

## АЛГОРИТМИ ПЛАНУВАННЯ ВАГОВИХ РОЗРАХУНКІВ ЛІТАКА

<sup>1</sup>Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова

просп. Академіка Глушкова, 40, Київ, Україна, 03680

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056

E-mails: <sup>1</sup>ledi\_annet@ukr.net; <sup>2</sup>konotop.dmitriy@gmail.com

Описано процес проектування складного технічного об'єкта на прикладі літака з використанням таких інформаційних технологій, як CAD/CAM/CAE-системи. Розглянуто основні моделі літака, які розробляються в процесі його проектування і відображують різні аспекти його структури та функціонування. Уведено поняття керувальної параметричної моделі під час проектування складного технічного об'єкта, яка являє собою сукупність початкових конструкторських даних для розроблення складного технічного об'єкта і забезпечує можливість оптимального керування складним технічним об'єктом на всіх етапах проектування з використанням сучасних комп'ютерних інформаційних технологій. Розкрито процес вагового проектування, який пов'язаний із всіма етапами розроблення літака і його виробництва. Подано використання алгоритму планування, що дозволяє упорядковувати вагові розрахунки на різних етапах вагового планування та проводити оптимізацію варіантів використання наявних в базі даних формул і методик розрахунку.

**Ключові слова:** алгоритм планування; вагове проектування; керувальна параметрична модель; проектування літака; CAD/CAM/CAE-середовище.

## Постановка проблеми

Процес проектування складного технічного об'єкта (СТО) на прикладі літального апарата в середовищі CAD/CAM/CAE включає чотири етапи прийняття технічних рішень і розроблення моделі майстер-геометрії (ММГ), моделі розподілу об'єктів (МРО), моделі повного визначення виробу (МПВВ) [1; 3; 7].

Основні моделі літака розробляються в процесі його проектування і відображують різні аспекти його структури та функціонування (рис. 1).



Рис. 1. Основні моделі літака

Геометричну модель  $M_i$  на різних етапах проектування можна подати у вигляді

$$M_i = \bigcup_{k=1}^N m_k, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість геометричних моделей;

$m_k$  – моделі компонентів конструкції, систем і обладнання геометричної моделі відповідного етапу проектування.

Керувальна параметрична модель (КПМ) при проектуванні СТО являє собою сукупність початкових конструкторських даних для розроблення СТО в середовищі CAD/CAM/CAE. Ця модель розробляється на основі прийнятих технічних рішень та даних ММГ і є основою для розроблення МРО та МПВВ, що забезпечує можливість оптимального керування СТО на всіх етапах проектування з використанням сучасних комп'ютерних інформаційних технологій [5].

Керувальна параметрична модель містить такі компоненти:

- модель майстер-геометрії;
- кінематичні схеми рухомих частин агрегатів;
- схеми конструкції;
- компоновальні схеми систем і обладнання.

Таким чином, будь-який компонент конструкції, систем і обладнання літака можна подати у вигляді такої функціональної залежності:

$$m_k = f(X_k),$$

де  $X_k$  – КПМ відповідного компонента конструкції, систем і обладнання літака:

$$X_k = \bigcup_{j=1}^S x_j,$$

$S$  – кількість усіх параметрів КПМ;

$x_j$  – параметр КПМ (базові точки прив'язки базові лінії, площини, у разі потреби – поверхні).

На основі формули (1) геометричну модель компонента конструкції, систем і обладнання літака можна подати у вигляді

$$m_k = f^k(x_i, i=1...s).$$

Процес розроблення моделі агрегату виробу з використанням КПМ можна подати у вигляді орієнтованого графу (рис. 2):

вузол 1 – виконується аналіз технічних рішень щодо агрегату виробу і визначаються моделі КПМ – схема кінематичних агрегатів (СКА), схема конструкції планера (СКП), схема розміщення систем (СРС) і моделі агрегату МРП, які розроблятимуться на цьому етапі;

вузол 2 – якщо агрегат містить рухомі частини, то переходимо на вузол 3, інакше – на вузол 9;

вузол 3 – розробляється модель СКА агрегату виробу;

вузол 4 – розробляється модель СКП агрегату виробу;

вузол 5 – розробляється модель СРС агрегату виробу;

вузол 6 – якщо зв'язок моделі СКП і СРС «відіграється» з моделлю СКА, то переходимо на вузол 7, інакше – на вузол 3;

вузол 7 – із використанням моделей СКА, СКП і СРС розробляється модель агрегату виробу на етапі МРО;

вузол 8 – якщо розроблена модель агрегату виробу відповідає заданим вимогам, то процес розроблення завершується, інакше – переходимо на вузол 1;

вузол 9 – розробляється модель СКП агрегату виробу;

вузол 10 – розробляється модель СРС агрегату виробу і переходимо на вузол 7.

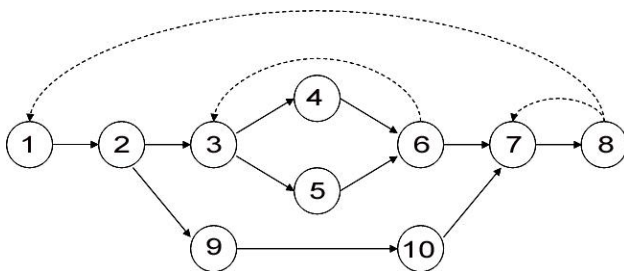


Рис. 2. Граф процесу розроблення моделі агрегату виробу з використанням КПМ

### Особливості вагового проектування

Процес вагового проектування нерозривно пов'язаний зі всіма етапами розроблення літака і його виробництва. Він є вирішенням (у певній послідовності) численних завдань, що ґрунтуються на взаємодоповнювальних вихідних даних, а методика має ітеративний характер.

Вагові розрахунки (рис. 3), що виконуються в процесі проектування літака, можна поділити на проектувальні та виконавчі [7].



Рис. 3. Класифікація вагових розрахунків

Проектувальні розрахунки можна поділити на три рівні залежно від етапу проектування.

Розрахунки першого рівня визначають зовнішній вигляд літака. Розрахунки другого рівня пов'язані з вибором конфігурації і розмірів агрегатів літака. Розрахунки третього рівня визначають кінцеві результати вагових характеристик. На кожному наступному етапі уточнюються дані, отримані на попередньому етапі. Загальна методика вагового проектування полягає у виконанні ітераційних процедур:

- задача розв'язується за статистичних значень вихідних даних і обмеженої кількості факторів (перший цикл ітерацій – перше наближення);

- далі відбувається повернення в початок задачі і повторюється її розв'язання, але вже з уточненими значеннями вихідних даних і перерозглядом важливих факторів, знайдених на попередньому етапі (другий цикл ітерацій – друге наближення);

- повторення ітерації.

Під час автоматизації процесу вагового проектування літака виникає задача автоматизації планування ходу вагових розрахунків.

Основні методики і формули вагового проектування можна знайти в джерелах [1; 3; 7]. У вагових формулах також простежується ітеративний характер вагового проектування, зокрема параметрами вагових формул першого і другого наближень є результати розрахунків попередніх рівнів.

### Математичний опис задачі

Заданий орієнтований граф  $G = \langle V, E \rangle$ , поданий у вигляді списків суміжності, де  $V$  – множина вершин графу, що відповідають компонентам, які містяться в базі знань,  $E$  – множина ребер графу, що відповідають зв'язкам між компонентами в процесі вагового розрахунку.

Для кожного компонента, отже, для кожної вершини  $V$  задано множину об'єктів  $F = \{f_{i1}, \dots, f_{in}\}$ , що відповідають формулам розрахунку. Для кожного елемента множини  $F$  задано множину параметрів  $P = \{p_{ij1}, \dots, p_{ijk}\}$ .

План програми задано у вигляді множини цілей  $A = \langle a_1, \dots, a_m \rangle$ , кожна з яких, у свою чергу, містить множину підзадач  $S = \langle s_{i1}, \dots, s_{iq} \rangle$ , які відповідають формулам розрахунку маси компонента, що є допустимими на заданому користувачем етапі вагового проектування.

Для кожної цілі та кожної підзадачі в процесі роботи алгоритму визначається рівень застосування в розрахунку –  $level[y]$ ,  $y \in A \cup S$ , що характеризує місце цілі та підзадачі в алгоритмі вагового розрахунку. Рівень визначається відповідно до причинних зв'язків між цілями плану.

Для кожної цілі та підзадачі також визначені логічні характеристики  $find[y]$  і  $result[y]$ , що визначають, чи були ці цілі розглянуті й виконані.

У процесі роботи необхідно розв'язати такі підзадачі:

- скласти підграф  $G = \langle V', E' \rangle$ , що містить лише ті компоненти  $V' \subseteq V$  і зв'язки  $E' \subseteq E$ , які потрібні для виконання розрахунків із заданим ступенем точності;
- призначити для кожної цілі та підзадачі рівень застосування в розрахунку;
- у разі потреби додавати елементи в дерево цілей для отримання можливості розрахувати рівні цілей;
- провести сортування цілей і підзадач.

### Методи розв'язання задачі

Кожен план має чотири компоненти, з яких два визначають етапи плану, а два виконують функції обліку, що дозволяють визначити, як може бути доповнений план [5]:

- множина відкритих передумов, у розглядваному завданні це множина невіршених цілей  $A$ , характеристика яких  $result = false$ ;

- множина дій, з яких складаються етапи плану, у завданні це множина підзадач  $S$ -функцій, за допомогою яких можна досягнути мети і розрахувати масове значення компонента.

- множина обмежень упорядкування: для зберігання зв'язків залежності в розрахунку компонентів створюється множина взаємозв'язків  $R = \langle r_1, \dots, r_w \rangle$ , у який заносяться дані про наявність обмежень упорядкування між цілями плану;

- множина причинних зв'язків: для кожної підзадачі визначається множина залежностей для використовуваних формул  $R[s]$ .

Проведення сортування ускладнюють дві особливості:

- наявність циклів: більшість алгоритмів топологічного сортування працюють для ациклічних графів;

- неповна постановка задачі.

Фактично описана основна задача є задачею топологічного сортування на графі.

Найчастіше топологічне сортування виконується за допомогою алгоритму сортування з обходом графу в глибину або методом подання графу у вигляді декількох рівнів (алгоритму Демукрона) [2; 4; 5].

У зв'язку з наявністю циклів використовувати алгоритм сортування з обходом в глибину не є можливим, оскільки порушується не лише головна умова застосування цього алгоритму, але й основна теза в доведенні його коректності [4].

Для використання алгоритму Демукрона необхідно спочатку отримати матрицю суміжності, після чого кількість ітерацій алгоритму залежить від кількості рівнів у графі. Ураховуючи особливості ітерацій вагового проектування та використовуючи побудоване на попередньому етапі дерево компонентів, можна скоротити кількість ітерацій, вибираючи для перегляду насамперед ті цілі, що відповідають більш загальним агрегатам.

У разі правильної організації вибору цілі та наявності всіх шуканих компонентів у списку цілей за алгоритмом розраховується рівень більшості компонентів за першу ітерацію.

**Алгоритм розв’язання задачі планування**

Алгоритми розв’язання перших двох підзадач показано на рис. 4 і 5.

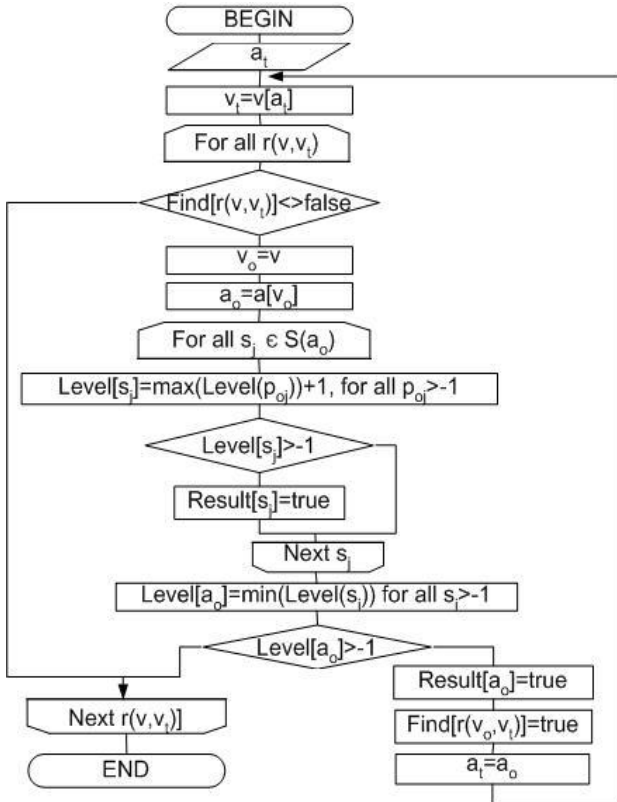


Рис. 4. Алгоритм знаходження рівнів у графі

Задача сортування розв’язується шляхом внесення елементів, яким призначено рівень, до списків  $L_1, \dots, L_j$ , де  $j$  – кількість рівнів у структурі. У списки додаються ключі цілей і підзадач.

Після отримання розв’язку основної задачі при складанні плану списки послідовно виводять свої компоненти, починаючи з першого списку та закінчуючи списком під номером  $j$ .

**Аналіз складності алгоритму**

Виконаний аналіз показав, що три підзадачі алгоритму виконуються за лінійний час:

– складність підзадачі побудови підграфу  $G'$  –  $O(mn)$ , де  $m$  – кількість елементів у множині  $A$ ,  $n$  – кількість елементів у множині  $F$ ;

– доповнення графу  $G'$  розв’язується за час  $O(tjm) + \Theta(th)$ , де  $h$  – розмірність вихідного графу  $G$ ,  $t$  – кількість конфліктів,  $j$  – кількість рівнів у плані;

– сортування розв’язується за час  $O(m)$ .

Способи зменшення складності алгоритму:

– видалення непотрібних умов із множини умов  $R$ , умова віддаляється, якщо рівні обох компонентів (залежного і причини) призначені, тим самим зменшується кількість елементів  $w$  у множині  $R$ ;

– для введення нових елементів у дерево розв’язання розглядаються насамперед конфліктні умови і як нові цілі та підзадачі вибираються компоненти і формули з нульовим рівнем;

– для проходження по дереву цілей береться за основу структура входження компонентів до складу виробу, при кожному кроці вибираються вищі в структурі компоненти, тим самим зменшується кількість повернень для розрахунку рівнів попередніх компонентів;

– насамперед запам’ятовуються залежні елементи, тим самим зменшується час повернення для розрахунку попередніх компонентів.

**Висновки**

Використання алгоритму планування дозволяє упорядковувати вагові розрахунки, які виконуються на різних етапах вагового планування і проводити оптимізацію варіантів використання наявних у базі даних формул та методик розрахунку.

У програмі автоматизації вагового планування передбачено два варіанти створення списку цілей: автоматично при виборі відповідного рівня розрахунку або вручну шляхом вибору у відповідному меню набору цілей – компонентів і підзадач – формул розрахунку їх мас.

Хоча план розрахунку впорядковує наявні варіанти розрахунку для зручності користування, але на кожному етапі вагового розрахунку наводяться всі можливі формули. Існує можливість переходу між етапами без виконання розрахунку; також у будь-який момент можна повернутися на попередній етап. Усі зміни, що вносяться у систему, відображаються на будь-якому етапі її розрахунку.

Згадана програма є частиною створення електронного макета літака.

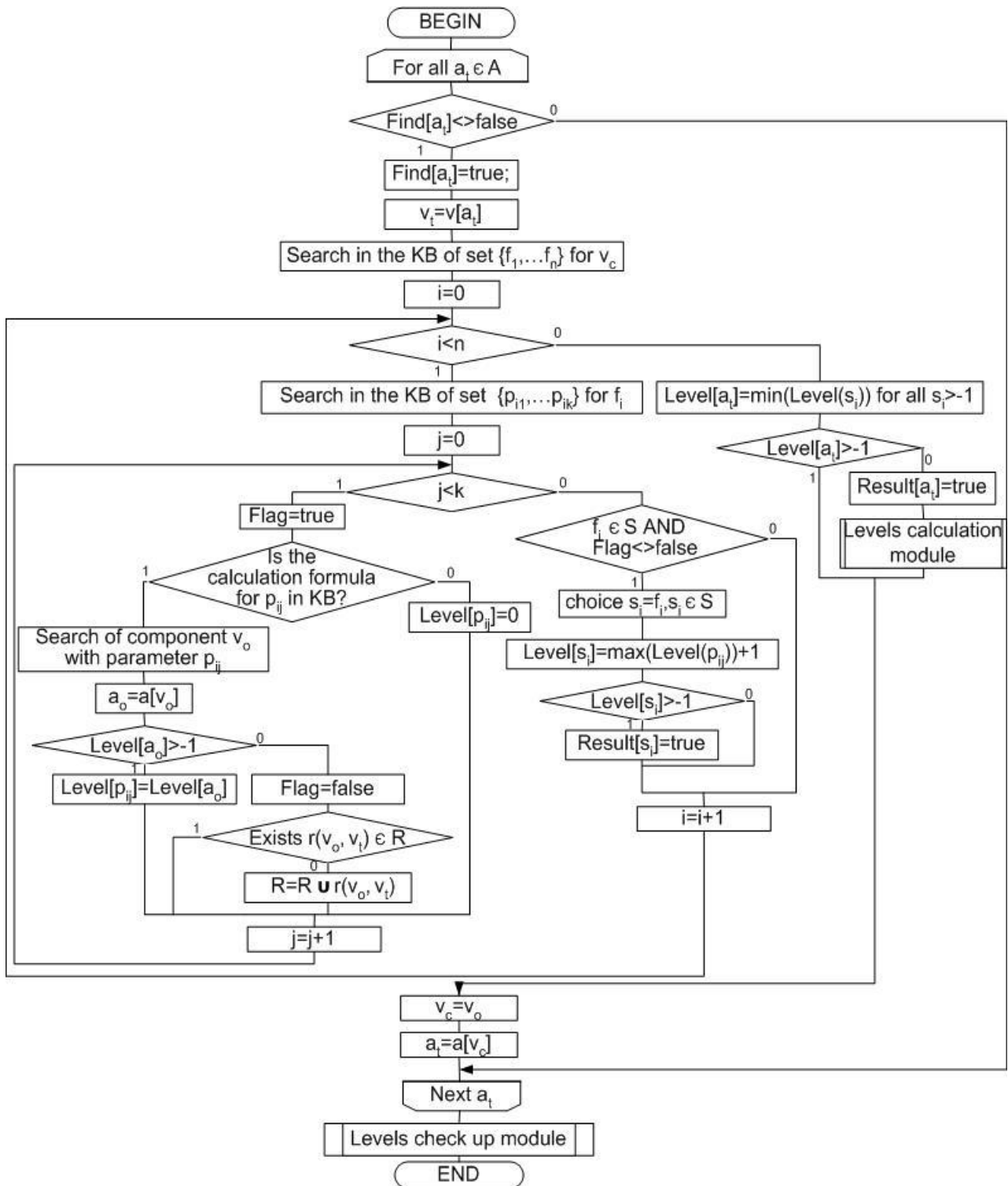


Рис. 5. Алгоритм планування вагових розрахунків

## Література

1. *Борисов В.В.* Проблемы информационной технологии обмена данными в системе автоматизированного проектирования сложного технического объекта / В.В. Борисов, В.П. Зинченко // XXXIII Международный симпозиум «Вопросы оптимизации вычислений»: тезисы докладов. – Кацевели: ИК им. В.М. Глушкова НАН Украины, 2007. – С. 38–39.

2. *Гудрич М.Т.* Структуры данных и алгоритмы в Java / М.Т. Гудрич. – Минск: Новое знание, 2003. – 671 с.

3. *Зинченко В.П.* Средства и методы управления проектной информацией при создании сложных технических объектов / В.П. Зинченко, Ю.В. Абрамов, В.В. Борисов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: Государственный аэрокосмический университет «ХАИ», 2001. – Вып. № 9. – С. 17–29.

4. *Кормен Т.* Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Риверст, К. Штайн. – 2-е издание. – Москва: Издательство «Вильямс» 2005. – 1296 с.

5. *Рассел С.* Искусственный интеллект. Современный поход / С. Рассел, П. Норвинг. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.

6. *Седжвик Р.* Фундаментальные алгоритмы на C++ / Р. Седжвик. – Киев: Издательство «ДиаСофт», 2001. – 688 с.

7. *Шейнин В.М.* Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов:

справочник / В.М. Шейнин, В.И. Козловский. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Машиностроение, 1984. – 552 с.

## References

1. Borisov, V.V.; Zinchenko, V.P. 2007. *Problems of the data exchange information technology in the automatization design system of complex technical object.* XXXIII International Symposium “Optimization of computation issues”. Head of report. Katseveli, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics NAS of Ukraine: 38–39 (in Russian).

2. Goodrich, M.T. 2001. *Data structures and algorithms in Java.* Jahn Wiley and Sons Inc. 670 p. (in Russian).

3. Zinchenko, V.P.; Abramov, Y.U.; Borisov, V.V. 2001. *Facilities and methods of project information managing of complex technical objects creation.* Open information and computer integration technology. Kharkov, “KhAI”. Vol. 9: 17–29 (in Russian).

4. Cormen, T.H.; Leiserson, C.E. 2001. *Introduction to Algorithms.* Second Edition. The MIT Press. 1202 p. (in Russian).

5. Russel, S.; Norving, P. 2009. *Artificial Intelligence: A modern Approach.* 3rd edition. Prentice Hall. 1152 p. (in Russian).

6. Sedgewick, R. 2001. *Algorithms in C++.* DiaSoft LTD. 688 p. (in Russian).

7. Sheinin, V.M.; Kozlovskij, V.I. 1984. *Weight estimation and the efficiency of passenger aircrafts.* Moscow, Mashinostroenie. 552 p. (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 25.04.2013.

**Абрамова Ганна Вікторівна.** Аспірант. Інженер-програміст. Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, ДП «Антонов», Київ, Україна. Освіта: Національний авіаційний університет, Київ, Україна (2007). Напрямок наукової діяльності: інформаційні технології, бази знань, онтологія. Кількість публікацій: 14. E-mail: ledi\_annot@ukr.net

**Конотоп Дмитро Ігоревич.** Аспірант. Кафедра автоматизації експериментальних досліджень, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна. Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна (2008). Напрямок наукової діяльності: застосування інформаційних технологій в авіації. Кількість публікацій: 20. E-mail: konotop.dmitriy@gmail.com

**G. Abramova<sup>1</sup>, D.Konotop<sup>2</sup>. Algorithm project weight calculation aircraft**

<sup>1</sup>Institute Cybernetics V.M. Glushkova, Glushkova avenue, 40, Kyiv, Ukraine, 03680

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Peremogy avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03056

E-mails: <sup>1</sup>ledi\_annot@ukr.net; <sup>2</sup>konotop.dmitriy@gmail.com

The paper describes the process of a complex technical object design on the example of the aircraft, using information technology such as CAD/CAM/CAE-systems, presents the basic models of aircraft which are developed in the process of designing and reflect the different aspects of its structure and function. The idea of control parametric model at complex technical object design is entered, which is a set of initial data for the development of design stations and enables the optimal complex technical object control at all stages of design using modern computer technology. The paper discloses a process of weight design, which is associated with all stages of development aircraft and its production. Usage of a scheduling algorithm that allows to organize weight calculations are carried out at various stages of planning and weighing options to optimize the use of available database of formulas and methods of calculation.

**Keywords:** aircraft design; CAD/CAM/CAE-environment; control parametric model weight design; scheduling algorithm.

**Abramova Ann.** Postgraduate student. Part-programming engineer.

V.M. Glushkova Institute of Cybernetics, ASTC “Antonov”, Kyiv, Ukraine.

Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine (2007).

Research area: Information technologies, knowledge base, ontology.

Publications: 14.

E-mail: ledi\_annot@ukr.net

**Konotop Dmytro.** Postgraduate student.

Department of Automatization of Experimental Researches, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine (2008).

Research area: using of information technology in aviation.

Publications: 20.

E-mail: konotop.dmitriy@gmail.com

**А.В. Абрамова<sup>1</sup>, Д.И. Конотоп<sup>2</sup>. Алгоритмы планирования весовых расчетов самолета**

<sup>1</sup>Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, просп. Академика Глушкова, 40, Киев, Украина, 03680

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», просп. Победы, 37, Киев, Украина, 03056

E-mails: <sup>1</sup>ledi\_annot@ukr.net; <sup>2</sup>konotop.dmitriy@gmail.com

Описан процесс проектирования сложного технического объекта на примере самолета. Используются такие информационные технологии, как CAD/CAM/CAE-системы. Рассмотрены основные модели самолета, которые разрабатываются в процессе его проектирования и отображают разные аспекты его структуры и функционирования. Введено понятие управляющей параметрической модели при проектировании сложного технического объекта, которая представляет собой совокупность исходных конструкторских данных для разработки сложного технического объекта и обеспечивает возможность оптимального управления сложным техническим объектом на всех этапах проектирования с использованием современных компьютерных информационных технологий. Раскрыт процесс весового проектирования, связанный со всеми этапами разработки самолета и его производства. Представлено использование алгоритма планирования, позволяющего упорядочивать весовые расчеты на разных этапах весового планирования и проводить оптимизацию вариантов использования имеющихся в базе данных формул и методик расчета.

**Ключевые слова:** алгоритм планирования; весовое проектирование; проектирование самолета; управляющая параметрическая модель; CAD/CAM/CAE-среда.

**Абрамова Анна Викторовна.** Аспирант. Инженер-программист.

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, Киев, Украина. ГП «Антонов», Киев, Украина.

Образование: Национальный авиационный университет (2007).

Направление научной деятельности: информационные технологии, базы знаний, онтология.

Количество публикаций: 14.

E-mail: ledi\_annot@ukr.net

**Конотоп Дмитрий Игоревич.** Аспирант.

Кафедра автоматизации экспериментальных исследований, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина.

Образование: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина (2008).

Направление научной деятельности: применение информационных технологий в авиации.

Количество публикаций: 20.

E-mail: konotop.dmitriy@gmail.com