

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КООРДИНАЦИИ СУБПОДРЯДЧИКОВ  
ПУТЕМ КОММУНИКАЦИИ ПРОГРАММНЫХ АГЕНТОВ  
С КОМПЕНСАЦИЕЙ НЕВЫГОДНЫХ СОГЛАШЕНИЙ  
И ПЕРЕДАЧЕЙ ПОЛЕЗНОСТИ****В. К. Гулаков, А. К. Буйвал, П. А. Паршиков (Брянск)**

В начале XXI-го века передовые страны мира, в том числе Россия, постепенно переходят от индустриального общества, основанного на жестком разделении труда, массовом производстве и обмене материальными продуктами, к постиндустриальному (информационному) обществу. В новой экономике важнейшая роль отводится методам и средствам интеграции, телекоммуникации и управления. Поэтому развитие новых технологий компьютерной интеграции, организации и управления предприятиями приобретает решающее значение. Кроме того, современные проекты, выполняемые предприятиями, становятся с каждым днем все более и более емкими и сложными и задействуют в своей работе не только возможности центрального предприятия, но и вовлекают в процесс выполнения многочисленных субподрядчиков. И в такой атмосфере рыночной взаимопроникающей экономики вопрос компьютерной интеграции и постоянного взаимодействия между участниками работ становится особо острым.

Все участники проекта взаимодействуют на рыночных началах и пытаются извлечь максимальную выгоду. Взаимодействие в рамках проекта осуществляется на основе заключенных предварительно договоров, но никаких жестких схем взаимоотношений не существует. Генеральный подрядчик не может требовать от субподрядчиков выполнения своих пожеланий, за исключением того, что прописано в рамках контракта, каждый агент в таком взаимодействии выступает как отдельный, независимый субъект. Кроме того, задача общей координации такой структуры усложняется приватностью процесса работы каждого такого агента. Общедоступной является лишь информация о возникших в работе задержках, которые повлекут за собой задержки в работах каждого последующего субподрядчика и задержки всего проекта.

Изменения в графике работ вездесущи и постоянны, и для их инициации достаточно возникновения проблем лишь у одного субподрядчика. Основная причина изменений – несоответствие между ресурсами, необходимыми для действий, и ресурсами, доступными субподрядчику [1]. Такое несоответствие ресурсов возникает, когда время действий не слишком хорошо подобрано в соответствии с доступными ресурсами по причине, например, неожиданного выхода из строя оборудования, нехватки персонала, перемещения ресурсов в более прибыльный проект. И если субподрядчик не может обеспечить достаточное количество ресурсов по первоначально предполагаемой стоимости, то стоимость работы превысит ожидаемое значение [1].

Наиболее распространенный вариант решения проблемы – перепланирование своей работы для соответствия доступным ресурсам. Такое действие не может осуществляться им самовольно, и поэтому субподрядчик вынужден просить генерального подрядчика произвести координацию таких изменений. Однако генеральный подрядчик может ответить отрицательно на такой запрос. Ведь координация изменений графика субподрядчиков вне компетенции генерального подрядчика, особенно в случае сложных проектов, когда вовлечено много субподрядчиков. Кроме того, генеральный подрядчик не может получить доступ к приватной информации, хранящейся у субподрядчиков и необходимой для координации графика проекта [2]. Контрактные отношения между генеральным подрядчиком и субпод-

рядчиком также обязывают следовать в рамках предварительных договоренностей. Все это означает, что генеральный подрядчик мало заинтересован в помощи субподрядчику при перепланировании. Поэтому необходима методология координации изменений графиков субподрядчиков.

Наиболее просты методологии централизованной координации, в соответствии с которыми генеральный подрядчик обязан координировать субподрядчиков. Две крайние методологии централизованной координации – строгая и свободная. Очевидно, что информация, необходимая для координации, вроде предпочтительных графиков субподрядчиков и сведений о ресурсах, недоступна генеральному подрядчику и хранится приватно субподрядчиком, что усложняет централизованную координацию [2]. Кроме того, централизованная координация не предполагает участия самих субподрядчиков в процессе разрешения конфликтов. Поэтому необходима методология распределенной координации изменений графика проекта.

Распределенная координация изменений графика проекта состоит из трех компонентов [3]: график проекта, ограничения ресурсов и дополнительные затраты, как показано на рис. 1. Каждый субподрядчик обладает собственными ограничениями ресурсов и собственной информацией о дополнительной стоимости, но график проекта один для всех.

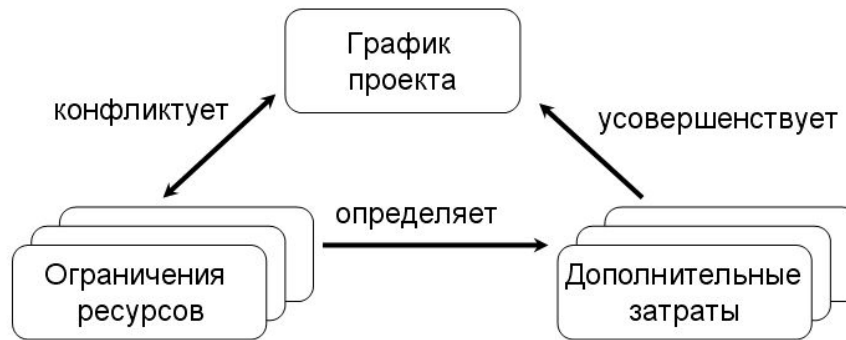


Рис. 1. Взаимодействие компонентов координации

Когда ограничения ресурсов вступают в противоречие с графиком проекта, такие ограничения ресурсов приводят к изменениям графика и возникновению информации о дополнительной стоимости. Субподрядчики будут пытаться понизить дополнительные затраты путем распределенной координации среди субподрядчиков и принять такие изменения графика, которые понизят дополнительные затраты, связанные с изменениями графика, и усовершенствуют график проекта.

Чтобы субподрядчики могли принимать во внимание собственные действия и, кроме того, способствовать увеличению глобальных результатов, была разработана методология распределенной координации изменений графика проекта, основанная на функции общественного благосостояния. Функция общественного благосостояния – это некая функция от индивидуальных функций полезности:  $W(u_1(x), \dots, u_n(x))$ . Функция общественного благосостояния дает способ ранжирования индивидуальных распределений, зависящий только от индивидуальных предпочтений, и является возрастающей функцией полезности каждого индивида [4].

Формализуем структуру распределенной координации изменений графика проекта следующим образом. Множество субподрядчиков  $A = \{A_1, \dots, A_n\}$  должны выработать коллективное решение по ряду действий  $\{a_1, \dots, a_m\}$ . Каждый субподрядчик должен знать полезность для своих альтернатив своих собственных действий, принимая во внимание дополнительные затраты других агентов от его действий и взвешивать их в сравнении со своими собственными дополнительными затратами. Определим функцию

общественного благосостояния  $E$  так, чтобы  $E$  отражало благосостояние группы следующим образом:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Cost_{(i,j)}, \quad (1)$$

где  $Cost_{(i,j)}$  – дополнительные затраты для  $j$  деятельности, которая принадлежит  $i$  субподрядчику;  $E$  – сумма дополнительных затрат субподрядчиков для всех  $m$  действий  $n$  субподрядчиков.

Цель распределенной координации изменений графика проекта – понижение  $E$ , т.е. суммы затрат субподрядчиков, связанных с их ограничениями ресурсов, подчиненными отношениям предшествования среди действий проекта:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Cost_{(i,j)} \rightarrow \min, \quad (2)$$

подчиненное условию

$$\forall x, Finish_x < \min_{y \in S_x} \{Start_y\}, \quad (3)$$

где  $Finish_x$  – дата окончания деятельности  $x$ ;  $Start_y$  – дата начала деятельности  $y$ ; и  $S_x$  – множество действий, которые должны следовать за деятельностью  $x$ .

В связи с огромным количеством взаимодействий между субподрядчиками в процессе распределенной координации изменений графика проекта, каждый субподрядчик будет представлен программным агентом, способным к коммуникации с другими программными агентами. Агент обменивается сообщениями с другими агентами, чтобы оценить изменения, и помочь реальному субподрядчику принять решение.

Каждый программный агент в системе вычисляет полезность сделки по изменению времени работы, чтобы оценить результат такого изменения графика. Полезность сделки для агента определяется как стоимость его первоначальной работы минус стоимость его новой работы, полученной им в результате сделки. Разница – та польза, которую агент извлек от сделки [6]. В качестве сделки рассмотрим договоренность с другими затронутыми субподрядчиками об изменении времени работы.

Представим полезность изменения времени работы как реально-оцениваемое число («деньги»), которое позволяет описать разницу между первоначальными затратами и затратами в случае альтернативных действий. Единицы полезности одинаковы для всех агентов, и агенты могут передавать свои единицы полезности другим агентам в качестве компенсации за невыгодные соглашения. Таким образом, представим полезность изменения времени работы как «перемещаемые деньги».

Каждый агент использует следующую функцию полезности для каждой деятельности  $k$ :

$$Utility_k = AC_k - \sum_{x \in \text{все\_последующие\_действия}} DC_x, \quad (4)$$

где  $AC_k$  – дополнительная «стоимость ускорения», необходимая для того, чтобы ускорить  $k$  деятельность;  $DC_x$  – дополнительная «стоимость задержки», необходимая для того, чтобы задержать последующую деятельность  $x$ .

Если агент не может следовать своему графику с доступными ему ресурсами, у него есть два варианта. Первый вариант – закончить деятельность согласно

первоначальному графику, но более высокой стоимостью за день. Это может привести к дополнительным затратам, необходимым чтобы ускорить  $k$  деятельность, в дополнение к первоначальной стоимости ( $C_{k0}$ ). Второй вариант – увеличить время выполнения работы с более низкой стоимостью за день. Поэтому агенты должны принимать во внимание два вида затрат для  $k$  деятельности при вычислении стоимости ускорения ( $AC_k$ ):  $C_{k1}$  – общая стоимость для  $k$  деятельности с первоначальным графиком и более высокой стоимостью в день; и  $C_{k2}$  – общая стоимость для  $k$  деятельности с удлинённым графиком и более низкой стоимостью в день, как показано на рис. 2, а.

$$AC_k = \begin{cases} C_{k1} - C_{k2}, & \text{если } C_{k1} > C_{k2} \\ 0, & \text{если } C_{k1} \leq C_{k2} \end{cases} \quad (5)$$

Если агент должен изменить свой график работы вследствие задержек предыдущих действий, у него есть два варианта. Первый вариант – выполнить работу с более короткой продолжительностью и более высокой стоимостью в день. При этом агент может понести *дополнительные затраты*, для того, чтобы ускорить  $x$  деятельность, в дополнение к первоначальной стоимости ( $C_{x0}$ ). Второй вариант – выполнить работу с более длинной продолжительностью и более низкой стоимостью в день. Поэтому необходимы два вида затрат деятельности  $x$  для вычисления «стоимости задержки» ( $DC$ ):  $C_{x3}$  – общая стоимость для деятельности  $x$  с более короткой продолжительностью и более высокой стоимостью в день; и  $C_{x4}$  – общая стоимость для деятельности с большей продолжительностью и более низкой стоимостью в день, как показано на рис. 2, б.

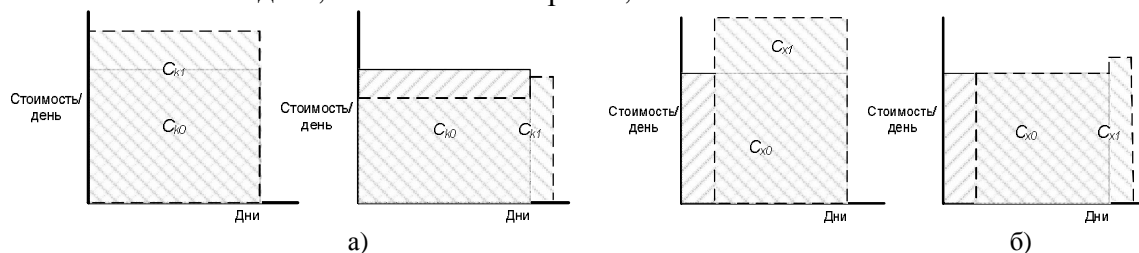


Рис. 2. Два вида стоимости ускорения (а) и два вида затрат от задержек (б)

Если начало деятельности задержано:

$$DC_x = \min \left( (C_{x3} - C_{x0}), \left( (C_{x4} - C_{x0}) + \sum_{y \in \text{все\_последующие\_действия}_x} DC_y \right) \right) \quad (6)$$

иначе:

$$DC_x = 0. \quad (7)$$

Агенты могут вычислить стоимость ускорения ( $AC$ ) и стоимость задержки ( $DC$ ), используя различные коэффициенты, вроде сверхурочных норм, дополнительных норм, или норм импорта. Однако предполагаемые нормы изменяются в зависимости от характеристик ресурсов. Поэтому, вместо того, чтобы вычислять  $AC$  и  $DC$ , основываясь на параметрах, которые не могут охватить все ситуации, программные агенты используют варианты изменения графика, предоставляемые субподрядчиками.

Вариант изменения графика – это кортеж вида:

(startDate endDate extraCost), (8)

где *startDate* – возможная дата начала деятельности; *endDate* – возможная дата конца деятельности; *extraCost* – дополнительная стоимость выбора данного варианта изменения времени деятельности.

Программные агенты в процессе переговоров осуществляют передачу единиц полезности для того, чтобы компенсировать агентам предоставление разрешения на изменение времени работы, которое для них (в их локальном масштабе), возможно, не является оптимальным. Такая стратегия переговоров называется компенсационной. После получения *DC* посредством переговоров, если окажется, что *AC* больше, чем *DC*, то есть полезность изменения времени работы положительна, агент должен произвести увеличение времени работы и при этом передать часть *DC* другим агентам для компенсации не выгодных им соглашений.

Для агентов необходим протокол компенсационных переговоров, чтобы получить *DC* от последующих агентов и передать им единицы полезности в качестве компенсации за невыгодные соглашения. Протокол компенсационных переговоров и будет управлять взаимодействием среди агентов. Протокол переговоров определяет команды, которые являются общими примитивными типами сообщений для агентов и последовательность передачи, которая отображает обмен структурированными сообщениями между агентами, когда изменяются их состояния.

Предложенный метод распределенной координации изменений графика проекта положен в основу разрабатываемой мультиагентной системы. Построение системы производится с использованием мультиагентной среды Anylogic 5, предоставляющей инструмент для быстрого создания профессиональных агентных моделей в графической среде [5]. Система построена из набора взаимодействующих согласно методологии агентов. Для взаимодействия со своими агентами субподрядчики используют разрабатываемый графический интерфейс пользователя.

Таким образом, методология распределенной координации позволяет усовершенствовать сетевой график проекта в случае изменения доступных ресурсов субподрядчиков в смысле понижения суммы затрат субподрядчиков, связанных с их ограничениями ресурсов? путем перепланирования работ согласно отношениям предшествования. Предложенный подход облегчает распределенную координацию изменений графика проекта, позволяя субподрядчикам предоставлять компенсацию затронутым субподрядчикам за невыгодные соглашения, идентифицировать и разрешать конфликты в жесткой сетевой структуре проекта, поддерживать логику работ и гарантировать сходимость распределенной координации.

Разрабатываемая агентная система, использующая для принятия решения предложенные субподрядчиками варианты изменения графика, позволит до начала выполнения работ скоординировать субподрядчиков. Таким образом, будет повышена эффективность использования ими ресурсов путем распределенной координации, что позволит успешно завершить весь проект.

Для промышленности такой подход позволит повысить конкурентоспособность выполнения проектов в результате улучшения графика, эффективного использования ресурсов, тесного взаимодействия среди субподрядчиков. Метод распределенной координации представляет основу для разработки мультиагентной системы планирования и управления, которая поможет субподрядчикам произвести выбор времени действий, идентифицировать и анализировать собственные ограничения ресурсов в данном графике, предсказывать результат перепланирования действий, координировать различные перспективы планирования, сотрудничая в направлении лучшего решения.

---

**Литература**

1. **O'Brien W.** An economic view of project coordination / W. O'Brien, M. A. Fisher, J. V. Jucker // E&FN Sporn London, 2000. 13(5). P. 393–400.
2. **Choo H. J.** Interactive coordination of distributed work plan / H. J. Choo, I. D. Tommelein // Proceedings of the Sixth Constructions Congress. Orlando, 2000. P. 11–20.
3. **Oberlender G. D.** Project Management for Engineering and Construction / G. D. Oberlender. New York: McGraw-Hill. 1993.
4. **Вэриан Х. Р.** Микроэкономика. Промежуточный уровень. Современный подход: Учебник для вузов / Перевод с англ. под редакцией Н. Л. Фроловой / Х. Р. Вэриан. М.: ЮНИТИ, 1997. 767 с.
5. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с Anylogic 5 / Ю. Карпов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
6. **Rosenschein J. S.** Designing conventions for automated negotiation / J. S. Rosenschein, G. Zlotkin. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.