

## **Проектирование отсеков поверхностей внешних обводов адаптивного крыла в САПР**

Ю. Ю. Викулин

*Улучшение взлётно-посадочных характеристик летательных аппаратов требует внедрения новых прогрессивных подходов, одним из которых является применение адаптивного крыла с гибкими обшивками. В виду конструктивной, компоновочной, технологической и аэродинамической сложности такого агрегата использование для его разработки САПР высокого уровня, таких как UNIGRAPHICS, CATIA и т. п. позволяет вести поддержку всего жизненного цикла изделия.*

*В настоящей статье раскрываются две основные задачи, возникающие при проектировании адаптивного крыла. Это ведение конструкторской базы данных готовых внешних обводов с использованием принципа параметрического проектирования в САПР и математическое моделирование двумерных обводов гибких обшивок для различных углов отклонения механизации передних и задних кромок адаптивного крыла.*

### ***Введение***

Совершенствование авиационной техники происходит постоянно, и предлагаются всё новые подходы к решению задачи улучшения взлётно-посадочных и крейсерских характеристик летательных аппаратов. Одним из таких новых направлений в конструкции самолётов является создание несущих поверхностей с геометрией, обладающей непрерывной производной на всех режимах полёта в частности адаптивного крыла.

Работы по созданию такого крыла ведутся во многих странах и первые результаты были достигнуты на экспериментальном самолёте F-111 в 80-х годах в США [1]. В те далёкие годы создание подобного рода крыла требовало больших капитальных затрат и применения новых технологий и материалов. В настоящий момент созданы материалы и разработаны различные виды конструкций приводов адаптивных крыльев. Они позволяют снизить затраты и применить такие крылья на новых гражданских и боевых самолётах.

Проектирование крыла начинается одновременно с проектированием всего самолёта на этапе аванпроекта, когда известны только первоначальные характеристики будущего летательного аппарата и по прототипам или эскизам конструктора со-

здаётся внешний облик в виде математической модели поверхности системой геометрического моделирования. Но уже на этом этапе проектирования необходимо с достаточной степенью точности воссоздать внешний облик ЛА, поскольку создание аэродинамической модели для последующих продувок или макета будущего изделия производится на высокоточном оборудовании стереолитографии или фрезерной обработки. От точности изготовления и исходной модели зависят полученные аэродинамические характеристики в аэродинамических трубах или численных расчётах по конечным элементам, прочностные характеристики и т. п. Для конструктивной проработки так же необходимо иметь уточнённую математическую модель поверхности крыла.

Создание методов проектирования поверхности адаптивного крыла является важной научно-технической задачей. Результатом исследований стали наборы программ и процедур, облегчающих конструктору построения поверхностей на всех этапах проектно-конструкторской работы.

### ***Глава 1. Проблемы представления информации о внешних обводах в современных САПР***

От локальных решений предприятия переходят к полному электронному определению изделий в САПР - электронному макету и CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия) [2]. Обеспечивается пространственная увязка сторон изделий без изготовления физических плазов и макетов поверхности изделий, исключается бумажный параллельный документооборот. Применяются международные стандарты, интерактивные электронные технические руководства (ИЭТР), другое нормативное обеспечение в области информационных технологий.

В процессе проектирования и изготовления изделий со сложными обводами, к которым могут быть отнесены самолеты и другие летательные аппараты, важное место занимают вопросы задания внешних поверхностей агрегатов, получения необходимой геометрической информации и её применения на всех этапах жизненного цикла изделия.

Поскольку качество обводов существенно влияет на летные характеристики ЛА, то, очевидно, что вопросы эффективного решения данного круга задач приобретают большую значимость.

Применение параметризации внешних обводов агрегатов - один из таких прогрессивных подходов. Неотъемлемой частью CALS – технологий является конструкторская база данных (рис. 1), содержащая информацию о готовых типовых решениях, таких как поверхности агрегатов ЛА.

В процессе наработок параметризованных моделей внешних обводов может создаваться библиотека типовых поверхностей, т. е. будет происходить накопление знаний, что так же является важной основой CALS – технологий, будет создана экспертная система, которая на основе заданных параметров ЛА сможет скомпоновать и создать точные внешние обводы всего летательного аппарата, состоящие из отдельных агрегатов.

Параметризованные модели хорошо проработаны только для граничного представления твёрдых тел (Boundary representation, B-Rep). Проектирование самих границ твёрдых тел, которые и представляют собой поверхности, остаётся всё ещё недостаточно изученным.

Существующий подход при создании параметризованных твердотельных деталей (B –rep) общего и специального машиностроения завоевал популярность из-за отсутствия программирования системы САПР на языках высокого уровня. Сама идея параметризации заложена в современные системы геометрического моделирования высокого уровня. Помимо этого, возможность визуализации параметров и незамедлительного перестроения всей геометрической модели даёт дополнительные преимущества при проектировании.

## ***2. Параметрическая модель крыла***

Параметр – величина, значения которой служат для различения элементов некоторого множества между собой. Параметры – независимые величины. Они широко применяются в математике, физике и других отраслях науки и техники. В геометрических задачах параметры выделяют единственную фигуру или подмножество фигур из множества фигур, соответствующих одному и тому же определению [3]. Параметризацией фигуры называется процесс выбора и подсчёта количества параметров, позволяющих выделить фигуру. В качестве фигуры рассматривается поверхность отсека крыла с процентной разбивкой и с единой формой профиля [4].

Примем в качестве системы параметризации декартову систему координат.

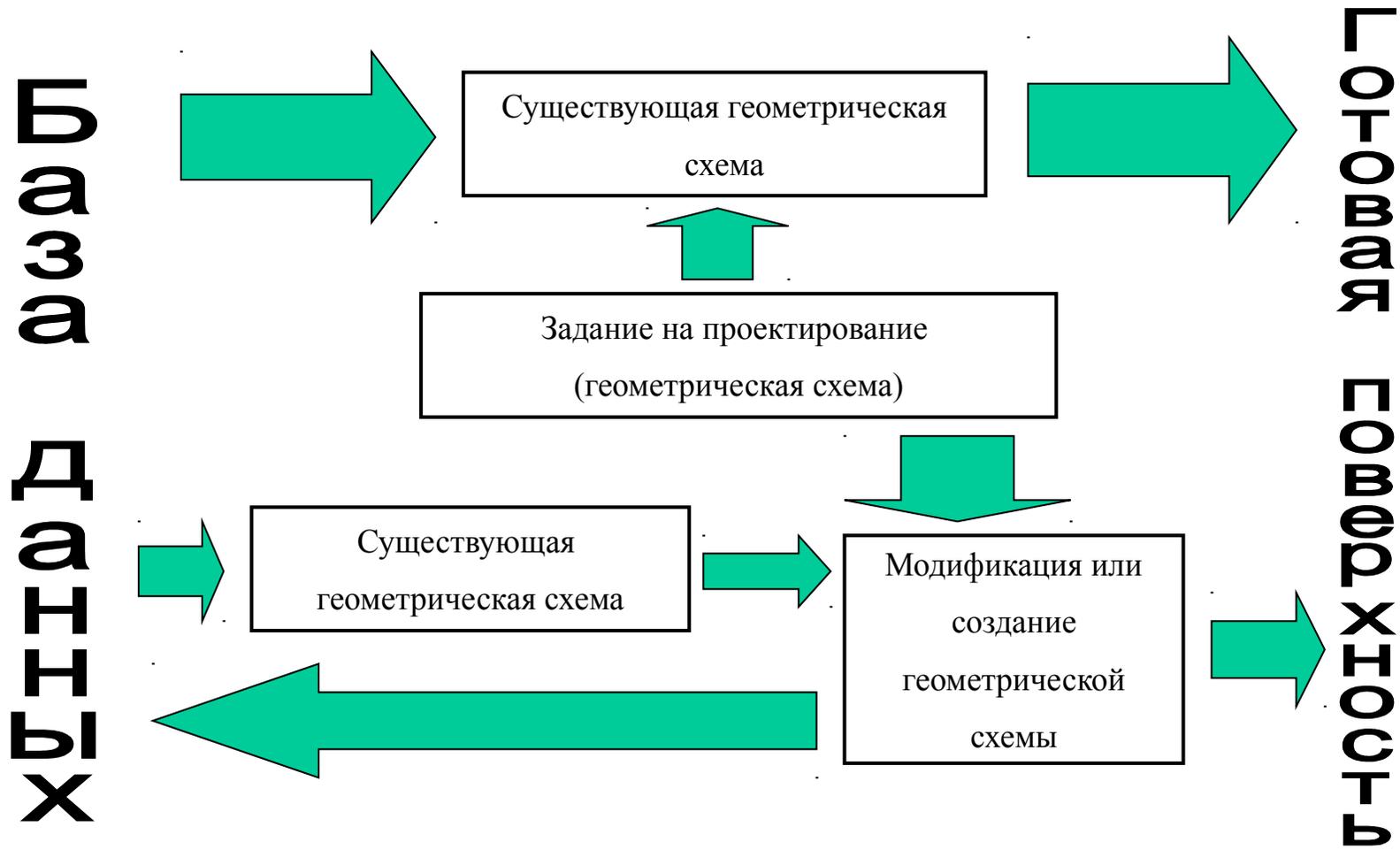


Рис.1 Схема составления конструкторской базы данных

Различают два вида параметризации: внутреннюю и внешнюю. Внутренняя параметризация – процесс выбора и подсчёта количества параметров, выделяющих поверхность из множества различных поверхностей, соответствующих одному и тому же определению. Положение поверхности в пространстве не принимается во внимание. Параметры, выделяющие поверхность независимо от её положения в пространстве, характеризуют её форму и поэтому называются параметрами формы. Число параметров формы поверхности обозначается  $P$ .

Внешняя параметризация – процесс выбора и подсчёта количества параметров, необходимых для выделения определённого положения поверхности из данного множества конгруэнтных фигур в пространстве. Параметры, выбранные при внешней параметризации, называются параметрами положения. Их число обозначается  $Q$ . Число, выражающее сумму параметров формы и положения, называют параметрическим числом поверхности и обозначают  $E$ . Таким образом,  $E=P+Q$ .

Выбираем параметры, которые выделяют поверхность и позволяют построить её с помощью алгоритма воспроизведения этой поверхности. В таком случае поверхность определена с точностью до алгоритма её воспроизведения. Так, например, параметрами, выделяющими единственный треугольник из множества фигур, соответствующих определению треугольника, являются три числа, выражающие длины его сторон. Поверхность крыла будем выделять через параметры его геометрической схемы  $p_0, p_1, p_2, p_3$  (рис. 2) и профиля  $c_1, c_2$  (рис. 3). Таким образом, количество параметров формы  $P=6$ . Количество параметров положения  $Q=5$  – три координаты начала декартовой системы крыла в системе координат самолёта и два угла установки в продольном и поперечном сечении.

Параметрическое число поверхности  $E=11$ .

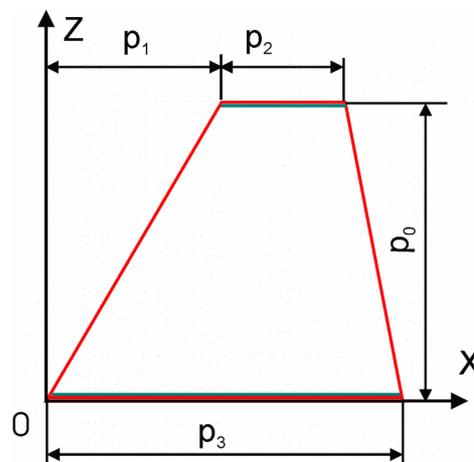


Рис. 2 Параметры, определяющие плановую проекцию крыла

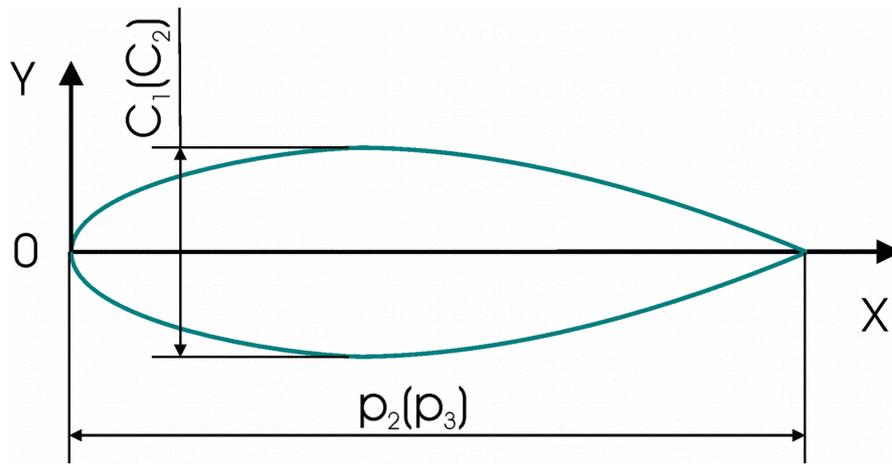


Рис. 3 Симметричный профиль крыла

Для адаптивного крыла количество параметров, определяющих геометрическую схему, значительно увеличивается (рис. 4).

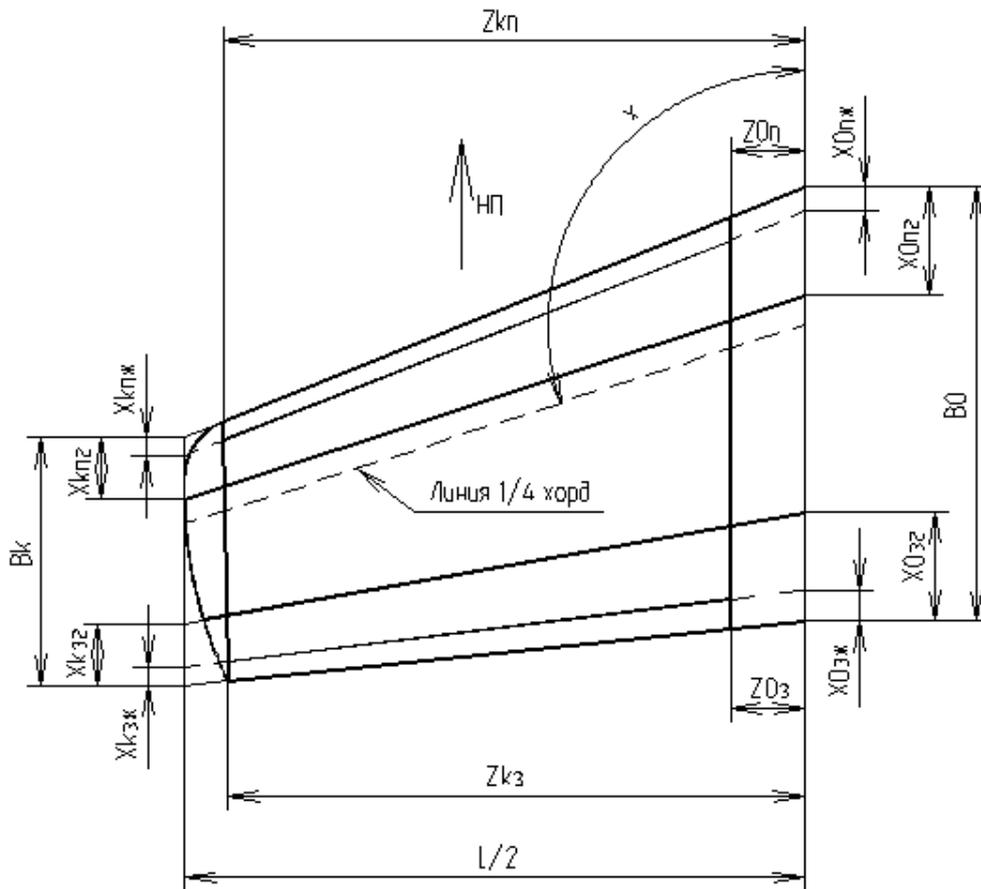


Рис. 4 Геометрическая схема крыла

На рис. 4 приняты следующие обозначения:  $L/2$  – полуразмах,  $\chi$  - угол стреловидности по  $1/4$  хорд,  $B_k$  – концевая хорда,  $B_0$  – центральная хорда,  $X_{0пж}$  – координата точки начало линии жёсткой части носка,  $X_{кпж}$  - координата точки конца линии жёсткой части носка,  $X_{0пг}$  - координата точки начала линии гибкой части носка,  $X_{кпг}$  - координата точки конца линии гибкой части носка,  $X_{0зж}$  - координата точки начала

линии жёсткой части закрылка,  $X_{кзк}$  - координата точки конца линии жёсткой части закрылка,  $X_{0зг}$  - координата точки начала линии гибкой части закрылка,  $X_{кзг}$  - координата точки конца линии гибкой части закрылка,  $Z_{кз}$  – конечная дистанция адаптивного закрылка,  $Z_{0з}$  - начальная дистанция адаптивного закрылка,  $Z_{0п}$  - начальная дистанция адаптивного носка,  $Z_{кп}$  - конечная дистанция адаптивного носка,  $НП$  – направление полёта.

При выделении параметров важно учитывать области их существования. Например, числа, выражающие длины сторон треугольника, могут быть только положительными и отличными от нуля. Сумма двух любых из этих чисел должна быть больше третьего числа. Параметры крыла  $p_2$ ,  $p_3$  – длина хорды профиля - должны быть положительны;  $p_1$  определяет стреловидность передней кромки:  $p_1 > 0$  - положительная стреловидность,  $p_1 < 0$  - отрицательная стреловидность. Если  $p_2=p_3$  и  $c_1=c_2$ , то получим цилиндрическую поверхность крыла.

В системах геометрического моделирования параметрами могут быть числовые значения или геометрические элементы, такие как точки, кривые, поверхности. Изменение одного или нескольких из них ведут к перестроению всей модели (рис. 5).

В авиации, силовые элементы – шпангоуты, лонжероны, стрингера, обшивки, панели и др. - в большинстве случаев связаны с внешним обводом ЛА и одни из граней твердотельных моделей этих тел представляют собой часть либо теоретической поверхности, либо эквидистанты от неё. Таким образом, модель поверхности агрегата ЛА представляет собой параметр построения твердотельной модели.

Создание электронного макета самолёта требует построения твердотельных моделей каждой детали и её увязка с окружением – другими деталями, входящими в проектируемый узел. Для данной детали они так же будут параметрами построения. Очевидно, что целиком электронный макет (ЭМ) нельзя назвать абсолютно параметризованной моделью в традиционном понимании, где изменение числового значения ведёт к перестроению и созданию нового геометрического облика. Наличие сложно изменяемых параметров в виде геометрических данных, таких как поверхности, ведут к возрастанию трудозатрат на проектирование.

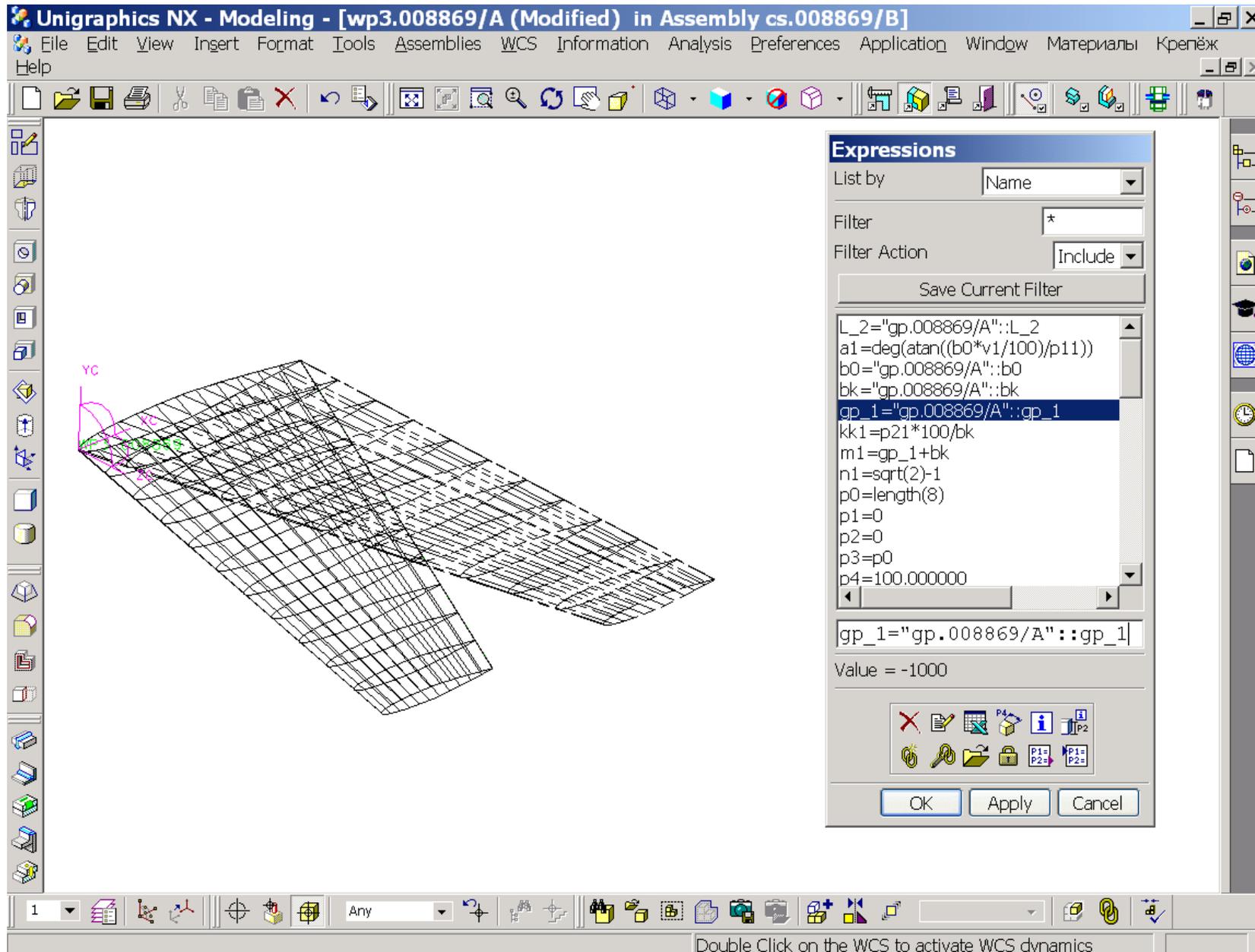


Рис. 5 Окно САПР UNIGRAPHICS с окном функции изменения параметров. Показана перестроенная поверхность крыла при изменении параметра  $P_1$

### **3. Методы построения поверхности адаптивного крыла**

Типы поверхностей.

Способы конструирования поверхностей крыльев по наличию исходных данных можно объединить в две большие группы:

- способы, применяемые на этапе эскизного проектирования;
- способы, формирующие практическую поверхность крыла.

В основу такого объединения положен как теоретический подход, так и практическая целесообразность применения того или иного метода проектирования несущих поверхностей, а так же их многообразие.

По типу поверхности крылья классифицируют следующим образом [4]:

линейчатые;

нелинейчатые;

существенно нелинейчатые;

интегральные.

Первый тип поверхности из приведённого списка является наиболее технологичным, что послужило их широкому распространению в авиационной промышленности.

Обшивка адаптивного крыла, образующая гладкую непрерывную поверхность, является гибкой упругой деталью. Существенной особенностью работы гибких деталей во всех случаях является наличие больших упругих перемещений, то есть сильное искажение их первоначальной конфигурации при внутренних напряжениях в пределах пропорциональности.

С точки зрения строительной механики, поверхности, подвергаемые изгибу, представляют собой оболочки. Эта оболочка изменяет свою форму (деформируется) под действием приложенных к ней нагрузок. Форма упругой поверхности образует аэродинамический обвод.

Существует геометрический метод построения поверхностей, являющихся поверхностями упруго деформированной оболочки, основанный на изометричном отображении или изгибании поверхности. Изгибание характеризуется постоянством некоторых величин. Так, теорема Гаусса показывает, что кривизна  $K$  – гауссова кривизна не меняется при изгибаниях, и так же сохраняются длины всех кривых на поверхности.

Конические и цилиндрические поверхности имеют нулевую гауссову кривизну, которая сохраняет своё значение при изгибаниях. Таким образом, при изменении кривизны профиля, формы поверхности крыльев всегда остаются в своём классе цилиндрических и конических поверхностей. Линейчатые поверхности представляют многообразие прямых с одним параметром, поэтому они имеют аналогию с пространственными кривыми, которые представляют многообразие точек с одним параметром [5].

Особое внимание следует уделить выбору кривых, применяемых для того или иного метода. Поскольку, при разработке математической модели поверхности на всех этапах проектирования применяется вычислительная техника, то допустимо использовать как аналитические кривые, так и кривые, полученные как результат численных алгоритмов.

Например, для описания профилей используются полиномиальные функции, универсальная степенная функция, кривые второго порядка, сплайновые кривые, а также кривые, полученные нелинейным преобразованием плоскости и кривые, математическая модель которых удовлетворяет условиям минимума волнового сопротивления и условиям изгиба при пластичных деформациях.

### ***3.1. Одномерные обводы для линейного каркаса поверхности***

Рассматривая упруго деформированную оболочку, аппроксимируем её поверхность сеткой одномерных обводов средних линий изогнутых гибких стержней. В частном случае один отсек поверхности может быть образован линейчатой развёртывающейся поверхностью.

Как известно из теории сплайнов, считается, что углы наклона средней линии незначительны  $|y'| \ll 1$ , и описывается уравнением:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  четыре неизвестных коэффициента, позволяющих задать четыре граничных условия.

Эту функцию (1) можно применить для описания направляющих линейчатой поверхности – срединной поверхности гибкой обшивки для рабочего положения механизации, но точность задания будет удовлетворительной только для малых углов отклонения. Следовательно, этот метод может быть применён только на этапе эскизного проектирования.

На этапе конструктивно-технологической проработки изделия необходимо применять более точный метод. Функция, описывающая упругую линию изогнутого стержня, должна удовлетворять минимуму интеграла внутренних напряжений по всей длине стержня. Математически это записывается так [6]:

$$\min J = \int_0^l k^2, \quad (2)$$

где  $k$  - кривизна кривой,  $l$ -длина стержня.

Если принять  $|y'| \ll 1$ , то решением этого интеграла является уравнение (1). Если же не принимать такого допущения, то аналитическое решение получить не удаётся и необходимо применять численные методы. Один из таких методов изложен в работе Мелума [7]. В ней показывается, что кривая, удовлетворяющая условию (2) для плоского случая должна состоять из отрезков клотоиды – «Спирали Корню».

Применение напряжённого сплайна, который является математическим аналогом изогнутого стержня, подвергнутого однородному растяжению, приложенному к его концам [8], повышает число граничных условий до пяти по сравнению с (1) и позволяет запечатлеть в двумерном обводе поверхности дополнительную конфигурацию обшивки.

В системах автоматизированного проектирования стандартом де-факто стало применение в качестве сплайновой кривой неоднородного рационального  $B$ -сплайна (NURBS). Поскольку все не алгебраические кривые, построенные в этих системах, задаются NURBS, то представляется необходимым дальнейшая проработка и исследование NURBS в качестве основных формообразующих кривых.

### ***Заключение***

Проведённые автором статьи исследования, показали, что правильное использование параметров формы при задании отсеков поверхностей крыльев позволяет значительно сократить сроки опытно-конструкторских работ при разработке новых образцов авиационной техники [9]. Для отсеков поверхности адаптивных крыльев разработаны алгоритмы и процедуры проектирования в САПР моделей поверхностей гибких обшивок по линейному каркасу NURBS, использующих свойства изгибания поверхности [10].

## **Список литературы**

1. Крыло с гибкой обшивкой, изменяющее в полёте форму профиля/ Пер. с англ. . В.Б. Рыбак. ст. D.K.Gould . Flexible-skin wing changes shape in flight. из журн.:Automotive Engineerings.- 1982.-v. 90, No1.- p. 66-69.
2. Информационные технологии в наукоёмком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса/ Под ред. А. Г. Братухина. – К.: Техніка, 2001. – 728 с.
3. Тевлин А. М. Курс начертательной геометрии (на базе ЭВМ): Учебник для инж. - техн. вузов/Тевлин А. М., Иванов Г. С., Нартова Л. Г. и др.; Под ред. А. М. Тевлина. – М.: Высш. школа, 1983. – 175 с.
4. Давыдов Ю.В., Злыгарев В.А. Геометрия крыла: Методика и алгоритмы проектирования несущих поверхностей. - М.: Машиностроение. 1987. - 136 с.
5. Гильберт Д., Кон-Фоссен С. Наглядная геометрия: Пер. с нем. – 3-е изд.-М.: Наука, 1981. – 344 с.
6. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 304 с., ил.
7. Mehlum E. 1974, Non-linear Splines In Computer-Aided Geometric Design (R.E. Barnhill and R.F. Riesenfeld, eds), Academic Press.
8. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с., ил.
9. Викулин Ю.Ю. Основа методики создания типовых параметризованных несущих поверхностей с двумя базовыми профилями и типовыми законцовками двойной кривизны // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности: Тезисы докладов первой научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. Ноябрь 2002 г. – Москва, ОАО «ОКБ Сухого», 2002.-С. 59-61.
10. Викулин Ю.Ю. Проектирование математической модели поверхности отклоняемого носка адаптивного крыла // XXVII Гагаринские чтения: Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. 9-12 апреля, 2002г. - Москва, 2002. – С. 130-131.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Викулин Юрий Юрьевич, аспирант Московского авиационного института (Государственного Технического Университета) на кафедре «Прикладная геометрия». Рабочий телефон: 941-75-24. E-mail: [yuryvikulin@mtu-net.ru](mailto:yuryvikulin@mtu-net.ru)