

УДК 629.7.01; 004.8

В.В. Воронько, Ю.А. Воробьев, О.В. Григоренко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ БАЗ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ ПРИ КОНВЕЙЕРНОЙ СБОРКЕ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА

*Рассмотрены проблемы повышения эффективности производства легких самолетов на основе роботизации участка конвейерной сборки самолетных конструкций. Предложен двухэтапный подход к созданию моделей мира интеллектуальных роботов-сборщиков. Описана нечеткая модель увязки деталей с использованием метода виртуальных баз.*

**Ключевые слова:** легкие самолеты, роботизация, конвейерная сборка, интеллектуальный робот, нечеткая модель, метод виртуальных баз.

### Введение

На современном этапе развития отечественного самолетостроения особую актуальность приобрела проблема разработки принципиально новых методов и средств подготовки производства легких самолетов (ЛС) для комплектации парка авиации общего назначения (АОН) как Украины, так и государств ближнего и дальнего зарубежья [1]. Указанная проблема непосредственным образом вытекает из существующего противоречия между необходимостью обеспечения выпуска в сжатые сроки с высоким уровнем качества сравнительно крупных серий самолетов с большим числом модификаций внутри каждой серии, и возможностями существующих средств технической подготовки производства по обеспечению перечисленных требований. При этом особую проблематичность вызывает рациональная организация сборочно-монтажных работ, которые составляют до 60% от общей трудоемкости изготовления самолета и до 65% от общей продолжительности цикла основного производства [2].

Основные затраты при традиционной, «ручной», организации сборочно-монтажных работ приходятся на изготовление технологической оснастки (шаблонов), операции взаимной координации деталей и подборок (составных частей) при их установке, фиксации составных частей (СЧ) в заданном положении, соединение деталей конструкции. В настоящее время для освоения растущих объемов выпуска ЛС может быть применен на практике лишь экстенсивный путь, предполагающий расширение фронта ручных работ и, соответственно, увеличение численности рабочих.

Альтернативный, интенсивный путь организации сборочно-монтажных работ, как и самолетостроительного производства в целом, пролегает через комплексную автоматизацию, в частности роботизацию сборочных операций [3]. Замена рабочего-сборщика средствами робототехники влечет за со-

бой проблему разработки соответствующих систем управления с элементами искусственного интеллекта. В конечном счете, эта проблема сводится к повышению уровня «интеллектуальности» производственных роботов-манипуляторов, которые должны, в определенной степени, моделировать поведение рабочего [4].

В качестве методической основы организации производственных процессов в условиях роботизированной конвейерной сборки ЛС представляется целесообразным применение «сборки по виртуальным базам», подробно описанной в [5, 6].

**Целью данной статьи** является анализ возможности применения аппарата нечеткой логики в задачах синтеза адекватных моделей и методов управления роботизированной конвейерной сборкой самолетных конструкций.

### Общая характеристика проблемы интеллектуализации роботизированной конвейерной сборки самолетных конструкций

Проблема повышения уровня «интеллектуальности» роботов, являясь по своей сути фундаментальной, с учетом специфики роботизации сборочно-монтажных работ в самолетостроении может быть представлена в форме совокупности двух тесно связанных прикладных проблем. Первой проблемой является построение модели мира отдельно взятого робота и разработка на основе этой модели методов планирования его поведения в различных ситуациях, возникающих в условиях реального сборочного производства. Вторая проблема состоит в разработке моделей и методов функционирования роботизированных участков или коллективов роботов с целью согласования действий отдельных роботов в составе указанных производственных подразделений. Поскольку очевидна необходимость последовательной ре-

лизации данных проблем, первоначальным является вопрос выбора формальных средств синтеза модели мира отдельного робота в составе участка конвейерной сборки легких самолетов.

### Постановка задачи синтеза модели мира робота-манипулятора на участке сборки самолетных конструкций

Прежде чем представить формальное описание модели мира робота-сборщика самолетных конструкций, введем ряд допущений, дающих возможность считать такую модель типовой для любого интеллектуального робота (ИР) в составе конвейерной сборки ЛС:

1. Роботизация охватывает такие виды монтажно-сборочных работ, как взаимная координация СЧ при их установке и фиксация сборочных единиц в заданном положении.

2. Рецепторные и эффекторные подсистемы ИР имеют функциональность, достаточную для копирования действий рабочего-сборщика.

3. Структура модели мира ИР инвариантна по отношению к способу обеспечения взаимозаменяемости СЧ и элементов технологической оснастки при сборке (по осям, либо по поверхностям), изменению подлежат лишь значения настроечных коэффициентов.

С учетом принятых допущений, на содержательном уровне задача синтеза типовой модели мира ИР по сборке самолетных конструкций формулируется следующим образом: даны результаты оценки геометрических параметров двух деталей (поступают от координатно-измерительной машины, либо от системы технического зрения ИР); необходимо на основе анализа параметров деталей произвести оценку их качества, и на этой основе сформировать соответствующее решение (например, о необходимости доработки какой-либо одной или обеих деталей, наличии брака и т.п.). Решение должно быть представлено в форме управляющего воздействия (например, угла поворота или величины линейного смещения) на исполнительный орган ИР.

Для формализации данной задачи целесообразно использовать метод определения лингвистической оценки формы поверхностей либо расположения осей сопрягаемых деталей, основанный на использовании математического аппарата нечеткого условного логического вывода [7]. Полученная лингвистическая оценка даст возможность легко определить и реализовать соответствующее управляющее воздействие на сервопривод ИР.

Рассмотрим формальное представление модели мира ИР для варианта увязки деталей по поверхностям. В качестве измеряемых исходных данных для определения качественной оценки двух увязываемых деталей принимаются два обобщенных параметра:

$X_1$  – характер поверхности первой детали;  $X_2$  – характер поверхности второй детали. При этом  $X_j \in [X_{j\min}, X_{j\max}]$ ,  $j = \overline{1,2}$ ,  $X_{1\min}$ ,  $X_{1\max}$  – минимально и максимально возможные значения оценки поверхности первой детали соответственно,  $X_{2\min}$ ,  $X_{2\max}$  – минимально и максимально возможные значения оценки поверхности второй детали соответственно.

Представим параметры  $X_1$  и  $X_2$  в виде нечетких множеств, формирующих лингвистические переменные:

$$X_j^0 = \{ \langle x_j^i, U_{X_j}, \overline{X_j} \rangle \}, X_j^i \in T_j^*(u), \\ j = \overline{1,2}; i = \overline{0,10}, \quad (1)$$

где  $T_j^*(u)$  – расширенное терм-множество лингвистической переменной "Оценка поверхности  $j$ ";  $X_j$  – нечеткое множество, описываемое функцией принадлежности;  $\mu_{\overline{X_j}} : U_{X_j} \rightarrow [0,1]$ ;  $U_{X_j}$  – универсумы вида  $U_{X_j} = \{0,1,\dots,10\}$ .

Значения лингвистической переменной "Оценка поверхности  $j$ " заданы в табл. 1.

Таблица 1

Значения лингвистической переменной "Оценка поверхности  $j$ "

Значения лингвистической переменной "Оценка поверхности $j$ "	$u_{ij} \in U_X$
Предельно низкая	0
Близкая к низкой	1
Низкая	2
Чуть выше, чем низкая	3
Почти средняя	4
Чуть лучше, чем средняя	5
Средняя	6
Почти высокая	7
Высокая	8
Чуть выше, чем высокая	9
Наивысшая	10

Для отображения  $q: X_j \rightarrow U_{X_j}$ ,  $j = \overline{1,2}$  введем следующее соотношение:

$$U_i = \text{ent} \left[ \left( \text{surf}(U_{X_j}) - 1 \right) \cdot \left( \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \right)^\alpha \right],$$

$$j = \overline{1,2}, i = \overline{0,10}, \quad (2)$$

где  $\text{surf}(U_{X_j})$  – мощность универсума  $U_{X_i} = \{0,1,\dots,10\}$ , то есть  $(\text{surf}(U_{X_j}) - 1) = 10$ ;

$X_j$  – текущее измеренное значение  $j$ -го параметра;  $\alpha$  – поправочный коэффициент ( $\alpha \geq 1$ ).

Нечеткие множества  $\tilde{X}_j$ ,  $j = \overline{1,2}$  имеют вид:

$$X_j = \int_{U_{X_j}} \mu_{X_j}(u)/u, \quad j = \overline{1,2}. \quad (3)$$

Для вычисления оценок функции принадлежности вида  $\mu_{X_j}(u_i)/u_i$ ,  $i = \overline{0,10}$  введем следующую процедуру:

$$\mu(u_i) = 1 - \frac{1}{\text{surf}(U_{X_j} - 1)} \times \left| u_i - \text{ent} \left[ \left( \text{surf}(U_{X_j}) - 1 \right) \cdot \left( \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \right)^\alpha \right] \right|. \quad (4)$$

$$R(A_1(x), A_2(y)) = \int_{U_{X_j} \times V_Y} \left( \mu(u) \rightarrow_1 \mu(v) \right) \wedge \left[ (1 - \mu(u)) \rightarrow_1 (1 - \mu(v)) \right] / (u, v) = \begin{cases} 1 - \mu(v), \mu(u) < \mu(v); \\ 1, \mu(u) = \mu(v); \\ \mu(v), \mu(u) > \mu(v). \end{cases} \quad (7)$$

Таблица 2

Значение лингвистической переменной "Качество поверхности"

Значение лингвистической переменной "Качество поверхности"	$v_{y_i} \in V_Y$
Недопустимо низкое	0
Близкое к низкому	1
Низкое	2
Чуть выше, чем низкое	3
Почти среднее	4
Чуть выше, чем среднее	5
Среднее	6
Близкое к высокому	7
Высокое	8
Чуть выше, чем высокое	9
Наивысшее	10

Рассмотрим случай, когда сопрягаемые детали с точки зрения технологии сборочно-монтажных работ неравнозначны, например, параметр  $X_1$  имеет большее значение, нежели параметр  $X_2$ . В этом случае вместо функции принадлежности вида

$$\mu(u) = \mu_1(u) \wedge \mu_2(u)$$

Для

$$\text{surf}(U_{X_j}) - 1 = 10,$$

то есть для случая  $i = \overline{0,10}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\forall j = \overline{1,2}$ , будем использовать соотношение упрощенного вида:

$$\mu(u_i) = 1 - \frac{1}{10} \left| u_i - \text{ent} \left( \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \right) \right|,$$

$$u_i \in U_{X_j}, \quad j = \overline{1,10}. \quad (5)$$

Представим результат решения задачи, то есть параметр  $Y$  изменения положения исполнительного органа ИР после оценки соотношения поверхности одной детали в виде нечеткого множества, формирующего лингвистическую переменную следующего вида:

$$Y^0 = \{ \langle y_i, V_Y, \tilde{Y} \rangle, y_i \in T^*(u) \}, \quad (6)$$

где  $T^*(u)$  – расширенное терм-множество лингвистической переменной "Качество поверхности";  $\tilde{Y}$  – нечеткое множество, описываемое функцией принадлежности  $\mu_{\tilde{Y}}: V_Y \rightarrow [0,1]$ ;  $V_Y$  – универсум вида  $V_Y = \{0,1,\dots,10\}$ .

Значения лингвистической переменной "Качество поверхности" заданы в табл. 2.

Для формирования решения на основе оценки поверхности сопрягаемой детали сформируем правило вида:

в правиле (7) необходимо использовать операцию "растяжения" нечетких множеств [7], то есть входное нечеткое множество должно быть представлено в виде  $\tilde{X} = X_1 \wedge \text{DIL}(\tilde{X}_2)$ .

Функция принадлежности в рассматриваемом случае приобретает вид:

$$\mu(u) = \mu_1(u) \wedge [\mu_2(u)]^{0,5}. \quad (8)$$

Рассмотрим случай, когда оценки характера поверхностей увязываемых деталей ранжированы по важности.

При этом, например, входной параметр первой детали оценен как «несущественное», а входной параметр второй детали как «почти малое». Для построения нечеткого множества

$$\tilde{X}_1 = \text{«несущественное»}$$

воспользуемся соотношением (5), а также определим по табл. 1 значение лингвистической переменной для параметра  $X_1$ , которое составляет  $U_i = 0$ . Фактическое значение параметра  $X_1$  при таких условиях составит:

$$\begin{aligned} \text{ent} \left[ \left( \text{surf}(U_{X_1}) - 1 \right) \left( \frac{X_1 - X_{1\min}}{X_{1\max} - X_{1\min}} \right) \right] &= \\ = \text{ent} \left[ 10 \left( \frac{X_1 - X_{1\min}}{X_{1\max} - X_{1\min}} \right) \right] &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

или  $X_1 - X_{1\min}$ .

Исходя из (9) по формуле (8) определим нечеткое множество «несущественное»:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 = \text{«несущественное»} &= \\ = 1/0 + .9/1 + .8/2 + .7/3 + \\ + .6/4 + .5/5 + .4/6 + .3/7 + .2/8 + .1/9 + .1/10. \end{aligned}$$

Для второго параметра по той же формуле:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 = \text{«почти _ малое»} &= \\ = (1/0 + .9/1 + .8/2 + .7/3 + .6/4 + \\ + .5/5 + .4/6 + .3/7 + .2/8 + .1/9 + .1/10) \cdot 0,5 &= 1/0 + \\ + .95/1 + .89/2 + .84/3 + .78/4 + .75/5 + .64/6 + \\ + .55/7 + .45/8 + .31/9 + .31/10. \end{aligned}$$

Для формирования решения на основе полученных лингвистических оценок входных параметров состояния поверхностей увязываемых деталей необходимо сформировать следующее бинарное отношение:

$$R_1(A_1(x), A_2(y)).$$

С учетом описанных выше технологических особенностей, такое отношение соответствует следующему условному предложению:

$$\begin{aligned} P1 = \text{«ЕСЛИ } \tilde{X}_1 - \text{«несущественное»} \\ \text{и «почти _ малое»,} \\ \text{ТО } \tilde{Y} - \text{«наивысшее»}. \end{aligned}$$

Предположим, что выходной параметр  $\tilde{Y}$  также описывается лингвистической переменной, и в данном случае ее значение «наивысшее» соответствует  $v_i = 10$ .

По аналогии получим:

$$\text{ent} \left[ \left( \text{surf}(V_y) - 1 \right) \left( \frac{Y_i - Y_{1\min}}{Y_{1\max} - Y_{1\min}} \right) \right] = 10,$$

поскольку

$$\text{surf}(V_y) - 1 = 10,$$

то

$$10 \left( \frac{Y_i - Y_{1\min}}{Y_{1\max} - Y_{1\min}} \right) = 10,$$

соответственно

$$Y_i = Y_{\max}.$$

По технологии, которая использовалась для составления нечетких множеств для входных параметров, из соотношения (5) определяем нечеткое множество  $\tilde{Y}$ :

$$\begin{aligned} \tilde{Y} = \text{«наивысшее»} &= \\ = .1/0 + .1/1 + .2/2 + .3/3 + .4/4 + \\ + .5/5 + .6/6 + .7/7 + .8/8 + .9/9 + .1/10. \end{aligned} \quad (10)$$

Значения всех членов выражения (10), кроме последнего, даны без описания значений соответствующих лингвистических переменных, однако, задав ранее предельное значение, мы можем, по крайней мере, говорить об общем количестве элементов нечеткого множества  $\tilde{Y}$ , то есть дать утверждение о мощности этого множества.

Далее, для обеспечения функциональной полноты модели интеллектуального робота по увязке по поверхностям деталей самолетных конструкций при сборке, необходимо для данного случая построить бинарное отношение

$$R(A_1(x), A_2(y))$$

и на его основе – процедуру вычисления оценок функции принадлежности, аналогично (7).

Полученный результат дает возможность построить матрицу бинарных отношений для текущих значений выходных параметров увязываемых деталей  $\tilde{X}_1^{\text{tex}}, \tilde{X}_2^{\text{tex}}$ .

Нечеткое множество  $\tilde{Y}^{\text{tex}}$ , отражающее значение текущих оценок качества поверхностей увязываемых деталей, может быть получено путем применения композиционного вывода Л. Заде [7]:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}^{\text{tex}} = R(A_2(y)) &= \\ = R_1(A_1(x) \text{OR}_1(x); A_2(y)) &= \\ = \left[ \tilde{X}_1^{\text{tex}} \wedge \text{DIL}(\tilde{X}_2^{\text{tex}}) \right] \text{OR}_1(A_1(x); A_2(y)), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\text{O}$  – операция максимальной композиции;  $R_1(A_1(x); A_2(y))$  – бинарное отношение вида (7).

Решение подзадачи, состоящей в определении угла поворота манипулятора, исходным значением

для которой являются значения из  $\tilde{Y}^{\text{тех}}$ , требует применения описанной выше технологии для: описания лингвистических переменных «Результат попытки сопряжения деталей» и «Угол поворота исполнительного органа ИР»; построения выражения типа ( ) для вычисления оценок функции принадлежности; построения соответствующего бинарного отношения и т.д.

### Выводы

1. Интенсификация производства ЛС предполагает повышение уровня «интеллектуальности» роботов-манипуляторов при организации сборки самолетных конструкций.

2. Рациональный путь роботизации сборочно-монтажных работ в самолетостроении состоит в последовательной реализации вначале типовой модели мира отдельного ИР, а затем – модели поведения коллектива ИР, задействованных на участке конвейерной сборки.

3. Продуктивным математическим аппаратом для синтеза и реализации моделей мира ИР-манипуляторов при сборке самолетных конструкций является нечеткая логика.

4. При роботизации конвейерной сборки самолетных конструкций целесообразно использование метода виртуальных баз.

### Список литературы

1. Воронько В.В. Основные направления и тенденции развития зарубежных технологий сборки авиационных конструкций [Текст] / В.В. Воронько // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2010. – Вып. 45. – С. 87-98.

2. Науковий твір № 17972. Методические материалы «Сборка сборочных единиц планера самолета по ответствиям» [Текст] / Г.О. Кривов, В.А. Матвиенко, Ю.А. Воробйов. – Дата реєстрації 19.09.2006.

3. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS – технологии. [Текст] / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

4. Алиев Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом [Текст] / Р.А. Алиев, Н.М. Абдикеев, М.М. Шахназаров. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.

5. ТИ 07509416.25088.0400. Сборка узлов и агрегатов планера самолета RRJ с использованием отверстий в качестве сборочных баз [Текст] / Г.А. Кривов, В.А. Матвиенко, Ю.А. Воробьев, Б.Н. Марьин, В.Ф. Кузьмин. – Комсомольск-на-Амуре, КнААПО, 2006. – 156 с.

6. СОУ МПП 49.035-90:2007. Технология сборки узлов и агрегатов планера самолета с использованием отверстий в качестве сборочных баз [Текст] / Г.А. Кривов, В.А. Матвиенко, Ю.А. Воробьев. – К., 2007. – 156 с.

7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление [Текст] / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 798 с.

Поступила в редколлегию 10.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ БАЗ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ ПРИ КОНВЕЄРНІЙ ЗБІРЦІ ПЛАНЕРА ЛІТАКА

В.В. Воронько, Ю.А. Воробйов, О.В. Григоренко

Розглянуто проблеми підвищення ефективності виробництва легких літаків на основі роботизації ділянки конвеєрної збірки конструкції літаків. Запропоновано двох етапний підхід до створення моделей світу інтелектуальних роботів-збиральників. Подано нечітку модель ув'язування деталей з використанням методу віртуальних баз.

**Ключові слова:** легкі літаки, роботизація, конвеєрне збирання, інтелектуальний робот, нечітка модель, метод віртуальних баз.

### FUZZY MODEL FOR FORMATION OF VIRTUAL BASES FOR ROBOTIC ARM CONVEYOR ASSEMBLY AIRFRAME

V.V. Voronko, U.A. Vorobiov, O.V. Grigorenko

The problems of improving the efficiency of production of light aircraft based robotics area conveyor assembly of aircraft structures are considered. The two-step approach to creating models of the world of intelligent robots collectors is offered. The fuzzy model of coordinating of details with use of a method of virtual base is described.

**Keywords:** light aircraft, robotization, assembly line, an intelligent robot, fuzzy model, method of virtual bases.