

А. В. Колесников, С. А. Солдатов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ СЛОЖНОЙ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ КООРДИНАЦИИ

Рассмотрена задача оперативно-производственного планирования на машиностроительном предприятии с заказным мелкосерийным характером производства и описан подход к решению подобных задач на основе методологии функциональных гибридных интеллектуальных систем с координацией.

A problem of operational industrial planning at a machine-building enterprise with custom-made, small-scale character of manufacture is considered, and an approach to decision of similar problems on the basis of methodology of functional hybrid intellectual systems with coordination is described.

Ключевые слова: задача оперативного планирования, координация, гибридная интеллектуальная система, машиностроительное производство.

Keywords: problem of operational planning, coordination, hybrid intellectual systems, machine-building enterprise.

Введение

Система планирования производства, несмотря на имеющийся арсенал научных методов и инженерных инструментариев, по-прежнему остается плохо изученным объектом. Ее наиболее проработанная область — стратегическое планирование. По мере продвижения к нижним слоям иерархии сокращаются горизонты планирования и возрастает степень детализации производства, что вызывает комбинаторный рост сложности плановых задач. Все это делает задачи оперативно-производственного планирования (ОПП), выполняемого службами оперативно-производственного планирования, на коротких, в несколько дней, временных интервалах сложными для автоматизации и оставляет их решение по-прежнему за специалистами-управленцами с большим профессиональным опытом и знаниями.

Основным направлением работ по автоматизации решения задач планирования с целью совершенствования систем управления предприятиями в 80-е гг. было управление качеством и оптимальное управление различными ресурсами. В 90-е гг. уже господствовала парадигма реинжиниринга бизнес-процессов как отказа от рассмотрения функциональной структуры предприятия и перехода к структуре бизнес-процессов, состоящих из автономных междисциплинарных групп, ориентированных на более полное удовлетворение интересов заказчиков.



К концу 90-х гг. и началу XXI века ключевой темой становится переход к виртуальным и сетевым принципам организации предприятий [1].

Сложность задач планирования современного производства, особенно на уровне оперативного (оперативно-производственного) планирования, давно превысила барьер доступности для наработанных наукой методов и программных продуктов. Все актуальнее переход к парадигме компьютерного синтеза метода, применяемого всякий раз заново при решении сложной практической задачи [2–4].

В этой связи для повышения качества принимаемых на уровне ОПП решений предлагается интеллектуальная система, построенная по методологии функциональных гибридных интеллектуальных систем [5], отличительная особенность которой – возможность синтеза метода решения сложной практической задачи с учетом координации.

1. Особенности сложных задач ОПП

Задача ОПП – важнейшая управленческая задача. Ее суть: в течение 11–12 дней, с середины текущего месяца, разработать оперативный график сборочного и механообрабатывающего производства (оперативный график) на следующий месяц, где перечислено количество изготавливаемой для продажи и в комплектацию продукции. Задачу ОПП решают коллективы специалистов из различных предметных областей, использующие свои данные, знания и методы решения, называемые системами поддержки принятия решений (СППР).

В ходе изучения работ [3–6], а также исследования практической задачи планирования на реальных машиностроительных предприятиях были выявлены следующие особенности ООП:

1. Главная особенность планирования – двоякий смысл. Это одновременно и фаза как управленческая деятельность (процесс), и задача, имеющая свойства, состав и структуру. Единственный способ разрешения противоречия – представление задачи планирования как неоднородной [5], т.е. как задачи-системы, состоящей из множества взаимодействующих подзадач.

2. На машиностроительном предприятии невозможно решение задачи планирования по частям для отдельных подразделений предприятия. Задача планирования должна охватывать всю многостороннюю деятельность предприятия. Это связано с глубокой взаимосвязью производственных процессов.

3. Для задачи планирования характерна динамичность. Исходные данные не долговечны и быстро теряют актуальность (устаревает).

4. При планировании на коротких горизонтах из-за ограниченности во времени трудно обеспечить всю необходимую для принятия решений полноту исходной информации. Таким образом, возникает стохастическая неопределенность.

5. При планировании единственной линии решения (линии рассуждения одного специалиста) недостаточно. Задачи планирования требуют итераций, альтернативных и согласованных линий рассуждения.



Поэтому здесь привлекаются эксперты с узкоспециализированными знаниями из нескольких предметных областей, так как различные профессиональные представления о промышленном предприятии в ходе обсуждения и принятия решений позволяют получить максимально полное его описание. Но поскольку все специалисты используют свой язык профессиональной деятельности, возникает проблема лингвистической неопределенности и полиязыкового характера задач.

6. Невозможна объективная проверка качества разработанного плана по отдельным результирующим показателям. Один из наглядных примеров – ситуация перевыполнения плана. За кажущимся успехом скрывается возможная нехватка материальных ресурсов в следующем календарном периоде, затоваривание складов, поломка оборудования вследствие излишней нагрузки. Единственный способ проверить качество плана – это моделирование его выполнения.

Таким образом, планированию присущи все свойства сложных задач: системность, неоднородность, динамичность, неопределенность, полиязыковой характер, внутренняя несогласованность.

При исследовании задачи ОПП на реальных промышленных предприятиях было выявлено, что ее нельзя решить только простым делением исходной задачи на подзадачи с последующим логическим увязыванием отдельных аспектов в единое мнение. Оказалось, что если применительно к условиям СППР соотнести образ сложной задачи с лицом, принимающим решения (ЛПР), а ее составные части – подзадачи – с экспертами, то существенное значение имеет и согласованная, скоординированная руководителем (ЛПР) работа специалистов. Большая размерность, сжатые сроки и высокая цена ошибки (до 15 % ежемесячной прибыли предприятия) привели к необходимости создания механизма, который уменьшил бы потери от планирования и позволил бы рационально использовать имеющиеся ресурсы.

Такой механизм согласования и взаимодействия – ежедневные совещания, или, как их называют на промышленных машиностроительных предприятиях, *планерки*. Суть этих совещаний, по словам участников, – «скоординировать свою работу». Для этого диспетчер производства (начальник планово-производственного отдела), разделив задачу между специалистами, периодически собирает последних на совещания (планерки), выслушивает информацию о решении ими подзадач и после анализа выдает указания по корректировке линий рассуждений экспертами. Это выявляет ошибки решения подзадач на ранних этапах, еще до агрегации профессиональных мнений в общее решение СППР. При этом в ходе планерок вырабатываются и применяются количественные и качественные оценки состояния ресурсов, заказов, сроков и т. п.

Вышесказанное требует расширения понятия «сложная задача» с учетом значимости эффекта коллективного решения, который назовем *координацией подзадач*.

2. Модель сложной задачи с координацией

Как показал анализ [6–12], в известных методах и моделях отсутствует либо имеет ограниченную область применения [13] важный для решения



задачи ОПП в СППР механизм взаимодействия (координации) подзадач в ходе процесса решения сложной задачи. В связи с этим в рамках системного подхода предлагается новый метод моделирования решения сложных задач с координацией подзадач, который позволил бы полнее учитывать широкий спектр отношений взаимодействия подзадач внутри задачи-системы, а именно: синхронизацию процесса решения подзадач, использование общих для них переменных, ограничений и т.п.

В системном подходе задачи традиционно рассматриваются как некие системы [13; 14], которые, в свою очередь, состоят из отдельных неделимых задач-элементов. Между задачами-элементами есть связи, посредством которых они взаимодействуют внутри системы (рис. 1). Порядок соединения и взаимодействия элементов в системе определяется ее структурой.

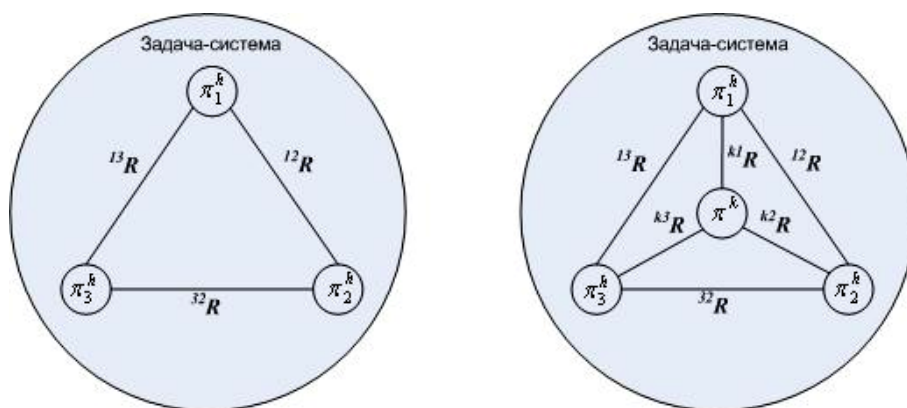


Рис. 1. Пример традиционного представления задачи в системном подходе и представления задачи с учетом координации:

π_1^h, \dots, π_3^h – задачи-элементы (подзадачи); π^k – задача-координатор; ${}^{qw}R | q, w = 1, \dots, 3, q \neq w$ – отношения подзадач; ${}^{kq}R$ – отношения координатора с подзадачами

Обозначим задачу-систему π^u , а задачу-элемент – π^h . Тогда $\Pi^h = \{\pi_1^h, \dots, \pi_{N_h}^h\}$ – множество задач-элементов, входящих в π^u ; $\dot{\Pi}^u = \{\hat{\pi}_1^u, \dots, \hat{\pi}_{N_u}^u\}$ – множество декомпозиций задачи π^u ; ${}^{qw}R | q, w = 1, \dots, N_h, q \neq w$ – отношения между задачами-элементами; N_h – мощность множества. Тогда модель задачи-системы представим в виде

$$\pi^u = \langle \Pi^h, {}^{qw}R, \dot{\Pi}^u \rangle. \quad (1)$$

Данная модель удовлетворяет всем требованиям системы. Она состоит из множества элементов Π^h , между элементами установлены отношения ${}^{qw}R$, связи организованы, что отражено во множестве декомпозиций $\dot{\Pi}^u$. При решении задачи-системы задачи-элементы преимущественно отделены от внешней среды (или ее состояние зафиксировано), т.е. выполняется требование о том, что связи внутри системы на-



много сильнее, чем со внешней средой. Простое суммирование решений задач-элементов не дает решение задачи-системы.

Тем не менее модель (1) имеет недостатки, основной из них — нерелевантное отображение связей между элементами, иными словами, учитывать только связи ${}^{qw}R$ недостаточно. Исследования работы СППР показали, что в большинстве случаев эксперты не могут дать профессиональные решения в условиях, заданных им изначально ЛПР. Обычно не хватает ресурсов, в частности времени, и имеют место ошибки в целеполагании. Изменение первоначальных условий в модели (1) невозможно из-за отсутствия существенного элемента — образа ЛПР, который бы выполнял функцию координатора как «перераспределителя» ресурсов и перереформулировал бы в зависимости от ситуации цели экспертов.

В связи с вышесказанным в предлагаемом подходе задача рассматривается не только как отображение последовательности решения подзадач, но и как система с новым элементом — координатором π^k . Его функция — мониторинг и управление процессом решения подзадач $\pi_1^h, \dots, \pi_{N_h}^h$ экспертами в ходе коллективного обсуждения. Координатор связан отношениями ${}^{kq}R \mid q = 1, \dots, N_h$ с каждой задачей π^h в системе π^u . Посредством отношений ${}^{kq}R$ координатор собирает информацию о состоянии процесса решения экспертом задачи-элемента и в конкретные моменты времени выдает координирующие воздействия для изменения входного набора данных (ресурсов, целей). Тогда модель сложной задачи с координацией можно представить в виде

$$\pi^{uk} = \langle \Pi^h, {}^{qw}R, \dot{\Pi}^u, \pi^k, {}^{kq}R \rangle, \quad (2)$$

где π^k — координатор; ${}^{kq}R \mid q = 1, \dots, N_h$ — отношения между координатором и задачами-элементами.

Таким образом, можно дать следующее определение *сложной практической задачи*: это задача, включающая взаимодействующие элементы-подзадачи, между которыми происходит обмен данными (значения переменных, синхроимпульсы и т.п.), управляемый специальным элементом — координатором.

Сравнение выражений (1) и (2) показывает, что модель (2) носит более общий характер и легко сводится к (1).

По своей сути элемент-координатор может быть представлен *координирующей задачей (К-задачей)*, которая должна быть «добавлена» в декомпозицию $\dot{\pi}^u \in \dot{\Pi}^u$ сложной задачи π^u , чтобы релевантно отображать в модели особенности задач планирования. Рассмотрим сущность задачи-координатора.

Пусть есть задача-система оперативно-производственного планирования π^u , состоящая из задач-элементов π_1^h и π_2^h , $\Sigma_1^h = \{^1\zeta_1^h, \dots, ^n\zeta_1^h\}$, $\Sigma_2^h = \{^1\zeta_2^h, \dots, ^m\zeta_2^h\}$ и $\Sigma^u = \{^1\zeta^u, \dots, ^g\zeta^u\}$ — множества всех возможных результатов решения задач-элементов π_1^h, π_2^h — и задачи-системы π^u соответственно. Решением задачи π^u будем считать искомый в ходе ра-



боты СППР план. Введем множество $C^* = \{c_1, \dots, c_p\}$ условий координации — в простейшем случае задач линейного программирования [15; 16] это неравенства. В практических задачах эти условия чаще записываются на естественном языке, например: «если есть нехватка материалов (результат решения π_1^h) и заказов с предоплатой более 50 % более половины от общего числа (результат решения π_2^h), то в производство запустить только заказы с предоплатой более 50 %».

Предположим, что существует такое множество условий $C^* = \{c_1, \dots, c_p\}$, что может быть определено соответствие ψ_1 :

$$\psi_1 : \Sigma_1^h \otimes \Sigma_2^h \otimes C^* \rightarrow \Sigma^u. \quad (3)$$

Эти элементы соответствия ψ_1 представляют собой кортежи $((\alpha \zeta_1^h, \beta \zeta_2^h, c_\gamma), \eta \zeta^u) \mid \alpha = 1, \dots, n, \beta = 1, \dots, m, \gamma = 1, \dots, p, \eta = 1, \dots, g$, где первая компонента — трехкомпонентный вектор, а вторая — решение $\eta \zeta^u$ задачи π^u . Вектор $(\alpha \zeta_1^h, \beta \zeta_2^h, c_\gamma)$ состоит из решения $\alpha \zeta_1^h \in \Sigma_1^h$ задачи π_1^h , решения $\beta \zeta_2^h \in \Sigma_2^h$ задачи π_2^h и координирующего условия $c_\gamma \in C^*$.

Соответствие ψ_1 — это не функция, так как оно не может быть записано аналитически и вычислено, поскольку условия координации и результаты решения задач-элементов чаще всего представлены на естественном языке. Оно однозначно, так как невозможно реализовать несколько планов производства сразу, сюръективно, так как каждое решение задачи π^u соответствует хотя бы одному элементу из $\Sigma_1^h \otimes \Sigma_2^h \otimes C^*$, и не инъективно, так как не каждому элементу из $\Sigma_1^h \otimes \Sigma_2^h \otimes C^*$ соответствует решение задачи π^u (например, материалы заказаны — результат решения π_1^h , но сроки поставки выходят за допустимые временные границы).

Поиск элементов соответствия ψ_1 — задача координатора (К-задача). Процесс ее решения назовем *процессом координации*. Рассмотрим его подробнее.

Пусть в результате решения π_1^h, π_2^h получены ${}^1\zeta_1^h \in \Sigma_1^h, {}^1\zeta_2^h \in \Sigma_2^h$ и $\{({}^1\zeta_{11}^h, {}^1\zeta_2^h)\} \otimes C^* \not\rightarrow \Sigma^u$, т.е. ${}^1\zeta_1^h$ и ${}^1\zeta_2^h$ не приводят к решению π^u . Тогда возникает необходимость повторного решения π_1^h и π_2^h . В практике СППР при решении сложных практических задач зачастую нет времени на то, чтобы решать задачу заново.

Поэтому ход решения сложной задачи π^u разбивается на отдельные этапы, а результаты решения систематически проверяются в конце этапов. Это позволяет обнаружить возможные ошибки до получения результирующего плана. Решения подзадачи π^h (линии рассуждения экспертов) также разбиваются на части (шаги).

Тогда в рассматриваемом примере в процессе решения задач π_1^h и π_2^h будут получены следующие промежуточные результаты:



$$\begin{aligned} {}^1\zeta_1^h &\Rightarrow {}^2\zeta_1^h \Rightarrow \dots \Rightarrow {}^{s-1}\zeta_1^h \Rightarrow {}^s\zeta_1^h = {}^1\zeta_1^h, \\ {}^1\zeta_2^h &\Rightarrow {}^2\zeta_2^h \Rightarrow \dots \Rightarrow {}^{s-1}\zeta_2^h \Rightarrow {}^s\zeta_2^h = {}^1\zeta_2^h, \end{aligned}$$

где s — количество частей (шагов); ${}^1\zeta_1^h$ и ${}^1\zeta_2^h$ — результаты решения задач-элементов π_1^h и π_2^h , к которым привели шаги $1, \dots, s$.

По итогам проверки координатором результатов, полученных на конкретном шаге, выявляется необходимость воздействия на ход решения подзадач π_1^h и π_2^h , чтобы процесс решения сложной задачи π^h привел к получению заданного результата (цели). Такое воздействие назовем *координирующим*. Поскольку после исполнения экспертом координирующего воздействия процесс решения подзадачи может привести к результату, отличному от результата решения подзадачи без этого воздействия, то обозначим результат, полученный на промежуточном этапе, без левого верхнего индекса: ${}_i\zeta_1^h$ и ${}_i\zeta_2^h$, где $i = 1, \dots, s$.

Определим множество $E = \{e_1, \dots, e_6\}$ координирующих воздействий. Исходя из работы [17], имеем следующие виды координирующих воздействий:

- интегральная координация e_1 задает плановый показатель на определенный период времени и различные ограничения (нормативы);
- четкая координация e_2 — координируемый параметр в каждый момент времени должен быть равен заданному значению;
- интервальная координация e_3 требует принадлежности координируемого параметра заданному интервалу;
- лингвистическая координация e_4 выдает координирующие воздействия на естественном языке;
- координация по времени (синхронизация решения подзадач) e_5 — результаты решения подзадач выдаются через строго определенные кванты времени, суть такого воздействия — установить, через какой период времени необходимо дать промежуточный результат, т.е. ${}_i\zeta^h$, где $i = 1, \dots, s$.

Ситуацию, когда линия рассуждения эксперта не меняется, обозначим как «пустое действие» e_6 .

Тогда с учетом вышесказанного установим соответствие

$$\psi_2 : ({}_i\zeta_1^h, {}_i\zeta_2^h) \otimes C^* \rightarrow E, \quad i = 1, \dots, s-1. \quad (4)$$

Элементы этого соответствия ψ_2 представляют собой пару $(({}_i\zeta_1^h, {}_i\zeta_2^h, c_\gamma), e_\nu) \mid i = 1, \dots, s-1, \gamma = 1, \dots, p, \nu = 1, \dots, 6$, где первая компонента — трехкомпонентный вектор, а вторая — координирующее воздействие $e \in E$. Вектор $({}_i\zeta_1^h, {}_i\zeta_2^h, c_\gamma)$ состоит из решения ${}_i\zeta_1^h \in \Sigma_1^h$ задачи π_1^h , решения ${}_i\zeta_2^h \in \Sigma_2^h$ задачи π_2^h и координирующего условия $c_\gamma \in C^*$.

Аналогично выражению (3) соответствие (4) — не функция. Оно многозначно, поскольку возможно применение по отношению к одной и той же задаче-элементу π^h сразу нескольких координирующих действий $e \in E$.



Поскольку есть ограничение на количество шагов, то при $i = s$ должно существовать соответствие $\psi_3 : ({}_i\zeta_1^h, {}_i\zeta_2^h) \otimes C^* \rightarrow \Sigma^u$.

Здесь ψ_3 есть $(({}_i\zeta_1^h, {}_i\zeta_2^h, c_\gamma), {}^n\zeta^u) | i = 1, \dots, s-1, \gamma = 1, \dots, p, \eta = 1, \dots, g$, где первая компонента – трехкомпонентный вектор, а вторая – решение ${}^n\zeta^u \in \Sigma^u$ задачи π^u . Трехкомпонентный вектор $({}_i\zeta_1^h, {}_i\zeta_2^h, c_\gamma)$ состоит из решения ${}_i\zeta_1^h \in \Sigma_1^h$ задачи π_1^h , решения ${}_i\zeta_2^h \in \Sigma_2^h$ задачи π_2^h и координирующего условия $c_\gamma \in C^*$. Если ψ_3 не существует, т.е. в результате поиска элементов ψ_3 обнаруживается, что $\psi_3 = \emptyset$, то ЛПР необходимо пересмотреть множество условий координации C^* .

По смыслу соответствие ψ_3 является подмножеством множества ψ_1 , так как единственное отличие от ψ_1 состоит в том, что в ψ_3 указаны конкретные результаты решения задач π_1^h и π_2^h . Тогда модель К-задачи для рассматриваемого примера можно записать следующим образом:

$$\pi^k = \langle \Sigma_1^h, \Sigma_2^h, \psi_2, D_{\psi_3} \rangle, \quad (5)$$

где Σ_1^h, Σ_2^h – исходные данные для задачи-координатора π^k ; $D_{\psi_3} \in \psi_3$ – конечная цель решения задачи-координатора π^u ; ψ_2 – условия, конкретизирующие отношения между исходными данными Σ_1^h, Σ_2^h и целью D_{ψ_3} и определяющие, как исходные данные задачи-координатора π^k преобразуются в цель (результат) решения задачи-координатора π^k .

Заключаем, что процесс координации – это процесс, в ходе которого на основе результатов решения задач-элементов, полученных на каждом шаге, выбираются координирующие воздействия для линии рассуждения каждого из экспертов, чтобы по окончании выполнения этапов решения сложной задачи получить результат ее решения.

Отметим, что с увеличением количества задач-элементов актуальность необходимости координировать их решение возрастает, так как комбинаторно растет количество отношений между элементами.

3. Модель гибридной интеллектуальной системы с учетом координации

В качестве модели ГиИС для решения сложной задачи оперативно-производственного планирования принята функциональная крупнозернистая ГиИС [5]:

$$\begin{aligned} \alpha^u(t) = & {}^1X^0 \cdot {}^{19}R^n \cdot {}^9m^i \circ {}^1X^0 \cdot {}^{12}R^n \cdot {}^2\hat{x}_1^n \circ {}^1X^0 \cdot {}^{12}R^n \cdot {}^2\hat{x}_2^n \circ {}^1X^0 \cdot {}^{12}R^n \cdot {}^2\hat{x}_6^n \circ \\ & \circ {}^2\hat{x}_3^n(t) \cdot {}^{22}R_6^n \cdot {}^2\hat{x}_3^n(t+1) \circ {}^2\hat{x}_1^n(t) \cdot {}^{22}R_7^n \cdot {}^2\hat{x}_3^n(t) \circ {}^2\hat{x}_3^n(t) \cdot {}^{22}R_8^n \cdot {}^2\hat{x}_5^n(t) \circ \\ & \circ {}^1X^0 \cdot {}^{11}\ddot{R}^n \cdot {}^1X^n \circ {}^2\hat{x}_1^n \cdot {}^{22}R_9^n \cdot {}^2X_1^n \circ {}^2X_2^n \cdot {}^{22}R_{10}^n \cdot {}^2\hat{x}_2^n, \end{aligned} \quad (6)$$

где ${}^2\hat{x}_1^n$ – исходные данные ${}^2D^u$ [5] сложной задачи π^u , передаваемые на вход одного или нескольких функциональных и технологических элементов $\alpha^h |_j$ и $\alpha^\tau |_j$ в соответствии с декомпозицией $\hat{\pi}^u$ задачи π^u ;



${}^2\hat{x}_2^n$ – выход одного или нескольких элементов $\alpha^h|_j^i$ в соответствии с $\hat{\pi}^u$, являющийся целью ${}^6G^u$ решения задачи π^u ; ${}^2\hat{x}_3^n$ – состояние гибрида α^u в момент времени t , $\omega = 1, \dots, N_h$; N_h – количество элементов множества; ${}^9m^i$ – интегрированный метод (левый верхний индекс – 9) решения задачи π^u ; $j = 1, \dots, 7$ – обозначение базовых классов функциональных ГиИС [5]; ${}^1X^n$ – множество знаков, построенных в информационном языке описания элементов функциональных ГиИС; ${}^2X_1^n, {}^2X_2^n$ – множества свойств «вход» и «выход» элементов из ${}^1X^n$ и ${}^2X^n$ соответственно; ${}^{22}R_6^n, {}^{22}R_7^n, {}^{22}R_8^n$ – отношения функционирования ГиИС; ${}^{11}\ddot{R}^n$ – отношения интеграции элементов, заменяющее отношения декомпозиции ${}^{88}r_3^n \in {}^{88}R_3^n$ (порядок решения подзадач); отношения ${}^{88}R_1^n$ – отношения между однородными задачами π^h , входящими в состав сложной задачи π^u ; ${}^{22}R_9^n, {}^{22}R_{10}^n$ – отношения типа «свойство – свойство» входа ГиИС и «входов» элементов, а также «выходов» элементов и «выхода» ГиИС соответственно. Кроме этого, 1, 2, 3 в качестве левого верхнего индекса X или x – признак ресурса, свойства, действия соответственно; 0 или n в качестве верхнего правого индекса X, R или x – признак базисного понятия и схемы ролевых концептуальных моделей соответственно; нижний правый индекс для X или x – порядковый номер класса понятий; верхний левый индекс для R обозначает, между какими понятиями категориального ядра установлены отношения (11 – «ресурс – ресурс», 22 – «свойство – свойство», 12 – «ресурс – свойство», 19 – «ресурс – метод», 88 – «задача – задача»); нижний индекс для R обозначает порядковый номер класса отношений.

Отношения ${}^{22}R_9^n, {}^{22}R_{10}^n$ устанавливаются, исходя из следующих соображений. Они задаются на множествах переменных ${}^2D^u, {}^6G^u$ и множествах переменных ${}^2D^h, {}^6G^h$ подзадач, входящих в состав сложной задачи. В работе [5] приводится три возможных случая: 1) множество переменных π^u совпадает с множеством переменных π^h , т.е. ${}^2D^u = {}^2D^h, {}^2G^u = {}^2G^h$; 2) множество переменных для π^h – подмножество соответствующего множества π^u , т.е. ${}^2D^h \subset {}^2D^u, {}^2G^h \subset {}^2G^u$; 3) множество переменных π^u – подмножество соответствующего множества π^h , т.е. ${}^2D^u \subset {}^2D^h, {}^2G^u \subset {}^2G^h$. Для рассматриваемого случая сложной задачи оперативно-производственного планирования характерен второй вариант.

При координации контролируются промежуточные состояния процесса решения подзадач. В принятых обозначениях (6) под ними понимаются состояния функциональных элементов $\alpha^h|_j$, имитирующих решение подзадач π^h , а также состояния технологических элементов $\alpha^r|_j$. На основе их анализа в ходе координации изменяются свойства



«вход» ${}^2\hat{x}_1^n$ одного или нескольких функциональных и технологических элементов $\alpha^h|_j$ и $\alpha^\tau|_j$. Для учета этого факта введем в модель крупнозернистой функциональной ГиИС (6) следующую тройку $\langle {}^2\hat{x}_3^n(t), {}^{22}R_{11}^n, {}^2\hat{x}_1^n(t+1) \rangle$, т.е. на основе состояния ГиИС ${}^2\hat{x}_3^n(t)$ в момент времени t меняются исходные данные ${}^2\hat{x}_1^n(t+1)$ для ГиИС для момента времени $t+1$. Множество отношений ${}^{22}R_{11}^n$ устанавливает связь между состоянием ${}^2\hat{x}_3^n(t)$ гибрида α^n на данный момент модельного времени t и состоянием входов одного или нескольких функциональных и технологических элементов $\alpha^h|_j$ и $\alpha^\tau|_j$ на следующем шаге.

Чтобы произвести необходимое изменение входов ${}^2\hat{x}_1^n$ одного или нескольких функциональных и технологических элементов $\alpha^h|_j$ и $\alpha^\tau|_j$ в модели (6), введем тройку $\langle {}^2\hat{x}_3^n(t), {}^{23}R_1^n, {}^3X_1^n \rangle$, где ${}^3X_1^n = \{ {}^3x_1^n|_1^1, \dots, {}^3x_1^n|_6^6 \}$ — множество понятий координирующих действий, которое тождественно множеству координирующих действий E , введенных в разделе 2, а множество ${}^{23}R_1^n$ — множество отношений между состоянием ${}^2\hat{x}_3^n$ гибрида α^n на данный момент модельного времени t и необходимыми координирующими действиями ${}^3X_1^n$. Ниже приведена модифицированная схема ролевых концептуальных моделей α^{uk} для спецификации крупнозернистой функциональной ГиИС с координацией

$$\alpha^{uk}(t) = \alpha^n(t) \circ {}^2\hat{x}_3^n(t) \cdot {}^{22}R_{11}^n \cdot {}^2\hat{x}_1^n(t+1) \circ {}^2\hat{x}_3^n(t) \cdot {}^{23}R_1^n \cdot {}^3X_1^n. \quad (7)$$

Отношения ${}^{22}R_{11}^n, {}^{23}R_1^n$ не задаются заранее, а, как ${}^{22}R_6^n, {}^{22}R_7^n, {}^{22}R_8^n$, фиксируются в ходе функционирования ГиИС и являются результатом решения задачи-координатора (5). Так как в соответствии с работой [5] технологические элементы управляют порядком работы функциональных элементов и обменом информации между ними, то целесообразно возложить решение задачи координации на технологический элемент.

Рассмотрим пример ГиИС, состоящей из трех функциональных элементов $\alpha^h|_1^1, \alpha^h|_1^7, \alpha^h|_1^6$ и одного технологического элемента $\alpha^\tau|_1^7$. На вход ГиИС подаются исходные данные и происходит их разделение между функциональными элементами в соответствии с декомпозицией сложной задачи, на выходе имеем результаты работы функциональных элементов, агрегация в общее решение задачи.

На рисунке 2а изображена структурная схема ГиИС, построенная для решения сложной задачи в соответствии с выражением (6). Здесь моделируется только логически увязанная последовательность решения подзадач π^h из декомпозиции сложной задачи $\hat{\pi}^n$. Это соответствует модели сложной задачи на рисунке 1а. Данная схема отражает описанную в разделе 1 ситуацию, когда выполненная агрегация решений подзадач в общее единое решение дает, с точки зрения ЛПР, оши-



бочный результат и требуется повторное решение задачи. В этом случае по каналу обратной связи ЛПР получает от компьютерной СППР результат решения сложной задачи и на основе своих оценок по каналу прямой связи вносит изменения в множества входных данных ${}^2D^u$ и условий ${}^9C^u$ решения сложной задачи π^u . Далее ЛПР инициирует новый синтез ГиИС и повторное решение сложной задачи.

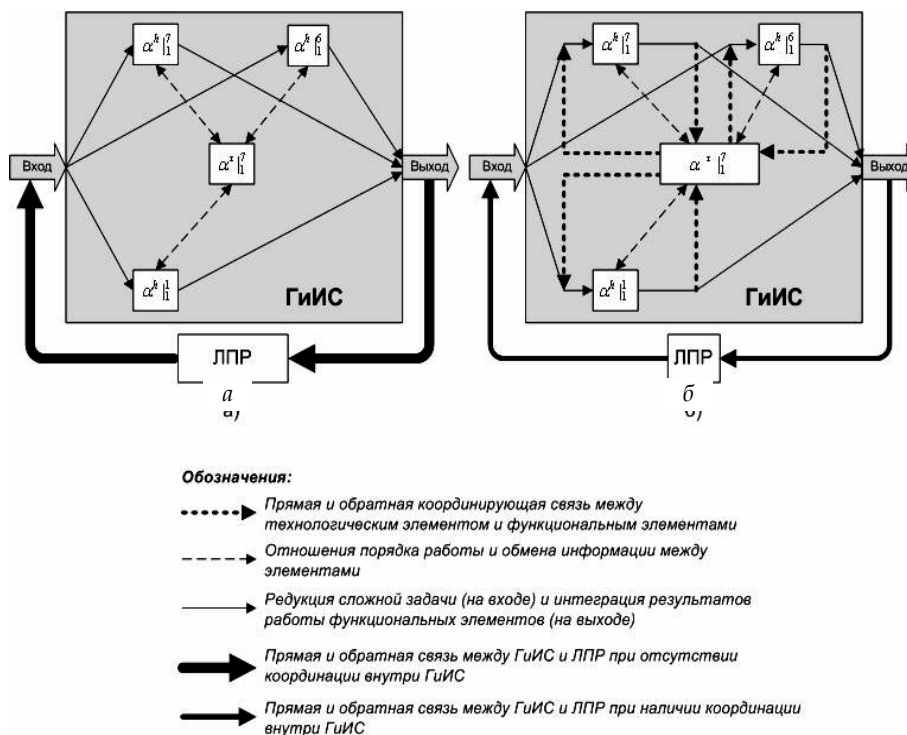


Рис. 2. Структурная схема ГиИС: без координации (а) и с координацией (б)

На рисунке 2б изображена принципиально иная структурная схема ГиИС. Ее отличие от вышеприведенной заключается в том, что технологический элемент $\alpha^x \uparrow_1^?$ определяет не только порядок работы функциональных элементов и обмен информации между ними, но и в соответствии со схемой (7) итерационно на основе состояния всех функциональных элементов корректирует для каждого из них входной набор данных и условий. Таким образом, часть функций ЛПР передается технологическому элементу, что отражено на рисунке 2б в изменении размеров соответствующих структурных блоков ЛПР и технологического элемента, а также толщины линий прямой и обратной связи в контуре управления. В представленной на рисунке 2б структурной схеме ЛПР по каналу обратной связи получает от компьютерной СППР результат решения сложной задачи. Если и планерки (т.е. координация) не помогают, т.е. решение по каким-либо причинам не устраивает ЛПР (например, затоваривание



складов, увеличение стоимости производимых изделий и т. д.), тогда оно вмешивается и меняет условия координации, т. е. модель задачи-координатора (5). Далее ЛПР инициирует новый синтез ГиИС и повторное решение сложной задачи.

На рисунке 3 приведен пример функционирования ГиИС с координацией, заданной схемой (7), для двух функциональных $\alpha^h |^1_1$, $\alpha^h |^7_1$ и одного технологического элемента $\alpha^r |^7_1$ и двух переменных для каждого элемента ${}^2\tilde{x}_{31}^h$, ${}^2\tilde{x}_{32}^h$. Каждая точка на данном рисунке – состояние функционального элемента в соответствующем подпространстве состояний в момент t_i , определяемый по формуле $t_i = t_0 + \tau \cdot i + \tau'$, где $i = 1, \dots, p-1$; τ – период, через который осуществляется проверка решения задач-элементов; t_0 – момент завершения редукции сложной задачи π^u и начала ее решения; τ' – время, отводимое на работу технологического элемента (на планерку); p – общее количество этапов.

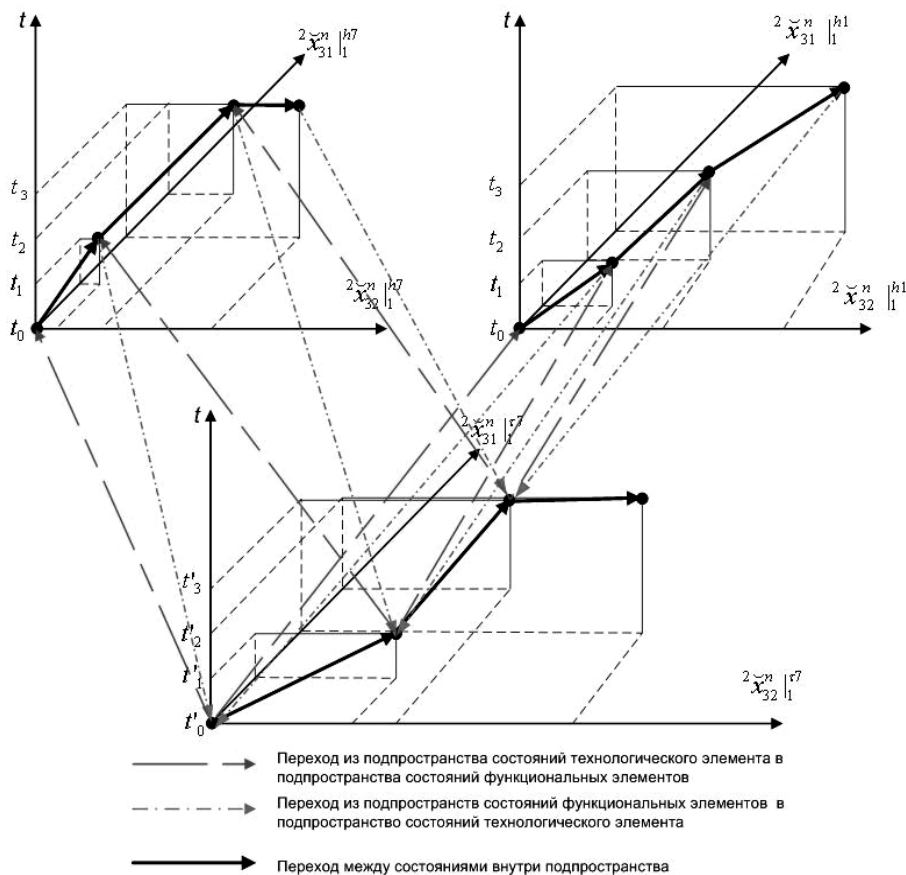


Рис. 3. Графическое представление функционирования ГиИС



Моменты времени смены состояния технологического элемента (на рисунке 3 это t_i) определяется по формуле $t_i = t_0 + \tau \cdot i, i = 1, \dots, p$.

Линии между подпространствами состояний обозначают передачу обработки информации в ГиИС от одного элемента к другому, т.е. обозначают переход от одной линии рассуждений к другой.

В каждый момент времени t_i фиксируются (опросом) состояния всех $\alpha^h |_j^\omega$, после чего $\alpha^\tau |_j^\omega$ (например, экспертная система) на основе состояния ${}^2\hat{x}_3^n(t_i)$ ГиИС выдает координирующее воздействие ${}^3x_1^n \in {}^3X_1^n$ для каждого элемента $\alpha^h |_j^\omega$. В процессе обработки технологическим элементом $\alpha^\tau |_j^\omega$ состояния ${}^2\hat{x}_3^n(t_i)$ ГиИС (решения задачи координации) изменяется состояние ${}^2\hat{x}_3^n |^\tau$ технологического элемента $\alpha^\tau |_j^\omega$. Причем время τ' , отводимое на такую обработку, не должно превышать периода, через который производится фиксация состояния ГиИС: $\tau' \leq \frac{T}{p}$, где T – предельное время, отведенное на решения сложной задачи π^u , p – общее количество этапов.

Переходы между состояниями функциональных элементов происходят скачкообразно, поскольку в промежуточные моменты времени состояние $\alpha^h |_j^\omega$ не отслеживается.

Таким образом, каждая точка подпространства состояний для каждого функционального элемента $\alpha^h |_j^\omega, j = 1, \omega = 1, 7$ на рисунке 3 представляет собой состояние в конкретный момент времени, единый для всех $\alpha^h |_j^\omega$. Когда $t_i = T$, выдается результат решения ${}^6G^u$ задачи π^u .

Ниже приведена концептуальная модель (8) функционирования ГиИС, построенной по схеме (7). В модели (8) фигурные скобки обозначают начало и завершение параллельной работы функциональных элементов. Из модели видно, что после каждой фиксации «} \Rightarrow » состояний функциональных элементов $\alpha^h |_j^\omega, j = 1, \omega = 1, 7$ происходит передача управления технологическому элементу $\alpha^\tau |_1^7$, а после смены им своего состояния – передача управления группе функциональных элементов. Например, для технологического элемента $\alpha^\tau |_1^7$, представляющего собой экспертную систему, это может быть переход к другой группе правил:

$$\begin{aligned} & {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_0) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h1}(t_0) \\ {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h7}(t_0) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h1}(t_1) \\ {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h7}(t_1) \end{array} \right\} \Rightarrow {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_0) \rightarrow \\ & \rightarrow {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_1) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h1}(t_1) \\ {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h7}(t_1) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h1}(t_2) \\ {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h7}(t_2) \end{array} \right\} \Rightarrow {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_1) \rightarrow (8) \\ & \rightarrow {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_2) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h1}(t_{p-1}) \\ {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h7}(t_{p-1}) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h1}(t_{p-2}) \\ {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{h7}(t_{p-2}) \end{array} \right\} \Rightarrow {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_{p-1}) \rightarrow {}^2\tilde{x}_3^n |_1^{\tau 7}(t_p), \end{aligned}$$



где « \Rightarrow » – отношение ${}^2R^n$, которое связывает состояние из разных подпространств и задает переход из одного однородного пространства в другие при функционировании ГиИС; « \rightarrow » – переход между состояниями внутри подпространства.

Данная модель отличается от концептуальной модели, приведенной в работе [5] (t – модельное время):

$$\begin{cases} {}^2\tilde{x}_3 |_1^{h1}(t) \rightarrow {}^2\tilde{x}_3 |_1^{h1}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow {}^2\tilde{x}_3 |_1^{h1}(t+n), \\ {}^2\tilde{x}_3 |_1^{h6}(t) \rightarrow {}^2\tilde{x}_3 |_1^{h6}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow {}^2\tilde{x}_3 |_1^{h6}(t+n). \end{cases} \quad (9)$$

В основу модели (9) положена идея, что одна и та же подзадача может решаться параллельно различными функциональными элементами. Отношения интеграции элементов возникают как внутренние невербальные образы в памяти пользователя, сравнивающего динамику моделирования сложной задачи с разных точек зрения, что позволяет увидеть то, чего нет в одномодельном моделировании.

В модели (8) развито иное предположение о включении в компьютерную модель СППР модели ЛПР, что приводит к возникновению синергетических эффектов самоорганизации. При этом появляется возможность связывать результаты работы отдельных функциональных элементов СППР еще в процессе синтеза решения сложной задачи, а не после, как в существующих моделях. Тем самым достигается большая релевантность компьютерной СППР и реальной.

Заключение

Описанный в данной статье теоретический базис решения сложной задачи оперативно-производственного планирования с учетом координации позволяет более полно, по сравнению с существующими методами и моделями, моделировать процесс решения подобных задач.

Учет при построении модели сложной практической задачи фактора координации позволил качественно улучшить модель сложной задачи и модель гибридной интеллектуальной системы, что сказалось на увеличении релевантности моделирования задачи оперативно-производственного планирования.

Можно также отметить, что принятие во внимание результатов моделирования задачи оперативно-производственного планирования с учетом координации специалистами-управленцами дает возможность повысить качественные и количественные показатели предприятия.

Список литературы

1. Тарасов В. Б. Причины возникновения и особенности организации предприятия нового типа // Проблемы теории и практики управления. 1998. №1. С. 87–90.



2. Колесников А. В., Солдатов С. А. Аналитический обзор и тенденции развития информационных систем планирования производства // Тр. междунар. науч. конф. «Инновации в науке и образовании – 2005», посвященные 75-летию основания КГТУ и 750-летию Кёнигсберга-Калининграда. Калининград: Изд-во КГТУ, 2005. Ч. 2. С. 40–42.
3. Татевосов К. Г. Основы оперативно-производственного планирования на машиностроительном предприятии. Л., 1985.
4. Малярченко И. Производственное планирование: от Вергилия... до APS-системы // PC WEEK/RE. 2006. №27. URL: <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=72912>.
5. Колесников А. В., Кириков И. А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М., 2007.
6. Сачко Н. С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством. Мн., 2008.
7. Кальянов Г. Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов. М., 2007.
8. Менар К. Экономика организаций. М., 1996.
9. Заболотский В. П., Оводенко А. А., Степанов А. Г. Математические модели в управлении. СПб., 2001.
10. Чекинов Г. П., Чекинов С. Г. Применение технологии многоагентных систем для интеллектуальной поддержки принятия решений (ИППР) // «Системотехника»: Сетевой электронный научный журнал. 2003. №1.
11. Бурцев М. С., Редько В. Г. Влияние агрессии на эволюцию в многоагентной системе // Сб. тр. 9-й Междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М., 2002. №1.
12. Курдюков А. А. Интеллектуальные агенты и их применение в инженерном проектировании // Матер. конф. и выставки «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. CAD/CAM/PDM-2001». М., 2001.
13. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. Л. Введение в системный анализ. М., 1989.
14. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. М., 1974.
15. Канторович Л. В. Математические методы организации и планирования производства. Л., 1959.
16. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применение. М., 1966.
17. Алтунин А. Е., Семухин М. В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень, 2000.

Об авторах

А. В. Колесников – д-р техн. наук, проф., РГУ им. И. Канта, ст. науч. сотр., Калининградский филиал ИПИ РАН, e-mail: avkolesnikov@yandex.ru.

С. А. Солдатов – соискатель, КГТУ, e-mail: ssa@west-automatica.com.

Authors

Professor A. V. Kolesnikov – IKSUR, e-mail: avkolesnikov@yandex.ru.

S. A. Soldatov – PhD student, KSUT, e-mail: ssa@west-automatica.com.

