

На правах рукописи



**Мирошниченко Павел Владимирович**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАМОТКИ  
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ  
ЛОКАЛЬНО-АППРОКСИМАЦИОННЫХ СПЛАЙНОВ**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования  
(авиационная и ракетно-космическая техника)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Денискин Юрий Иванович,  
д.т.н., профессор,  
профессор кафедры «Инженерная графика»  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского  
университета)

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор,  
зав.кафедрой экономической информатики  
ФБГОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный университет»  
Мартынов Виталий Владимирович;  
  
к.т.н,  
руководитель департамента ИТ решений ООО  
«ДжиИ Хелскэа» (GE Healthcare / General  
Electric)  
Аведьян Артем Богосович

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «МАТИ – РГТУ им.  
К.Э.Циолковского», 121552, г.Москва,  
ул.Оршанская, д.3

Защита диссертации состоится 29 декабря 2014 г. в 10:00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.125.13 ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Отзывы на автореферат направлять по адресу 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.13,  
к.т.н., профессор



Л.В. Маркин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Интенсивное развитие и создание новых поколений авиационной техники определяют задачи разработки новых конструкционных материалов, обеспечивающих оптимальные физико-механические характеристики авиационных конструкций, с применением современных технологий. Наиболее перспективными являются конструкционные композиционные материалы (ККМ) на основе углеродных, борных, стеклянных, органических и других видов волокон и нитей. Некоторые физико-механические свойства ККМ значительно превосходят аналогичные свойства металлических материалов. Например, удельная прочность ККМ в 4-5 раз превышает удельную прочность стали, алюминиевых и титановых сплавов. Композиционные материалы при этом обладают низкой теплопроводностью, высокой термостойкостью, хорошими технологическими, электроизоляционными, антикоррозийными свойствами и сравнительно малым удельным весом. Важнейшим преимуществом технологии изготовления авиационных и других конструкций из ККМ является возможность получать монолитные конструкции без швов и скреплений, что позволяет достаточно просто воспроизводить теоретические контуры внешних обводов летательного аппарата при сохранении его аэродинамических свойств.

Использование ККМ в авиационной технике напрямую связано с созданием современных эффективных технологий изготовления авиационных конструкций с комплексом наперед заданных характеристик при условии обеспечения высокого уровня автоматизации. В настоящее время при изготовлении авиационных конструкций из ККМ применяется один из самых популярных и эффективных методов – намотка непрерывными нитями/волокнами на поверхность технологической оправки. Для совершенствования и оптимизации технологического процесса намотки требуется разработка программно-аппаратного обеспечения намоточных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на основе применения максимально полных математических моделей, описывающих процесс укладки ленты на поверхность оправки с учетом целого ряда условий и ограничений. Одним из таких обязательных условий является содержание в модели геометрических данных о задании поверхности технологической оправки и кривой намотки. Все выше перечисленное определяет актуальность выполненного диссертационного исследования.

**Целью диссертационной работы** является разработка научно-методического и программного обеспечения для автоматизации проектирования процесса намотки конструкций из композиционных материалов на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов. Научно-методическое обеспечение должно включать: модели процесса намотки, учитывающие реальную структуру ленты и единообразие формирования криволинейной поверхности технологической оправки, а также методику определения оптимальной траектории движения нитераскладывающего механизма намоточного станка с ЧПУ.

**Для достижения поставленной цели требуется решение следующих теоретических и прикладных задач:**

- разработать геометрические модели процесса укладки ленты на сложную криволинейную поверхность технологической оправки с учетом универсальности их применения;
- разработать методики математического описания моделей процесса укладки ленты на сложную криволинейную технологическую поверхность оправки на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов;
- разработать алгоритмы получения явных приближенных формул локально-аппроксимационных сплайнов для расчета параметров процесса намотки;
- разработать методики построения оптимальной траектории движения нитераскладывающего механизма намоточного станка с ЧПУ для увеличения производительности процесса намотки;
- выполнить программную реализацию разработанного научно-методического обеспечения автоматизации проектирования процесса намотки в виде программного обеспечения.

**Объектом диссертационного исследования** является теория автоматизации проектирования процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов.

**Предметом диссертационного исследования** является математический аппарат для автоматизации проектирования процесса намотки сложных конструкций из волокнистых композиционных материалов.

#### **Методы исследования.**

Поставленные в работе теоретические задачи решаются методами дифференциальной и вычислительной геометрий с привлечением математического анализа, дифференциальных уравнений, линейной алгебры, теории упругости и некоторых других областей математики. В прикладной части работы при разработке программного обеспечения

применялись методы теории вычислений, обыкновенных дифференциальных уравнений, теории матриц и современные методы программирования.

### **Научная новизна работы.**

Разработано научно-методическое обеспечение автоматизации проектирования процесса намотки авиационных конструкций из композиционных материалов на сложную технологическую поверхность оправки на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов:

1. Разработана методика математического описания модели укладки ленты на сложную криволинейную технологическую поверхность оправки на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов;
2. Разработан алгоритм получения явных приближенных формул для расчета параметров процесса намотки;
3. Разработана методика автоматизированного формирования оптимальной траектории движения нитераскладывающего механизма намоточного станка;
4. Разработан комплекс программных модулей, реализующих модель процесса укладки ленты.

Полученные методики и алгоритмы позволяют программно реализовать модель процесса намотки на поверхности зависимых сечений с криволинейной образующей с учетом структуры ленты и накладываемых ограничений по оптимальной траектории движения нитераскладывающего механизма станка.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика математического описания модели укладки ленты на сложную криволинейную технологическую поверхность оправки на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов;
2. Алгоритм получения явных приближенных формул для расчета параметров процесса намотки;
3. Методика автоматизированного формирования оптимальной траектории движения нитераскладывающего механизма намоточного станка;
4. Система автоматизации проектирования процесса намотки и программирования намоточных станков на языке M(G)-кодов с учетом их реальных кинематических схем.

### **Практическая значимость.**

На основе разработанного методического и алгоритмического обеспечения автоматизации проектирования процесса намотки создана система проектирования и программирования намоточных станков с учетом их реальных кинематических схем. Системные средства инженерного анализа разработанной системы позволяют визуализировать

ориентацию волокон в слоях тела намотки и рассчитывать конструктивно-прочностные характеристики ленты.

Использование разработанного программного комплекса при проектировании реальных конструкций из композиционных материалов позволило:

- сократить сроки проектирования авиационных конструкций (секций отсеков фюзеляжа, лонжеронов) на 10-12% по сравнению с ручным проектированием.
- снизить стоимость изготовления на 6-8% за счет уменьшения затрат на проектирование и оптимизацию технологического процесса намотки по времени.

### **Реализация и внедрение результатов.**

Результаты диссертации внедрены на предприятии ОАО «НИАТ», в также учебный процесс Московского авиационного института (национального исследовательского университета), что подтверждается соответствующими актами внедрения. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615308 «Программа *WindingCAD* для моделирования процесса намотки сложных криволинейных конструкций из волокнистых композиционных материалов, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике».

### **Апробация работы.**

Разработанные в диссертации теоретические и прикладные основы автоматизации проектирования процесса укладки ленты на сложную криволинейную технологическую поверхность оправки на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов использовались при проведении НИР по гранту №4.В37.21.0425 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 9-й международной конференции «Авиация и космонавтика-2010» (Москва, 16-18 ноября 2010 г.), на международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010» (Одесса, 2010 г.), на «VIII международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях» (Алушта, 25-31 мая 2010 г.), на научно-методических семинарах кафедры «Инженерная графика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), 2010 – 2013 гг.

**Публикации:** Основное содержание диссертации опубликовано в 7 научных работах, 3 из них – издания, рекомендованные ВАК РФ.

**Структура и объем работы:** диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (125 наименований) и приложений. Работа объемом 119 страниц содержит 15 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновываются актуальность, научная новизна и практическая ценность исследуемой проблемы, формулируются задачи и цели диссертационной работы, приводятся выносимые на защиту научные положения.

Определены цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена анализу систем автоматизации проектирования и теории сплайнов в задачах моделирования процесса намотки авиационных конструкций из композиционных материалов.

Анализ включает три части. В первой – проанализированы основополагающие работы по созданию систем автоматизации проектирования процесса намотки, посвященных геометрическому моделированию и математическому описанию задания поверхности технологической оправки (Борох Г.Р., Калинин В.А.), определения схем и траекторий намотки (Битюков Ю.И.), математическому и программному обеспечению процесса намотки (Шварц А.Б., Князев Д.Н.). Во второй части приведен общий обзор сплайн-аппроксимации, ее применение в задачах геометрического моделирования. В третьей части проанализировано применение локально-аппроксимационных сплайнов, показаны их преимущества перед кубическими. На основе анализа сделан вывод об актуальности проблемы обобщения и совершенствования существующих, а также создания новых методов автоматизации проектирования процессов намотки и выкладки.

**Во второй главе** разработана обобщенная методика геометрического моделирования укладки ленты на сложную поверхность технологической оправки. Основным преимуществом обобщенной методики является использование локально-аппроксимационных вместо интерполяционных кубических сплайнов, что позволяет избавиться от достаточно большого количества коэффициентов разложения и громоздкого математического описания.

Пусть в пространстве фиксирована декартова система координат  $Oxyz$  и поверхность  $\Sigma$  класса  $C^2$  задана параметрическим представлением

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v), (u, v) \in D = [a_1; b_1] \times [a_2; b_2],$$

где вектор-функция

$$\mathbf{r}(u, v) = x(u, v) \cdot \mathbf{i} + y(u, v) \cdot \mathbf{j} + z(u, v) \cdot \mathbf{k} \quad (1)$$

удовлетворяет условию  $\left[ \mathbf{r}'_u(u, v), \mathbf{r}'_v(u, v) \right] \neq 0$  в любой точке

$$(u, v) \in [a_1; b_1] \times [a_2; b_2].$$

Пусть  $\gamma$  – гладкая параметрически заданная кривая на поверхности

$$\gamma: \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(u_K(t), v_K(t)), t \in [t_0 - \alpha_K; t_1 + \alpha_K], \alpha_K > 0 \quad (2)$$

Число  $\alpha_K$  может быть сколь угодно малым и вводится для удобства.

Данная кривая будет определять схему укладки ленты.

Очевидно, что при выполнении условий, наложенных на вектор-функцию, определяющую поверхность, каждая точка этой поверхности априори является обыкновенной. Поэтому для любой гладкой кривой на поверхности существует (если ограничиться достаточно малым ее куском) полугеодезическая система координат, в которую данная кривая входит в качестве координатной линии. Способ построения такой системы координат заключается в следующем. В каждой точке  $M^0(t)$  кривой  $\gamma$  выбирается направление на поверхности, ортогональное к направлению  $\gamma$ . Через точку  $M^0(t)$  в этом направлении проводится геодезическая линия (такое построение выполнимо всегда и при этом единственным образом). На геодезической откладывается дуга длины  $\delta$ , которая может быть положительной или отрицательной в зависимости от того, в какую сторону от  $\gamma$  отложена дуга. В результате получаем некоторую точку  $M^{\delta}(u_{II}; v_{II})$  на поверхности, положение которой определяется значениями  $t$  и  $\delta$  (система координат  $u' = t, v' = \delta$  на поверхности является полугеодезической). Точка  $M^{\delta}$  определяется также параметрами  $u_{II}, v_{II}$ . Следовательно,  $u_{II}, v_{II}$  есть функции от параметров  $t$  и  $\delta$ :  $u_{II}(t, \delta), v_{II}(t, \delta)$ . Предположим, что указанные функции определены на прямоугольнике  $K = [t_0 - \alpha_K; t_1 + \alpha_K] \times [-d_{\max}/2 - \Delta_2; d_{\max}/2 + \Delta_2]$ ,  $\Delta_2 > 0, d_{\max} > 0$ . Как известно, для поверхности, удовлетворяющей

сформулированным выше условиям, такой прямоугольник всегда можно указать (можно найти положительные  $d_{\max}$ ,  $\Delta_2$ ).

На поверхности можно ввести локальную систему координат близкую к полугеодезической системе, в которую данная кривая входит в качестве координатной линии. Причем координатное отображение, возникающее при введении такой системы координат, выписывается в явном виде. Пусть неотрицательные на отрезке  $[t_0; t_1]$  функции  $\sigma_1(t)$  и  $\sigma_2(t)$  задают закон изменения ширины ленты. Пусть  $K_\sigma = \{(t, \delta) : t_0 \leq t \leq t_1, -\sigma_1(t) \leq \delta \leq \sigma_2(t)\}$ . Если  $F : K_\sigma \rightarrow D$  есть координатное отображение локальной системы координат, то моделирование укладки произвольной ленты (как в методе «сухой» намотки, так и в методе «мокрой» намотки) осуществляется с помощью отображения:

$$W : K_\sigma \rightarrow \mathbf{R}^3, \quad \overline{OW}(t, \delta) = \overset{\mathbf{r}}{w}(t, \delta) = \overset{\mathbf{r}}{r} \circ F(t, \delta), \quad (t, \delta) \in K_\sigma.$$

Пусть  $d \leq d_{\max}$  - максимальная ширина ленты.

Для удобства вводится гомеоморфизм

$$H(t, s) = \left( t, -\sigma_1(t) + (\sigma_1(t) + \sigma_2(t)) \cdot \frac{2 \cdot s + d}{2 \cdot d} \right),$$

который задает отображение прямоугольника  $K' = [t_0; t_1] \times [-d/2; d/2]$  на замкнутую область  $K_\sigma = \{(t, \delta) : t_0 \leq t \leq t_1, -\sigma_1(t) \leq \delta \leq \sigma_2(t)\}$ . Поэтому положение ленты на оправке можно представить как образ множества  $K'$  при отображении  $W : K' \rightarrow \mathbf{R}^3$ , определенном формулой

$$W : (t, s) \mapsto P, \quad \overline{OP} = \overset{\mathbf{r}}{r} \circ F \circ H(t, s), \quad (t, s) \in K'.$$

При этом предполагается, что учитываются следующие допущения:

1. Лента состоит из  $n$  идеальных растяжимых однородных нитей.
2. Укладка крайних нитей ленты осуществляется по параметрическим заданным кривым  $\overset{\mathbf{r}}{w}(t, d/2)$ ,  $t \in [\theta_0; \theta_1]$  и  $\overset{\mathbf{r}}{w}(t, -d/2)$ ,  $t \in [\theta_0; \theta_1]$ . Укладка произвольной нити, располагающейся между крайними, осуществляется по одной из кривых  $\mathbf{w}(t, s)$ ,  $t \in [\theta_0; \theta_1]$ , где фиксированный параметр  $s \in (-d/2; d/2)$ . Параметру  $s=0$  соответствует заданная кривая армирования  $\mathbf{r}(u(t), v(t))$ ,  $t \in [\theta_0; \theta_1]$ .

Рассмотрим равномерную сетку

$$\Delta_t : \tau_{-2} < \tau_{-1} < \tau_0 = t_0 < \tau_1 < \dots < \tau_n = t_1 < \tau_{n+1} < \tau_{n+2};$$

$$\tau_i = t_0 + h_i \cdot i, \quad i = -2, \dots, n+2, \quad h_i = \frac{t_1 - t_0}{n}.$$

Значение  $n$  выбирается из условия выполнения неравенства  $2 \cdot h_t < \alpha_K$ . Из каждой точки

$Q_i(x(u_K(\tau_i), v_K(\tau_i)); y(u_K(\tau_i), v_K(\tau_i)); z(u_K(\tau_i), v_K(\tau_i)))$ ,  
 $i = -2, \dots, n, n + 1$  строятся две возможные геодезические  $\gamma_i^+$  и  $\gamma_i^-$ , перпендикулярные кривой  $\gamma$ .

Пусть параметрические представления геодезических линий имеют вид

$$\begin{aligned} \gamma_i^+ : \rho_i^+(s) &= r(u_i^+(s), v_i^+(s)), \quad s \in [0, d/2 + \alpha_\Pi], \quad \alpha_\Pi > 0; \\ \gamma_i^- : \rho_i^-(s) &= r(u_i^-(s), v_i^-(s)), \quad s \in [0, d/2 + \alpha_\Pi]. \end{aligned}$$

Через  $s$  обозначена переменная длина дуги геодезических линий. Рассмотрим равномерную сетку

$$\begin{aligned} \Delta_s : s_{-m-2} < s_{-m-1} < s_{-m} = -d/2 < \dots < s_{-1} < s_0 = 0 < s_1 < \dots < s_m = d/2 < s_{m+1} < s_{m+2}; \\ s_j &= h_s \cdot j, \quad j = -m-2, \dots, m+2, \quad h_s = \frac{d}{2 \cdot m}. \end{aligned}$$

Причем значение  $m$  выбирается из условия выполнения неравенства  $2 \cdot h_s < \alpha_\Pi$ . Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} u_{ij} &= u_i^-(s_{-j}), \quad v_{ij} = v_i^-(s_{-j}), \quad j = -m-2, \dots, -1; \\ u_{ij} &= u_i^+(s_j), \quad v_{ij} = v_i^+(s_j), \quad j = 0, 1, \dots, m+2. \end{aligned}$$

и определим на прямоугольнике  $K' = [t_0; t_1] \times [-d/2; d/2]$  функции  $U(t, s)$ ,  $V(t, s)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} U(t, s) &= \sum_{i=1}^{n+3} (\lambda_0 U_{i-3}(s) + \lambda_1 U_{i-2}(s) + \lambda_2 U_{i-1}(s)) N_{4,i}(t); \\ U_i(s) &= \sum_{j=1}^{2m+3} (\mu_0 u_{i,j-m-3} + \mu_1 u_{i,j-m-2} + \mu_2 u_{i,j-m-1}) N_{4,j}(s), \quad i = -2, \dots, n+2; \\ V(t, s) &= \sum_{i=1}^{n+3} (\lambda_0 V_{i-3}(s) + \lambda_1 V_{i-2}(s) + \lambda_2 V_{i-1}(s)) N_{4,i}(t); \\ V_i(s) &= \sum_{j=1}^{2m+3} (\mu_0 v_{i,j-m-3} + \mu_1 v_{i,j-m-2} + \mu_2 v_{i,j-m-1}) N_{4,j}(s), \quad i = -2, \dots, n+2. \end{aligned}$$

Если  $h_s \leq h_t$ , то при  $u_\Pi, v_\Pi \in C^1(K)$  будет

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \|D^{(i,j)} u_\Pi - D^{(i,j)} U\|_{C^1(K)} &= 0; \quad \lim_{h \rightarrow 0} \|D^{(i,j)} v_\Pi - D^{(i,j)} V\|_{C^1(K)} = 0; \\ 0 \leq i + j \leq 1; \quad h &= \sqrt{h_t^2 + h_s^2}. \end{aligned}$$

Следовательно, отображение  $F : (t, s) \mapsto (U(t, s), V(t, s))$ ,  $(t, s) \in K'$  является координатным отображением некоторой локальной системы

координат на поверхности близкой к полугеодезической системе. Заметим, что функции  $U, V$  можно записать в следующем виде:

$$U(t, s) = \sum_{i=1}^{n+3} \sum_{j=1}^{2m+3} p_{ij} N_{4,j}(s) N_{4,i}(t) = \begin{pmatrix} N_{4,1}(t) \dots N_{4,n+3}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1,2m+3} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{n+3,1} & \dots & p_{n+3,2m+3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{4,1}(s) \\ \dots \\ N_{4,2m+3}(s) \end{pmatrix}$$

$$V(t, s) = \sum_{i=1}^{n+3} \sum_{j=1}^{2m+3} q_{ij} N_{4,j}(s) N_{4,i}(t) = \begin{pmatrix} N_{4,1}(t) \dots N_{4,n+3}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{11} & \dots & q_{1,2m+3} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{n+3,1} & \dots & q_{n+3,2m+3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{4,1}(s) \\ \dots \\ N_{4,2m+3}(s) \end{pmatrix},$$

где

$$p_{ij} = \lambda_0 (\mu_0 u_{i-3, j-m-3} + \mu_1 u_{i-3, j-m-2} + \mu_2 u_{i-3, j-m-1}) +$$

$$+ \lambda_1 (\mu_0 u_{i-2, j-m-3} + \mu_1 u_{i-2, j-m-2} + \mu_2 u_{i-2, j-m-1}) +$$

$$+ \lambda_2 (\mu_0 u_{i-1, j-m-3} + \mu_1 u_{i-1, j-m-2} + \mu_2 u_{i-1, j-m-1});$$

$$q_{ij} = \lambda_0 (\mu_0 v_{i-3, j-m-3} + \mu_1 v_{i-3, j-m-2} + \mu_2 v_{i-3, j-m-1}) +$$

$$+ \lambda_1 (\mu_0 v_{i-2, j-m-3} + \mu_1 v_{i-2, j-m-2} + \mu_2 v_{i-2, j-m-1}) +$$

$$+ \lambda_2 (\mu_0 v_{i-1, j-m-3} + \mu_1 v_{i-1, j-m-2} + \mu_2 v_{i-1, j-m-1}).$$

Важным преимуществом разработанной является то, что число ненулевых слагаемых в выражениях для функций  $U$  и  $V$  не превосходит 16, т.е. не зависит от мелкости сеток и при уплотнении сетки (росте числа узлов сетки) время нахождения значения функции не увеличивается. На вычисление функции с применением локально-аппроксимационных сплайнов требуется  $16 \times 2 = 32$  арифметические операции, а значит, такой процесс занимает долю секунды.

На рисунке 1 показана зависимость времени вычисления функции от числа узлов сетки с применением интерполяционных или локально-аппроксимационных сплайнов.

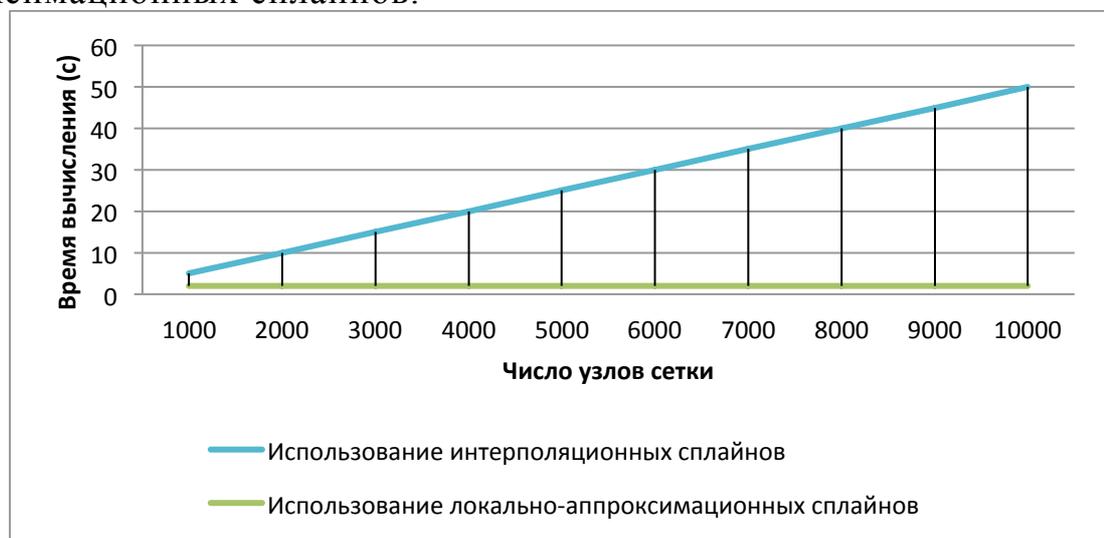


Рисунок 1 - Зависимость времени вычисления функции.

Во второй главе разработана методика единообразного описания достаточно широкого класса поверхностей – дважды непрерывно дифференцируемых поверхностей зависимых сечений с переменной замкнутой криволинейной образующей, которая в процессе изменения остается инцидентной плоскости, параллельной координатной плоскости. Обозначим такой класс поверхностей  $C_{\Pi_1}^2$ . Известно, что поверхности технологических оправок часто состоят из конструктивной (поверхность изделия) части и технологической, служащей для разворота ленты. При этом поверхности могут задаваться различными параметрическими представлениями. Это является существенным недостатком, т.к. для разработки вычислительных алгоритмов, связанных с такой поверхностью, и их дальнейшей программной реализации возникает проблема гладкого соединения разных частей, согласования параметризаций на разных частях. При единообразном задании поверхностей класса  $C_{\Pi_1}^2$  все указанные проблемы автоматически устраняются, т.к. вся поверхность технологической оправки (все ее части) будет описана одной явно заданной дважды непрерывно дифференцируемой вектор-функцией.

В диссертации разработан алгоритм получения явных приближенных формул локально-аппроксимационных сплайнов для расчета параметров процесса намотки.

Периодический интерполяционный сплайн на равномерной сетке можно выписать в явном виде. Пусть  $S_{3,1}(x)$  - кубический сплайн, который удовлетворяет условиям

$$s_{3,1}(x_i) = f_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (s_{3,1})^{(q)}(x_0) = (s_{3,1})^{(q)}(x_n), \quad q = 0, 1, 2.$$

Если сетка  $\Delta$  равномерная с шагом  $h$ , то сплайн  $s_{3,1}(x)$  можно выписать в явном виде:

$$s_{3,1}(x) = \sum_{i=-1}^{n+1} \eta_i \cdot N_{4,i+2}(x),$$

$$\eta_i = \frac{6}{\Phi(n)} \sum_{j=1}^n \Psi_n(i+1, j) \cdot f_{j-1}; \quad \eta_0 = \eta_n; \quad \eta_{-1} = \eta_{n-1}; \quad \eta_{n+1} = \eta_1, \quad \text{где}$$

$$\Phi(n) = 4 \cdot A(n-1) - 2 \cdot A(n-2) - 2 \cdot (-1)^n, \quad n \geq 4;$$

$$A(n) = \frac{(2 + \sqrt{3})^{n+1} - (2 - \sqrt{3})^{n+1}}{2\sqrt{3}}, \quad n \geq -1;$$

$$\Psi_n(i, j) = \begin{cases} (-1)^{i+1} (A(n-i) + (-1)^n A(i-2)), & j=1; \\ (-1)^{i+j} (4 \cdot A(j-2) \cdot A(n-i) - A(j-3) \cdot A(n-i) + \\ + (-1)^n A(i-j-1) - A(j-2)A(n-i-1)), & 1 < j \leq i; \end{cases}$$

$i = 1, 2, \dots, n.$

Кроме того, если  $f \in C^k[a; b]$ ,  $k = 0, 1, 2$ , то справедливы оценки

$$\|D^{(\beta)} S_{3,1} - D^{(\beta)} f\|_{C[a;b]} \leq M_\beta^{(k)} h^{k-\beta} \omega(D^{(k)} f, h), \quad 0 \leq \beta \leq k, \text{ где}$$

$$M_0^{(0)} = 7/4, \quad M_0^{(1)} = 9/8; \quad M_1^{(1)} = 4; \quad M_0^{(2)} = 19/96;$$

$$M_1^{(2)} = 2/3; \quad M_2^{(2)} = 4$$

Определим функции

$$g_j(u) = \sum_{i=-1}^{n+1} \eta_{ij} \cdot N_{4,i+2}(u), \quad j = -2, \dots, k+2, \quad u \in [a; b],$$

где  $\eta_{n,j} = \eta_{0,j}, \quad \eta_{-1,j} = \eta_{n-1,j}, \quad \eta_{n+1,j} = \eta_{1,j},$

$$\eta_{ij} = \frac{6}{\Phi(n)} \sum_{s=1}^n \Psi_n(i+1, s) \cdot f_{s-1,j}.$$

Рассмотрим функцию

$$g(u, v) = \sum_{p=1}^{k+3} (\lambda_0 g_{p-3}(u) + \lambda_1 g_{p-2}(u) + \lambda_2 g_{p-1}(u)) \cdot N_{4,p}(v), \quad \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = 1.$$

Подставляя выражения для функций  $g_j(u)$ , получим:

$$g(u, v) = \sum_{p=1}^{k+3} \sum_{i=-1}^{n+1} (\lambda_0 \eta_{i,p-3} + \lambda_1 \eta_{i,p-2} + \lambda_2 \eta_{i,p-1}) \cdot N_{4,i+2}(u) \cdot N_{4,p}(v).$$

Обозначим

$$Q_{i+1,p-1} = \lambda_0 \eta_{i,p-3} + \lambda_1 \eta_{i,p-2} + \lambda_2 \eta_{i,p-1}, \quad i = -1, \dots, n+1; \quad p = 1, \dots, k+3$$

В итоге получаем:

$$g(u, v) = \sum_{j=0}^{k+2} \sum_{i=0}^{n+2} Q_{ij} \cdot N_{4,i+1}(u) \cdot N_{4,j+1}(v), \quad u \in [a; b], \quad v \in [c; d].$$

В силу локальности  $B$ -сплайнов в полученном выражении не более 16 ненулевых слагаемых, независимо от выбора мелкости сеток. В этом заключается основное преимущество представленной методики получения явных приближенных формул локально-аппроксимационных сплайнов перед методикой, где используются интерполяционные сплайны, у которых коэффициенты разложения по базису имеют достаточно громоздкий вид, а число ненулевых слагаемых зависит от мелкости сетки. Это, в свою

очередь, начинает сказываться, например, при нахождении траектории движения нитераскладывающего механизма намоточного станка.

Пусть  $\overset{1}{r}(u, v), (u, v) \in [a; b] \times [c - \varepsilon; d + \varepsilon], \varepsilon > 0$  - параметрическое представление поверхности зависимых сечений с криволинейной образующей  $\Sigma$ . Каждая  $u$ -линия такой поверхности представляет собой криволинейную образующую поверхности, инцидентную плоскости, параллельной координатной плоскости. Выберем равномерную сетку  $\Delta_u \times \Delta_v$  на прямоугольнике  $[a; b] \times [c; d]$ :

$$\begin{aligned} \Delta_v &: v_{-3} < \dots < v_0 = a < \dots < v_k = b < \dots < v_{k+3}; \\ v_i &= c + jh_v, \quad j = -3, \dots, k+3; \quad h_v = \frac{d-c}{k} \leq \varepsilon; \\ \Delta_u &: u_{-3} < \dots < u_0 = a < \dots < u_n = b < \dots < u_{n+3}; \\ u_i &= a + ih_u, \quad i = -3, \dots, n+3; \quad h_u = \frac{b-a}{n} \leq h_v. \end{aligned}$$

Рассмотрим поверхность  $\Sigma_{n,k}$ , с параметрическим представлением

$$\overset{r}{R}_{n,k}(u, v) = \sum_{j=0}^{k+2} \sum_{i=0}^{n+2} \overset{r}{Q}_{ij} \cdot N_{4,i+1}(u) \cdot N_{4,j+1}(v), \quad u \in [a; b], v \in [c; d],$$

где  $\overset{1}{\eta}_{n,j} = \overset{1}{\eta}_{0,j}, \quad \overset{1}{\eta}_{-1,j} = \overset{1}{\eta}_{n-1,j}, \quad \overset{1}{\eta}_{n+1,j} = \overset{1}{\eta}_{1,j},$

$$\overset{r}{\eta}_{ij} = \frac{6}{\Phi(n)} \sum_{s=1}^n \Psi_n(i+1, s) \cdot \overset{r}{r}(u_{s-1}, v_j),$$

$$\overset{1}{Q}_{ij} = \lambda_0 \overset{r}{\eta}_{i-1, j-2} + \lambda_1 \overset{r}{\eta}_{i-1, j-1} + \lambda_2 \overset{r}{\eta}_{i-1, j}, \quad i = 0, \dots, n+2; \quad j = 0, \dots, k+2.$$

Для последовательности вектор-функций  $\overset{1}{R}_{n,k}(u, v)$ , определяющих поверхности зависимых сечений класса  $C_{\Pi_1}^2$ , будет выполнено  $\lim_{h_u \rightarrow 0} \left\| \overset{1}{R}_{n,k} - \overset{r}{r} \right\|_{C^m([a;b] \times [c;d])} = 0$ . Таким образом, геометрическая часть определителя поверхности класса  $C_{\Pi_1}^2$  состоит из точечного каркаса сечений такой поверхности, а алгоритмическая часть определителя задается вектор-функцией  $\overset{1}{R}_{n,k}(u, v)$ .

Перед аппроксимацией поверхности оправки поверхностью, определяемой точечным каркасом сечений, иногда необходимо задать технологическую часть оправки, которая может включать в себя поверхность законцовки, служащую для разворота ленты, и переходную поверхность, соединяющую конструктивную часть оправки и законцовку.

В методе конструирования технологической части оправки параметрами являются: расстояния  $D, D_1, D_2$ ; радиус  $R$  выбираемой

окружности. Изменяя эти параметры, можно управлять формой технологической части.

В диссертации разработан алгоритм построения поверхности оправки (параметры, с помощью которых можно управлять формой поверхности:  $N$  (количество дополнительных сечений),  $R, \rho, D_1 < D_2 < D$ ).

1. Задать точечный каркас конструктивной части поверхности оправки (как есть). Крайние сечения повторить по два раза, изменяя аппликаты на  $\Delta z$  (заданное положительное число):

$$\begin{aligned} & \{P_{ij}(x_{ij}; y_{ij}; z_j) : i = 0, 1, \dots, n-1\}, \quad j = 0, 1, \dots, k, \quad z_0 < z_1 < \dots < z_k; \\ & \{P_{i,-1}(x_{i0}; y_{i0}; z_0 - \Delta z) : i = 0, 1, \dots, n-1\}; \quad \{P_{i,-2}(x_{i0}; y_{i0}; z_0 - 2\Delta z) : i = 0, 1, \dots, n-1\}; \\ & \{P_{i,k+1}(x_{ik}; y_{ik}; z_k + \Delta z) : i = 0, 1, \dots, n-1\}; \quad \{P_{i,k+2}(x_{ik}; y_{ik}; z_k + 2\Delta z) : i = 0, 1, \dots, n-1\}. \end{aligned}$$

2. Построить конструктивную часть оправки:

$$T^r(u, v) = \sum_{j=0}^{k+2} \sum_{i=0}^{n+2} Q_{ij}^r \cdot N_{4,i+1}(u) \cdot N_{4,j+1}(v), \quad u, v \in [0; 1],$$

где  $Q_{ij}^r = \lambda_0 \dot{\eta}_{i-1, j-2}^r + \lambda_1 \dot{\eta}_{i-1, j-1}^r + \lambda_2 \dot{\eta}_{i-1, j}^r, \quad i = 0, \dots, n+2; \quad j = 0, \dots, k+2$

$$\dot{\eta}_{n,j}^r = \dot{\eta}_{0,j}^r, \quad \dot{\eta}_{-1,j}^r = \dot{\eta}_{n-1,j}^r, \quad \dot{\eta}_{n+1,j}^r = \dot{\eta}_{1,j}^r, \quad \dot{\eta}_{ij}^r = \frac{6}{\Phi(n)} \sum_{s=1}^n \Psi_n(i+1, s) \cdot OP_{s-1, j}^{\text{III}}$$

3. Найти  $OP_{i,0}^{\text{II}} = P_{i,0}, \quad OP_{i,k}^{\text{II}} = P_{i,k}, \quad i = 0, 1, \dots, n,$

$$OP_{i,k+1}^{\text{II}} = OP_{i,k}^{\text{II}} + \frac{D_1}{\left( \begin{matrix} r & r \\ k & T'_v \left( \frac{i}{k}, 1 \right) \end{matrix} \right)} T'_v \left( \frac{i}{k}, 1 \right);$$

$$OP_{i,-1}^{\text{II}} = OP_{i,0}^{\text{II}} - \frac{D_1}{\left( \begin{matrix} r & r \\ k & T'_v \left( \frac{i}{k}, 0 \right) \end{matrix} \right)} T'_v \left( \frac{i}{k}, 0 \right).$$

4. Определить

$$x_{c,-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,0}; \quad y_{c,-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_{i,0}; \quad x_{c,k+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,k}; \quad y_{c,k+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_{i,k}.$$

5. Найти полярные углы точек  $P_{i,j}, \quad j = 0, k:$

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & x_{i,j} - x_{c,j} = 0; y_{i,j} - y_{c,j} \geq 0; \\ \frac{3\pi}{2}, & x_{i,j} - x_{c,j} = 0; y_{i,j} - y_{c,j} < 0; \\ \arctg \frac{y_{i,j} - y_{c,j}}{x_{i,j} - x_{c,j}}, & x_{i,j} - x_{c,j} > 0; y_{i,j} - y_{c,j} \geq 0; \\ 2\pi - \arctg \left( -\frac{y_{i,j} - y_{c,j}}{x_{i,j} - x_{c,j}} \right), & x_{i,j} - x_{c,j} > 0; y_{i,j} - y_{c,j} < 0; \\ \pi - \arctg \left( -\frac{y_{i,j} - y_{c,j}}{x_{i,j} - x_{c,j}} \right), & x_{i,j} - x_{c,j} < 0; y_{i,j} - y_{c,j} \geq 0; \\ \pi + \arctg \left( \frac{y_{i,j} - y_{c,j}}{x_{i,j} - x_{c,j}} \right), & x_{i,j} - x_{c,j} < 0; y_{i,j} - y_{c,j} < 0. \end{cases}$$

6. Найти

$$\begin{aligned} \overline{OP}_{i,k+2}^{\theta} &= (x_{c,k+1} + R \cos \varphi_{i,k+1}, y_{c,k+1} + R \sin \varphi_{i,k+1}, z_k + D_2); \\ \overline{OP}_{i,k+3}^{\theta} &= (x_{c,k+1} + \rho \cos \varphi_{i,k+1}, y_{c,k+1} + \rho \sin \varphi_{i,k+1}, z_k + D); \\ \overline{OP}_{i,-2}^{\theta} &= (x_{c,-1} + R \cos \varphi_{i,k+1}, y_{c,-1} + R \sin \varphi_{i,k+1}, z_0 - D_2); \\ \overline{OP}_{i,-2}^{\rho} &= (x_{c,-1} + \rho \cos \varphi_{i,k+1}, y_{c,-1} + \rho \sin \varphi_{i,k+1}, z_0 - D). \end{aligned}$$

7. Найти точки дополнительных сечений:

$$\begin{aligned} \overline{OP}_{s,-j} &= \sum_{i=0}^3 \frac{3!}{i!(3-i)!} v_j^i (1-v_j)^{3-i} \cdot \overline{OP}_{s,-i}^{\theta}; \\ \overline{OP}_{s,k+j} &= \sum_{i=0}^3 \frac{3!}{i!(3-i)!} v^i (1-v)^{3-i} \cdot \overline{OP}_{s,k+i}^{\theta}; \\ v_0 &= 0 < v_1 < \dots < v_N = 1. \end{aligned}$$

На рисунке 2 показана иллюстрация примера моделирования поверхности прямоугольного профиля и поверхности законцовки.

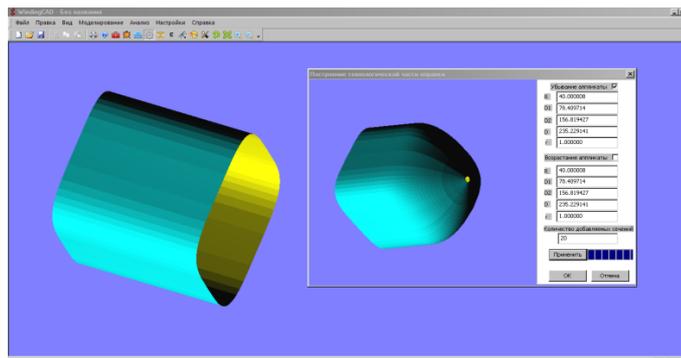


Рисунок 2 - Пример моделирования поверхности оправки.

**В третьей главе,** посвященной разработке научно-методического обеспечения автоматизации расчета траектории движения раскладывающего механизма намоточного станка с числовым программным управлением, проанализирован метод дискретного динамического программирования для решения многошаговых задач оптимизации, т.е. задач, оптимизацию в которых можно представить в виде ряда последовательных этапов (шагов) для нахождения оптимальной траектории и закона движения раскладывающего механизма намоточного станка. С применением метода дискретного динамического программирования разработана обобщенная методика нахождения оптимальной траектории движения раскладывающего механизма намоточного станка.

1. Вектор состояния нитераскладчика имеет вид  $\mathbf{x}_j = (x_{0,j}; x_{1,j}; x_{2,j}; x_{3,j}; x_{4,j})^T = (t_{n,j}; t_{1,j}; \lambda_{n,j}; T_j; \lambda_{1,j})^T$ , где  $T_j = T(t_{1,j}, s_0)$ ;

2. Поведение объекта управления можно описать разностным уравнением  $\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j)$ ,  $j = 0, 1, \dots, N-1$ , где

$$\mathbf{u}_j = (u_{0,j}; u_{1,j}; u_{2,j}; u_{3,j}; u_{4,j}; u_{5,j})^T = (t_{n,j}^g; t_{1,j}^g; \lambda_{n,j}^g; \Delta t_{n,j}; \Delta T_j; u_{5,j}), \quad u_{5,j} = \pm 1$$

вектор управления, а

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j) = \begin{pmatrix} x_{0,j} + u_{3,j} \\ x_{2,j} + \frac{u_{1,j} \cdot u_{3,j}}{u_{0,j}} \\ x_{3,j} + \frac{u_{2,j} \cdot u_{3,j}}{u_{0,j}} \\ x_{4,j} + u_{4,j} \\ \hat{\lambda}(x_{0,j}, x_{1,j}, x_{2,j}) + u_{5,j} \sqrt{\rho^2 - \left| \mathbf{r}_A(x_{1,j}, \hat{\lambda}(x_{0,j}, x_{1,j}, x_{2,j})) - \mathbf{r}_B(x_{0,j}, x_{2,j}) \right|^2} \end{pmatrix}$$

3. Множеством допустимых состояний нитераскладчика является пересечение множеств

$$X_1 = \left\{ \mathbf{x} = (x_0; \dots; x_4) \in \mathbf{R}^4 : \left| \mathbf{r}_A(x_1, \hat{\lambda}(x_0, x_1, x_2)) - \mathbf{r}_B(x_0, x_2) \right| \leq \rho \right\};$$

$$\begin{aligned}
X_2 &= \left\{ \mathbf{x} \in X_1 : x_4 = \hat{\lambda}(x_0, x_1, x_2) + \sqrt{\rho^2 - \left| \overset{\mathbf{r}}{r}_A(x_1, \hat{\lambda}(x_0, x_1, x_2)) - \overset{\mathbf{r}}{r}_B(x_0, x_2) \right|^2} \right\} \cup \\
&\cup \left\{ \mathbf{x} \in X_1 : x_4 = \hat{\lambda}(x_0, x_1, x_2) - \sqrt{\rho^2 - \left| \overset{\mathbf{r}}{r}_A(x_1, \hat{\lambda}(x_0, x_1, x_2)) - \overset{\mathbf{r}}{r}_B(x_0, x_2) \right|^2} \right\}; \\
X_3 &= \left\{ \mathbf{x} \in X_2; M(\mu) \in D, OM(\mu) = \overset{\mathbf{r}}{r}_B(x_0, x_2) + \mu \left( \overset{\mathbf{r}}{r}_A(x_1, x_4) - \overset{\mathbf{r}}{r}_B(x_0, x_2) \right), \mu \in [0; 1] \right\};
\end{aligned}$$

$$X_4 = \left\{ \mathbf{x} = (x_0, \dots, x_4) \in \mathbf{R}^5 : -E \leq x_3 \leq \frac{T_p + nE}{\sum_{i=1}^n \frac{\left| D^{(1,0)} \overset{\mathbf{r}}{w}(t_i(x_1, x_0), s_i) \right|}{\left| D^{(1,0)} \overset{\mathbf{r}}{w}(t_i(x_1, x_0), s_0) \right|}} - E \right\}.$$

4. Множеством допустимых управлений служит следующее множество

$$\begin{aligned}
U_j(\mathbf{x}_j) &= \left\{ \mathbf{u}(j) \in \mathbf{R}^6 : 0 \leq D^{(1,0)} L_1(x_{1,j}, x_{4,j}) \cdot u_1 + D^{(0,1)} L_1(x_{1,j}, x_{4,j}) \cdot \overset{\mathbf{g}}{\lambda}_1 \leq c_1 \right. \\
&\quad \left. 0 \leq D^{(1,0)} L_n(x_{0,j}, x_{2,j}) \cdot u_0 + D^{(0,1)} L_n(x_{0,j}, x_{2,j}) \cdot u_2 \leq c_1; u_5 = \pm 1 \right\}.
\end{aligned}$$

Время перехода  $\tau_{j,j+1}$  из состояния  $\mathbf{x}_j$  в состояние  $\mathbf{x}_{j+1}$  может быть найдено с помощью выражения  $\tau_{j,j+1} = \frac{u_{3,j}}{u_{0,j}}$ .

Эффективность всего процесса в целом характеризуется функцией вида:

$$J(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{u}}) = \sum_{k=0}^{N-1} J_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k), \quad J_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \frac{u_{3,k}}{u_{0,k}},$$

где  $\underline{\mathbf{x}} = (\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$  - набор состояний (фазовая траектория процесса), а  $\underline{\mathbf{u}} = (\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1})$  - набор векторов управления. Итак, оптимальный закон движения нитераскладчика (оптимальный в смысле увеличения производительности процесса за счет сокращения времени изготовления конструкции) находится в результате решения задачи многошаговой оптимизации, которая может легко быть решена методом дискретного динамического программирования:

$$\begin{aligned}
&J(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{u}}) \rightarrow \min, \\
&\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_j, \mathbf{u}_j), \quad j = 0, 1, \dots, N-1; \\
&\mathbf{x}_j \in X_1 \cap X_2 \cap X_3 \cap X_4; \quad \mathbf{u}_j \in U_j(\mathbf{x}_j).
\end{aligned}$$

Функции Беллмана для данной задачи многошаговой оптимизации находятся из соотношений:

$$B_N(\mathbf{x}_{N-1}) = \min_{\mathbf{u}_{N-1} \in U_{N-1}(\mathbf{x}_{N-1})} J_{N-1}(\mathbf{x}_{N-1}, \mathbf{u}_{N-1});$$

$$B_k(\mathbf{x}_{k-1}) = \min_{\mathbf{u}_{k-1} \in U_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1})} \{J_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + B_{k+1}(\mathbf{x}_k)\}, \quad k = 1, \dots, N-1.$$

На рисунке 3 показана оптимальная траектория движения нитераскладчика при укладке одного витка ленты на эллиптический цилиндр.

Таким образом, в третьей главе разработана обобщенная методика построения оптимальной траектории и закона движения нитераскладывающего механизма станка с учетом структуры ленты и описанных ограничений. Отличительной особенностью и важным преимуществом разработанной методики является то, что траектория и закон движения могут быть построены для существенно более широкого класса поверхностей – поверхностей зависимых сечений с криволинейной образующей.

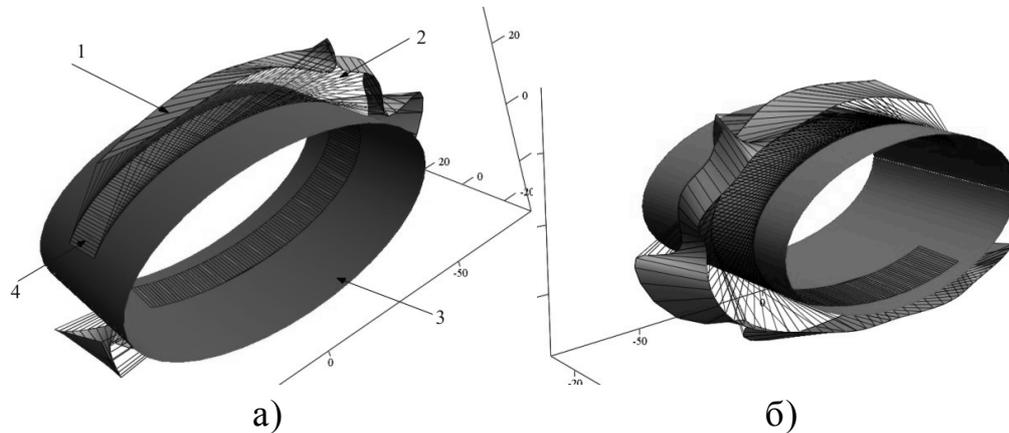


Рисунок 3- Оптимальная траектория движения нитераскладчика  
 1 – положение нитераскладчика; 2 – крайние нити ленты;  
 3 – поверхность оправки; 4 – лента на оправке.

**В четвертой главе** рассмотрены задачи разработки и реализации *CAD/CAM/CAE* системы для изготовления конструкций из волокнистых композиционных материалов методом намотки. Приведены общая архитектура системы, назначение ее функциональных блоков, показаны преимущества системы.

*CAD/CAM/CAE* система *WindingCAD* предназначена для моделирования процесса намотки сложных конструкций из волокнистых композиционных материалов. Уникальной отличительной особенностью системы является унифицированное геометрическое моделирование поверхностей технологических оправок, принадлежащих классу поверхностей зависимых сечений с замкнутой криволинейной образующей, посредством аппроксимации вектор-функции такой поверхности дважды непрерывно дифференцируемой вектор-функцией поверхности, построенной по точечному каркасу сечений данной поверхности оправки.

Система позволяет единообразно моделировать «сухую» и «мокрую» намотки посредством гладкого отображения плоской односвязной области в трехмерное Евклидово пространство, при котором лента на поверхности представляет собой образ прямоугольника.

В системе возможно проводить расчет оптимальной траектории и закона движения во времени раскладывающего механизма намоточного станка с соблюдением комплекса условий, возникающих из возможностей намоточного оборудования и сохранения натяжения нитей на нитераскладчике. На выходе системы выполняется генерация программного кода для намоточных станков с ЧПУ с учетом их реальных кинематических схем.

Общая функциональная схема *CAD/CAM/CAE* системы *WindingCAD* представлена на рисунке 4. Данная система разработана на языке *Visual C++* с применением объектно-ориентированного подхода. Графический интерфейс разработан с применением библиотеки *OpenGL*.

Система *WindingCAD* предназначена для работы в операционной системе *MicrosoftWindows*, поэтому отдельные ее модули используют преимущества графического интерфейса *MicrosoftWindows*. Для представления геометрической и управляющей информации используются формы, таблицы, графики, а также возможности трехмерного графического моделирования геометрических объектов, поддерживаемые библиотекой *OpenGL* (рисунок 5). Обмен данными между отдельными модулями системы осуществляется через сохраняемые в памяти компьютера файлы.

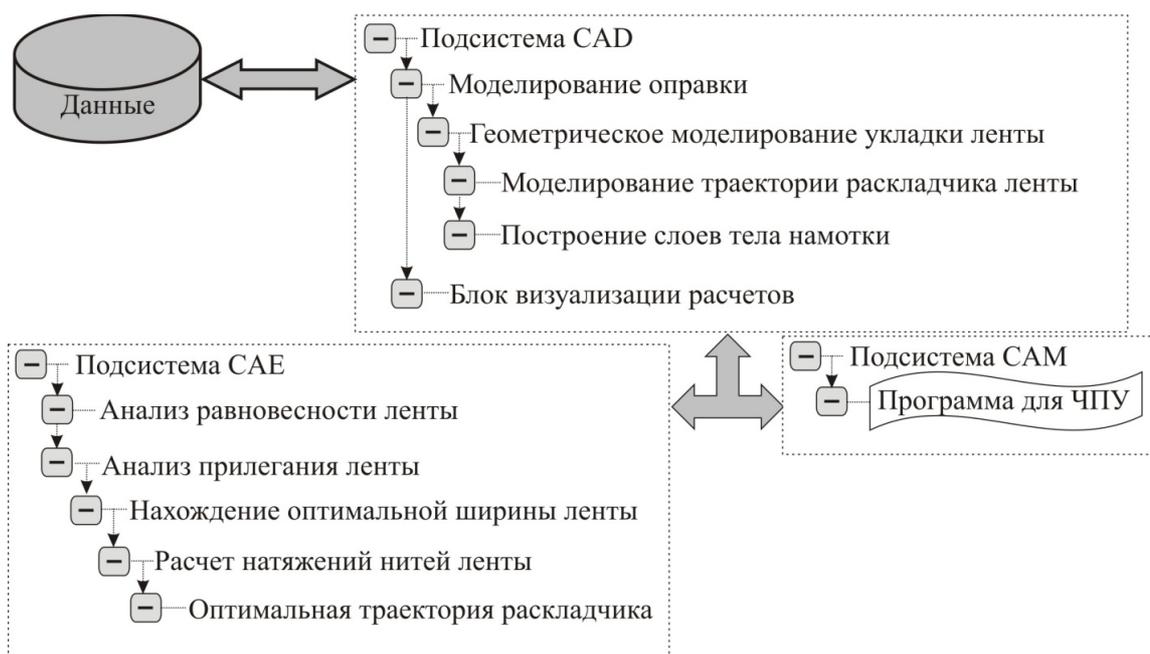


Рисунок 4 - Общая функциональная схема системы *WindingCAD*.

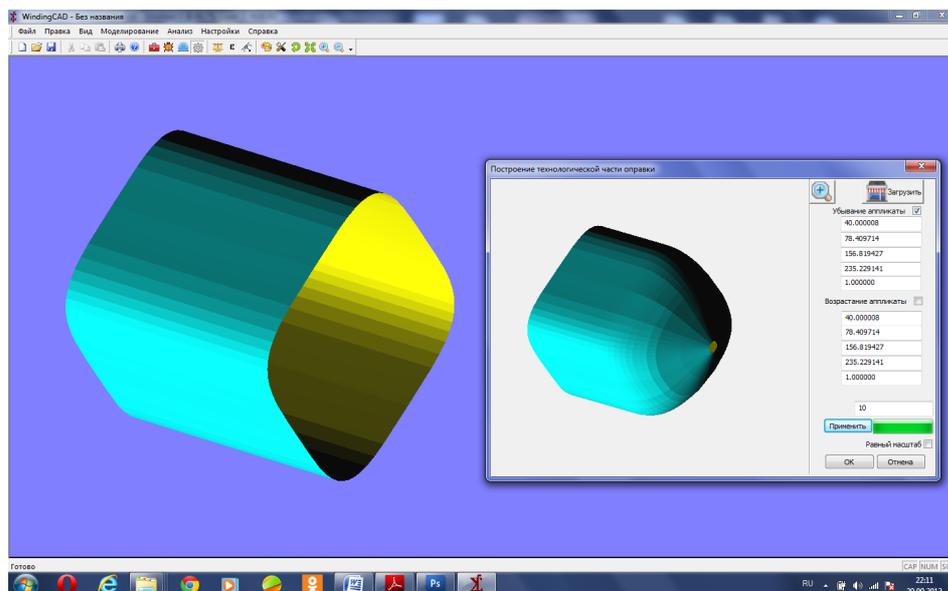


Рисунок 5 - Основное рабочее окно системы *WindingCAD* с вспомогательным окном задания параметров и построения технологической части оправки.

**В приложении представлено** свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615308 «Программа *WindingCAD* для моделирования процесса намотки сложных криволинейных конструкций из волокнистых композиционных материалов, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены теоретические и прикладные проблемы разработки научно-методического обеспечения автоматизации процесса намотки конструкций из композиционных материалов на основе применения локально-аппроксимационных сплайнов. Разработанное научно-методическое обеспечение включает: геометрические модели процесса намотки, учитывающие реальную структуру ленты и единообразие формирования криволинейной поверхности технологической оправки, а также методику определения оптимальной траектории движения раскладывающего механизма намоточного станка с ЧПУ.

Использование основных результатов работы позволяет существенно улучшить технологию изготовления конструкций из волокнистых композиционных материалов с комплексом наперед заданных характеристик при условии обеспечения высокого уровня автоматизации:

- сократить сроки проектирования секций отсеков фюзеляжа, сопел двигателей, воздухопроводов на 10-12% по сравнению с ручным проектированием.
- снизить стоимость изготовления на 6-8% за счет уменьшения затрат на проектирование и оптимизацию технологического процесса намотки по времени.

Это достигается за счет применения максимально полных математических моделей, описывающих процесс укладки ленты на поверхность оправки с учетом целого ряда условий и ограничений.

Выполненные в диссертационной работе исследования позволили получить следующие теоретические и практические результаты.

1. Разработан обобщенный математический аппарат для моделирования технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов. Отличительной особенностью предложенного аппарата является универсальность его применения. Основным преимуществом является использование локально-аппроксимационных вместо интерполяционных кубических сплайнов, что позволяет избавиться от достаточно большого количества коэффициентов разложения и, соответственно, от зависимости времени вычислений от мелкости разбиения, что существенно увеличивает скорость расчета.

2. Теоретически обоснована и разработана методика геометрического моделирования процесса укладки ленты на сложную криволинейную технологическую поверхность оправки. Разработан алгоритм получения явных приближенных формул локально-аппроксимационных сплайнов для расчета параметров процесса намотки. Важным преимуществом разработанной методики введения локальной системы координат на поверхности является то, что число ненулевых слагаемых в выражениях

для параметрических функций не превосходит 16, при этом устраняется громоздкий вид сплайнов.

3. Разработана методика единообразного задания достаточно широкого класса поверхностей – дважды непрерывно дифференцируемых поверхностей зависимых сечений. Методика позволяет с единых методологических позиций оценить использование переменной замкнутой криволинейной образующей, которая в процессе изменения остается инцидентной плоскости, параллельной координатной плоскости поверхностей зависимых сечений.

4. Разработана методика построения оптимальных траекторий и законов движения нитераскладывающего механизма намоточного станка с ЧПУ для увеличения производительности процесса намотки. Применение этой методики позволило впервые производить учет ограничения на скорости и ускорения рабочих органов станка, что обеспечивает стабильность технологических параметров метода намотки.

5. На основании разработанного научно-методического обеспечения создана система автоматизации проектирования процесса намотки авиационных конструкций и программирования намоточных станков с учетом их реальных кинематических схем. Уникальной отличительной особенностью системы является унифицированное геометрическое моделирование поверхностей технологических оправок. Встроенные в систему средства инженерного анализа поведения композита на поверхности позволяют как визуализировать ориентацию волокон в слоях тела намотки, так и рассчитывать конструктивно-прочностные характеристики (деформации волокон, возможные разрывы нитей ленты, образование складок, натяжение нитей на раскладчике ленты и др.)

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

Работы, опубликованные в периодических рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Битюков Ю.И., Калинин В.А., Денискин Ю.И., Мирошниченко П.В. Нахождение оптимальной траектории движения нитераскладчика в процессе намотки конструкций из волокнистых композиционных материалов // Омский научный вестник. – 2012. – №2(110). - С. 14-18.

2. Битюков Ю.И., Денискин Ю.И., Мирошниченко П.В. Применение сплайнов на равномерной сетке в задаче твердотельного моделирования // Труды МАИ [Электронный ресурс]: науч. журн. / Моск. авиационный ин-т (гос.техн. университет) «МАИ». – Электрон. журн. – Москва: МАИ, 2011 – вып.44. – Режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru>. – Загл. с титул. экрана. – № гос. регистрации 019163

3. Мирошниченко П.В., Битюков Ю.И., Денискин Ю.И. Использование статистических методов и геометрического

моделирования в контроле качества изготовления конструкций из волокнистых композиционных материалов // Качество. Инновации. Образование: науч.-практ. журнал. – М.: Фонд «Европейский центр по качеству», 2011. – №10.

Остальные:

4. Битюков Ю.И., Калинин В.А., Денискин Ю.И., Мирошниченко П.В. Определение закона движения раскладывающей головки намоточного станка по заданному рисунку укладки ленты на оправку в процессе намотки конструкций из композитных материалов // Сборник научных трудов Международной науч.-практ. Конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010». Том 5. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. – С.54 – 57.

5. Битюков Ю.И., Денискин Ю.И., Мирошниченко П.В. Программа *WindingCAD* для моделирования процесса намотки сложных криволинейных конструкций из волокнистых композиционных материалов, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ), ГР № 2012615308, 13.06.2012.

6. Битюков Ю.И., Денискин Ю.И., Мирошниченко П.В. Программа *LayingTheTapeCAD* для моделирования процесса выкладки сложных криволинейных конструкций из волокнистых композиционных материалов, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ), ГР № 2012616090, 04.07.2012.

7. Мирошниченко П.В., Ищук А.В. Технологический процесс изготовления крупногабаритных корпусов РДТТ методом намотки // Сборник материалов «VIII международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях» (NPNJ'2010)/ - Алушта: 2010.