

УДК 004.891 : 629.735.33.002.72

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ АГРЕГАТНОЙ СБОРКИ В АВИАСТРОЕНИИ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

А. С. Топал¹, В. Е. Зайцев², И. В. Шостак³, С. Б. Белов⁴¹ НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина, alexa_u@ukr.net² НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина, vitaliy.zaytsev@khai.edu³ НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина, iv_shostak@rambler.ru⁴ НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина, alexa_u@ukr.net

Проведен анализ типовых решений и разработана классификация решений по корректировке директивной технологии сборки планера самолета на авиационном предприятии. Описано построение сетевой модели представления знаний, учитывающей специфику агрегатно-сборочного производства. Выполнен переход от сетевой модели к соответствующей продукционной, основанной на многосортной логике предикатов со временем. Приведен двухэтапный метод формирования решений при организации агрегатно-сборочного производства, включающий постоянный мониторинг текущего состояния производства и непосредственное формирование решений в случае отклонений хода производства от плана.

АГРЕГАТНО-СБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, МОНИТОРИНГ, СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ, ДИРЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, МНОГОСОРТНАЯ ЛОГИКА ПРЕДИКАТОВ СО ВРЕМЕНЕМ.

Введение

На текущем этапе развития промышленности предприятия внедряют в структуру управления производством автоматизированные системы класса ERP/MRP, которые решают задачи эффективного управления сбытом, закупками, финансами, бухгалтерией и кадрами. Внедрение таких систем не решает задач управления сложными производственными процессами, для этого необходимо использовать системы класса MES, учитывающие технологическую специфику предприятия и специально разработанные для каждой конкретной области.

Существующие MES-системы ориентированы на интеграцию со SCADA-системами, установленными на уровне производственных процессов. Однако характерные особенности авиастроительного производства — большая доля ручного труда, мелкосерийный выпуск продукции, многотысячная номенклатура деталей, узлов и агрегатов (от 60 тыс. до 250 тыс.), преобладание механосборочных и ручных сборочных операций при производстве изделий, а также отсутствие или частичное применение АСУТП — усложняют внедрение существующих MES-систем на таких предприятиях.

К настоящему времени не разработано MES-систем, учитывающих характерные особенности авиационного производства, в частности, агрегатно-сборочного производства, являющегося одним из самых сложных и ответственных процессов самолетостроения, эффективная организация которого позволяет значительно повысить эффективность предприятия в целом. В агрегатно-сборочном производстве очень затруднено использование SCADA-

систем из-за большого количества сборочных операций, которые выполняются рабочими вручную. Эта характерная для авиастроения черта делает невозможным автоматизацию получения актуальной информации о текущем состоянии производства, что усложняет принятие решений при организации агрегатно-сборочного производства на предприятии.

Процесс организации агрегатно-сборочного производства в самолетостроении характеризуется довольно высоким уровнем неопределенности, которая обуславливается недостаточным объемом информации о текущем состоянии производства, поэтому этот процесс не может быть эффективно реализован на основе традиционных, аналитических методов обработки информации, которые применяются в современных автоматизированных системах.

Использование методов искусственного интеллекта, в частности, технологии экспертных систем, предоставит возможность существенно повысить адекватность производственных решений за счет того, что при формировании решений будет учтено текущее состояние объектов производства. Именно это является основной функцией динамических экспертных систем (ДЭС), которая обеспечит поддержку принятия решений на основе достоверной информации, полученной со всех уровней производственной иерархии.

Современные оболочки создания ДЭС [1], такие как G2, RTworks и др., ориентированы на сбор текущих данных с помощью развернутой на производстве сети SCADA-систем, применение которых

слишком затруднено в агрегатно-сборочном производстве на авиастроительном предприятии в силу его особенностей. Вместе с тем, современные ДЭС, которые базируются преимущественно на продукционных моделях представления знаний, не позволяют адекватно отображать фактор времени, который выступает на передний план при решении задач организации агрегатно-сборочного производства. Представление временных зависимостей позволит четко прогнозировать развитие процессов агрегатно-сборочного производства, что повысит качество принимаемых решений для эффективного устранения последствий отклонений от плана в случае их возникновения.

Таким образом, к настоящему времени не решена задача создания экспертной системы для эффективной поддержки принятия решений при организации агрегатно-сборочного производства на авиастроительном предприятии.

Цель статьи состоит в изложении подхода к синтезу ядра экспертной системы на основе усовершенствованных сетевых моделей знаний для формирования решений при организации агрегатно-сборочного производства на авиастроительном предприятии.

1. Анализ предметной области и постановка задач исследования

Технология сборки и монтажа самолетных конструкций, включая выбор схем сборки, метода сборки, технологической последовательности выполнения операций, состава и количества сборочной и контрольно-испытательной оснастки, оборудования и инструмента, в значительной степени зависит от конструкции собираемых изделий и ее особенностей.

Многообразие практических схем сборки зависит от конструктивно-технологических особенностей изделий, а возможность их использования в конкретных условиях — от степени обеспечения агрегатно-сборочного цеха ресурсами, оснащением, своевременностью поставки агрегатов, узлов, сборок, подборок и деталей из цехов-поставщиков.

Таким образом, стоит задача описать варианты сборочной технологии и процесс формирования решений в зависимости от текущего состояния производственных процессов.

2. Сетевая модель формирования решений при реализации директивной технологии агрегатной сборки

На основании классификатора сборочных единиц, основанного на конструкторско-технологическом членении самолета [2], а также особенностей технологических схем сборки разработана классификация возможных решений (рис. 1), которые

принимаются специалистами агрегатно-сборочного цеха в случае появления коллизий (запаздывание агрегатов, узлов и сборок на критический срок). Эти решения согласованы со стандартами предприятия и спецификацией типа самолета.

В ходе разработки приведенной классификации последовательно применялись следующие признаки:

- 1) характер принимаемых решений;
- 2) участки агрегатно-сборочного цеха, на которых возможно принятие решений по корректировке директивной технологии сборки;
- 3) сборочные единицы, отсутствие которых приводит к необходимости принятия решений при реализации директивной технологии.

На решения технологического характера выпускаются «Технологические указания», которые утверждаются главным технологом завода.

На рис. 1. представлены типовые решения (листья дерева), принимаемые в агрегатно-сборочном цехе в ходе производства в зависимости от текущего его состояния.

Представим модель формирования решений при реализации директивной технологии агрегатно-сборочного производства сетевой моделью следующего вида:

$$AT = \{(P, B, R), T, I(T), O(T), V, Q, M_0\}, \quad (2.1)$$

где $P = \{p_i\}$ — конечное непустое множество позиций сети (их графическое изображение совпадает с изображением позиций в сети Петри [6] — кружки), моделирующее условия реализации или следствия событий; $B = \{b_k\} \subset P$ — множество позиций сети (их графическое изображение также совпадает с изображением позиций в сети Петри — кружки), моделирующее условия (b_k) и интервалы (int_k) их продолжительности. Причем существует биективное отображение $BI: b_k \rightarrow int_k$, задающее продолжительность справедливости условий позиции; $R = \{r_q\}$ — множество решающих позиций, с помощью которых выполняется выбор маркирования позиций после срабатывания инцидентного перехода в зависимости от текущего маркирования. Такие позиции в сети графически изображаются шестиугольниками; $T = \{t_n, (s_j, time_j), f_m\}$ — множество переходов сети, которые моделируют события, происходящие в процессе производства; t_n — переходы, которые происходят без учета временных зависимостей; s_j — переходы, которые характеризуются моментами времени $time_j$, т. е. существует биективное отображение $ST: s_j \rightarrow time_j$, задающее момент времени выполнения перехода; f_m — переходы, которые имеют смежные по входу решающие позиции. Поведение такого перехода (т. е. маркирование смежных по выходу позиций) будет зависеть

от маркирования смежных по входу позиций. Такие переходы отображают возможные варианты работы сети, а также осуществляют выбор таких вариантов; $I(T)$ — множество позиций, смежных переходам по входам; $O(T)$ — множество позиций, смежных переходам по выходам.

При таком определении дуги в сети будут представлены парами значений $(p_i, t_n) \in I(T) \times T$ и $(t_n, p_i) \in T \times O(T)$, т. е. состоять из смежных позиций и переходов. Причем $I(T) \cup O(T) \subset P$, т. е. в сети нет позиций и переходов без дуг.

$V = \{v_i\}$ — множество переменных, которое интерпретируется как опоздание производственного задания по сравнению с планом, может включать при необходимости значения начала и окончания выполнения конкретного задания.

$Q = \{q_c\}$ — процедуры, которые вычисляют опоздание заданий, общее прогнозируемое опоздание агрегата по опозданиям комплектующих (формируют множество переменных V). Может быть расширено при необходимости другими процедурами согласно интерпретации позиций и переходов.

M_0 — начальное маркирование сети AT . Задается как $M_0 = (M_0(p_1), \dots, M_0(p_N))$, где $N = |P|$.

Дадим ряд определений.

Вершина t_n типа переход сети AT является возбужденной при условии, что во всех смежных по входу позициях установлен маркер.

Вершина s_j типа переход сети AT является возбужденной в результате работы процедуры, которая отображает текущее состояние производственного задания.

Вершина f_m типа переход сети AT является возбужденной при условии, что в соответствующей решающей позиции установлен маркер; в таком случае выбор исходящей вершины типа «позиция», куда передается маркер, осуществляется согласно множеству векторов маркирования, т. е. дальнейшая активизация позиций сети зависит от текущего состояния маркирования входных позиций.

Динамика процесса в модели, которая приведена выше, задается следующим образом. Маркирование позиций с временными зависимостями происходит в результате работы подсистемы мониторинга, т. е. условием появления маркеров в определенных позициях является активизация соответствующих переходов в определенные моменты времени. Таким образом, функционирование сети связано с реальным течением времени производства, и такое маркирование осуществляется с помощью процедур $Q = \{q_c\}$, действующих на основе логических правил, которые будут описывать в явном виде время в модели.

Активизация переходов f_m осуществляется при совпадении начальных векторов маркирования и вектора маркирования из множества векторов-ус-

ловий, которые связаны с решающими позициями. Выбор дальнейшей позиции (позиций) для передачи маркера осуществляется с помощью соответствующих процедур, связанных с решающей позицией. Множество векторов маркирования и процедуры их выбора представляют собой базу знаний для формирования решений при реализации директивной технологии агрегатно-сборочного производства.

Были исследованы некоторые свойства сети, и показано, что представленная сетевая модель безопасна (разрешает иметь лишь один маркер в каждой позиции) и не должна иметь тупиков, в противном случае, сборочный технологический процесс, который отображается такой сетью, не может быть завершен.

Используется следующая интерпретация элементов сети.

Позиции из множества P отвечают условиям завершенности сборочного задания, связанные переменные содержат возможные отклонения задания от плана. Позиции из множества B отвечают состоянию производственных заданий в механо-сборочных и агрегатных цехах (с учетом времени), связанные сменные содержат возможные отклонения задания от плана, а также моменты начала и окончания выполнения определенного задания. Решающие позиции представляют собой знания, которые позволяют в зависимости от ситуации (комплектации сборочного задания, опоздания сборочных единиц) выбирать возможные варианты ее решения.

Переходы сети отображают производственные процессы определенного задания. Переходы из множества s_j содержат моменты изменения состояния задания (начало выполнения, окончание выполнения). Переходы из множества f_m интерпретируются как процессы формирования и принятия решений по определенным производственным ситуациям (например, при отсутствии комплектации сборочного задания).

Полная сеть AT состоит из частичных сетей двух типов. Первый тип сетей состоит из позиций $B = \{b_k\} \subset P$ и отображает условия или свойства, которые задаются с учетом времени (интерпретируются в работе как условия готовности производственных заданий или условия комплектации), и, соответственно, переходы s_j с указанием моментов времени. Второй тип сетей состоит из позиций $p_i \in P \setminus B$ (т. е. обычных невременных позиций и решающих позиций), которые включают множество переменных V , задающее сроки опоздания агрегатно-сборочного задания. В сеть второго типа включаются переходы $t_i \in T \setminus s_j$, т. е. обычные невременные переходы t_n , и переходы f_m , позволяющие выбирать дальнейшее маркирование сети в зависимости от текущего маркирования.

Для построения полной сети, которая будет отображать весь ход производства, задается биективное отображение множества свободных исходящих позиций частичной сети первого типа (тех позиций, которые не являются смежными по входу или не имеют исходящих дуг, т. е. позиций из множества $VO(T) \setminus VI(T)$, $VI(T) \cup VO(T) \subset B$) на свободные входящие позиции сети второго типа (тех позиций, которые не являются смежными по выходу или не имеют входных дуг, т. е. позиций из множества $PI(T) \setminus PO(T)$, $PI(T) \cup PO(T) \subset P \setminus B$).

Смысл такого отображения заключается в том, что им задается передача информации о состоянии выполнения производственных заданий из уровня механических и механосборочных цехов (отображается сетью первого типа) на уровень агрегатно-сборочных цехов (отображается сетью второго типа).

Сети первого типа (названные в исследовании «сетями мониторинга») служат для обеспечения мониторинга текущего состояния производства и получения информации о готовности сборочных единиц с учетом их отклонения от плана. На рис. 2 изображены фрагменты сетей первого и второго типов. Позиции и переходы имеют следующие значения: b_{k1} — задание не выдано, b_{k2} — задание в работе, b_{k3} — задание завершено и сдано, s_{j1} — начало выполнения, s_{j2} — конец выполнения, p_1-p_i — условия наличия сборочных единиц, $p_{i0}-p_{i0}$ — дальнейшие варианты процесса сборки.

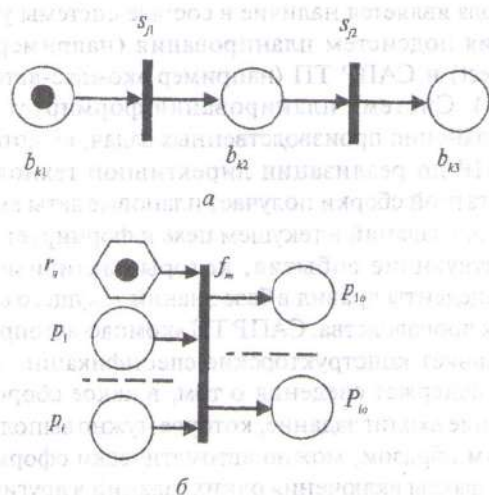


Рис. 2. Фрагменты сети мониторинга (а) и сети формирования решений (б)

Сеть второго типа (названная в исследовании «сетью формирования решений») отображает директивную технологию сборки агрегатов и обеспечивает принятие решений по результатам мониторинга на основе данных о задержках сборочных единиц и знаний о возможных вариантах директивного технологического процесса агрегатно-сборочного про-

изводства. Исходящие позиции сетей мониторинга совпадают с входящими позициями сети формирования решений при организации агрегатной сборки на авиастроительном предприятии (такое совпадение может отображать перемещение готовых деталей между механическими и агрегатными цехами).

Как известно, сеть может быть однозначно определена правилами продукции с использованием многосортного продукционного языка (правила логики предикатов первого порядка). Таким образом, можно записать продукционные правила, которые будут отображать построенную сеть, т. е. построить соответствующую логическую модель.

3. Отражение времени в сетевой модели

Для отображения времени были проанализированы существующие логические модели времени и обоснована необходимость синтеза модели представления каузально-темпоральных зависимостей. Проанализированы подходы к созданию моделей знаний с учетом временных зависимостей и выбран подход, который позволяет синтезировать модель представления каузально-темпоральных зависимостей с учетом специфики предметной области [5].

Для описания процесса агрегатно-сборочного производства задано 3 сорта временных переменных, которые будут введены в исчисления предикатов первого порядка: *Time* — сорт моментов времени, *Interval* — сорт интервалов времени, *Duration* — сорт длительностей, которые формируются с помощью трех непересекающихся множеств символов.

На основании базовых примитивов задаются базовые отношения между ними (отношение упорядоченности моментов времени, отношение соответствия момента началу и концу интервала времени, качественные отношения на моментах времени; качественные отношения на интервалах по Аллену; качественные отношения на моментах и интервалах времени). Для задания атомарных отношений между интервалами времени используется запись следующего вида: $\langle \text{отношение} \rangle (i_1, i_2)$, где $i_1, i_2 \in \text{Interval}$, $\langle \text{отношение} \rangle$ — соответствующее интервальное отношение. Например, $meets(i_1, i_2)$ — совпадение конца одного и начала другого интервала.

Для связывания логических утверждений со временем обосновано использование метода конкретизации [4]. В общем виде правильно построенная формула с помощью метода конкретизации выглядит таким образом:

Истинностный предикат

(логическое утверждение первичного языка, утверждение конкретизации)

Метод конкретизации дает возможность представлять отношения между терминами и их временны-

ми зависимостями с высокой степенью общности, которая позволяет формализовать общие свойства временных утверждений, несовместимые факты, причинно-следственные (каузальные) зависимости, которые являются важнейшими для описания агрегатно-сборочного производства.

Для свойств, справедливых в моменты и на интервалах времени, а также для выделения событий использованы следующие предикаты временных утверждений:

$Holds_on(f, i)$ — это означает, что свойство $f \in Fluent$ имеет место (истинно) на интервале времени $i \in Interval$;

$Occurs(ep)$ — это означает, что событие $e \in Event$ имеет место (истинно) в момент или на интервале времени $p \in Time \cup Interval$.

Используя предикаты временных утверждений, были построены правила для синтеза процедур вычисления отклонений производственных задач от плана. Например, факт опоздания сдачи задания запишется так:

$$\forall S_i \text{ в задание, } \exists i, j, k \in Interval, \exists t \in Time$$

$$\begin{aligned} & Occurs(\text{Плановый_конец_выполнения}(S_i), t) \wedge \\ & Holds_on(\text{status}(S_i, \text{ в работе}), i) \wedge \\ & Holds_on(\text{Timeliness}(S_i, \text{ своевременно}), j) \\ & \wedge \text{end}(j) = t \Rightarrow \\ & Holds_on(\text{Timeliness}(S_i, \text{ опаздывает}), k) \wedge \text{meets}(j, k) \end{aligned}$$

4. Метод формирования решений при реализации директивной технологии агрегатной сборки

Представим двухэтапный метод формирования решений на основе созданной модели представления знаний. Метод состоит из двух этапов: первый основан на логическом выводе на множестве каузально-темпоральных правил и использовании процедур сети мониторинга для выявления отклонений заданий от плана, второй — на логическом выводе на множестве классических производственных правил и использовании процедур сети формирования решений (используя глубинные знания экспертов) для устранения последствий отклонений от плана.

Множество S всех заданий, которые нужно выполнить в течение месяца, состоит из множеств φ_n — заданий, которые не выданы, φ_w — заданий, которые находятся в работе, и φ_r — задания, которые были сданы; таким образом, $S = \{\varphi_n \cup \varphi_w \cup \varphi_r\}$, причем $\varphi_n \cap \varphi_w \cap \varphi_r = \emptyset$. Задания при нормальном ходе производственного процесса переходят из множества φ_n в множество φ_w , далее в множество φ_r . Введем признак Status, который характеризует принадлежность задания S к φ_n , φ_w или φ_r . Однако различные причины вызывают задержки при пере-

ходе заданий из одного множества в другое. Для отслеживания своевременности выдачи и сдачи заданий был введен признак Timeliness, который характеризует принадлежность задания S к $\bar{\omega}$ или $\bar{\omega}$. Таким образом, множество всех заданий состоит из двух множеств $S = \{\bar{\omega} \cup \bar{\omega}\}$, причем $\bar{\omega} \cap \bar{\omega} = \emptyset$, где $\bar{\omega}$ — множество выданных или выполненных заданий без отклонения от плана, а $\bar{\omega}$ — множество заданий, время выполнения или выдачи которых было задержано по некоторым причинам. Задания разделяются на комплекующие и сборочные $S = \{S_k \cup S_a\}$, причем $S_k \cap S_a = \emptyset$, где S_k — задание на изготовление комплекующих, S_a — сборочные задачи.

Существует отображение $S \rightarrow P$, которое задает соответствие заданий позициям сети, причем существует биективное отображение $S_k \rightarrow B$ и $S_a \rightarrow (P \setminus B) \setminus R$.

Введем множество E всех событий, которые изменяют признаки заданий в моменты времени $T = \{T_p \cup T_f\}$, причем $T_p \cap T_f = \emptyset$, где T_p — множество моментов времени, которые уже наблюдались в прошлом, T_f — множество моментов времени, которые состоятся в будущем. Существует отображение некоторых событий во временные переходы сети, т. е. переходы сети могут иметь интерпретацию процесса выполнения задания $E \rightarrow s_j$.

Необходимыми условиями для реализации метода является наличие в составе системы управления подсистем планирования (например, MS Project) и САПР ТП (например «компас-автопроект»). Система планирования формирует план выполнения производственных задач, из которого СППР по реализации директивной технологии агрегатной сборки получает плановые даты выдачи и сдачи заданий в текущем цехе и формирует соответствующие события, которые активизируют antecedенты правил в базе знаний текущего состояния производства. САПР ТП «компас-автопроект» сохраняет конструкторские спецификации, которые содержат сведения о том, в какое сборочное задание входит задание, которое нужно выполнить, таким образом, можно автоматически сформировать факты включения одних заданий в другие.

Исходя из вышесказанного, двухэтапный метод вывода на знаниях при принятии решений по организации агрегатно-сборочного производства может быть представлен следующей последовательностью шагов:

Начальная ситуация:

$$\forall S_i \in \bar{\omega} \wedge \forall S_i \in \varphi_n, \exists S_p : S_k \rightarrow S_a.$$

1. В случае возникновения событий $E_j^f \in E$ фактических изменений состояния задания, где

$j \in \{\text{нач}, \text{оконч}\}$, *нач* — начало выполнения задания, *оконч* — окончание выполнения задания.

$$\forall S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \in \varphi_n$$

- событие $E_{\text{нач}S_i}^\Phi$ — (пере)формирование

$$\varphi_w \setminus \setminus \varphi_n = \{S_i | S_i \in \varphi_w \wedge S_i \notin \varphi_n\};$$

- событие $E_{\text{оконч}S_i}^\Phi$ — формирование

$$\varphi_r \setminus \setminus \varphi_w \wedge \varphi_r \setminus \setminus \varphi_n = \{S_i | S_i \in \varphi_r \wedge S_i \notin \varphi_n \wedge S_i \notin \varphi_w\}.$$

2. В случае возникновения событий $E_j^{pl} \in E$ плановых изменений состояния задания, где $j \in \{\text{нач}, \text{оконч}\}$, *нач* — начало выполнения задания, *оконч* — окончание выполнения задания.

- $\forall S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \in \varphi_n \wedge t_{\text{нач}S_i}^\Phi \in T_f \wedge t_{\text{нач}S_i}^{pl} \in T_p$ событие $E_{\text{нач}S_i}^{pl}$ — переформирование

$$\bar{\omega} \setminus \setminus \bar{\omega} = \{S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \notin \bar{\omega}\}.$$

- $\forall S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge \forall S_i \in \varphi_w \wedge t_{\text{оконч}S_i}^\Phi \in T_f \wedge t_{\text{оконч}S_i}^{pl} \in T_p$ событие $E_{\text{оконч}S_i}^{pl}$ — переформирование

$$\bar{\omega} \setminus \setminus \bar{\omega} = \{S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \notin \bar{\omega}\};$$

- $\forall S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \in \varphi_r \wedge t_{\text{оконч}S_i}^\Phi \leq t_{\text{оконч}S_i}^{pl}$ событие $E_{\text{оконч}S_i}^{pl}$ — переформирование

$$\bar{\omega} \setminus \setminus \bar{\omega} = \{S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \notin \bar{\omega}\}.$$

3. В случае возникновения событий $E_k^{ch} \in E$ проверки выполнения задания, где $k \in \{\varphi, \omega, b\}$, φ — проверка состояния задания, ω — проверка своевременности выполнения задания, b — проверка опоздания выдачи задания.

- $\forall S_i | S_i \in \varphi_w \wedge t_{\text{оконч}S_i}^\Phi \in T_f \wedge t_{\text{пров}S_i}$ событие E_φ^{ch} — вычисление продолжительности выполнения задания $dur_{S_i}^w = t_{\text{пров}S_i} - t_{\text{нач}S_i}^\Phi$

- $\forall S_i | S_i \in \varphi_w \wedge S_i \in \bar{\omega} \wedge t_{\text{пров}S_i}$ событие E_ω^{ch} — вычисление продолжительности опоздания сдачи задания $dur_{S_i}^r = t_{\text{пров}S_i} - t_{\text{оконч}S_i}^{pl}$

- $\forall S_i | S_i \in \varphi_r \wedge S_i \in \bar{\omega} \wedge t_{\text{оконч}S_i}^{pl} \leq t_{\text{оконч}S_i}^\Phi$ событие E_b^{ch} — переформирование

$$\bar{\omega} \setminus \setminus \bar{\omega} = \{S_i | S_i \in \bar{\omega} \wedge S_i \notin \bar{\omega}\}.$$

4. Для каждого сборочного задания $S_i \in S_a$, которое выполняется в цехе, осуществление проверки опозданий Z_{S_i} — входящих в него заданий, и определение такого опоздания dur_{max} , что $Z_m = \max(dur_{S_i}^r)$ и утверждение, что dur_{max} и будет опозданием всего задания.

5. Определение цеха-потребителя для задания $S_i \in S$ путем анализа маршрутного технологического процесса и передача опоздания dur_{max} (выполняется процедура из множества Q сети мониторинга) задания S_i в цех-потребитель (который не является текущим цехом). На этом шаге осуществляется связь сети мониторинга и сети принятия решений (передача информации об отклонении от плана).

6. Установление наличия критической ситуации. Процедура в решающей позиции из множества B путем сравнения продолжительности опоздания dur_{max} задания $S_i \in S$ с критическим опозданием проверяет совпадение вектора маркирования и связанных параметров со списком векторов, которые описывают определенные ситуации.

7. В случае выявления коллизии — осуществление вывода по правилам сети формирования решений. Эти правила определяют часть базы знаний, которая соответствует одному из этапов агрегатно-сборочного производства (доступная, стапельная, внестапельная сборка). Осуществляется выбор исходящей позиции $I(O)$, которая получит маркер и определит дальнейшие шаги процесса сборки, т. е. выход из критической ситуации. Знания в базе основаны на знаниях экспертов по организации агрегатно-сборочного производства и формированию технологических указаний диспетчеру агрегатно-сборочного цеха.

Первый этап приведенного метода (шаги 1–4) осуществляется параллельно, асинхронно и непрерывно на частичных сетях мониторинга в разных звеньях производства, что дает возможность в процессе поддержки принятия решений учитывать текущее состояние сборочных единиц, которые изготавливаются во всех подразделениях авиационного предприятия.

Второй этап метода (шаги 5–7) позволяет сформировать решения по конкретной производственной ситуации, которые представляют собой конечное множество и могут быть описаны в виде условий и соответствующих вариантов решения.

Выводы

В статье было описано построение сетевой модели представления знаний, учитывающей специфику агрегатно-сборочного производства на авиационном предприятии. Проведен анализ типовых решений, которые могут быть приняты для корректирования директивной технологии агрегатной сборки в авиационном производстве в случае возникновения отклонений от плана, которые не позволяют придерживаться принятого на предприятии варианта сборки. Выделены критерии и разработана классификация решений по корректировке директивной технологии сборки планера самолета на авиационном предприятии.

Выделены и описаны позиции и переходы в сети, обоснованы необходимые виды позиций и переходов для отображения процессов производства с учетом времени, а также особые позиции и переходы для формирования решений на основе информации об опоздании сборочных единиц. Был осуществлен переход от сетевой модели к соответствующей предикатной, а также обоснован выбор многосортной логики предикатов для расширения временем. Были введены дополнительные сорта для моментов и интервалов времени, а также сорта для временных утверждений — свойства и события. Эта логическая модель встраивается в производственную модель представления знаний, которыми естественно представляется сетевая модель.

Таким образом, путем модификации этапа представления знаний стало возможным учитывать временные зависимости между событиями в ходе производственного процесса, что позволит вычислить отклонения от плана изготовления узлов и агрегатов, поступающих в агрегатно-сборочный цех. Так-

же приведен двухэтапный метод формирования решений по организации агрегатно-сборочного производства, включающий постоянный мониторинг текущего состояния производства и непосредственное формирование решений в случае отклонений хода производства от плана.

Список литературы: 1. Попов Э.В. Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании. — М.: МИФИ, 1996. — 360 с. 2. Бабушкин А.И. Методы сборки самолетных конструкций. — М.: Машиностроение, 1985. — 248 с. 3. Vila L. A survey on temporal reasoning in artificial intelligence // AI Communications. — 1994. — Vol. 7, no. 1. — Pp. 4-28. 4. Allen J. F. Towards a general theory of action and time // Artificial Intelligence. 1984. — Vol. 23. — Pp. 123-154. 5. Еремеев А.П., Троицкий В.В. Представление временных и причинно-следственных зависимостей в системах поддержки принятия решений реального времени семиотического типа // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. — 2000. — №3. — С. 25-31. 6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 264 с.

Поступила в редколлегию 15.05.07