

УДК 004.491.22

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ В МУЛЬТИАГЕНТНОМ ПОДХОДЕ

И.В. Майоров

Научно-производственная компания «Разумные решения»
Россия, 443013, г. Самара, ул. Московское шоссе, 17 (ТОЦ «Вертикаль»), оф. 1201

Рассматривается постановка задачи адаптивного многокритериального планирования ресурсов предприятий. Показывается, что одной из причин разрыва между ожидаемыми и фактическими результатами планирования являются ограничения классических подходов к управлению предприятиями, планирования производственных мощностей. Показывается высокая трудоемкость процесса планирования, уточняются требования к системам оперативного распределения ресурсов в реальном времени. Формулируется математическая постановка задачи распределения ресурсов при планировании, каждый из которых может иметь собственные критерии (расписание стоимости ресурса, его производительность, сроки, себестоимость, риск и другие), причем их важность может изменяться в ходе выполнения задач. Предлагается использование мультиагентного подхода к принципу построения систем планирования на основе мультиагентной платформы НПК «Разумные решения».

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, мультиагентные технологии, управление ресурсами, динамическое планирование, реальное время.

Растущая сложность современной глобальной экономики сейчас хорошо известна, что часто связывается с ростом неопределенности и динамики изменений спроса и предложения.

Методы планирования ресурсов предприятий являются одной из основных форм деятельности в процессах принятия решений и играют исключительно важную роль в промышленном производстве и различных сферах обслуживания. В современных условиях конкуренции эффективное планирование является важнейшим условием для удержания и завоевания новых рынков. Развитие вычислительных алгоритмов и создание разнообразных систем управления выдвигают на первый план эффективность и адекватность систем планирования современным быстроизменяющимся условиям рыночной среды.

Новые условия требуют решения задач распределения, планирования, оптимизации, согласования, мониторинга и контроля использования ресурсов в реальном времени, когда от самого момента времени напрямую зависит качество и эффективность решения поставленной задачи управления.

Однако проблема состоит в том, что в условиях растущей неопределенности изменения спроса и предложения, увеличения размерности решаемых задач и разнообразия действующих факторов, расширяющейся множественности критериев принятия решений участников процессов распределения, планирования и

использования ресурсов, часто имеющих конфликтные интересы, новые задачи решаются плохо или не решаются вовсе существующими методами и средствами.

В этих условиях требуются более оперативные, гибкие и эффективные подходы к принятию решений по распределению, планированию, оптимизации, согласованию и контролю ресурсов, позволяющие предприятиям сохранять и увеличивать свою рентабельность, избегая простоя или дефицита всех видов ресурсов, включая кадры, оборудование, финансы и другие.

В этой связи среди собственников и руководителей предприятий высшего уровня все чаще обсуждается задача создания «предприятий реального времени», в которых планирование ресурсов осуществляется динамически «на лету», в реальном времени, поскольку часто качество и эффективность управленческих решений напрямую зависят от самого момента времени.

Мультиагентные технологии считаются одними из инновационных и действенных средств планирования для решения задач в режиме реального времени. Научные и практические основы мультиагентного подхода к решению сложных задач и построению распределенных систем начали складываться в последние десятилетия прошлого века на стыке направлений по искусственному интеллекту, объектно-ориентированному и параллельному программированию, интернет-технологиям и телекоммуникациям [1-5].

Особенности задач адаптивного планирования

Задача планирования заказов (заявок) на производственных ресурсах рассматривается в следующей постановке. Имеется система производственных ресурсов (станков, рабочих центров, производственных линий, цехов, исполнителей и т. п.), которые характеризуются типом выполняемых работ, производительностью, расписанием доступности, стоимостью выполнения единицы работы. На данную систему поступает поток заказов, которые описываются объемом работ, типом ресурсов, на котором должен быть выполнен заказ, срок поступления, предельный срок выполнения, стоимость выполнения работ, технологический порядок операций с указанием их последовательности, требования по показателям качества, рисков, себестоимости, объемов выпуска.

Требуется создать оптимальный план, учитывающий заданные критерии, связанные с минимизацией предельного времени выполнения, затрат, штрафов, рисков невыполнения, минимизации простоев ресурсов, максимизации прибыли, обеспечения равномерности загрузки оборудования, достижения заданных критериев по качеству.

Поэтому задача планирования может рассматриваться как задача многокритериальной оптимизации с заданными ограничениями на системе ресурсов. При этом система должна рассматриваться как динамическая, поскольку поток заказов изменяется во времени, сами требования и характеристики ресурсов изменяются, поэтому в системе должен строиться план, учитывающий процессы смены параметров заказов и ресурсов.

Современное машиностроительное производство характеризуется следующими особенностями:

- растут объемы заказов;
- осуществляется модернизация производства, заменяется станочный парк, меняются технологии, рабочие специальности и т. д.;
- внедряются новые инновационные технологии производства;

- требуется все более индивидуальный подход к каждому заказчику, заказу, процессу, рабочему;
- требуется поддержка постоянных изменений в конфигурациях изделий для удовлетворения требований клиентов и спроса на продукцию;
- идет переориентация на позаказное производство;
- все выше разнообразие изделий, станков и квалификаций рабочих;
- все больше необходимость в переходе к рыночным отношениям и мотивации менеджеров, мастеров и рабочих;
- необходимо экономное использование ресурсов, снижение цен и повышение эффективности для собственника;
- необходимо возвращение конкурентоспособности продукции как в стране, так и на мировом рынке;
- необходимо применение принципов бережливого производства.

Для того чтобы удовлетворить этим требованиям, необходимо автоматизировать процессы оперативного управления ресурсами.

Это означает в первую очередь своевременную, быструю и гибкую реакцию на события, например на поступление нового заказа, задержку изготовления деталей и сборочных единиц, поломку или ремонт станка и т. д.

В современной научной литературе достаточно хорошо представлены методы и средства планирования и оптимизации, разработанные для решения задач массового обслуживания и исследования операций, к числу которых относятся методы линейного и динамического программирования, программирования в ограничениях и ряд других [2-7, 10-13].

Однако с ростом размерности решаемых задач разработанные методы и средства, имеющие комбинаторную природу (варианты полного перебора), приводящую к непропорциональному росту времени вычислений, не позволяют решать практические задачи.

Вместе с тем указанные методы обладают рядом недостатков [9]:

- высокая размерность задачи (сотни ресурсов, тысячи заказов, длинный горизонт времени) по-прежнему остается критическим фактором в достижении оперативности решений;
- не учитывается множество индивидуальных критериев у каждого участника процесса решения, которые при этом могут задаваться дискретно и даже процедурно (алгоритмически) и меняться в зависимости от ситуации или момента времени;
- планирование на практике ведется не пакетами, а по событиям, в «скользящем режиме» и должно сочетаться с одновременным контролем исполнения планов;
- часто случаются непредвиденные события (приход новых заказов, отзыв уже запланированных, поломка ресурсов и т. д.), на которые требуется гибкая (адаптивная) реакция с учетом особенностей ситуации, без полного останова и перезапуска системы;
- качество принимаемых решений часто зависит от самого момента времени, (возникнет затоваривание или дефицит);
- характеристики заказов и ресурсов могут меняться во времени, даже когда они уже запланированы, равно как и важность критериев, которая бывает напрямую связана с достигаемыми результатами;
- требуется индивидуальный подход к каждому заказу и ресурсу;
- трудно объяснять и обосновывать решение пользователю и др.

Поэтому для решения практически важных задач в режиме реального времени предлагается использовать мультиагентные технологии.

Методология мультиагентного подхода

В мультиагентном подходе решение любой сложной задачи распределения, планирования и оптимизации ресурсов выстраивается путем последовательных приближений: от самого грубого, простого, быстрого решения – к более сложным и лучшим решениям, т. е. обеспечивается управление сходимостью решения, что особенно важно в условиях реального времени.

В этих целях создается коллекция базовых типовых программных агентов, которые стараются добиться заданных им целевых установок (идеальных значений показателей), а получив максимум возможного в текущей ситуации, не оставляют попыток их улучшить. Например, заказ на фабрике или заказ в грузовой компании хочет быть выполнен точно в срок и с минимальной ценой, ресурс при этом может быть максимально эффективно использован и не иметь простоев или перегрузки. Заказ получает активность и быстро размещается в расписание на первое свободное место на ресурсе, но дальше может активироваться ресурс, который может оценивать свое состояние и делать попытки его улучшить, например при поступлении нового или отмене уже ранее запланированного заказа.

Агенты делают первое распределение первоначально «эгоистично» (автономно), работая с общей сценой и никого не спрашивая, и потому очень быстро, если ресурсы свободны; но наталкиваясь на решения других агентов и выявляя конфликты, способны вступать в переговоры, идти на уступки и добиваться согласованного решения (консенсуса) в интересах объединяющей их организации (участка, цеха, предприятия), агент которой к тому же может менять целевые установки идеала агентам своей организации по ходу развития ситуации, например управляя важностью критериев.

При этом требуется поддержать весь цикл управления ресурсами, включающий реакцию на события, распределение, планирование и оптимизацию (если есть время), согласование решения с исполнителями (с применением мобильных устройств), мониторинг и контроль, а также выявление расхождения между планом и фактом и последующее перепланирование ресурсов.

Фактически весь выигрыш от перехода к принятию решений в реальном времени для повышения эффективности использования ресурсов и достигается за счет учета особенностей динамично изменяющейся ситуации, что на практике людям делать очень сложно и что ведет обычно к избытку, простоям и холостому пробегу или, напротив, дефициту ресурсов.

Такой подход может применяться для планирования по многим критериям, в числе которых обычно выделяют качество продукции или предлагаемых услуг, время на их реализацию, цену (себестоимость), риски и другие.

Выигрыш в эффективности при использовании мультиагентных технологий достигается за счет перехода к принятию решений «по ситуации» в реальном времени, когда пользователь, а далее и система управляет важностью критериев.

Разработанный подход основан на концепции «холона» системы [16], где были введены специальные классы агентов «заказов», «продуктов» и «ресурсов» вместе с агентом «персонала», который наблюдает за результатами и дает советы другим агентам, когда это необходимо.

Такой подход применяется прежде всего для решения задач многокритери-

ального планирования, в числе которых традиционно рассматривают качество продукции или услуг, время на их реализацию, цену (себестоимость), риски и другие. В предлагаемом подходе система сама, отталкиваясь от достигнутых показателей и текущей ситуации с заказами и ресурсами, выбирает себе цели для улучшения вектора своих параметров и в качестве первоочередной цели для улучшения своего состояния берет тот критерий, по которому худшие значения показателей. Реализация мультиагентного подхода в разработке интеллектуальной системы динамического планирования основана на использовании концепции сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) и метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами предприятий в реальном времени на виртуальном рынке [14-16, 21].

Согласно данной концепции каждой заявке, заказу и другим потребностям и возможностям (производственные ресурсы, станки, оборудование, транспортные средства, персонал) присваиваются программные агенты, которые договариваются с другими агентами и планируют выполнение заказов «точно в срок» (JIT) или «как можно раньше» (ASAP), что позволяет обеспечить поддержку коллективного согласования и принятия решений в реальном времени на различных этапах планирования и исполнения производственного плана в различных подразделениях, работающих совместно над решением общих задач.

Формализация постановки задачи

Для математической постановки задачи распределения ресурсов при планировании предполагается, что каждый из ресурсов может иметь собственные критерии (например, расписание стоимости ресурса, его производительность, сроки, себестоимость, риск и другие), причем их важность может изменяться в ходе выполнения задач.

Для повышения эффективности управления и планирования предлагается использовать мультиагентные технологии, позволяющие автоматизировать процессы разрешения конфликтов и нахождения балансов интересов по использованию ресурсов. Формально задача может быть сформулирована через удовлетворенности агентов заказов и ресурсов.

Производственное предприятие может быть описано через систему холонов (сложных систем) ресурсов и задач: на нижнем уровне ресурсы представлены станками, рабочими центрами, рабочими конкретными специальностями. Заказы на этом уровне – это производственные задания исполнителям. Далее – более крупные холоны: участки, производственные цеха с участками и заказы на уровне цехов с соответствующими межцеховыми связями. На верхнем уровне – производство в целом с кооперацией по смежным производствам. В мультиагентном подходе каждому холону уровня h (предприятия, цеха, рабочего и т. п. и соответствующих заказов) ставятся в соответствие агенты ресурсов и задач, состояние которых описывается через функции удовлетворенности $u^{res\ h}_j$ по критериям i из множества $\{x_i^h\}$ с весом $\alpha^{res\ h}_{ij}$, показывающих, насколько критерии уклоняются от желаемых значений $x_{ij}^{id\ h}$ для данного ресурса j по холону h . Критерии сворачиваются аддитивным способом в единую функцию удовлетворенности. В данной модели целевая функция агентов ресурсов (res) холона на уровне h по удовлетворенности $[0,1]$ зависит от отклонения критериев x_i^h , от значений критериев на предшествующем уровне холона $h-1$ и значений удовлетворенности агентов ресурсов и задач на уровне холонического описания. Аналогично может быть задана функция с весом $\beta^{task\ h}_{mn}$ удовлетворенности заказов (задач) $u^{task\ h}_n$ на хо-

лоне h , в качестве критериев рассматривается множество $\{y_n^h\}$. На уровне холонов ресурсов и задач вводятся приоритеты $\{w_j^{res\ h}\}$ и $\{w_n^{task\ h}\}$ соответственно.

Тогда задача оптимизации плана предприятия сводится к максимизации удовлетворенности агентов ресурсов и задач для холонов уровня $h=1..H$:

$$\begin{aligned} u^h &= u^{res\ h} + u^{task\ h} = \\ &\sum_j w_j^{res\ h} u_j^{res\ h} + \\ &\sum_n w_n^{task\ h} u_n^{task\ h} = \sum_j w_j^{res\ h} \sum_i \alpha_{ij}^{res\ h} f_{ij}^{res\ h} (x_i^h - x_{ij}^{id}, x_i^{h-1}, f_{ij}^{res\ h-1}) + \\ &\sum_n w_n^{task\ h} \sum_m \beta_{mn}^{task\ h} f_{mn}^{task\ h} (y_m^h - y_{mn}^{id}, y_n^{h-1}, f_{mn}^{task\ h-1}); \end{aligned}$$

$$x^{res\ h*} = \max_{x_i^h} (u^{res\ h}); \quad (1)$$

$$y^{task\ h*} = \max_{y_m^h} (u^{task\ h}),$$

где $x^{res\ h*}$ и $y^{task\ h*}$ – оптимальные значения критериев переменных ресурсов и задач для холона уровня h . Для холона нижнего уровня 1 функции компонент удовлетворенности f_{ij} при $h=1$ зависят только от отклонений аргументов:

$$x_i \in D^I, y_m \in D^M \forall i, j, I = Dim(D^I), M = Dim(D^M).$$

Переменные x и y лежат в области критериев ресурсов D^I и D^M заказов, I и K – размерности соответствующих пространств.

Таким образом, задача оптимизации сформулирована для агентов в системе как задача максимизации удовлетворенности (1). Рекурсивность задачи (1) по уровню холонов и нелинейность по зависимостям от решений на предшествующем уровне допускают итерационное решение при помощи «вложенных» сетевых мультиагентных планировщиков, что доказывается экспериментальной реализацией в системах НПК «Разумных решений».

Мультиагентная платформа «Разумных решений»

Важнейшим достоинством мультиагентной технологии в планировании и оптимизации ресурсов является возможность адаптивного построения и исполнения планов, когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только адаптивно корректируется по мере появления событий в реальном времени при необходимости (и при наличии ресурса времени) на сколь угодно длинную цепочку изменений.

Разрабатываемый прототип мультиагентной платформы предназначается для создания адаптивных систем планирования в ресурсах в реальном времени. Платформа будет применяться для таких систем, как планирование производственных ресурсов предприятий, планирование систем поставок, управление системами планирования проектов и аналогичные.

Мультиагентная платформа состоит из редактора начальной сцены, генератора событий, очереди событий с заданием их классов, моментов их появления и поступления в систему, мира агентов (движка системы), базовых классов агентов и протоколов переговоров, визуальных компонент для редактирования параметров агентов и отображения, экспорта и импорта данных, подсистемы логирования и трекинга сообщений и финансовых счетов агентов, а также некоторых вспомогательных компонент.

Мультиагентная платформа включает в себя функциональность основного мультиагентного планировщика, которая может быть модифицирована под новую предметную область. Это особенно важно при выполнении экспериментов с различными моделями сетей потребностей и возможностей.

Таким образом, предложена формализация многокритериальной задачи планирования заказов и ресурсов в сети холонов потребностей и возможностей. Введены целевые функции агентов сети в виде скалярной свертки функций удовлетворенности, показывающие отклонение текущих показателей критериев от предпочитаемых. Поступающие в систему ресурсов задачи, состоящие из связанных подзадач определенной длительности и набора заданных показателей, динамически планируются для выполнения на ресурсах. Агенты задач стремятся повысить свою функцию удовлетворенности путем обмена сообщениями с конкурирующими задачами. Удовлетворенность системы агентов (соответственно, значения показателей стремятся к заданным) увеличивается в процессе функционирования системы.

В предлагаемой парадигме решение любой сложной задачи управления и построения приемлемого квазиоптимального плана (расписания) использования ресурсов предлагается рассматривать как процесс самоорганизации сообщества конкурирующих и кооперирующих программных агентов, представляющих интересы потребностей и возможностей всех участников процессов принятия решений.

Рассмотрена возможность построения мультиагентной платформы для создания прототипов мультиагентных систем планирования.

Заключение

Рассмотрена формальная постановка задачи многокритериальной оптимизации для применения в системах мультиагентного планирования.

С помощью функций удовлетворенности агентов по критериям возможно свести задачу оптимизации к рекурсивной задаче оптимизации в системе холонов сети потребностей и возможностей.

Показывается возможность создания базового инструмента – мультиагентной платформы для решения сложных задач управления ресурсами – специальной программной среды для моделирования коллективных переговоров агентов по согласованию их интересов для достижения заданных целей объединяющего их целого, идущих на уступки в зависимости от складывающейся ситуации, собственных возможностей и потребностей.

Для экспериментальной проверки предлагаемых моделей, методов и средств создается прототип системы и производится его исследование на предмет качества и эффективности, сходимости и устойчивости решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Leung, Y.-T.*, 2004, Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis, CRC Computer and Information Science Series, Chapman & Hall, London.
2. *Shirzadeh Chaleshtari, A., Shadrokh, Sh.*, 2012, 'A Branch and Bound Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources', World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 6, pp. 23-28.
3. *Vos, S.* 2001, "Meta-heuristics: The State of the Art" in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1-23.
4. *Fatos Xhafa, Ajith Abraham*, Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications, Springer Publishing Company, Incorporated. 2008.

5. Gongfa, L., 2011, 'A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem', IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing, pp. 12-22.
6. Xueni, Q., Lau, H., 2010, 'An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem' in Proceedings of the tenth IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisbon, pp. 371-376.
7. Pinedo, M., 2008, Scheduling: Theory, Algorithms, and System, Springer, Berlin.
8. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application // 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). France, Toulouse. 2011. Springer, pp. 5-14.
9. Rzevski, G., Skobelev, P., 2014, Managing complexity, WIT Press, UK-USA, 198 p.
10. Rolf C.R., Kuchcinski, K., 2011, 'Distributed constraint programming with agents', in Proceedings of the second international conference on Adaptive and intelligent systems, Springer-Verlag, Berlin, pp. 320-331.
11. Meisels, Amnon. Distributed Search by Constrained Agents / Amnon Meisels. – Springer . – 2008. – 216 c. – ISBN 978-1-84800-040-7.
12. Petcu, Adrian. A class of Algorithms For Distributed Constraint Optimization / Adrian Petcu. – IOS Press. – 2009. – 304 p. – ISBN 978-1-58603-989-9.
13. Yokoo M. Distributed Constraint Satisfaction: Foundation of Cooperation in Multi-agent Systems Springer . – 2001. – 143 p. – ISBN 978-3-540-67596-9.
14. Bummux B.A., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 162-169.
15. Bummux B.A., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. – 2009. – № 2. – С. 78-87.
16. Vittikh V.A., Larukhin V.B., Tsarev A.V. Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology // V. Marik, J.I. Martinez, P. Skobelev (Eds.): Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013), August 26-28, 2013, Prague, Czech Republic. – HoloMas 2013, LNAI 8062. – P. 13-24, 2013. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013. <http://www.springerlink.com/content/978-3-642-40089-6/>. DOI: 10.1007/978-3-642-40090-2.
17. Самарский научный центр РАН, Институт управления сложными системами РАН, XVII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iccs.ru/cscmp/index.html>.
18. Skobelev, P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.). – Elsevier. – 2015. – pp. 207-230.
19. Mayorov I., Skobelev P. Towards thermodynamics of real timescheduling // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – WIT Press, vol. 10 (2015), Issue 3. – pp. 213-223.
20. Skobelev P., Mayorov I., Kozhevnikov S., Tsarev A., Simonova E. Measuring adaptability of «swarm intelligence» for resource scheduling and optimization in real time // Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015), Lisbon, Portugal, 10-12 January, 2015. – Vol. 2. – SCITEPRESS. – P. 517-522.
21. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 12. – С. 33-46.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2015 г.

PROBLEM STATEMENT OF ADAPTIVE ENTERPRISE RESOURCE PLANNING IN MULTI-AGENT APPROACH

I.V. Mayorov

Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd.
17, Moskovskoye shosse, Samara, 443013, Russia
Business Center "Vertical", office 1201

The problem statement of adaptive multi-criteria enterprise resource planning is considered. The paper demonstrates that one of the reasons for the gap between the expected and actual planning results is constraints of the traditional approaches to enterprise management and production capacity planning. The high labour intensity of the planning process is demonstrated and requirements to systems of efficient resource allocation in real-time mode are specified. The mathematical problem statement of resource allocation while planning is formulated; every resource may have its own criteria (resource cost schedule, productivity, time limits, prime cost, risks, etc.), the importance of the criteria being capable of changing during the task realization. The paper suggests taking the multi-agent approach to the principle of planning system development based on the multi-agent platform of the SEC "Smart Solutions".

Keywords: multi-criteria optimization, multi-agent technology, resource management, dynamical planning, real time.