

УДК 519.95: 518.0: 621.391: 681.325

В.П. Зинченко, В.В. Борисов

Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных технических объектов

Выполнен анализ проблем оптимизации алгоритмов проектирования, позволяющий сделать выводы о том, что метод декомпозиции – наиболее эффективный метод оптимизации алгоритмов проектирования сложных технических объектов, поскольку декомпозиция проектных моделей уменьшает их взаимозависимость.

The problems of design algorithms optimization are analyzed. The executed analysis makes it possible to draw a conclusion that a decomposition method is the most efficient for optimization of complex technical object design algorithm because the decomposition of project models reduces their interdependency.

Проведено аналіз проблем оптимізації алгоритмів проектування, який дозволяє дійти висновків про те, що метод декомпозиції є найбільш ефективним методом оптимізації алгоритмів проектування складних технічних об'єктів, оскільки декомпозиція проектних моделей зменшує їх взаємозалежність.

Введение. Особенностью задачи создания оптимальной информационной технологии (ОИТ) проектирования сложных технических объектов (СТО) есть то, что число критериев оптимальности $n \gg 1$ и задачу можно решить, используя методы анализа, декомпозиции и синтеза [1]. Другими словами, ОИТ проектирования СТО можно реализовать как последовательное решение независимых подзадач, для каждой из которых определены частные критерии оптимальности и уровни декомпозиции. Для этого предложено структурировать критерии оптимальности субобъектов СТО в соответствии с их назначением, что позволяет выделить и сгруппировать частные критерии и, в итоге, создать ОИТ проектирования как отдельных субобъектов СТО, так и СТО в целом. На примере решения задачи прочности СТО показано, что декомпозиция выполняется на двух уровнях: на верхнем уровне создаются конечно-элементные модели (КЭМ) и выполняется моделирование; на нижнем уровне определяются деформации и напряжения в конечных элементах (КЭ) и подготавливаются исходные данные (синтез) для задач верхнего уровня. Также показано, что в известных программных комплексах (например, NASTRAN [2] и др.) невозможен синтез структур и свойств КЭМ

субобъектов СТО, что не позволяет реализовать ОИТ проектирования СТО.

Постановка задачи

Задачу оптимального проектирования СТО будем рассматривать как задачу принятия решения на трех этапах: *внешнее* проектирование (выработка требований к основным характеристикам и качествам СТО), *формирование облика* (увязка требований *внешнего* проектирования с технологическими и конструкторскими возможностями *внутреннего* проектирования) и *внутреннее* проектирование (оценка возможностей реализации основных параметров, придающих СТО требуемое качество). Так же на этапе *формирования облика* строится допустимое множество вариантов СТО, среди которых ищется вариант, который обеспечивает достижение целей, определяемых на уровне «внешнего» проектирования [3].

Разбиение проектирования СТО на этапы обусловлено тем, что непосредственное определение искомой конструкции на всем мыслимом множестве ее вариантов практически невозможно. Это связано с тем, что применяемые комплексы программ моделирования СТО требуют значительных ресурсов на один вариант [4]. Следовательно, на этапе *формирования облика* необходимо уменьшить число альтерна-

тивных вариантов проекта с учетом требований *внешнего* проектирования, используя метод неформальной декомпозиции [3].

Постановку задачи можно сформулировать как исследование проблем создания ОИТ проектирования СТО на примере решения задачи прочности самолета. Необходимо проанализировать проблемы существующих алгоритмов и технологий проектирования самолета. На основании анализа должна быть предложена новая ОИТ, позволяющая решить указанные проблемы.

Метод оптимизации

Обозначим $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ вектор конструктивных параметров СТО, $x \in X$. Выбор координат вектора и множества X осуществляется на основе опыта проектирования подобных СТО. При известных режимах работы СТО критерий эффективности есть функцией $F(x)$ только конструктивных параметров $x \in X$. Для единственного $F(x)$ задача оптимального проектирования заключается в определении вектора конструктивных параметров:

$$x^0 \in \text{Arg max}_{x \in X} F(x), \text{ где } \text{Arg max}_{x \in X} F(x) = \{x \in X \mid F(x) = \max_{x' \in X} F(x')\} \quad (1)$$

Проектирование СТО связано с большой размерностью N вектора x , что требует больших ресурсов для определения значений $F(x)$. Поэтому для решения (1) необходимо использовать метод декомпозиции.

Если $u_i(x) (i = 1, 2, \dots, m)$ – частные критерии качества СТО, $F(x)$ – монотонный (для $\forall x, x' \in X$ из $u_i(x') \geq u_i(x'') (i = 1, 2, \dots, m) \Rightarrow F(x') \geq F(x'')$), $\Pi(U)$ – множество оптимальных по Парето векторов из U , $\Pi(X)$ – множество векторов $x \in X$, для которых $u(x) \in \Pi(U)$, тогда задача определения вектора конструктивных параметров принимает вид

$$x^0 \in \text{Arg max}_{x \in \Pi(X)} F(X) \quad (2)$$

Следовательно, решение (1) можно представить как декомпозицию нахождения векторов

$x \in \Pi(X)$ и решения (2). При этом этап *формирование облика* не зависит от критерия F , что позволяет существенно сократить число вариантов СТО на этапе *внешнего* проектирования. В результате на этом этапе формируется согласованное с возможностями *внутреннего* проектирования техническое задание. Решение (2) есть решение задачи оптимального проектирования (1), где процедура *формирования облика* состоит в построении паретовского множества $\Pi(u, X)$. Такая же задача должна решаться и на этапе «внутреннего» проектирования. Несмотря на относительную *простоту* частных критериев, задача построения множества $\Pi(u, X)$ является непростой из-за большой размерности вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ и сложной структуры множества X . Выход из этой ситуации – дальнейшая декомпозиция и создание иерархии задач «внутреннего» проектирования.

Отметим, что на практике декомпозиция неформальна, так как выбор вектора частных критериев совместно выполняется конструкторами этапов *внутреннего* и *внешнего* проектирования. Для правильного выбора вектора необходимо исследовать паретовские множества субъектов СТО, соответствующие разным векторам частных критериев (разные концепции). Построение такого паретовского множества имеет смысл тогда, когда заранее неизвестно, как вектор частных критериев «согласован» с глобальной целью $F(x)$.

Известно, что если $F(x)$ монотонный, то декомпозиция (1) возможна. На практике монотонность $F(x)$ следуют из самого смысла частных критериев оптимальности, но в [3] сформулированы необходимые и достаточные условия монотонности критерия $F(x)$.

В действительности эффективность СТО определяется не только вектором конструктивных параметров x , но и внешними по отношению к СТО условиями, которые конструктор может описать как неопределенные факторы, значения которых заранее неизвестны. Решением *внешнего* проектирования СТО процесс

проектирования не заканчивается, так как появляется необходимость детализации СТО, проектирования подсистем и связей между ними. Это этап *внутреннего* проектирования.

Предположим, что СТО с требуемой степенью подробности описывается вектором $x(0) \in E^{N_0}$ размерности N_0 , причем известно, что $x(0) \in X_0 \subset E^{N_0}$. Это означает, что задание конкретного значения $x(0) \in X_0$ определяет вариант конструкции СТО, т.е. создается СТО с вектором конструктивных параметров $x(0)$, который не может подробно описывать СТО. Множество X_0 реализуемых вариантов СТО всегда ограничено. Описание СТО (вектор конструктивных параметров) должно быть достаточно подробным (вместо конечномерного пространства E^{N_0} могут потребоваться пространства функциональные, например, описание субобъектов СТО) и достаточно простым. Поэтому при выборе вектора конструктивных параметров СТО требуется найти компромиссное решение между полным и неполным описанием объекта. Если такой компромисс найден, то основной задачей является определение вектора агрегированных параметров нулевого уровня $x(0)$, который можно выразить через другие конструктивные параметры, соответствующие более детальному описанию СТО. Решение задачи проектирования для известного векторного критерия эффективности $W_0(x) = (W_0^1(x), \dots, W_0^{n_0}(x))$ при единственной критерии оптимальности F_0 сводится к поиску

$$x^*(0) \in \text{Arg max}_{x(0) \in X_0} F_0(x(0))$$

или к отысканию $\Pi(W_0, X_0)$, (3)

где $\text{Arg max}_{x \in X} F_0(x) = \{x \in X \mid F(x) = \max_{x \in X} F_0(x)\}$; $\Pi(W_0, X_0)$ – множество точек Парето из X_0 по совокупности частных критериев $(W_0^1(x), \dots, W_0^{n_0}(x))$.

Решить (3) невозможно вследствие высокой размерности вектора N_0 и сложности допус-

тимого множества конструктивных параметров X_0 , глобального критерия F_0 , векторного критерия W_0 . Выходом из этой ситуации служит построение иерархии «внутреннего» проектирования.

Введем агрегированные конструктивные параметры первого уровня $x(1) \in X_1, X_1 \in E^{N_1}, N_1 < N_0$, где $x(1) = f_1(x(0)), X_1 = \{x(1) = f_1(x(0)) \mid x(0) \in X_0\} \equiv f_1(X_0)$ – образ X_0 при отображении f_1 . Введем критерии первого уровня $W_1(x(1)) = (W_1^1(x(1)), \dots, W_1^{n_1}(x(1)))$.

Поскольку $N_1 < N_0$, размерность вектора конструктивных параметров стала меньше, то $x(1)$ обеспечивает более целостное, чем $x(0)$ представление о СТО. Величины f_1, W_1 должны быть согласованы с $W_0, x(0), X_0$. Например, крыло самолета описывается вектором $W_0, x(0)$ большой размерности. Вектор $x(1)$ может представлять описание варианта крыла в посадочной конфигурации, эквивалентного $x(0)$. Критериями W_0 и W_1 могут быть значения, учитывающие различную степень детализации описаний $x(0)$ и $x(1)$ соответственно.

Если и на этом уровне задача построения паретовского множества $\Pi(W_1, X_1)$ варианта СТО, соответствующего частным критериям $W_1(x(1))$ не может быть решена, тогда необходимо ввести следующий уровень агрегирования, и так далее до некоторого s -го уровня: $x(s) = f_s(x(s-1)) \in X_s, X_s \subset E^{N_s}, N_s < N_{s-1}, X_s = \{x(s) = f_s(x(s-1)) \mid x(s-1) \in X_{s-1}\} = f_s(X_{s-1})$, когда задача формирования множества $\Pi(u_s, X_{s1})$ может быть решена за приемлемое время.

Такая декомпозиция неоднозначна и реализация даже одного варианта агрегирования требует значительных ресурсов. Поэтому желательно уменьшить число этапов агрегирования, но при этом возрастет вероятность ошибок при переходе от одного описания СТО к другому.

После выполнения всех этапов агрегирования, т.е. введения величин $x_k, X_k, W_k, 0 \leq k \leq s$,

задачу «внутреннего» проектирования можно решить так. Найдем $\Pi(W_s, X_s)$ и все решения уравнений (4) из множества X_{s-1} , когда $x(s)$ пробегает множество $\Pi(W_s, X_s)$.

$$f_s(x(s-1)) = x(s) \quad (4)$$

Эти решения определяют множество $\bar{X}_{s-1} = f_s^{-1}(\Pi(W_s, X_s))$, где $f_s^{-1}(\Pi)$ – полный прообраз множества Π при отображении $f_s(\bullet)$. Далее решаем задачу нахождения множества $\Pi(W_{s-1}, X_{s-1})$ и $\bar{X}_{s-2} = f_{s-1}^{-1}(\Pi(W_{s-1}, \bar{X}_{s-1}))$. Продолжая этот процесс, через s шагов придем к задаче отыскания $\Pi = \Pi(W_0, X_0)$. Этот процесс можно представить в виде такого рекуррентного уравнения процесса проектирования:

$$\begin{aligned} \Pi_k &= \Pi(W_k, f_{k+1}^{-1}(\Pi_{k+1})), \\ k &= s-1, s-2, \dots, 1, 0, \Pi(W_s, X_s). \end{aligned} \quad (5)$$

Под решением задачи «внутреннего» проектирования будет множество Π_0 .

На каждом шаге решения рекуррентного уравнения происходит отбор, приводящий к сокращению числа вариантов проекта и требуемой детализации на следующем шаге, так как $\Pi_k \subseteq X_k, 0 \leq k \leq s-1$. В том случае, когда на каждом уровне агрегирования конструктивных параметров определен один глобальный критерий эффективности $F_k, 0 \leq k \leq s$ принимает вид

$$\begin{aligned} \Pi_k &= Arg \max_{x(k) \in f_{k+1}^{-1}(\Pi_{k+1})} F_k(x(k)) \quad (k = s-1, \\ s-2, \dots, 1, 0), \quad \Pi_s &= Arg \max_{x(s) \in X_s} F_k(x(s)) \end{aligned} \quad (6)$$

Решение (6) требует применения методов глобальной оптимизации. Собственно процесс решения (6) можно интерпретировать как синтез СТО, соответствующий движению проекта снизу вверх, т.е. от $x(s)$ к $x(0)$. Напротив, движение $x(0) \rightarrow X(s)$ описывает процесс анализа.

Поскольку описанная декомпозиция неоднозначна (например, агрегирование выполнено неэффективно, неудачно выбраны f_k и W_k), то может оказаться, что множество Π_0 , получен-

ное в результате решения задачи «внутреннего» проектирования, не будет содержать ни одного варианта проекта из множества $\Pi(W_0, X_0)$, что нежелательно. Поэтому агрегаты f_k и критерии W_k на каждом шаге необходимо определенным образом согласовывать.

Для этого используется понятие согласованности (если для $\forall \bar{x}, \bar{y} \in X_{k+1}, x \in X_k$ таких, что $\bar{y} R_{k+1} \bar{x}, x \in f_{k+1}^{-1}(\bar{x})$, найдется точка $y \in f_{k+1}^{-1}(\bar{y})$, доминирующая x , т.е. $y R_k \bar{x}$, где $W_k(x(k)) = (W_k^1(x(k)), \dots, W_k^{n_k}(x(k)))$ – векторный критерий, определенный на множестве X_k , при фиксированном $k, 0 \leq k \leq m, R_k$ – бинарное отношение такое, что для $\forall \bar{x}, \bar{y} \in X_k$ полагаем $x R_k y$ тогда и только тогда, когда $W_k^i(x) > W_k^i(y)$ для всех $i, 1 \leq i \leq n_k$ и найдется i_0 , для которого $W_k^{i_0}(x) > W_k^{i_0}(y)$) и вполне согласованности (если они согласованы и для $k, 0 \leq k \leq m-1$ отображение $f_{k+1}(\bullet)$ изотонное: для $\forall x, y \in X_k$ из $y R_k x \Rightarrow f_{k+1}(y) R_{k+1} f_{k+1}(x)$) отношения $R(R_0, R_1, \dots, R_m)$ и агрегирования f_k .

Установить согласованность отношений предпочтения и агрегирования означает, что конструкторы k -го и $(k+1)$ -го уровней имеют примерно одинаковые представления о том, что такое «хорошая» СТО. Точнее, конструктор k -го уровня, детализируя проект, полученный от конструктора $(k+1)$ -го уровня, может сохранить результат сравнения двух проектов, имеющийся на более высоких уровнях внутреннего проектирования. Полное согласование означает, что любые два варианта СТО, один из которых эффективнее на k -м уровне, останутся такими же и для конструктора $(k+1)$ -го уровня. Иными словами, при переходе от одного уровня агрегирования к другому, более высокому, не появляются дополнительные критерии оценки СТО, меняющие результат сравнения двух проектов в иерархических системах проектирования (конструкторское бюро). Предположение о полной согласованности

отношений предпочтения конструкторов и агрегирования естественно, поскольку результат сравнения двух СТО при подробном и грубом (агрегированном) описании должен оставаться неизменным. Отметим, что к полной согласованности следует стремиться при построении ОИТ, так как выбор W_k, f_k не ограничены традициями проектирования и привычками конструкторов (создаются впервые). В связи с этим важна задача получения достаточных условий и эффективных алгоритмов проверки согласованности отношений и агрегирования при заданных W_k, f_k .

Известно [3], что если отношение R и агрегирование f_k согласованы, то решение Π_0 уравнения (5) содержит решение задачи проектирования (3), т.е.

$$(W_0, X_0) \subseteq \Pi_0, \quad (7)$$

откуда вытекает, что если R и f вполне согласованы, то $\Pi_0 = \Pi(W_0, X_0)$ и следствие: обозначим $\pi(W, X)$ произвольную точку из множества Парето $\Pi(W, X)$ и вместо уравнения (5) рассмотрим уравнение $\pi_k = \pi(W_k, f_{k+1}^{-1}(\pi_{k+1}))$, $k = m-1, m-2, \dots, 1, 0$. $\pi_m = \pi(W_m, X_m)$, тогда, если отношение предпочтения R и агрегирование вполне согласованы, то $\pi_0 = \pi(W_0, X_0)$ т.е. $\pi_0 \in \Pi(W_0, X_0)$. Этот факт подтверждает, что задача проектирования (3) сводится к решению уравнений (5), (6).

Условия согласования необходимы, так как при их нарушении нельзя гарантировать включение (7). Полная согласованность важна, когда требуется найти точно множество Парето $\Pi(W_0, X_0)$, например при дальнейшем использовании некоторого сложного, трудно вычислимого глобального критерия. Следовательно, полная согласованность избавляет от разработки и проверки на эффективность «лишних» проектов. В том случае, когда на нулевом уровне уже существует глобальный критерий F_0 , полное согласование уменьшает число проектов, детализация которых проводится на

$m-1, m-2, \dots, 1$ уровнях внутреннего проектирования. Решение (5), (6) включает в себя решение экстремальных и обратных задач. Известно, что подобные задачи неустойчивы по отношению к погрешностям в исходной информации и в вычислениях. Вопросы устойчивости в процессах проектирования (5), (6) важны при создании ОИТ проектирования СТО, поскольку на практике никогда точно не известны множества X_k , а существуют некоторые приближения к ним. Эта ситуация типична даже тогда, когда точно описаны множества реализуемых проектов и функции f_k . Использование связей $X_{k+1} = f_{k+1}(X_k)$ для эффективного построения множеств X_k теряет смысл, поскольку пришлось бы перебрать все множество X_0 . Таким образом, метод решения задач проектирования (10), основанный на сведениях их к (5), (6), должен базироваться на приближенной информации.

Предложенный подход к задаче внутреннего проектирования для ОИТ проектирования СТО требует разрешения двух проблем: описания СТО с разной степенью агрегирования и разработки алгоритмов решения уравнения (5), т.е. соответствующих методов оптимизации.

Формализация проектирования

Предположим, что процесс моделирования состоит из нескольких этапов, где строится грубая модель и проверяется правильность выбора ее основных параметров; если необходимо, то можно производить уточнение модели. Переход к более точной модели должен быть согласован с более грубым описанием, что можно выполнить двумя путями: оставаясь на данном уровне детализации или переходя на более подробный уровень детализации.

В первом случае, если есть априорные данные, можно решить такую задачу по уточнению модели: задан объект, в процессе работы которого одновременно могут быть изменены его входная $x(t)$ и выходная $y(t)$ переменные. Необходимо построить оптимальную модель объекта, т.е. найти $y(t) = A_t x(s)$ (более точно

необходимо определить оценку $y^*(t) = A_i^* x(s)$ [3, 6]. Определить такую оценку можно, например, по критерию минимума среднего квадрата ошибки. Если нет априорных данных, то для уточнения модели можно использовать, например, методы компьютерного моделирования.

Действительно, если произвольную имитацию процесса обозначить θ и если она имеет случайный характер, то имитационная модель позволяет наблюдать при каждом x некоторые случайные показатели $f^\theta(x, \theta)$, $\theta = 0, 1, \dots, m$, зависящие от θ . Часто стремятся найти такое x , при котором среднее значение показателя $f^\theta(x, \theta)$ принимает наименьшее значение при определенных ограничениях на средние значения остальных показателей $f^i(x, \theta)$, $i = 1, 2, \dots, m$, т.е. требуется решить такую задачу компьютерного моделирования: минимизировать $F^0(x) = Mf^0(x, \theta)$ при ограничениях $F^i(x) = Mf^i(x, \theta) \leq 0$, $i = 1, 2, \dots, m$, $x \in X$.

Во втором случае, т.е. когда осуществляется переход на более подробный уровень детализации, необходимо также производить согласование более полной модели с моделью предыдущего уровня, можем получить целую систему «вложенных» друг в друга моделей. Причем на каждом из таких уровней уточнение модели можно проводить с помощью некоторых алгоритмов идентификации / оптимизации.

Рассмотренные эмпирические соображения можно математически формализовать, что позволит достаточно эффективно реализовать процесс построения моделей, например КЭМ самолета [3, 5].

Объектом моделирования можно называть два множества (E, F) , где E – набор элементов реальной СТО, а F – набор правил, характеризующих связи между элементами F . Пусть L – система подмножеств декартова произведения ExF . Тогда если $L_1 = (E_1, F_1) \in L$, то E_1 – некоторый набор элементов моделируемого объекта, а F_1 – соответствующие правила из F . На совокупности подмножеств рассмотрим функ-

цию μ со значениями в некоторой полной решетке C . Значения μ понимаются как векторы, компоненты которых характеризуют работу элементов E_1 «соединенных» по правилам из F_1 . В этот набор величин могут входить как внутренние показатели моделируемой системы (переходные характеристики и др.), так и требования, предъявляемые к работе рассматриваемых элементов (надежность и пр.).

Объектами моделирования есть $\mathfrak{R} = (E, F, L, \mu, C)$ с которыми ассоциируется семейство объектов–моделей $\mathfrak{R} = (E_a, F_a, L_a, \mu_a, C)$ ($a \in I$), где множество индексов частично упорядочено. Это свойство I интерпретируется в том смысле, что сравнимые между собой индексы соответствуют моделям, полученным один из другого детализацией (на семействе моделей задано двухпараметрическое множество отображений $f_{\alpha\beta} = (f_{\alpha\beta}^{(1)}, f_{\alpha\beta}^{(2)})$, $f_{\alpha\beta} : (E_\beta, F_\beta) \rightarrow (E_\alpha, F_\alpha)$, $\alpha \leq \beta$, $\alpha, \beta \in I$ такое, что $\forall \alpha \leq \beta \leq \gamma \Rightarrow f_{\alpha\gamma} = f_{\alpha\beta} \circ f_{\beta\gamma}$, где $f_{\alpha\alpha}$ – тождественное отображение. Формализация связей между объектом и семейством моделей определяется отображениями $g_\alpha : (E, F) \rightarrow (E_\alpha, F_\alpha)$, которые должны быть согласованы с отображениями $f_{\alpha\beta}$ так:

$$g_\alpha = f_{\alpha\beta} \circ g_\beta, \text{ для } \forall \alpha, \beta \in I, \alpha \leq \beta. \quad (8)$$

При таком подходе к определению согласованных моделей семейство $((E_\alpha, F_\alpha), f_{\alpha\beta})$, $\alpha, \beta \in I$ представляет собой проектную систему. Поскольку детализация моделей проводится с целью улучшения качества моделирования исследуемого объекта, где функции μ_α ($\alpha \in I$) отвечают за качество описаний, то условие

$$\mu_\beta(A) \geq \mu_\alpha(f_{\alpha\beta}(A)), \text{ где } \alpha, \beta \in I, \alpha \leq \beta \quad (9)$$

означает, что: меры качества одного и того же подмножества на разных уровнях детализации должны быть сравнимы; при переходе к более детальной модели ее качество не должно ухудшаться.

В таких условиях система (E_α, F_α) , $\alpha \in I$ – проективна, для нее существует проективный

предел (E_p, F_p) и существуют предельные значения L_p, μ_p для $\{L_p\}$ и $\{\mu_p\}$. Следовательно, определенная модель $\mathfrak{R}_p = (E_p, F_p, L_p, \mu_p, C)$ будет полной.

Модель \mathfrak{R}_p адекватна (по критерию μ) объекту \mathfrak{R} , если существует взаимно однозначное соответствие $i: (E, F) \rightarrow (E_p, F_p)$, удовлетворяющее условиям $i(L) = L_p$ и для $\forall A \in L$ $\mu(A) = \mu_p(i(A))$. Заметим, что i однозначно определяется отображениями $g_\alpha, \alpha \in I$. Согласно [3] ММ $\mathfrak{R}_\alpha = (E_\alpha, F_\alpha, L_\alpha, \mu_\alpha, C)$ адекватна объекту $\mathfrak{R} = (E, I, L, \mu, C)$ тогда и только тогда, когда выполняются условия (8, 9) и соотношение $g_\alpha^{-1}(A) \in L, \mu(g_\alpha^{-1}(A)) = \mu_\alpha(A)$ для $\forall \alpha \in I$ и $A \in L_\alpha$.

Предложенный подход позволяет определить пути формализации двух основных ситуаций, которые наблюдаются при проектировании СТО: последовательного усложнения и уточнения (проектирование сверху вниз); последовательное упрощение (проектирование снизу вверх).

Неформальный анализ первой ситуации в интерпретации СТО в терминах блок-схем или схем-моделей показывает, что эти понятия только раскрывают ее структуру, но не решают вопросы о связях между элементами системы, т.е. не позволяют раскрыть структуру всего множества элементов системы. Связи элементов системы между собой – очень важное обстоятельство, поскольку связи сложной системы (которую проектируем) с элементами (из которых строится сложная система) по существу лежат в основе метода проектирования. Более точно: процесс проектирования СТО по существу сводится к построению из базисных элементов системы любой сложности с помощью композиций, т.е. проблема уточнения структуры системы сводится к проблеме нахождения базиса и композиций. Очевидно, что основная проблема здесь – нахождение композиций (проектирование, которое позволяет стро-

ить из заданных базовых элементов более сложные элементы) [7].

Очевидно, что если строго заданы композиции, то, следовательно, строго заданы и декомпозиции, т.е. средства, которые позволяют раскладывать более сложные системы на простые.

В проектировании снизу вверх основной прием исследования – декомпозиция и агрегирование. Декомпозиция состоит в разложении исходной системы на ряд независимых подсистем, а агрегирование – в замене какого-либо элемента системы агрегатом.

Критерии качества

Особенности «внешнего» и «внутреннего» проектирования СТО определяются спецификой СТО. Например, в задаче проектирования крыла самолета один из критериев качества – вес конструкции G_0 , который задается на этапе «внешнего» проектирования. Его можно связать с экономическими критериями качества. Те-

кущий вес конструкции $G = \sum_{i=1}^m V_i \rho_i$, где m – количество субобъектов, а V_i и ρ_i – соответственно, объем и удельный вес материала субобъекта. Параметры субобъектов определяются внешними аэродинамическими нагрузками, количеством и характером связей между субобъектами. Задача проектирования крыла с $G = G_0$ состоит в определении распределения веса между субобъектами, в зависимости от величины и характера нагружения. Размерность вектора конструктивных параметров $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ в этом случае определяется как $N = \sum_{j=1}^m k_j$, где k_j – количество связей i -го субобъекта, m – количество субобъектов.

Оптимальное значение веса крыла $G = G_0$ может быть получено при различных сочетаниях весов субобъектов. При этом напряжения в субобъектах при расчетных нагрузках не должны быть больше максимально допустимых значений. Поэтому при решении этой задачи необходимо использовать такие критерии

качества, как величины максимально допустимых напряжений $A_0(\sigma, \tau)$, определяемых характеристиками материалов субобъектов и особенностями нагружения (допустимые напряжения для сжатых субобъектов, как правило, ниже допустимых напряжений для растянутых субобъектов) [9].

Алгоритмы и технологии

По существующей технологии применения МКЭ решение задачи контроля уровней напряжений в субобъекте СТО можно представить в виде следующей итерационной процедуры:

$$\rightarrow \{x\}_0 \rightarrow M_i \rightarrow \{C\}_i \rightarrow A_i(\sigma, \tau) \rightarrow R(W) \rightarrow \{x\}_{i+1}$$

где $\{x\}_0$ – исходные параметры, M_i – создание КЭМ, $\{C\}_i$ – расчет НДС, $A_i(\sigma, \tau)$ – анализ НДС, $R(W)$ – проверка критерия качества, $\{x\}_{i+1}$ – новые (измененные) параметры.

Трудоемкость решения задачи оценивается по формуле: $L = \sum_{i=1}^k [\zeta_1(N) + \zeta_2(m)]_i$, где $\zeta_1(N)$ – трудоемкость создания i -й КЭМ, $\zeta_2(m)$ – трудоемкость анализа НДС, k – количество итераций.

Поскольку общая модель СТО представляется как совокупность моделей субобъектов, каждая из которых исследуется отдельно со своим множеством конструктивных параметров $x_j \in X$ и критериев качества W , то структура данных проекта имеет вид дерева (рис. 1).

Синтез конечного результата на каждом j -м уровне декомпозиции представляет собой объединение результатов задач $j + 1$ -го уровня с последующим сравнением с критериями качества j -го уровня. Например, при решении задачи контроля веса конструкции СТО сумма весов субобъектов сравнивается с G_0 .

Рассмотрим ОИТ проектирования СТО на примере решения задачи определения НДС конструкции планера самолета [8].

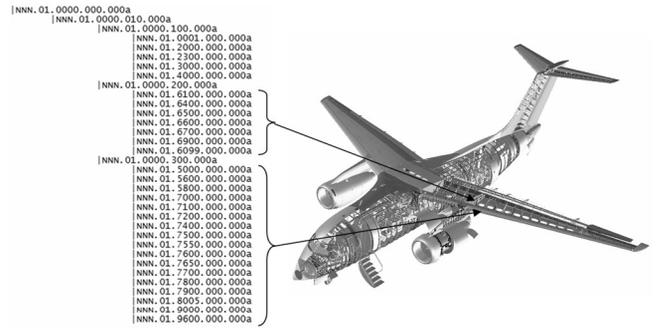


Рис. 1. Дерево проекта

Для анализа НДС конструкции самолета традиционно применяются *Nastran* и *ANSYS* [2, 10]. Ими используются два уровня декомпозиции КЭМ и, соответственно, две группы алгоритмов: универсальный для M_i , $A_i(\sigma, \tau)$ и четыре специализированных для расчета НДС КЭ, $\{C\}_i$. Количество уровней декомпозиции обусловлено тем, что в МКЭ решена только задача синтеза КЭМ из КЭ. Поэтому моделирование СТО в *Nastran* и *ANSYS* нуждается в создании геометрических моделей (ГМ), используемых для формирования КЭМ. Дополнительные уровни декомпозиции формируются с помощью *CAD*-систем [11]. Критерий выполнения декомпозиции – постоянство параметров субобъектов в ГМ (рис. 2). Синтез общей КЭМ СТО происходит путем объединения близко расположенных узлов КЭМ субобъектов. Такой метод – неоднозначен, в силу неогласованности структур КЭМ субобъектов. Отметим, что количество ГМ, необходимых для формирования КЭМ СТО, приблизительно равно количеству субобъектов. Поэтому время создания КЭМ для расчета НДС всего СТО, например планера самолета, составляет от двух до пяти лет. Для анализа НДС используется метод интерактивной визуализации, эффективность которого существенно зависит от количества субобъектов. Поэтому, например, время анализа НДС планера самолета составляет от одного до шести месяцев.

Приведенные факты подтверждают актуальность разработки ОИТ проектирования СТО.

Новая технология

На основе выполненного анализа и изложенных теоретических подходов предлагается

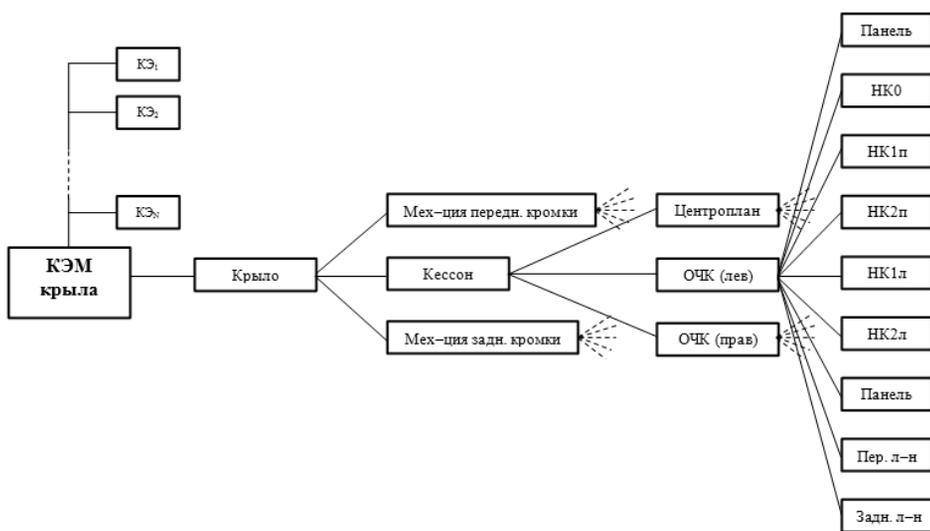


Рис. 2. Декомпозиция геометрической модели

новая ОИТ проектирования СТО, в частности, проектирования самолетов. Данная технология сокращает время создания КЭМ и анализа НДС благодаря использованию трех и более уровней декомпозиции КЭМ, что позволяет отказаться от использования ГМ. Предлагается следующий алгоритм ОИТ проектирования СТО, например, самолета:

Шаг 1. Выделить из общей структуры самолета планер и определить исходные данные для расчета НДС (рис. 3).

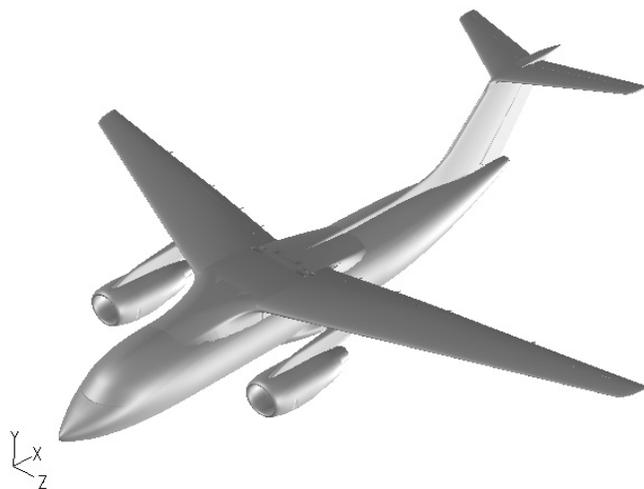


Рис. 3. 3D-модель самолета

Шаг 2. Выполнить декомпозицию планера по функциональным признакам (рис. 4).

Шаг 3. Выполнить декомпозицию субобъектов по конструктивным признакам (рис. 5).

Шаг 4. Сформировать КЭМ субобъектов с учетом их связей и условий нагрузки (рис. 6).

Шаг 5. Выполнить синтез КЭМ СТО на основе КЭМ субобъектов (рис. 7).

Шаг 6. Проверить выполнение критерия $A_0(\sigma, \tau)$. Если критерий выполняется, то перейти на Шаг 7. Иначе, перейти на Шаг 2.

Шаг 7. Конец.

Отметим, что на каждом шаге декомпозиции из общего вектора конструктивных параметров i -го уровня $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ выделяются частные векторы субобъектов $i + 1$ -го уровня, а вектор конструктивных параметров

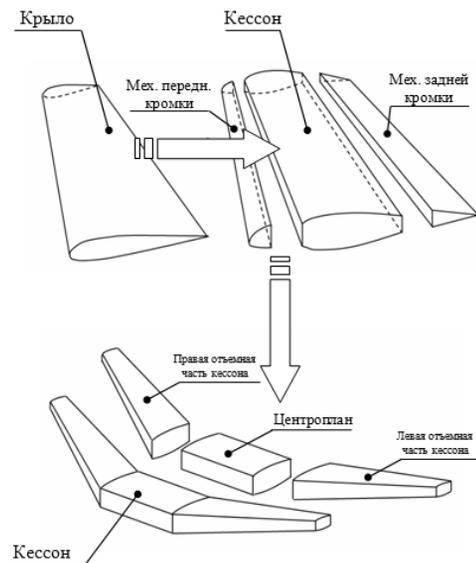


Рис. 4. Декомпозиция крыла на субобъекты

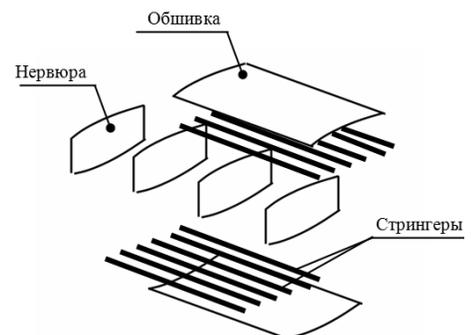


Рис. 5. Декомпозиция центроплана на субобъекты

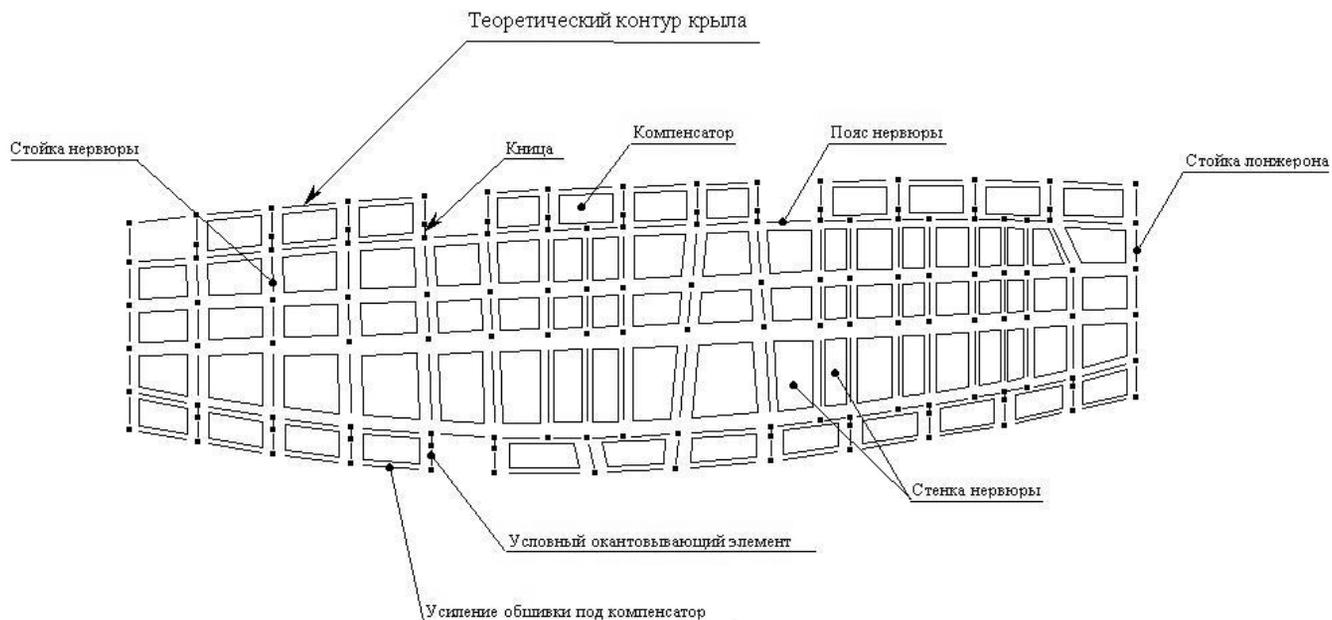


Рис. 6. Конечно-элементная модель типовой нервюры крыла (для наглядности элементы раздвинуты)

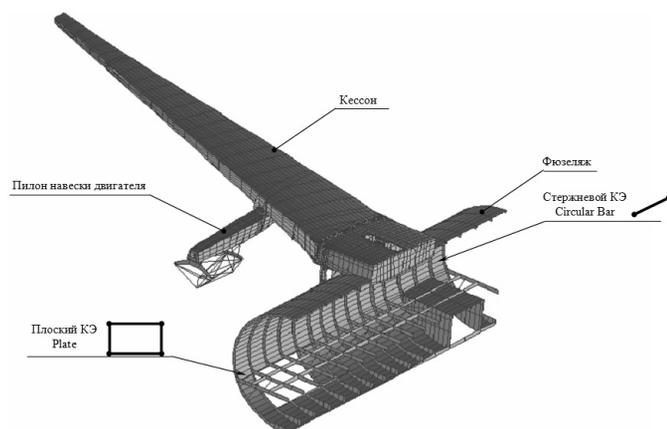


Рис. 7. Фрагмент конечно-элементной модели планера самолета

i -го уровня преобразуется в вектор интегральных параметров $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_M)$, где $M \ll N$. Например, при проектировании крыла используются такие интегральные параметры, как вес кессона, механизации передней и задней кромок. Таким образом, вместо 10^5 контролируется три параметра. При этом допускается корректировка частных критериев качества $i + 1$ -го уровня без изменения критерия i -го уровня.

Сокращение размерности частных векторов конструктивных параметров и критериев качества уменьшает количество классов алгоритмов проектирования на каждом уровне декомпозиции КЭМ. Например, на Шаге 4 процедуры при формировании КЭМ крыла самолета

требуется менее 10 классов алгоритмов, что позволяет автоматизировать процесс формирования КЭМ обшивки, лонжеронов, стрингеров и нервюр. Кроме того, наличие КЭМ субобъектов позволяет выполнять анализ НДС отдельных агрегатов за минимальное время. В итоге, существенно уменьшается время формирования общей КЭМ и анализа НДС самолета в целом.

Заключение. Одной из главных проблем, связанных с принципом декомпозиции, остается проблема синтеза проектных моделей, которая решена только для узкого круга задач (синтез 3D-моделей сборок, синтез КЭМ из КЭ). Не решена проблема синтеза структур и свойств КЭМ, что не позволяет оптимизировать алгоритмы решения задач, связанных с анализом прочности конструкций СТО. В результате, недопустимо увеличивается время создания КЭМ и анализа НДС СТО.

Предложенный метод формирования облика СТО в условиях использования ОИТ проектирования СТО, с одной стороны, позволяет найти агрегированные параметры «оптимальных» систем при решении задач «внешнего» проектирования, с другой, она – исходная в процессе «внутреннего» проектирования. Таким образом, формирование облика связывает этапы «внешнего» и «внутреннего» проектирования.

Показано, что процесс формирования облика включает в себя правильный выбор агрегированных параметров, частных критериев и описание множества допустимых технически реализуемых проектов СТО.

Предложен формализованный метод проектирования СТО, который позволяет математически формализовать и достаточно эффективно реализовать процесс построения моделей, например, КЭМ самолета. Он позволяет определить пути формализации двух основных ситуаций, которые имеются при проектировании СТО: последовательного усложнения и уточнения (проектирование сверху вниз); последовательного упрощения (проектирование снизу вверх).

На основе выполненного анализа и изложенных теоретических подходов предложена новая ОИТ проектирования СТО, в частности, самолетов. Данная технология сокращает время создания КЭМ благодаря использованию трех и более уровней декомпозиции КЭМ, что позволяет отказаться от использования ГМ. Кроме того, наличие КЭМ субобъектов позволяет выполнять анализ НДС отдельных агрегатов за минимальное время, в результате чего уменьшается общее время анализа НДС СТО. Таким образом, предложенная ОИТ позволяет существенно сократить общее время проектирования СТО.

1. *Теория и технология автоматизированного проектирования* / В.И. Скурихин, В.В. Дубровский, В.Б. Шифрин и др. – К.: Наук. думка, 1988. – 284 с.
2. *Шимкович Д.Г.* Расчет конструкций в *MSC/NASTRAN for Windows*. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.

3. *Зинченко В.П.* Проблемы оптимизации проектных исследований сложных технических систем // XXXV Междунар. симп. «Вопросы оптимизации вычислений». – ИК НАН Украины им. В.М. Глушкова, 2009. – Т. 1. – С. 253–259.
4. *Исследование* вопросов повышения качества разработки программного обеспечения PDM-систем за счет повышения независимости программных модулей / В.В. Борисов, Ф.Н. Горин, Н.П. Зинченко и др. // Интеллектуальные информационно-аналитические системы и комплексы: Сб. науч. тр. ИК НАН Украины им. В.М. Глушкова, 2000. – С. 136–141.
5. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. *Зинченко В.П.* Інформаційна технологія проектних досліджень складних технічних об'єктів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2000. – № 4. – С. 32–42.
7. *Борисов В.В.* Проблемы обеспечения надежности функционирования PDM-систем // Технології створення перспективних комп'ютерних засобів та систем з використанням новітньої елементної бази: Зб. наук. пр. ІК НАН України ім. В.М. Глушкова, 2000. – С. 67–72.
8. *Борисов В.В., Зинченко В.П.* Анализ актуальных проблем информационной технологии декомпозиции и синтеза конечно-элементных моделей // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: Гос. Аэроком. Ун-т «ХАИ», 2009. – 44. – С. 79–91.
9. *Глаголев А.Н., Гольдинов М.Я., Григоренко С.М.* Конструкция самолетов. – М.: Машиностроение, 1975. – 480 с.
10. <http://www.emt.ru> – описание ANSYS.
11. <http://www.catia.ru> – описание CATIA.

Поступила 23.09.2009

(после доработки 12.01.2011)

Тел. для справок: (044) 400-4523, (097) 432-6370 (Киев)

E-mail: bvv1958@volicable.com

© В.П. Зинченко, В.В. Борисов, 2011