

УДК 004.891 : 629.735.33.002.72

А.Н. ТОПАЛ, И.В. ШЕВЧЕНКО, А.С. ТОПАЛ

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

ПРОБЛЕМА РЕАЛИЗАЦИИ РАЗНОТИПНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Описаны основные типы неопределенности, характерные для экспертных знаний в производственных системах искусственного интеллекта. Приведена архитектура интегрированной производственной системы искусственного интеллекта на основе объединения интерактивного программного комплекса «V-КВАНТ» и динамической экспертной системы для снижения всех типов неопределенности знаний. Разработаны базы квантов знаний и сетевая модель, для решения характерных задач авиационного производства. Предложен подход к унификации разнородных моделей знаний в рамках производственной системы искусственного интеллекта.

производственная система искусственного интеллекта, база знаний, динамическая экспертная система, сетевая модель, метод вероятных алгоритмических квантов знаний, сценарный пример обучающих знаний

Введение

Усложнение современных технологических объектов и процессов приводит к необходимости разработки производственных систем искусственного интеллекта (ПСИИ) [1]. Специфика ПСИИ обусловлена, прежде всего, необходимостью учета неопределенности экспертных знаний при формировании прогнозов о поведении объекта управления в штатных и, в особенности, экстремальных режимах.

Принято различать четыре типа неопределенности экспертных знаний в ПСИИ [1]:

1. Неопределенность, связанную с ненадежностью исходной информации (неточностью измерений, неопределенностью понятий и терминов, неуверенностью экспертов в своих заключениях).
2. Неопределенность, вызванную нечеткостью языка представления правил.
3. Неопределенность, возникающую при неполной информации (нечетких посылках).
4. Неопределенность, порождаемую агрегацией знаний, исходящих от разных источников, если эти знания противоречивы или избыточны.

Большинству производственных систем и про-

мышленных комплексов присуща сравнительно высокая динамичность функционирования, а также частая смена ситуаций, сопровождаемая обновлением больших объемов измерительных и других данных, характеризующих текущее состояние объектов управления. Исходя из этого, целесообразно выделить пятый тип неопределенности, связанной с действием многочисленных внешних и параметрических возмущений. Указанные возмущения существенно понижают точность прогноза состояния объекта на достаточно удаленное от текущего время [2].

Второй и третий типы неопределенности экспертных знаний могут быть учтены при использовании аппарата нечеткой логики [3]. Комплексный же учет первых четырех типов неопределенности предусмотрен в методе вероятных алгоритмических квантов знаний (ВАКЗ-методе), который является частью квантового подхода [4] к моделированию генерации человеческих причинно-следственных суждений от посылок к следствиям при поиске решений в условиях неопределенности. Вместе с тем, ВАКЗ-метод не в состоянии учесть пятый тип неопределенности, поскольку не рассчитан на принятие решений в реальном времени.

Из приведенных выше соображений вытекает целесообразность построения ПСИИ в форме интегрированной системы, ядром которой служит объединение базы вероятных квантов знаний (ВкЗ) с продукционной базой знаний (БЗ) динамической экспертной системы (ДЭС). При этом правила, содержащиеся в БЗ ДЭС способны отражать временные зависимости, имеющие место в ходе производства. Для этого продукционные правила расширены средствами темпоральной логики и представлены в форме сети [5].

Целью статьи является изложение путей решения проблемы реализации разнотипных моделей представления знаний, а именно квантовых моделей знаний с сетевыми моделями знаний, расширенных темпоральной логикой в рамках единого информационного пространства производственных систем искусственного интеллекта, ориентированной на использование в рамках авиационного производства.

1. Постановка задачи синтеза интегрированной ПСИИ на основе ВАКЗ-метода и ДЭС

Интеграция моделей знаний на основе вероятных квантов (v -квантов), составляющих основу ВАКЗ-метода с сетевыми моделями в рамках единой ПСИИ принципиально возможна, поскольку знания в виде v -квантов и сетевых моделей, расширенных средствами темпоральной логики, могут быть адекватно представлены в матричном виде. Однако следует принять во внимание, что возможно размерность матриц будет различной, поскольку для моделей первого типа размерность определяется количеством признаков (имплицативных или функциональных), а для сетевых – характеристиками потоков на входе объекта принятия решений.

Необходимо разработать архитектуру интегрированной ПСИИ, включающую наборы специальных модулей для реализации ВАКЗ-метода и проведения процесса вывода на знаниях с учетом времен-

ного фактора, а также ряд общих модулей, обеспечивающих взаимодействие системы с пользователями.

Исходя из поставленной задачи, интегрированная ПСИИ должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Тип ПСИИ – интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР).
2. Состав ядра системы: ВкЗ с подсистемой логического вывода решений на основе алгоритмов АЛУПР, АЛ(Вv) и АЛ(Сv) [4]; БЗ продукционного типа с машиной вывода, реализующей итерационную процедуру вывода на знаниях [6].
3. Наличие специального драйвера между ВкЗ и продукционной БЗ ДЭС для обмена знаниями.
4. Наличие подсистемы мониторинга текущего состояния объекта (оборудования, оснастки, складского хозяйства и т.п.).
5. Наличие единого пользовательского интерфейса с функциями: редактирования исходных данных и знаний в сценарных примерах обучающих знаний, наблюдений за объектом принятия решений, структуры и семантики vk -знаний, администрирования продукционной БЗ, выдачи принимаемых решений и их объяснения лицу, принимающему решения (ЛПР).

Из перечисленных выше требований наиболее значимым в аспекте рассматриваемой проблемы является наличие специального драйвера, обеспечивающего интеграцию баз знаний, представленных в указанных формах.

2. Обобщенная структура и создание интегрированной ПСИИ

Для реализации ВАКЗ-метода может быть использован интерактивный программный комплекс (ИПК) «V-КВАНТ» [7].

Входные данные для ИПК «V-КВАНТ» формируют из сообщений экспертов и пользователей конкретной предметной области, из показаний датчи-

ков, измерителей, из других источников в виде входных файлов доменизированных матриц «объект-признак» [4], которые представляют исходные знания. Известные закономерности данной предметной области, некоторые комбинации значений признаков объекта принятия решений (ОПР), сценарные примеры причинно-следственных связей в цепочках логического вывода следствий из посылок также являются исходными знаниями. Компоненты доменизированных матриц записывают символами из множества $\{0, 1\}$ («1» – ОПР обладает признаком, «0» – не обладает) с указанием вероятностных значений их показателей достоверности (ПД).

Выходной информацией ИПК «V-КВАНТ» служат новые знания в форме vk-знаний (ВАКЗ-моделей), выводимые посредством v-КСВР из по-

сылочной информации, а также сама v-КСВР как система обнаруженных при обучении устойчивых функциональных закономерностей с вычисляемыми ПД в форме выходных файлов.

Архитектура ИПК полностью отвечает современной концептуальной модели ИСППР [1] и содержит типовые блоки: 1) интерфейс «пользователь-система», 2) база данных, 3) база знаний, 4) блок логического вывода и принятия решений, 5) блок объяснений.

Основные режимы функционирования ИПК «V-КВАНТ»: штатный (R1), «дообучение» (R2), «переобучение» (R3) и «так держать» (R4) описаны в [7]. Выполнение указанных режимов обеспечивают блоки и подсистемы, составляющие архитектуру ИПК (рис. 1).

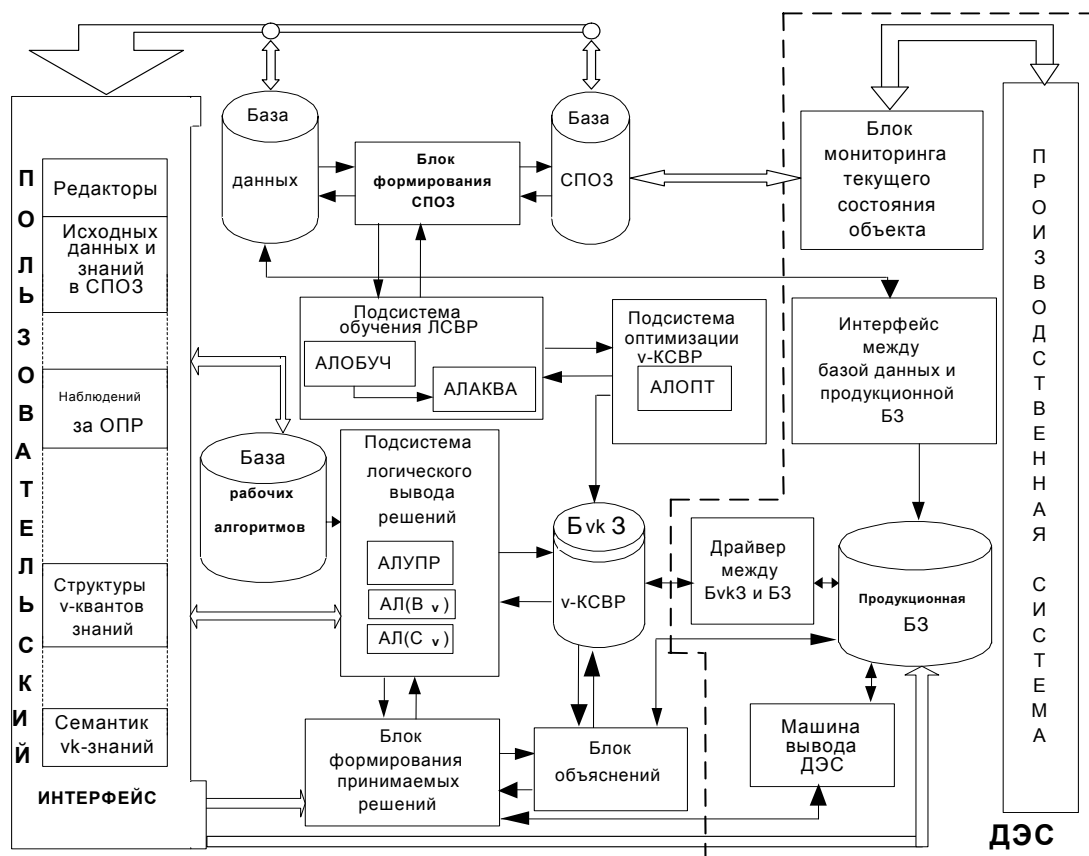


Рис. 1. ИПК «V-КВАНТ» и ДЭС – обобщенная структура интегрированной ПСИИ

Поскольку характерными задачами в ходе производства является выбор оборудования (например, прессового) исходя из его характеристик, а также задача обеспечения ритмичности агрегатной сборки

в авиастроении, ниже рассмотрены примеры реализации указанных задач на основе v-квантов и сетевых моделей соответственно.

3. База квантов знаній для рішення задачі орієнтовочного вибору потужності преса

Нижче приведені сценарні приклади для вибору потужності преса (вероятності імплікації були отримані експертним шляхом):

ЕСЛИ (Маса поковки до 1 кг) **ТО** Уси́лие преса 630 тс (6,3 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 1 до 2,5 кг) **ТО** Уси́лие преса 1000 тс (10 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 2,5 до 4 кг) **ТО** Уси́лие преса 1600 тс (16 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 4 до 7 кг) **ТО** Уси́лие преса 2000 тс (20 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 7 до 12 кг) **ТО** Уси́лие преса 2500 тс (25 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 12 до 18 кг) **ТО** Уси́лие преса 3150 тс (31,5 МН)

(вероятність імплікації = 0,90)

ЕСЛИ (Маса поковки от 18 до 22 кг) **ТО** Уси́лие преса 4000 тс (40 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 22 до 30 кг) **ТО** Уси́лие преса 5000 тс (50 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

ЕСЛИ (Маса поковки от 30 до 50 кг) **ТО** Уси́лие преса 6300 тс (63 МН) (вероятність імплікації = 0,90)

ЕСЛИ (Маса поковки от 50 до 80 кг) **ТО** Уси́лие преса 8000 тс (80 МН) (вероятність імплікації = 0,90).

С помощью ИПК «V-КВАНТ» была сгенерирована Б νk З в виде 10-ти ν -квантов знаній 1-го уровня: $\nu k_1 C_1$, $\nu k_1 C_2$, $\nu k_1 C_3$, $\nu k_1 C_4$, $\nu k_1 C_5$,

$\nu k_1 C_6$, $\nu k_1 C_7$, $\nu k_1 C_8$, $\nu k_1 C_9$, $\nu k_1 C_{10}$ и одного ν -кванта знаній 2-го уровня $\nu k_2 C$, где имена ν -квантов соответствуют значениям целевой характеристики «Мощность преса»: C_1 – Уси́лие преса 630 тс (6,3 МН); C_2 – Уси́лие преса 1000 тс (10 МН); C_3 – Уси́лие преса 1600 тс (16 МН); C_4 – Уси́лие преса 2000 тс (20 МН); C_5 – Уси́лие преса 2500 тс (25 МН); C_6 – Уси́лие преса 3150 тс (31,5 МН); C_7 – Уси́лие преса 4000 тс (40 МН); C_8 – Уси́лие преса 5000 тс (50 МН); C_9 – Уси́лие преса 6300 тс (63 МН); C_{10} – Уси́лие преса 8000 тс (80 МН).

Опишем характеристики, выделенные при анализе сценарных примеров обучающих знаній (СПОЗ) и используемые при генерировании ν -квантов знаній: x_1 – Маса поковки до 1 кг; x_2 – Маса поковки от 1 до 2,5 кг; x_3 – Маса поковки от 2,5 до 4 кг; x_4 – Маса поковки от 4 до 7 кг; x_5 – Маса поковки от 7 до 12 кг; x_6 – Маса поковки от 12 до 18 кг; x_7 – Маса поковки от 18 до 22 кг; x_8 – Маса поковки от 22 до 30 кг; x_9 – Маса поковки от 30 до 50 кг; $b_{z_5}^{\Phi'}$ Маса поковки от 50 до 80 кг.

Приведем сгенерированные ν -кванты знаній по выбору мощности штамповочного преса:

$$\nu k_1 C_1 = [x_1 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_2 = [x_2 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_3 = [x_3 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_4 = [x_4 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_5 = [x_5 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_6 = [x_6 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_7 = [x_7 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_8 = [x_8 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_9 = [x_9 | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$\nu k_1 C_{10} = [x_{10} | \emptyset : p(\rightarrow) = 0,9]$$

$$vk_2C = \begin{bmatrix} vk_1C1 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C2 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C3 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C4 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C5 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C6 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C7 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C8 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C9 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \\ vk_1C10 | \emptyset : p(\rightarrow) = 1, 0 \end{bmatrix}$$

4. Сетевая модель обеспечения ритмичности агрегатной сборки в авиастроении

Ритмичная работа (выполнение плановых заданий) подразделений авиастроительного предприятия напрямую зависит от своевременных поставок узлов, панелей и т.д. Исходя из дискретной природы агрегатной сборки, целесообразно представить этот процесс с позиций событийного подхода, который предусматривает представление процесса в виде упорядоченной последовательности событий, связанных между собой соответствующими условиями.

Обобщенная сетевая модель *AT* описывает авиастроительное производство с уровня механосборочных цехов до уровня агрегатно-сборочного цеха. Процесс агрегатной сборки протекает в агрегатно-сборочном цехе, предназначенном для решения сложных и специфичных задач авиастроения, и зависит от результатов работы механосборочных и агрегатных цехов, то есть своевременной поставки панелей и агрегатов. Изготовление деталей и сборка узлов, секций, панелей и агрегатов происходит в механосборочных и агрегатных цехах, предназначенных для выполнения механических операций и несложных сборок. Таких цехов некоторое счетное множество, состав которого определяется на каждом авиастроительном предприятии в зависимости от объемов производства. Поэтому целесообразно отделить процесс мониторинга текущего состояния

объектов производства в механосборочных и агрегатных цехах от процесса формирования решений при реализации агрегатной сборки, и представить соответствующими моделями [5].

Обобщенная сеть *AT* является композицией всех сетей типа *MN* (используется для адекватного представления процесса мониторинга текущего состояния объектов производства) и сети типа *DN* (используется для адекватного представления процессов формирования решений при агрегатной сборке), путем объединений соответствующих выходных позиций $\exists b_i \in B \mid I(s_j) = 0 \wedge O(s_j) = 1$ и входных позиций $\exists p_i^a \in P^a \mid I(s_k) = 1 \wedge O(s_k) = 0$.

Такая композиция сетей отображает перемещение готовых агрегатов из механосборочных или агрегатных цехов в агрегатно-сборочный цех.

Динамика процесса в модели *AT* задана следующим образом. Маркирование позиций сети *MN* происходит вследствие работы подсистемы мониторинга, и появление маркеров в позициях является результатом активизации соответствующих переходов в определенные моменты времени. Таким образом, функционирование сети связано с реальным течением времени производства, и маркирование позиций и активизация решающих позиций в сети *DN* осуществляется с помощью процедур из множества Q^{MN} , которые вычисляют опоздание сборочных единиц путем сравнения плановых и фактических изменений состояния производственных заданий.

Графически сеть *AT*, декомпозированная на сети *MN* и *DN*, может быть отображена как показано на рис. 2.

Обозначения, приведенные на рисунке:

$b_{z_1}^{\Phi^r}$ – сборка каркаса фонаря кабины летчиков выполнена;

$b_{z_5}^{\Phi^r}$ – отсек фюзеляжа Ф2 (кабина летчиков) собран и доставлен в цех агрегатной сборки;

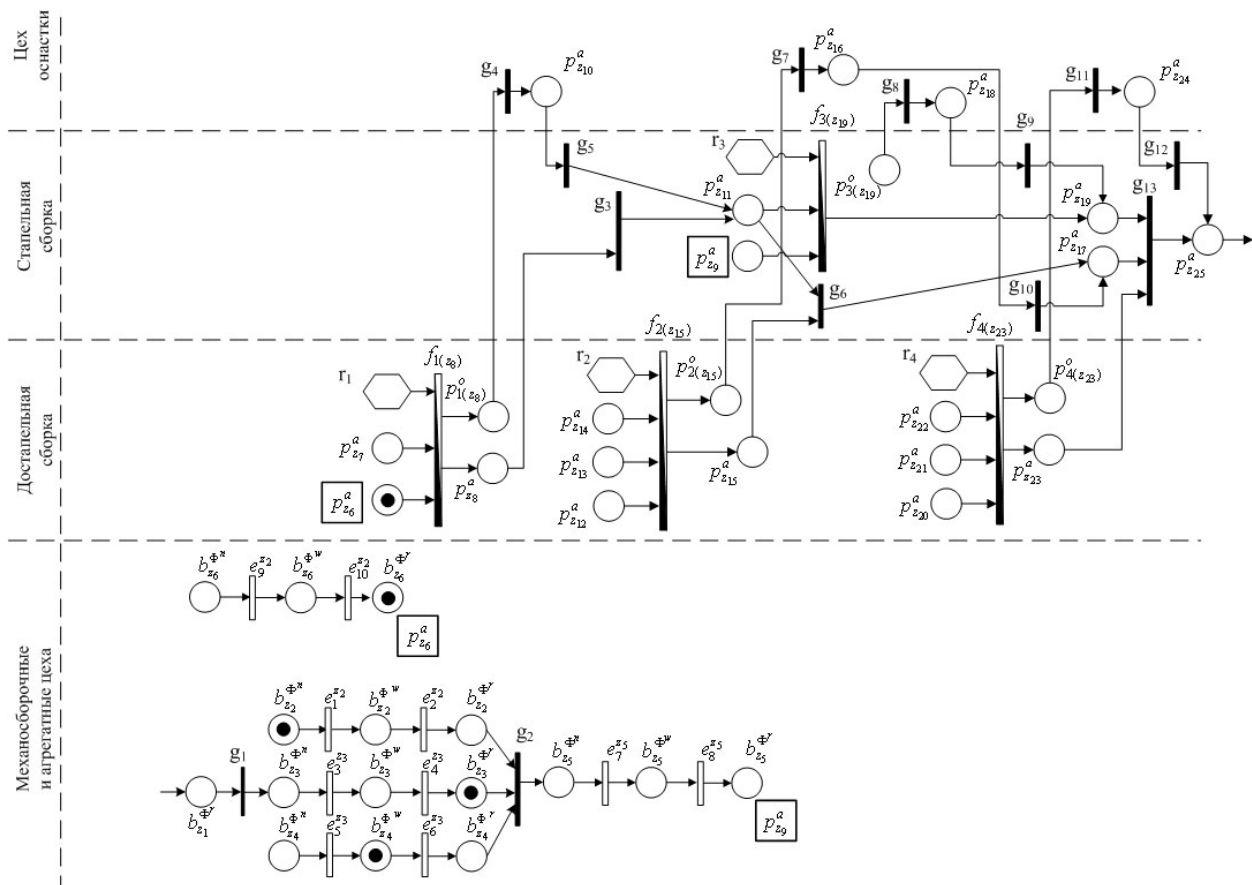


Рис. 2. Фрагмент сети формирования решений при реализации агрегатной сборки

$b_{z_6}^{\Phi^r}$ – силовые балки низинки шасси изготовлены и доставлены в цех агрегатной сборки;

g_1 – транспортировать «каркас фонаря кабины летчиков» в агрегатный цех;

g_2 – выполнить сборку отсека фюзеляжа Ф2 (кабина летчиков);

g_3 – установить низинку шасси в стапель общей сборки;

g_4 – изготовление дополнительной оснастки для фиксации балок;

g_5 – выполнить сборку низинки в стапеле общей сборки;

g_6 – установка нижних панелей отсека Ф2 (шп. 24-30);

g_7 (g_{11}) – изготовление дополнительных фиксаторов для стрингеров, шпангоутов и обшивок нижних (боковых) панелей;

g_8 – изготовить макетный шпангоут;

g_9 – выполнение работ в зоне шп.18 с использованием макета;

g_{10} (g_{12}) – сборка нижних (боковых) панелей в стапеле общей сборки;

g_{13} – установка боковых панелей;

$P_{z_6}^a$ – силовые балки низинки шасси изготовлены и доставлены в цех агрегатной сборки;

$P_{z_7}^a$ – нижние панели заложены в стапель сборки низинки шасси;

$P_{z_8}^a$ – низинка шасси собрана в спец. приспособлении;

$P_{z_9}^a$ – отсек фюзеляжа Ф2 (кабина летчиков) собран и доставлен в цех агрегатной сборки;

$P_{z_{10}}^a$ – доп. оснастка для фиксации силовых балок изготовлена;

$p_{z_{11}}^a$ – низинка шасси заложена в ступень общей сборки;

$p_{z_{12}}^a$ ($p_{z_{20}}^a$) – стрингеры нижних (боковых) панелей готовы;

$p_{z_{13}}^a$ ($p_{z_{21}}^a$) – шпангоуты нижних (боковых) панелей готовы;

$p_{z_{14}}^a$ ($p_{z_{22}}^a$) – обшивка нижних (боковых) панелей готова;

$p_{z_{15}}^a$ ($p_{z_{23}}^a$) – нижние (боковые) панели собраны в спец. приспособлениях;

$p_{z_{16}}^a$ ($p_{z_{24}}^a$) – дополнительные фиксаторы для нижних(боковых) панелей изготовлены;

$p_{z_{17}}^a$ ($p_{z_{25}}^a$) – нижние (боковые) панели установлены;

$p_{z_{18}}^a$ – макетный шпангоут изготовлен;

$p_{z_{19}}^a$ – завершены работы в зоне шп.18;

r_1 – силовая балка опаздывает >20 дн;

r_2 – нижние панели (24-30 шп.) опаздывают >10 дн;

r_3 – отсек фюзеляжа Ф2 опаздывает >20 дн;

r_4 – боковые панели (24-30 шпангоуты) опаздывают >10 дн;

$f_{1(z_8)}$ – выполнить сборку низинки в специальном приспособлении;

$f_{2(z_{15})}$ ($f_{4(z_{23})}$) – установка нижних (боковых) панелей отсека Ф2 (шпангоуты 24-30);

$f_{3(z_{19})}$ – выполнить работы в зоне 18 шпангоута;

$p_{1(z_8)}^o$ – необходима дополнительная оснастка для фиксации балок;

$p_{2(z_{15})}^o$ ($p_{4(z_{23})}^o$) – необходима дополнительная фиксация шпангоутов, стрингеров, обшивки на панели;

$p_{3(z_{19})}^o$ – необходим макет 18 шпангоута.

При композиции сетей мониторинга и сети формирования решений согласно схеме членения, принятой на авиастроительном предприятии, объединяются вершины, обозначения которых совпадают и на рисунке очерчены рамкой.

Полученная сеть интерпретируется как события и условия наступления событий в авиастроении. Условие, будучи логическим высказыванием либо истинно (наличие маркера в позиции), либо ложно (отсутствие маркера в позиции). На рис. 2 показан реальный пример формирования решений при опоздании некоторых сборочных единиц. При прогонке сети количество маркеров в позициях может быть равно 0 или 1, то есть каждая позиция сети АТ безопасна.

Согласно интерпретации предметной области (сеть отображает процесс агрегатной сборки самолета) и условиям возникновения маркеров в позициях (появление маркера – результат работы планово-диспетчерских бюро соответствующего цеха), каждый переход сети АТ есть потенциально запусковым. При прогонке сети от начальной маркировки, через определенный интервал времени, маркер достигнет целевой позиции, которая интерпретируется как «самолет собран».

5. Суть подхода к унификации разнородных моделей знания в рамках ПСИИ

Из описанных выше примеров видно, что модели знаний на основе v -квантов как наборы векторов, отражающих признаки, относящихся к описанию атомарных элементов знаний, так и знания в форме сетевой модели, расширенной средствами темпоральной логики, могут быть адекватно представлены в форме соответствующих матриц [9]. Данная особенность позволяет использовать знания, изначально формализованные в виде v -квантов, в процессе формирования решений на основе сетевой модели. Справедливо и обратное: знания, отражающие временной фактор функционирования произ-

водства, можно использовать в ходе реализации ВАКЗ-метода. Данный принцип служит методической основой для синтеза процедуры преобразования знаний из одной формы в другую с последующим построением на основе этой процедуры специального драйвера, как функционального модуля, входящего в состав интегрированной ПСИИ.

Выводы

Описаны основные типы неопределенности, архитектура интегрированной ПСИИ на основе объединения ИПК «V-КВАНТ» и ДЭС для снижения всех типов неопределенности знаний, возникающих в процессе поддержки принятия распознающих и прогнозных решений в условиях производства.

Разработаны СПОЗ и базы квантов знаний для решения задачи ориентировочного выбора мощности пресса. Разработана сетевая модель, усовершенствованная средствами темпоральной логики для обеспечения ритмичности агрегатно-сборочного производства.

Предложен подход к представлению знаний, формализованных с использованием разнородных моделей, а именно представленных в виде v -квантов и в виде сетевой модели, расширенной средствами темпоральной логики.

Литература

1. Алиев Р.А., Абдикеев Н.М., Шахназаров М.М. Производственные системы с искусственным интеллектом. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.

2. Сироджа И.Б., Шостак И.В. Индуктивный подход к снижению неопределенности знаний в производственных системах искусственного интеллекта // Міжнародна конференція з індуктивного мо-

делювання „МКІМ-2002”. – Львів, 2002. – С. 100-106.

3. Захаров В.М., Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. IV Имитационное моделирование // Техническая кибернетика. – 1994. – №5. – С. 168-210.

4. Сироджа И.Б. Квантовый подход к решению задач инженерии знаний // Проблемы бионики. – Х.: ХНУРЭ, 1999. – Вып. 50. – С. 35-42.

5. Топал А.С., Зайцев В.Е., Шостак И.В., Белов С.Б. Автоматизация поддержки принятия решений при организации агрегатной сборки в авиационной промышленности на основе специализированной экспертной системы // Бионика интеллекта. – 2007. – 1(66). – С. 145-152.

6. Шостак И.В. Управление сложными объектами в реальном времени на основе динамических экспертных систем // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т „ХАИ”, 2002. – Вып. 10. – С. 204-210.

7. Варфоломеева И.В. Информационная технология поддержки принятия технологических решений на базе квантовой инженерии знаний “КВАНТ+” // Интеллектуальные системы: Труды Шестого международного симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2004. – С. 250-253.

8. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.

9. Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.

Поступила в редакцию 6.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Э.Г. Петров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.