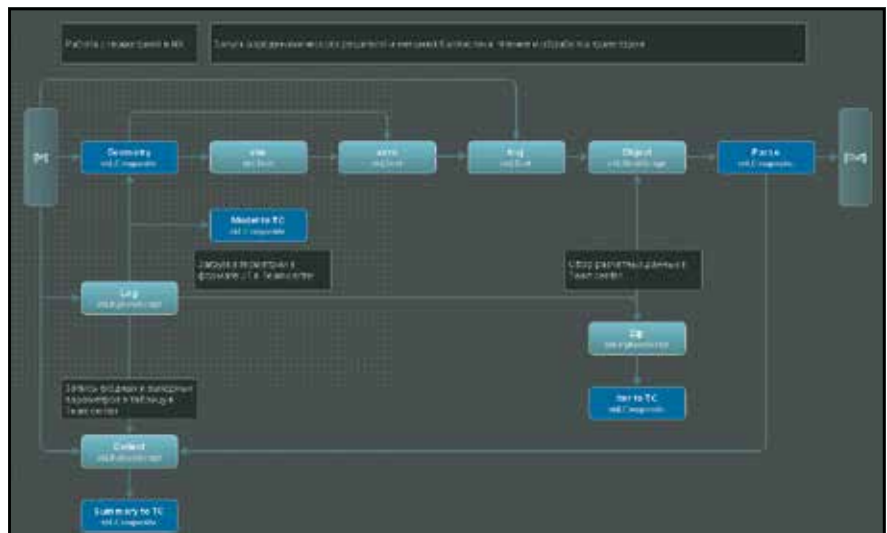


Рис. 3. Расчетная последовательность для вычисления нелинейных характеристик, представленная в виде вычислительной цепочки pSeven

нальный элемент расчетной схемы, стрелки обозначают направление потока данных. Таким образом, pSeven позволяет собрать всю расчетную цепочку средствами визуального программирования, при этом собранная расчетная схема также представляет собой функциональный блок с однозначно определенными форматами входных/выходных данных и может быть использована в дальнейшем для построения более сложных схем.

Расчетная последовательность $\vec{x} \rightarrow \{T, \vec{C}\}$, требуемая уравнением (1) и изображенная на рис. 3, устроена следующим образом:

- ▶ Входные данные, поступившие на вход расчетной цепочки, разбиваются на параметры геометрии и управления. Геометрические параметры поступают в блок Geometry, функционально представляющий собой CAD NX и выполняющий расчет масс-инерционных характеристик (МИХ) изделия. Отметим, что все продукты линейки NX имеют прямую интеграцию с PLM-системой Teamcenter. Блоки Log, Collect, Summary to TC, Model to TC являются вспомогательными и позволяют сохранить полную информацию об инициализированном расчете в Teamcenter, взаимодействие с которым описывается в следующем разделе.
- ▶ Вычисленные МИХ позволяют посчитать аэродинамические параметры изделия, что происходит в блоке aero (после преобразования данных в соответствующий формат в блоке elm). Функционально блок aero представляет собой отдельное приложение, разработанное специалистами АО "КБП" и осуществляющее расчет аэродинамических характеристик изделия по линейной модели. Отметим, что несмотря на относительную простоту модели аэродинамический расчет для рассматриваемого класса изделий является верифицированным в широкой области скоростей (числа Маха от 0 до 7) и высот (от 0 до 80 км) полета.
- ▶ Вычисленные аэродинамические данные об изделии и заданные параметры управления позволяют полностью восстановить траекторию в блоке traj, который функционально представляет собой отдельное приложение. Отметим, что форма начального участка траектории является фактически фиксированной, в то время как терминальный участок выводится из закона пропорционального сближения.
- ▶ На последней стадии расчета полученная траектория анализируется в блоке Object (отдельное приложение, разработанное специалистами АО "КБП"), в котором вычисляются оставшиеся величины (конечная располагаемая перегрузка, частоты реагирования). На этом этапе также используются вспомогательные блоки Zip, Inter to TC, Parse для записи полученных характеристик в PLM Teamcenter.

Для простоты изложения мы не рассматриваем вопросы корректной обработки ошибок в работе различных блоков, в большинстве случаев они легко решаются стандартными средствами pSeven.

Собранная и отлаженная расчетная последовательность позволяет непосред-

ственно перейти к решению задачи (1), единственная тонкость заключается в том, что линейные ограничения задачи желательно задать отдельным образом. Дело в том, что подавляющее большинство оптимизационных методов (методы pSeven не являются исключением) по-разному работают с линейными и нелинейными данными. Явное разделение этих двух типов обычно существенно повышает эффективность нахождения решения.

Окончательная расчетная схема для решения задачи (1) в pSeven представлена на рис. 4, где блоки представляют собой:

- ▶ Single_run – описанную выше расчетную схему вычислений нелинейных характеристик (рис. 3), представленную в виде единого составного блока pSeven;
- ▶ Constraints – вычисление линейных ограничений задачи;
- ▶ Optimizer – стандартный блок pSeven, предоставляющий множество оптимизационных алгоритмов и собственно решающий задачу (1).

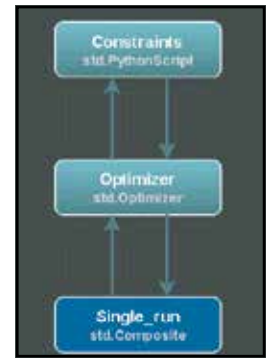


Рис. 4. Схема решения оптимизационной задачи в pSeven

Интеграция с Teamcenter

Teamcenter является системой управления жизненным циклом изделия и имеет модульную структуру. Хранимые данные имеют связи между собой, которые описываются моделью данных. Такой подход обеспечивает целостность данных, поддерживает версию и разграничение доступа.

Модель данных – это описание шаблона структуры взаимосвязи компонентов между собой. Например, в модель данных оптимизационного расчета (рис. 5, 6) может быть добавлен блок "Расчетная модель", в котором хранятся все расчетные модели, участвующие в оптимизации. И хотя в описываемой работе такой блок не применялся, возможность сохранения моделей является важной и удобной отличительной особенностью Teamcenter. Наборы данных (например, свойства ма-

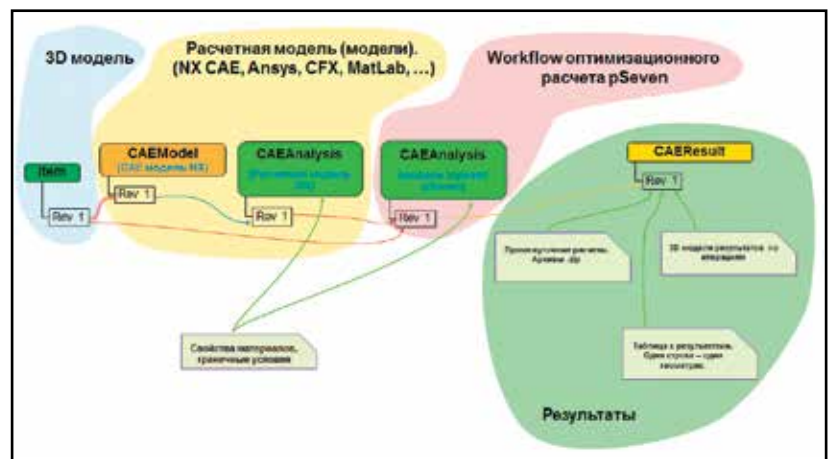


Рис. 5. Модель данных оптимизационного расчета в среде Teamcenter



Рис. 6. Графическое представление модели данных оптимизационного расчета в среде Teamcenter

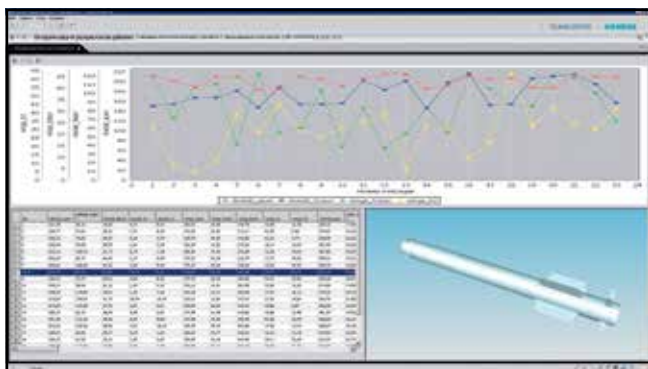


Рис. 7. Представление данных оптимизационного расчета в среде Teamcenter

териалов и граничные условия) также имеют механизм версионирования.

Проведение оптимизационного расчета в среде Teamcenter выглядит следующим образом:

- ▶ необходимая ревизия элемента в Teamcenter открывается для редактирования;
- ▶ указывается папка на файловой системе, куда автоматически импортируются все необходимые для расчета файлы. Также автоматически создается двухсторонняя связь папки с Teamcenter, при этом ревизия 3D-модели в Teamcenter автоматически блокируется от изменений;
- ▶ дальнейшая работа с проектом производится точно так же, как если бы никакой связи с Teamcenter не было (сам Teamcenter может быть закрыт): производится оптимизационный расчет, вносятся изменения в постановку задачи и т.д.;
- ▶ Teamcenter сохраняет сделанные в проекте изменения по требованию пользователя, при этом структура данных автоматически обновляется из связанной папки на файловой системе (из папки проекта).

Запуск оптимизационного расчета происходит непосредственно в pSeven и не отличается от обычного запуска. При этом во время расчета происходит автоматическая передача результатов по итерациям в Teamcenter. Таким образом, результаты проводимых расчетов можно просматривать фактически в режиме реального времени, при этом никакого дополнительного взаимодействия с pSeven не происходит.

На рис. 7 представлен пример отображения результатов оптимизационного расчета в среде Teamcenter,

где по горизонтали отложен индекс рассчитанной модели ПТУР с измененными геометрическими параметрами, а по вертикали изображены расчетные характеристики соответствующего варианта изделия. Отметим, что все графики интерактивны и могут быть настроены по количеству выводимых параметров, масштабу и способу отображения.

Результаты

Задача нахождения оптимальной аэродинамической компоновки ПТУР была решена с помощью интеграционной платформы pSeven, дополненной необходимой функциональностью PLM Teamcenter. Такой подход автоматически разрешает большую часть технических вопросов, в том числе и вопросы выбора эффективных оптимизационных алгоритмов. Тем не менее, тип проводимой оптимизации с необходимостью должен быть выбран на этапе постановки задачи, при этом возможны два варианта:

- ▶ оптимизация нацелена на улучшение характеристик уже существующего изделия, и тогда имеет смысл говорить о локальной оптимизации, которая призвана найти оптимальное решение с высокой точностью, но в рамках известного решения;
- ▶ обликковые исследования, в которых точность нахождения решения может быть невелика, но требуется провести поиск решений во всем пространстве параметров.

Рассматриваемая задача с очевидностью относится ко второму классу, и здесь выбор подходящих алгоритмов оптимизации не составляет труда: наиболее эффективными алгоритмами в данном случае являются методы на основе мета-моделирования. Поставленная задача была решена методами именно этого семейства. Мы не будем останавливаться на подробностях соответствующих алгоритмов, тем более что pSeven предоставляет необходимую функциональность автоматически. Достаточно сказать, что результаты, представляемые ниже, были получены всего за 280 обращений к расчетным модулям, что исключительно мало для задачи с девятнадцатью оптимизируемыми параметрами.

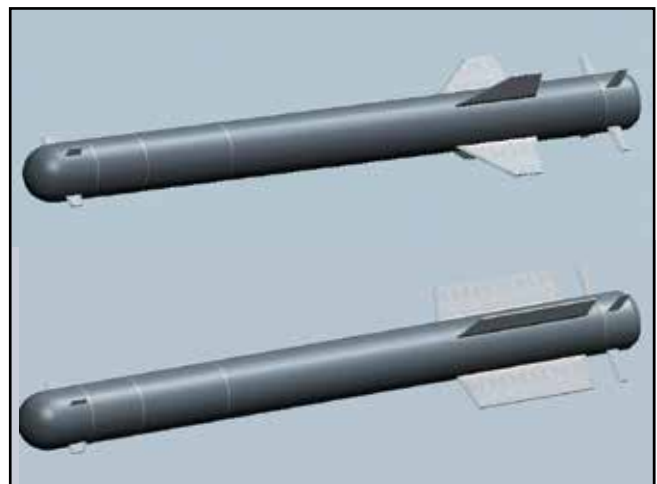


Рис. 8. Два лучших решения задачи поиска оптимальной аэродинамической компоновки ПТУР (формально лучшее решение расположено сверху)

Особенностью оптимизационного модуля rSeven является то, что при решении любой задачи полученный ответ представляет собой не только лучшее решение, но и множество других кандидатов, которые, проигрывая по формальным критериям, тем не менее представляют отдельный интерес, так как при сравнимом качестве сильно отличаются от лучшего решения в пространстве оптимизируемых переменных. Именно эта особенность позволила сравнительно быстро идентифицировать фактически только два варианта решения задачи, представленных на рис. 8. Отличительной чертой найденных решений является то, что при несущественном отличии времен подлета (32,74 и 34,78 секунды

для конфигураций, представленных на рис. 8 сверху и снизу соответственно), геометрии найденных решений существенно различны. Сравнительный вид траекторий полета приведен на рис. 9.

Таким образом, можно сделать вывод, что существует несколько различных компоновок, обладающих примерно одинаковыми характеристиками (время и угол подлета к цели, располагаемая перегрузка и др.). Более того, расчеты показывают, что характеристики траекторий для двух существенно различных обликов изделия близки (отметим, что дополнительные исследования показали, что близость траекторий является особенностью решаемой модельной задачи, при учете реально требуемых перегрузок отличия становятся существенными). Следовательно, несмотря на отличия геометрий решения обладают некоторыми общими свойствами. Рассмотрение диаграммы параллельных координат, представленной на рис. 10, позволяет сделать вывод, что искомая оптимальная компоновка обладает следующими отличительными особенностями:

- ▶ имеет крыло большого размаха с большой концевой хордой;
- ▶ имеет развитый трапециевидный руль большого размаха;

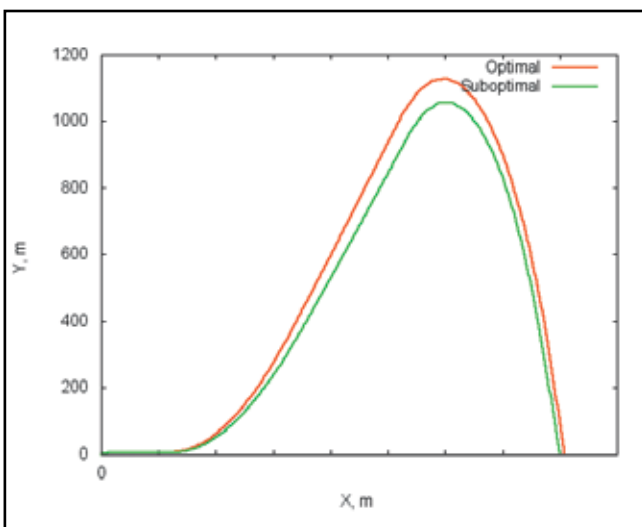


Рис. 9. Сравнение траекторий двух лучших решений

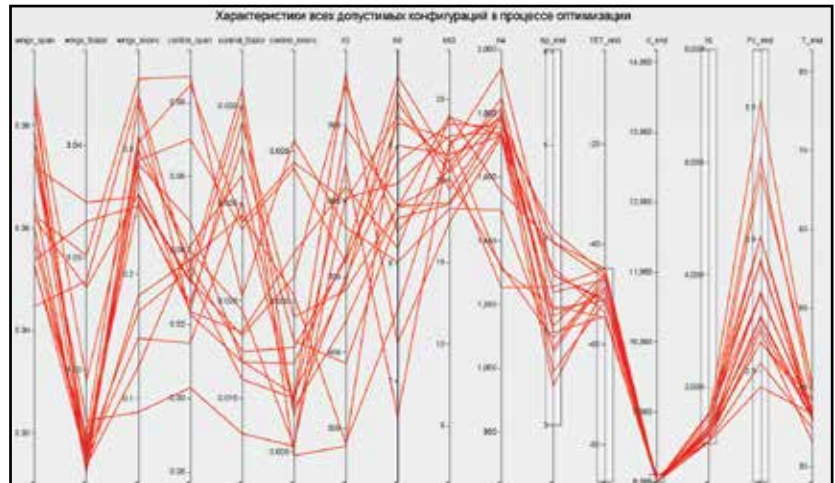


Рис. 10. Характеристики всех допустимых конфигураций, найденных в процессе решения

- ▶ может не иметь дестабилизатора (по крайней мере, его влияние является достаточно малым);
- ▶ закон управления имеет следующую структуру: участок 3 должен поднимать изделие на угол 18-23°, длина участка 4 составляет 1700-1800 м.

Таким образом, полученное при решении задачи поиска оптимальной аэродинамической компоновки ПТУР интегрированное решение для оптимального проектирования в управляемой среде на базе rSeven и Teamcenter позволяет:

- ▶ улучшить технические и эксплуатационные характеристики изделия;
- ▶ упростить процесс принятия конструкторских решений;
- ▶ сравнительно легко объединить множество дисциплин в рамках одного процесса и таким образом вывести исследования на качественно новый междисциплинарный уровень.

Важно отметить, что использование связи rSeven+Teamcenter позволяет избежать многих проблем, которые обычно возникают при внедрении процессов автоматизированного проектирования на крупных предприятиях. В частности, удается не только автоматизировать инженерные расчеты, необходимые для синтеза облика сложных технических изделий, но и одновременно с тем контролировать целостность информации и обеспечить привязку требований на изделие к проводимым расчетам. Кроме того, в рамках использованного подхода легко удается формализовать взаимодействие между подразделениями, сохранять все проведенные расчеты в единой среде и таким образом отслеживать, на основе каких расчетов приняты те или иные конструкторские решения. Таким образом, интеграция rSeven + Teamcenter + NX существенно упрощает построение и внедрение процессов оптимального проектирования и дает уверенное преимущество в достижении поставленных целей.

Г. Ф. Крылов, А. Л. Сарычев,
АО "Конструкторское бюро приборостроения",
Д. С. Хоминич, компания DATADVANCE,
А. К. Кавалеров, Консалтинговая группа "Борлас"