

УДК 658.5.011

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
АГРЕГАТНО-СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

© 2021 Р.А. Салаев, А.А. Федоров, А.В. Салаева

Ульяновский государственный технический университет,  
обособленное структурное подразделение  
«Институт авиационных технологий и управления», Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 10.12.2020

В статье приводится универсальная имитационная модель процессов агрегатно-сборочного производства на основе методик IDEF0 и численных методов моделирования. Постановка задачи формируется следующим образом: необходимо провести анализ существующих средств имитационного моделирования, структурировать процессы сборочного производства на отдельные классы и подклассы, описание процессов по методике IDEF0, создание имитационной модели процесса агрегатно-сборочного производства с увязкой экономических и трудовых затрат. В качестве критерия оптимизации в данном исследовании рассматривалась суммарная трудоемкость технологических процессов сборки и экономические затраты. Численное моделирование и оптимизация параметров рабочего процесса проводилась в среде имитационного моделирования AnyLogic. Полученные модели имитационного моделирования в дальнейшем могут применяться в системе управления авиационных предприятий, а также в других производственных сферах продукции которых является сложная система.

*Ключевые слова:* агрегатно-сборочное производство, имитационное моделирование, оптимизация, структурирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66

**ВВЕДЕНИЕ**

Современное агрегатно-сборочное производство (АСП) представляет собой совокупность сложных технологических процессов, которые невозможно изучать как единое целое. Поэтому, учитывая специфику сборочных работ в самолетостроении: многодетальность планера, большое разнообразие применяемых конструкционных материалов, разнообразие технологических процессов и средств их оснащения, сложность пространственных форм, малая жесткость большинства конструкций планера из-за чего становится необходимым применение многочисленной и сложной технологической оснастки [1]. Все это требует последовательно и правильное структурирование всех процессов для построения моделей.

В качестве инструментария для исследования производственных процессов сборочного производства наиболее эффективно использовать средства имитационного моделирования.

---

*Салаев Роман Андреевич, аспирант.*

*E-mail: rayzer75@yandex.ru*

*Федоров Александр Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Самолетостроение».*

*E-mail: aa.fedorov@ulstu.ru*

*Салаева Ангелина Викторовна, магистрант.*

*E-mail: angelinafv@mail.ru*

Имитационная модель производственного процесса заключается в моделировании отдельных подпроцессов, описание их свойств (габаритные размеры, применяемые средства технологического оснащения, трудоемкость и т.д.) и далее создание взаимосвязей между ними. Для авиационных предприятий в которых, как правило, сложная производственная структура целесообразно построение составной многоуровневой имитационной модели.

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Целью данного исследования является разработка объектно-ориентированной методологии имитационного моделирования процессов АСП, а также других сложных производственных процессов.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Материал исследования включает данные о действующих на предприятии технологических процессах, конструкторской документации, инструкций, оборудования, производственных площадях, экономических затратах, методы исследования основаны на современных информационных технологиях.

### АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящее время рынок программного обеспечения средств имитационного моделирования стремительно развивается. Пользователю предлагается большой выбор систем, предназначенных для различных подходов к имитационному моделированию (Таблица 1).

Наиболее популярным из приведенных в таблице средств имитационного моделирования является DELMIA (Dassault Systemes), при помощи которого решаются задачи планирования и оптимизации процессов сборочного производства. Система основана на PPR (Product, Process and Resources – продукт, процесс, ресурс) модели данных об изделии. Т.е. каждая имитационная модель включает в себя 3D-модель изделия, протекающие процессы на производстве и необходимые ресурсы для выполнения процесса. Программное обеспечение DELMIA имеет возможность интеграции с PDM-системами (напр., ENOVIA Smarteam), а также с различными САПР (напр., NX, CATIA, SolidWorks) [2].

Программное обеспечение компании Siemens: Plan Simulation, представляет собой объектно-ориентированную среду имитационного моделирования. Plant Simulation используется во многих производственных отраслях. Одним из недостатков данного программного обеспечения, как и DELMIA, является то что они используют только один из подходов к имитационному моделированию (объектно-ориентированный) [3].

Система AnyLogic, компании JXTechologies, использует в своей работе все три основных подхода к имитационному моделированию: дискретно-событийный, агентный и системную динамику, а также позволяет получать как обычные, так и оптимизационные решения. В этой связи, система AnyLogic перспективна для использования в построении моделей для сложных процессов АСП.

### ТЕХНОЛОГИЯ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Наиболее эффективным методом структурирования моделей объекта является метод предложенный Томасом Саати [4, 5]. Данный метод заключается в изучении сложного процесса путем разбивки его на подпроцессы. Объект сборки следует рассматривать как совокупность сложных систем, разбитых на подсистемы, учитывая всю информацию о сборочной единице (СЭ) применяемых материалов и их свойствах, конструкторской и технологической документации, трудоемкости и циклов, количество рабочих на участке, необходимость в средствах технологического оснащения и т.п.

Очевидно, что обобщенная структура конфигурации объекта сборки может быть представлена в виде сложного графа, состоящего из сложного множества узлов, каждая из которых соответствует определенному критерию структурирования объекта сборки и операций. Связи между узлами интерпретируются его ребрами. Схема графа представлена на рисунке 1.

В данном графе  $A_0$  – это начальное состояние объекта сборки. Принимаем, что  $A = \{t, k, \varepsilon, n\}$  соответственно  $A$  – это множество значение  $t$  – технологических,  $k$  – конструкторских,  $\varepsilon$  – экономических, а также  $n$  – информация о производственных площадях. Далее объект сборки следует классифицировать исходя из следующих вершин графа, каждая из которых является подграфов. Подграфы приведены в таблице 2.

Классифицируя объект производства по классификаторам, приведенным в таблице 2 ( $R, K, P, C, M, \Gamma$ ) делается вывод, к какому виду сборки относится объект. Вершина графа  $S$  также включает в себя информацию о имеющемся технологическом оснащении на предприятии, состоянии оборудования, привязки его к производственным площадям, количестве рабочих, необходимых для работы, и т.п. Далее выполня-

**Таблица 1.** Программное обеспечение средств имитационного моделирования

Подход к имитационному моделированию	Средства имитационного моделирования
Дискретно-событийное моделирование	GPSS, AnyLogic, Arena, DELMIA, Extend, PowerSim Studio, Witness, ProModel, Pilgrim, Taylor Simulation, SimScript, FlexSim и др.
Системная динамика	AnyLogic, Arena, SimBioSys, eMPlant, Plant Simulation, SimuLab, VenSim, PowerSim, Pilgrim, Dynamo, Stella, Ithink и др.
Агентное моделирование	AnyLogic, SimAgent, SimBioSys, AgentSpea, TeleScript, RePast, NetLogo, Ascape, Mason и др.

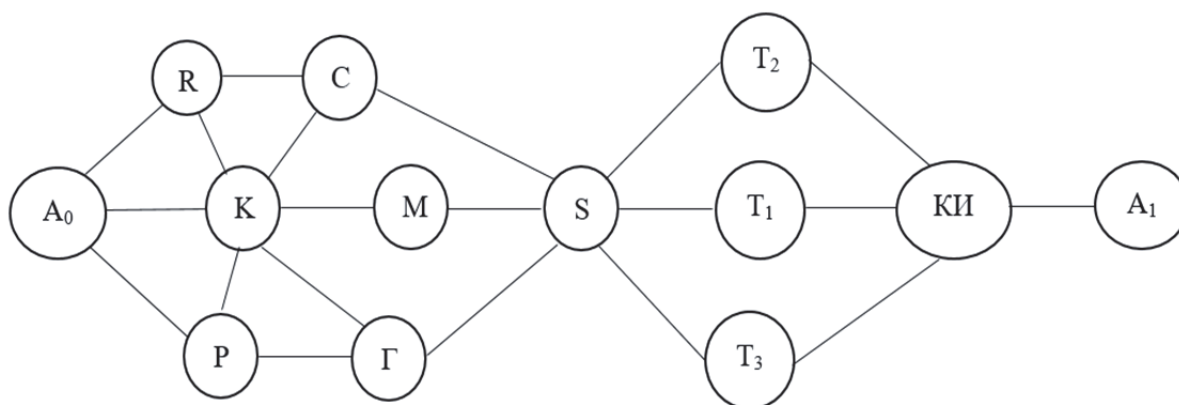


Рис. 1. Структура процессов АСП в виде сложного графа

ются последовательности сборочных работ, обозначенные как  $T_1, T_2, T_3$ , данные вершины графа включают всю последовательность работ исходя из технологического процесса, утвержденного на предприятии, трудоемкость каждой операции и суммарную стоимость нормо-часа для каждой категории работ и т.д. После проведения работ производятся контрольные измерения, относящиеся в вершине графа КИ. В итоге объект производства переходит в состояние  $A_1$ , обозначающее его конечное состояние на этапе АСП, после которого объект сборки передается на другие этапы сборки.

### ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Построение имитационной модели происходит на базе разработанного бизнес процесса с помощью методики IDEF0 [6].

При построении функциональной модели IDEF0 используется процессный подход, согласно которому все функции разбиваются на подпроцессы. На первом этапе построения бизнес процесса строится диаграмма верхнего уровня А-0, в данной диаграмме имеется только 1 функциональный блок и полное количество дуг (опе-

раций) соответствующих процессу сборки. Пример диаграммы А-0 представлен на Рисунке 2.

Данную диаграмму можно разложить на дочерние диаграммы (рис. 3.), которые состоят из подпроцессов функционального блока А-0.

При построении имитационной модели процессов АСП необходимо учитывать большое количество характеристик сборки, поэтому многоуровневую имитационную модель следует строить исходя из бизнес-процессов, построенных при помощи методики IDEF0.

Многоуровневая имитационная модель строится в системе Anylogic с использованием ее стандартных компонентов. Для описания сложных многокомпонентных задач, которые невозможно описать с применением стандартных функций, используются Java классы – это программный код, написанный на языке Java (рис. 4.)

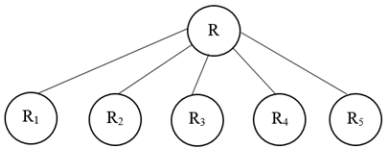
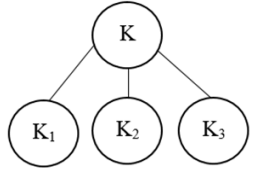
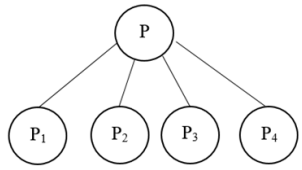
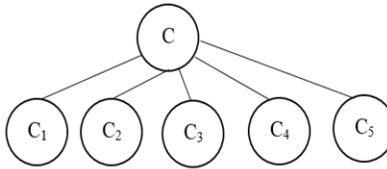
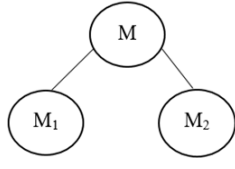
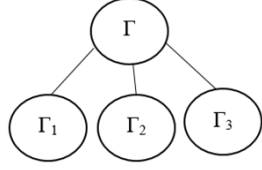
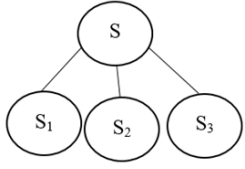
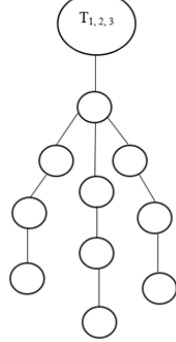
Примерами операций, для которых необходимо использования языка Java:

- Сборка по базовым отверстиям (БО), т.к. используется сложный геометрический контур, а также необходимо учитывать точность геометрических размеров;
- Сверление и рассверливание отверстий;
- Клепка.



Рис. 2. Функциональный блок А-0

Таблица 2. Расшифровка вершин графа

Вершина графа	Наименование	Составляющие и их описание	Изображение подграфа
<i>R</i>	Степень расчлененности	<i>R</i> <sub>1</sub> – Агрегат; <i>R</i> <sub>2</sub> – Отсек; <i>R</i> <sub>3</sub> – Секция; <i>R</i> <sub>4</sub> – Панель; <i>R</i> <sub>5</sub> – Узел; <i>R</i> <sub>6</sub> – Подузел	
<i>K</i>	Конструктивные контуры аэродинамического обвода	<i>K</i> <sub>1</sub> – Цилиндрическая поверхность; <i>K</i> <sub>2</sub> – Линейчатая поверхность; <i>K</i> <sub>3</sub> – Поверхность двойной кривизны.	
<i>P</i>	Принадлежность объекта сборки	<i>P</i> <sub>1</sub> – Фюзеляж; <i>P</i> <sub>2</sub> – Крыло; <i>P</i> <sub>3</sub> – Оперение; <i>P</i> <sub>4</sub> – Гондолы.	
<i>C</i>	Тип соединения	<i>C</i> <sub>1</sub> – Клепанные, резьбовые; <i>C</i> <sub>2</sub> – Сварные; <i>C</i> <sub>3</sub> – Паяные; <i>C</i> <sub>4</sub> – Клеевые; <i>C</i> <sub>5</sub> – Комбинированные.	
<i>M</i>	Метод базирования	<i>M</i> <sub>1</sub> – Прямой метод базирования; <i>M</i> <sub>2</sub> – Косвенный метод базирования.	
<i>Г</i>	Степень герметизации	<i>Г</i> <sub>1</sub> – Условно–негерметичные; <i>Г</i> <sub>2</sub> – Гермокабины; <i>Г</i> <sub>3</sub> – Топливные отсеки.	
<i>S</i>	Вид сборки	<i>S</i> <sub>1</sub> – Сборка в стапеле; <i>S</i> <sub>2</sub> – Внестапельная сборка; <i>S</i> <sub>3</sub> – Детально-узловая сборка.	
<i>T</i> <sub>1</sub> , <i>T</i> <sub>2</sub> , <i>T</i> <sub>3</sub>	Последовательность сборочных работ		

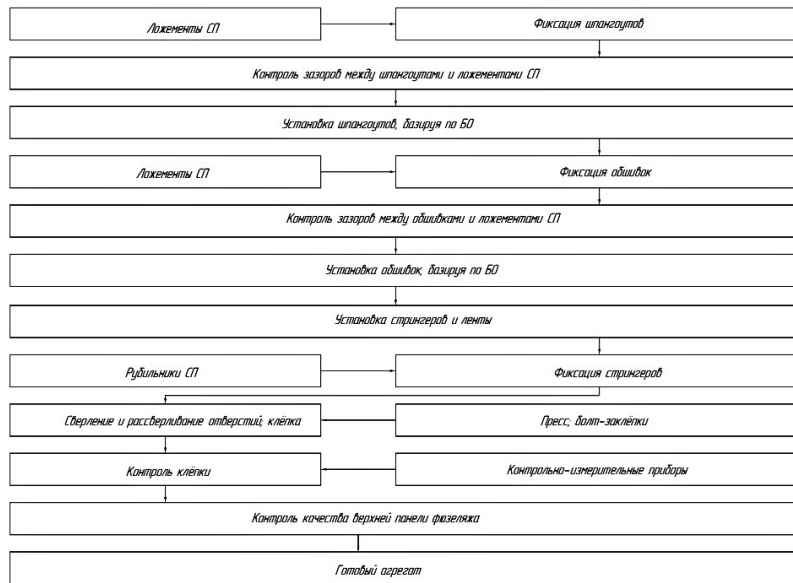


Рис. 3. Дочерняя диаграмма на примере сборки панели фюзеляжа

```

V**
 * MyClass
 */
public class MyClass extends com.kj.analogic.libraries.enterprise.Entity implements java.io.Serializable {

    /**
     * Конструктор по умолчанию
     */
    public MyClass() {
    }

    @Override
    public String toString() {
        return super.toString();
    }

    /**
     * Это число используется при сохранении состояния модели<br>
     * Это рекомендуется изменить в случае изменения класса
     */
    private static final long serialVersionUID = 1L;
}
    
```

Рис. 4. Java класс

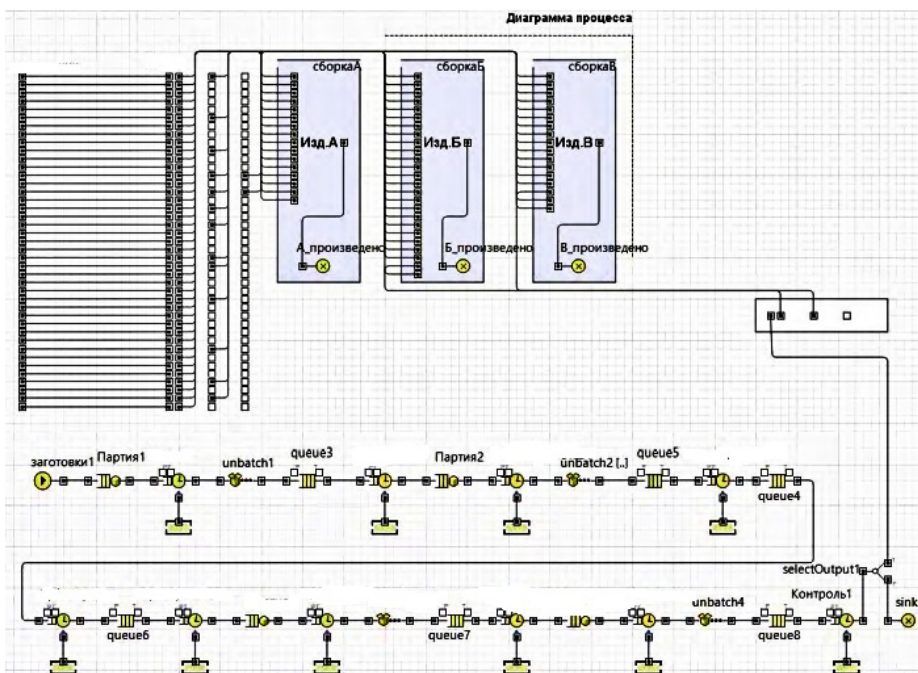


Рис. 5. Многоуровневая имитационная модель



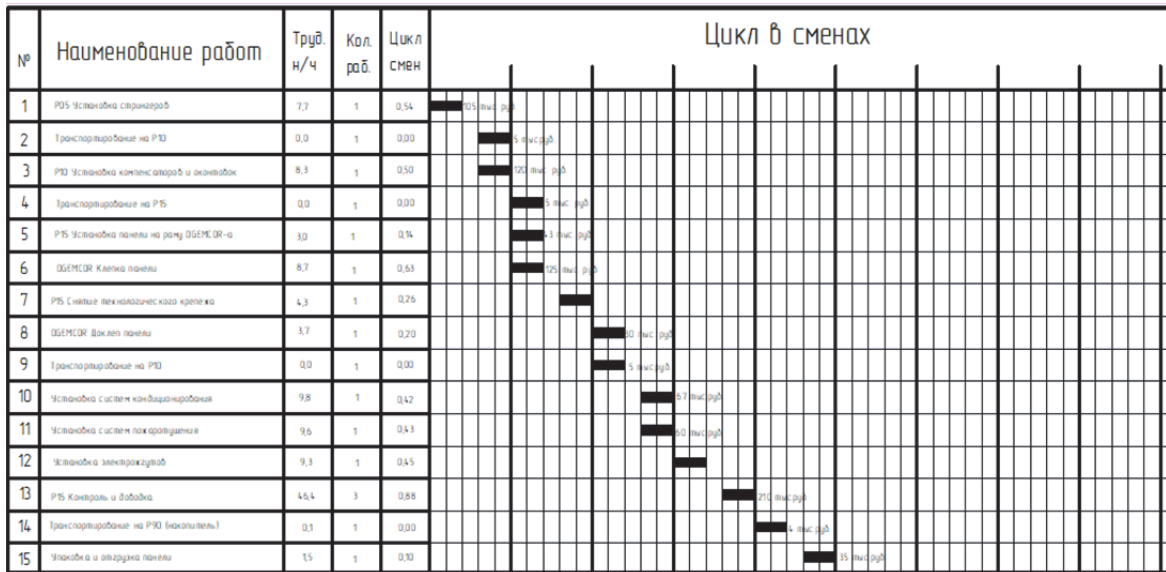


Рис. 6. График сборки объекта

После описания всех процессов строится многоуровневая имитационная модель (рис. 5). Построение велось, учитывая все сходные параметры объекта сборки и вышеописанные структуры графа. Каждый элемент системы соответствует рабочей операции и включает в себя все данные (технологические, конструкторские, экономические, производственные).

В результате построения многоуровневой имитационной модели получаем график сборки объекта (рис. 6).

Результаты построения модели позволяют выстроить систему управленческих решений с выбором наиболее оптимального пути сборки по наименьшей трудоемкости, циклам сборки и экономическим затратам.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ершов В. И., Павлов В. В., Каширин М. Ф., Хухорев В.С. Технология сборки самолетов: учеб. пособие. – М.: Альянс, 2015. – 456 с., ил.
2. Кузина С.В. Разработка инструментов планирования процессов подготовки производства на основе имитационного моделирования: дисс. ... канд. техн. наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский авиационный институт, М.: 2019. 163 с.
3. Компания Siemens PLM Software. Обзор продукта Plant Simulation. [Электронный ресурс] – [http://www.plm.automation.siemens.com/ru\\_ru/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plantsimulation.shtml#lightview-close](http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plantsimulation.shtml#lightview-close) (дата обращения 21.10.2020)

4. Саати Т. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
5. Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С. Основы автоматизированного проектирования самолетов: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
6. Киселева М.В. Имитационное моделирование систем в среде Anylogic: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 88 с.
7. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009. 592 с.
8. Гречников Ф.В., Глустенко С.Ф. Способы расчёта параметров топологии и маршрутов технологических операций в агрегатно-сборочном производстве // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета) // 2012. № 5(36). С. 55-60
9. Гречников Ф.В., Глустенко С.Ф. Теория и методика расчета передаточных функций топологических схем технологических систем сборки летательных аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета) // 2014. №6. С. 187-191
10. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М.: Издательство Московского университета, 2011. 304 с.

**IMULATION MODELING OF PROCESSES OF UNIT-ASSEMBLY  
PRODUCTION OF AIRCRAFT PRODUCTS**

© 2021 R.A. Salaev, A.A. Fedorov, A.V. Salaeva

Ulyanovsk State Technical University,  
Separate Structural Unit  
«Institute of Aviation Technologies and Management», Ulyanovsk, Russia

The article presents a universal simulation model of aggregate and Assembly production processes based on IDEF0 methods and numerical modeling methods. The problem statement is formed as follows: it is necessary to analyze the existing simulation tools, structure the Assembly production processes into separate classes and subclasses, describe the processes using the IDEF0 method, create a simulation model of the aggregate-Assembly production process with a link between economic and labor costs. The total labor intensity of Assembly processes and economic costs were considered as optimization criteria in this study. Numerical modeling and optimization of workflow parameters were performed in the AnyLogic simulation environment. The obtained simulation models can be used in the future in the management system of aviation enterprises, as well as in other production areas where the product is a complex system.

*Key words:* aggregate-assembly production, simulation, optimization, structuring.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66

---

*Roman Salaev, Postgraduate Student.*

*E-mail: rayzer75@yandex.ru*

*Alexander Fedorov, Candidate of Technics, Head of the Aircraft Department. E-mail: aa.fedorov@ulstu.ru*

*Angelina Salaeva, undergraduate Student.*

*E-mail: angelinafv@mail.ru*