

УДК 004.4:[658.011.56+338.534]::334.726
DOI: 10.15827/0236-235X.116.005-014

Дата подачи статьи: 10.02.16
2016. Т. 29. № 4. С. 5–14

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ APS ДЛЯ МУЛЬТИНАЦИОНАЛЬНЫХ КОМПАНИЙ

*А.А. Сухобоков, к.т.н., artem.sukhobokov@yandex.ru
(Компания «САП СНГ», Космодамианская наб., 52/2, г. Москва, 115054, Россия);
А.В. Сухобоков, предприниматель, andrey.sukhobokov@optimalmngmnt.com
(Компания «Оптимальное Управление», ул. Фестивальная, 22, корп. 6, г. Москва, 125581, Россия);
Д.С. Лахвич, аспирант, dmitry.lakhvich@optimalmngmnt.com;
И.В. Тихонов, аспирант, ilya.tikhonov@optimalmngmnt.com
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005, Россия)*

Приведена классическая функциональная архитектура систем синхронного планирования (APS). Показано, что применяемые в настоящее время на этапе сводного планирования математические модели и методы линейного математического программирования не позволяют решить ключевую для мультинациональных компаний задачу оптимизации прибыли компании в целом. Рассмотрена история развития математических моделей и методов оптимизации для решения задачи оптимизации прибыли после налогообложения в мультинациональных компаниях. Развитие математических моделей показало, что для оптимизации внутренних цепочек поставок больших мультинациональных компаний необходимо решать задачи оптимизации очень большой размерности, содержащие десятки миллиардов столбцов и строк с билинейными или трилинейными ограничениями. Рассмотрены подходы к распараллеливанию численных алгоритмов решения таких задач. В качестве наиболее перспективного выделен подход, предполагающий использование платформ Big Data для решения задач большой размерности. Определена дополнительная функциональность, которой должны обладать модуль проектирования цепочек поставок, а также модуль планирования спроса, чтобы APS мог эффективно использоваться в мультинациональных компаниях. Определена дополнительная функциональность, которой должны обладать модули управления финансовыми цепочками и модули контроллинга смежной ERP-системы, чтобы APS мог эффективно использоваться в мультинациональных компаниях. Показано, что перспективный APS для мультинациональных компаний должен разрабатываться на основе комплекса из двух технологических платформ – In-Memory и Big Data. Представлена функциональная архитектура APS для мультинациональных компаний в контексте корпоративной системы в целом. Дополнительно на один уровень глубже детализирована архитектура модуля сводного планирования APS, обеспечивающего решение оптимизационной задачи как для одного, так и для конечного числа периодов времени.

Ключевые слова: APS, мультинациональная компания, внутрифирменные цепочки поставок, трансфертные цены, товаропотоки, задача билинейной оптимизации, распараллеливание алгоритмов оптимизации, сводное планирование, архитектура APS, платформы Big Data.

Основным средством оптимизации цепочек поставок являются APS (Advanced Planning System или, в другой трактовке, Advanced Planning & Scheduling systems), поставляемые в составе систем ERP II, SCM-систем или в виде отдельных продуктов. Одна из наиболее уважаемых организаций в области методологии управления предприятиями APICS (American Production and Inventory Control Society) дает определение APS [1], согласно которому эти системы обладают следующим набором свойств:

- осуществляют анализ и планирование логистики и производства на краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные периоды;
- используют развитые математические алгоритмы или логику для оптимизации или моделирования при решении следующих задач: составление расписаний загрузки ограниченных мощностей, подбор поставщиков, планирование инвестиций, планирование загрузки ресурсов, прогнозирование, управление потребностями и пр.;
- одновременно учитывают ряд ограничений и бизнес-правил, позволяющих обеспечить планирование и составление расписаний в реальном вре-

мени, поддержку принятия решений, возможности ATP (available-to-promise) и CTP (capable-to-promise);

- часто генерируют и оценивают множество сценариев, один из которых менеджмент затем использует как «официальный план»;
- включают пять основных компонентов: планирование потребностей, планирование производства, составление расписаний производства, планирование дистрибуции, планирование транспортировки.

В основополагающей монографии [2], которая расширяется и пополняется при каждом очередном издании, приводится обобщенная архитектура APS-системы [3], показанная на рисунке 1.

Теоретически APS могут оптимизировать затраты, прибыль, NPV, NCF, риски, гибкость и устойчивость цепочки поставок, уровень обслуживания клиентов [4]. Однако в реально внедренных системах в подавляющем большинстве случаев осуществляется минимизация затрат на закупку, хранение, транспортировку и производство продукции [5]. В [6] показан редкий случай – внедрение APS в компании SSAB Oxelösund, где в каче-



стве целевого показателя максимизируется прибыль. Максимум прибыли достигается за счет используемого метода планирования сроков выполнения работ по заказам клиентов: чем прибыльнее заказ, тем быстрее он исполняется и меньше стоит в очередях, ожидая выполнения других заказов.

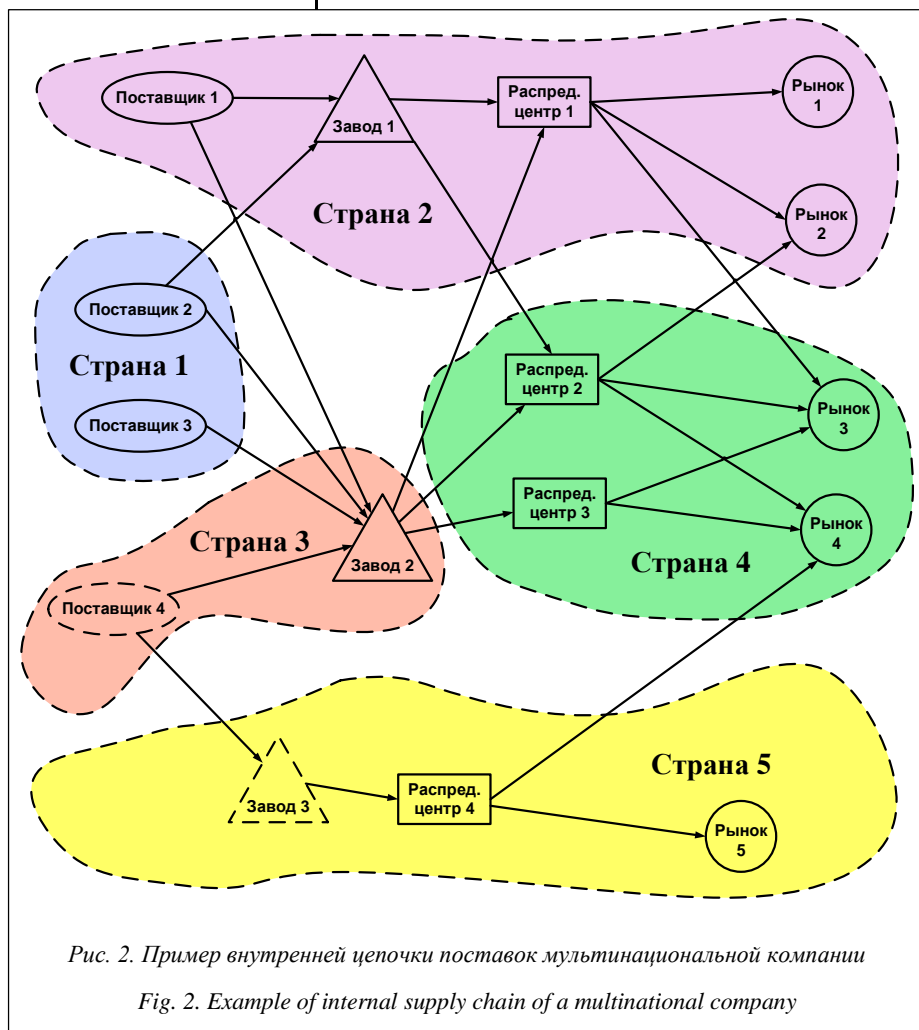
В подавляющем большинстве APS, когда используются строгие методы оптимизации и математические модели, применяются методы линейного программирования и смешанного линейного целочисленного программирования [7]. Существует множество задач, в которых целесообразно применять нелинейные модели и методы нелинейного и смешанного нелинейного целочисленного программирования, но их использование ограничено большой сложностью расчетов и ограниченностью используемых вычислительных ресурсов [7]. Уменьшение сложности используемых математических моделей, использование линейных моделей означают, что оптимизация в этих случаях выполняется по одной группе параметров, например, по объему грузоперевозок, загрузке транспортных или производственных мощностей, длине транспортных маршру-

тов. При этом отсутствуют возможности дополнительной оптимизации за счет варьирования цен, следовательно, имеющиеся возможности оптимизации финансовых показателей являются ограниченными.

Методы нелинейного программирования и смешанного нелинейного целочисленного программирования сейчас в основном применяются только в специализированных решениях для непрерывного

производства (в APS для предприятий нефтеперерабатывающей, химической и других подобных отраслей) [8–10].

В мультинациональных компаниях процесс оптимизации цепочек поставок имеет существенные особенности. Для их понимания на рисунке 2 приведен пример структуры такой компании.



После того как с помощью одного из APS строится логистическая схема, при которой достигается минимум затрат на производство и транспортировку в мультинациональной компании, производится финансовая оптимизация найденной схемы. Для этого используются пакет Global Tax Planning [11] от THOMPSON REUTERS, входящий в состав линейки решений ONESOURCE, другие подобные пакеты или внутренние разработки компаний большой четверки (Deloitte, EY, KPMG, PwC). Суть решаемой задачи состоит в том, чтобы, учитывая особенности налогообложения дочерних компаний, работающих в разных странах, и ограничения, накладываемые налоговыми органами этих стран, максимизировать общую прибыль после налогообложения мультинациональной компании в целом. Оптимизация достигается за счет варьирования трансфертных цен (цен на товары между дочерними компаниями) и перераспределения затрат на транспортировку. Для формирования математической модели используются данные по различным видам постоянных и переменных затрат в дочерних компаниях, ставки множества налогов и пошлин в каждой из стран. Решаемая задача, как и большинство задач оптимизации логистики, является задачей линейного программирования, то есть решается последовательность двух линейных задач.

На самом деле такое последовательное применение линейных моделей не позволяет найти истинный максимум прибыли. Он практически никогда не лежит в той области, где достигается минимум затрат. Чтобы найти этот максимум, надо решить общую оптимизационную задачу, в которой одновременно варьируются планы производства, методы транспортировки и трансфертные цены. В тех случаях, когда задача оптимизации логистики формулируется как задача линейного программирования, общая задача оптимизации прибыли мультинациональной компании будет билинейной – в ее ограничениях будут присутствовать производство цен и товаропотоков между дочерними компаниями. Если же задача оптимизации логистики формулируется как билинейная задача в силу того, что при разных режимах работы оборудования из одного и того же сырья можно получить разное соотношение конечных продуктов (процессы в химии и нефтепереработке), общая задача оптимизации прибыли мультинациональной компании будет трилинейной.

Математические модели и алгоритмы для оптимизации внутренних цепочек поставок мультинациональных компаний

Эволюция развития моделей и алгоритмов. Впервые задача совместной оптимизации цепочек поставок мультинациональной компании за счет варьирования товаропотоков и трансфертных цен была математически сформулирована в 1976 г. в

работе [12]. Для ее решения предложен рекуррентный эвристический алгоритм поиска максимума прибыли, который на каждом шаге изменял набор трансфертных цен и решал линейную задачу поиска оптимальных товаропотоков. Процесс прекращался при остановке роста целевого значения – суммарной общей прибыли компании после налогообложения. Предложенная модель имела ряд ограничений:

- предполагалось, что мультинациональная компания имеет центральный распределительный центр, из которого все продукты транспортируются в дочерние компании;
- в модели отсутствовала возможность определить необходимое количество сырья и комплектующих, используемых при производстве конечных продуктов (Bill of Materials – BOM);
- не учитывалась возможность распределения транспортных расходов: они всегда относились на счет получателя.

В 1989 г. в работе [13] была предложена нелинейная модель смешанного целочисленного динамического программирования, в которой максимизировалась прибыль мультинациональной компании после уплаты налогов. Нелинейность была обусловлена использованием в ней трансфертных цен и переменных, отражающих принятые решения о распределении накладных расходов по заводам. Трансфертная цена каждого продукта формировалась из надбавки и суммы затрат на производство продукции, плюс затраты на транспортировку, включая пошлины. Такой подход является недостатком этой модели, так как в большинстве случаев пошлины зависят от цены перемещаемых товаров, а в работе они рассматриваются как часть стоимости доставки за единицу товара. В качестве алгоритма решения задачи предложен иерархический процесс, на каждой итерации которого решается смешанная задача линейного целочисленного программирования для поиска оптимальных товаропотоков и ищутся оптимальные значения надбавок. Процесс повторяется, пока не будет найден локальный оптимум. Поскольку надбавки не имеют каких-либо ограничений, результирующее решение может приводить к сильному уменьшению налоговых выплат, что, естественно, неприемлемо для налоговых органов.

На базе модели, представленной в [13], в [14] была предложена многопродуктовая модель для одного периода, с помощью которой формализована задача распределения ресурсов для производителей персональных компьютеров. Это первая модель, в которой были введены бинарные переменные для распределения транспортных расходов между поставщиком и потребителем.

В 2001 г. Carlos J. Vidal и Marc Goetschalckx предложили модель управления внутренними цепочками поставок мультинациональной компании, в которой реализована возможность поставки сы-

рья от внешних глобальных поставщиков, учитывается стоимость запасов, предусмотрена возможность распределения транспортных расходов между участниками цепочки поставок [15]. Также предусмотрены различные варианты формирования трансфертных цен (для стран, где по законодательству трансфертные цены формируются исходя из стоимости товаров по контрактам CIF, и для стран, где по законодательству трансфертные цены формируются исходя из стоимости товаров по контрактам FOB). Модель сформулирована как билинейная задача оптимизации с линейной целевой функцией. Для решения задачи авторы предложили эвристику, основная суть которой сводится к решению задачи методом разделения переменных. На каждой итерации сначала фиксируются трансфертные цены и решается задача оптимизации товаропотоков. Потом для найденных значений товаропотоков ищутся оптимальные трансфертные цены. После конечного числа повторений процесс сходится к локальному оптимуму. Поскольку качество локального оптимума сильно зависит от начальной точки, авторы исследовали семь различных вариантов задания начальной точки.

Позднее, в 2013 г., эти же авторы в [16] предложили эвристический алгоритм для решения задачи, сформулированной в [15], суть которого в том, что сначала точным методом решается линейная задача, представляющая собой упрощение первоначальной билинейной задачи, а затем из найденной точки иницируется поиск точного решения билинейной задачи методом ветвей и границ. Предложенный подход обеспечивает сходимость решения к глобальному оптимуму с любой требуемой точностью.

В 2008 г. Tan Miller и Renato de Matta предложили билинейную модель для максимизации глобальной прибыли мультинациональной компании, которая позволяет определить оптимальную стратегию производства для каждого завода, а также оптимальные планы закупок и дистрибуции в сочетании со значениями трансфертных цен [17]. Модель учитывает налоги и курсы обмена валют в каждой стране. Как и в [13], трансфертные цены представляют собой суммы затрат и надбавок, но на размер надбавок наложены ограничения. Особенность этой модели в том, что единицей планирования является страна, а не отдельный завод или центр дистрибуции. Для стран с большими расстояниями, таких как Россия, Китай, США, Канада, учет стоимости транспортировки без привязки к фактическому местоположению завода приводит к очень большим погрешностям. В связи с отсутствием эффективных методов решения билинейных задач большой размерности, чтобы применять модель на практике, авторы предложили несколько допущений и упростили разработанную модель до линейной.

Эти же авторы в 2015 г. предложили решать сформулированную билинейную задачу методом декомпозиции Бендерса, не изменив ключевую особенность детализации своей модели до уровня страны [18].

В 2008 г. S. Perron, P. Hansen, S. Le Digabel и N. Mladenovic предложили в [19] новую формулировку математической модели, представленной в [15]. Они сформулировали модель только для стран, где по законодательству цены формируются исходя из стоимости товаров по контрактам CIF, но предложенный ими подход позволяет примерно на 65 % сократить число произведений переменных в ограничениях, что дает возможность существенно сократить время решения и работать с моделями большей размерности. Также в работе была предложена линейная модель, являющаяся упрощением билинейной. Для решения билинейной задачи в работе были протестированы четыре метода:

- эвристика, предложенная в [15];
- обычный метод локального поиска с чередующимися окрестностями, традиционно применяемый для решения билинейных задач оптимизации (метаэвристика VNS);
- метод локального поиска с чередующимися окрестностями, специально адаптированный для решения задачи оптимизации внутренних цепочек поставок мультинациональных компаний (адаптированная метаэвристика VNS);
- метод ветвей и границ, позволяющий найти строгое решение билинейной оптимизационной задачи.

По результатам тестирования на примерах лучшим оказался специализированный метод локального поиска с чередующимися окрестностями, а точный сильно уступает эвристическим по размерности задач, которые могут быть решены с его помощью.

Представленная в [19] математическая модель была доработана в работе [20] с учетом присутствующих в российской экономике НДС и экспортных пошлин.

В работе [21] высказана идея подхода к построению гибкой математической модели для оптимизации внутренних цепочек поставок, позволяющей учитывать любое необходимое число переделов сырья, возможность продажи и закупки полуфабрикатов у сторонних компаний, наличие произвольного числа эшелонов распределительных центров.

Параллельные алгоритмы. Билинейные задачи, которые требуется решать для оптимизации внутренних цепочек поставок мультинациональных компаний, имеют очень большие размерности. В [21] приведен пример, когда для представления модели необходима матрица, имеющая более 5×10^{10} столбцов и примерно 2×10^{10} строк. Естественным способом решения задач больших размерностей является распараллеливание процесса

решения. Практически для всех рассмотренных ранее в этом разделе эвристических и строгих алгоритмов существуют их параллельные версии. При распараллеливании используются два основных подхода.

Подход 1. Параллельно рассчитывается много вариантов одной и той же задачи с разными исходными данными, а потом результаты этих расчетов сравниваются и выбирается лучший. В качестве примера можно привести распараллеливание метаэвристики поиска с чередующимися окрестностями для решения задач непрерывной и дискретной оптимизации VNS [22], которую в общем виде можно описать так:

- определение последовательности размеров окрестностей и начальной точки;
- циклический поиск локального оптимума, начиная с первого заданного размера окрестности и заданной начальной точки; если в результате локального поиска на очередном шаге будет найдено новое лучшее значение оптимума, использовать на следующем шаге найденную точку оптимума в качестве начальной, в противном случае перейти к поиску на следующем размере окрестностей.

Для повышения эффективности поиска глобального оптимума с помощью чередующихся окрестностей было разработано несколько вариантов [22] параллельного алгоритма VNS (PVNS). Наиболее эффективный из них заключался в наращивании числа решений, выбираемых в текущей окрестности, и в параллельном выполнении локального поиска для каждого из них.

Подход 2. Основная задача преобразовывается и декомпозируется на несколько задач меньшей размерности, которые могут решаться параллельно, а их результаты потом объединяются и позволяют найти решение основной задачи. Такой подход используется как при решении задач линейного программирования методами декомпозиции Бендера или Данцига–Вульфа [23], так и при решении целочисленных задач параллельными методами ветвей и границ или секущих плоскостей [24].

Однако все перечисленные алгоритмы имеют некоторые общие характерные особенности: они ориентированы на распараллеливание не более чем на несколько десятков (иногда сотен) параллельных подпроцессов и требуют интенсивного обмена данными между отдельными подпроцессами в процессе решения задачи. Примером проявления этих свойств является ситуация с распараллеливанием алгоритмов линейной оптимизации в компании SAP [25]. Компания к 2004 г. испытывала потребность в переходе на параллельные алгоритмы решения задач целочисленного линейного программирования из-за имеющей место тенденции роста размерности при оптимизации цепочек поставок. В течение трех лет она проводила исследования по реализации параллельных алгоритмов с помощью

декомпозиции Данцига–Вульфа (выделение блоков в исходных матрицах и параллельное решение задачи для отдельных блоков на разных узлах кластера). Результаты показали, что при увеличении числа параллельно обрабатываемых блоков основной матрицы более, чем до 25–35, дальнейшего увеличения размерности решаемой задачи и скорости решения задачи не происходит.

Появление программных платформ для работы с большими данными и соответствующих вычислительных кластеров предъявляет новые требования к параллельным алгоритмам оптимизации [26]. Программные и аппаратные средства Big Data в своем современном состоянии ориентированы на совершенно другие характеристики кластеров. Число параллельно работающих узлов может составлять десятки и сотни тысяч, но связи между узлами не способны обеспечить интенсивный обмен информацией в процессе обработки данных. Применение кластеров Big Data позволило на порядок снизить стоимость обработки информации по сравнению с суперкомпьютерами, но для эффективного использования таких ресурсов требуются принципиально иные алгоритмы. В [27] предлагается один из вариантов решения билинейной задачи оптимизации на платформе Big Data.

Обсуждение архитектуры будущих APS для оптимизации внутренних цепочек поставок мультинациональных компаний

В первых работах, рассматривавших роль и место системы оптимизации внутренних цепочек поставок мультинациональных компаний в общей корпоративной системе управления [20], предлагалось реализовать отдельный такой модуль и интегрировать его с ERP-системой. В этом случае этот модуль как бы играл роль APS. Однако в процессе обсуждения проблематики потенциальные клиенты выразили заинтересованность не только в решении среднесрочной задачи максимизации прибыли на один период 12–18 месяцев за счет одновременного варьирования планов производства, товаропотоков и трансфертных цен. Не менее важной они посчитали и задачу более детального одновременного планирования производства, товаропотоков и трансфертных цен на несколько (конечное число) периодов. Такая оптимизация позволит учесть прогнозы изменения спроса конечных пользователей, рыночных цен, курсов валют, а также время производства товаров на имеющихся заводах, скорость их транспортировки по различным маршрутам и время обработки в распределительных центрах. Суммарная длительность всех периодов такого варианта планирования может быть несколько меньшей или равной длительности укрупненного среднесрочного планирования на один период.

Как же конкретно необходимо расширить функциональность создаваемых APS и ERP, чтобы успешно использовать методы одновременной оптимизации логистики и трансфертных цен? Все модули APS для мультинациональной компании (в том числе модуль планирования закупок, модуль планирования транспорта, модуль ATP и др.) должны быть реализованы с учетом мультинационального характера оптимизируемых цепочек поставок. Например, при планировании транспорта надо учитывать, что возможно взимание таможенных и других сборов не только за перемещаемые через границу товары, но и за пересечение границы транспортным средством (автомобилем).

Приведем самые важные ключевые требования к APS и другим интегрированным с ним продуктам в составе корпоративной системы мультинациональной компании.

1. В модуле проектирования логистических сетей должна быть предусмотрена возможность описания государств и экономических зон с отличающейся системой налогообложения. В этих описаниях должны быть отражены все виды взимаемых налогов, пошлин и сборов, а также методы расчета их величин. Объекты логистической цепочки (в том числе внешние поставщики и потребители) должны присваиваться одному из описанных государств или выделенной в нем экономической зоне. В связи с тем, что финансовый модуль является одним из центральных компонентов ERP-системы, будет логично, если все необходимые мастер-данные по государствам, экономическим зонам и методам налогообложения будут вводиться там, а в APS будут поступать через интеграционный интерфейс.

2. Функциональность модуля планирования спроса APS должна быть шире, чем просто сбор, прогноз и предоставление данных о предполагаемом спросе. Если продукты производства продаются конечным пользователям по ценам в локальных национальных валютах разных государств, то спрос необходимо прогнозировать в этих национальных валютах. Прогноз динамики курсов валют должен вводиться в управление финансовыми цепочками и быть доступным для разных приложений, в том числе для APS, чтобы оптимизировать показатели мультинациональной компании в целом в валюте корпоративного учета. Еще одним расширением функциональности модуля планирования спроса должны стать функции сбора, прогнозирования и предоставления модулю сводного планирования данных об эластичности спроса – его изменении в зависимости от изменения цен для конечных потребителей. Это позволит планировать объемы производства и сбыта, обеспечивающие максимальную прибыль.

3. В [28] в качестве одного из направлений будущего развития APS указана тесная интеграция APS со средствами контроллинга ERP-системы.

Для APS, обеспечивающего одновременную оптимизацию логистики и трансфертных цен в мультинациональных компаниях, актуальность решения этой проблемы резко повышается. Для определения допустимых значений трансфертных цен методом Cost plus в мультинациональной компании необходима единая система учета затрат, охватывающая все дочерние компании в разных странах, в которой будут учитываться различные нюансы процессов закупки, производства и дистрибуции, в том числе стоимость различных видов приобретаемого сырья и комплектующих, услуги контрагентов, наличие консигнационных и специальных запасов, использование периодических заказов и так далее. В существующих ERP-системах такая система контроллинга сейчас отсутствует. Единственным известным авторам решением такого типа является разрабатываемый компанией IM&C пакет GCP [29, 30], расширяющий возможности SAP ERP. Но он имеет очень ограниченное число внедрений, и компания IM&C расширяет его функциональность, чтобы реализовать оптимизацию трансфертных цен без оптимизации товаропотоков. Для успешной реализации и последующего распространения APS, осуществляющего одновременную оптимизацию трансфертных цен и товаропотоков, необходимо наличие таких компонентов в составе стандартных средств контроллинга ERP-системы.

4. Модули управления финансовыми цепочками обеспечивают корпоративное бюджетирование, управление финансовыми потоками, получение кредитов, взаимодействие с банками, операции на валютных и товарно-сырьевых биржах, на рынках ценных бумаг и деривативов, хеджирование рисков и другие процессы, необходимые для непрерывного функционирования компании. В случае мультинациональной компании взаимное влияние цепочек поставок и финансовых цепочек заметно усиливается. Ставки по кредитам, курсы валют и другие условия влияют на объемы затрат, которые учитываются при планировании цепочек поставок. И, наоборот, реализация тех или иных хозяйственных операций в разных странах влияет на финансовые цепочки. Недостаток синхронизации финансового и бизнес-планирования в APS отмечался еще в [31], однако в существующих системах он так и не устранен. В APS для мультинациональных компаний должен быть реализован механизм синхронизации, позволяющий инициировать перепланирование финансовых цепочек при появлении изменений в цепочках поставок и, наоборот, перепланировать цепочки поставок при появлении изменений в финансовых цепочках.

5. Использование высокопараллельных численных методов на базе технологических платформ Big Data для решения задачи одновременной оптимизации планов производства, товаропотоков и трансфертных цен требует одновременного приме-

нения нескольких технологических платформ, на базе которых будет построен APS для мультинациональных компаний.

В составе модуля сводного планирования такого APS необходимо выделить следующие блоки:

- два блока формирования и работы с математическими моделями (один – для модели с одним периодом времени, другой – с конечным числом периодов времени);
- два блока управления процессом решения оптимизационной задачи (по одному для каждой модели);
- блок численных расчетов.

Блок формирования математической модели в [21] предложено разрабатывать на базе In-Memory платформы SAP HANA. Выбор платформы In-Memory действительно целесообразен, поскольку модель содержит достаточно большой объем данных. Ее надо сформировать за какое-то разумное время, а процесс формирования предпо-

лагает получение большей части данных по интеграционным интерфейсам из ERP-системы мелкими порциями с помощью множества отдельных запросов. Рассчитанный в [21] максимальный объем данных модели составляет 3,2 EB. Эта оценка завышена на несколько порядков из-за того, что для больших моделей использован коэффициент заполненности разреженных матриц, характерный для малых моделей. Тем не менее объем больших моделей может измеряться в терабайтах. Использование платформы In-Memory позволит относительно быстро сформировать данные такого объема. Если в перспективе (как, например, планирует SAP) ERP и APS будут полностью перенесены на платформу In-Memory, оба блока формирования математических моделей для APS мультинациональных компаний не будут требовать реализации на отдельной платформе.

Блоки управления процессом решения оптимизационной задачи осуществляют процесс загрузки

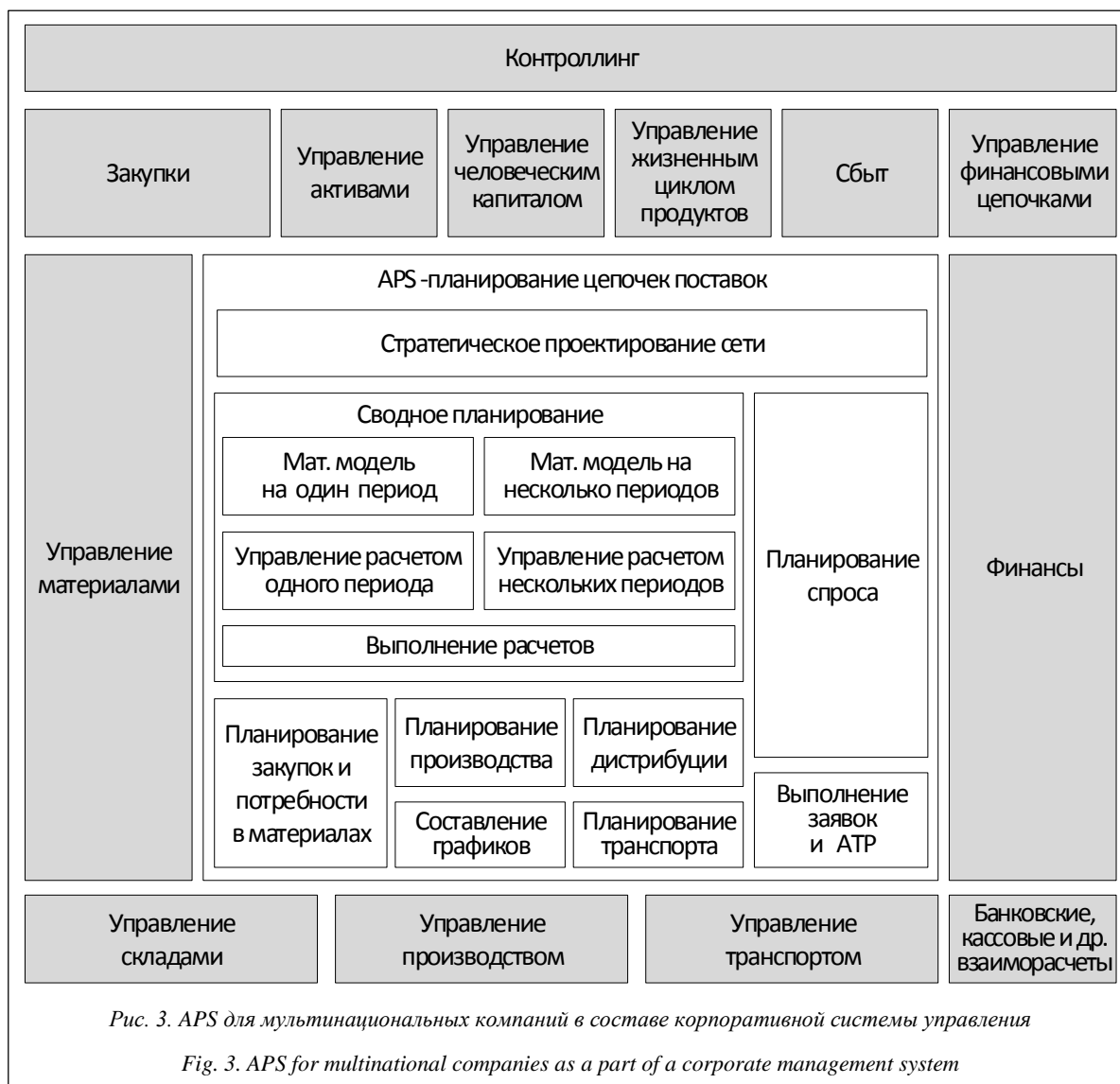


Рис. 3. APS для мультинациональных компаний в составе корпоративной системы управления

Fig. 3. APS for multinational companies as a part of a corporate management system

в Nadoor или Spark одной или последовательности из нескольких математических моделей, интерпретируют результаты выполнения каждого отдельного расчета на платформе Big Data и обеспечивают возврат окончательных итоговых результатов в корпоративную систему управления.

Для компаний, имеющих сложную внутреннюю логистическую структуру, может потребоваться использовать в блоке численных расчетов кластер, содержащий несколько десятков тысяч серверов. Это сразу заставляет при проектировании такого блока ориентироваться на использование облачной инфраструктуры, предоставляемой внешними провайдерами. В менее сложных случаях облако может быть гибридным или частным: часть серверов используемого кластера (или все) могут быть взяты из собственной ИТ-инфраструктуры компании.

Архитектура APS для мультинациональной компании характеризуется большим числом информационных связей между APS и другими модулями корпоративной системы [20]. Чтобы не перегружать концептуальное представление архитектуры, авторы воспользовались минималистским подходом, примененным в [3]. Это позволило представить APS для мультинациональной компании в контексте корпоративной системы в целом и одновременно детализировать модуль сводного планирования (рис. 3). Модули вне APS, структура которых не раскрыта, выделены на рисунке серым цветом.

При проектировании будущих APS для мультинациональных компаний должны учитываться как конкретные требования 1–5, представленные выше, так и требования по функциональному взаимодействию с каждым из смежных модулей корпоративной системы, представленных на рисунке 3. Такой комплексный подход позволит разработать APS, способные существенно повысить эффективность работы мультинациональных компаний.

Число мультинациональных компаний в мире постепенно увеличивается за счет того, что все больше средних и даже мелких компаний из разных стран выходят на зарубежные рынки, создают дочерние компании в других государствах, чтобы теснее взаимодействовать со своими поставщиками и потребителями. Эта тенденция, а также связанное с ней постепенное увеличение роли мультинациональных компаний в глобальной экономике являются сильным стимулом для практической реализации сформулированных требований и воплощения предложенных решений.

Литература

1. Blackstone J.H. Jr. (Ed.), APICS Dictionary. 13th ed., APICS Publ., 2011, 164 p.
2. Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies. 5th ed. H. Stadtler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, 572 p.

3. Meyr H., Wagner M., Rohde J. Structure of advanced planning systems. Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies. 5th ed. H. Stadtler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 99–106.
4. Fleischmann B., Koberstein A. Strategic network design. Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies. 5th ed. H. Stadtler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 107–123.
5. Ivert L.K. Use of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems to support manufacturing planning and control processes. PhD thesis. Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden, 2012, 111 p. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/162616/162616.pdf> (дата обращения: 27.01.2016).
6. Jonsson P., Kjellsdotter L., Rudberg M. Applying advanced planning systems for supply chain planning: three case studies. Int. Jour. of Physical Distribution & Logistics Management. 2007, vol. 37, iss. 10, pp. 816–834.
7. Kallrath J., Maindl T.I. Real Optimization with SAP® APO. Springer, Berlin, Heidelberg, NY, 2006, 340 p.
8. Lasschuit W., Thijssen N. Supporting supply chain planning and scheduling decisions in the oil and chemical industry. Comp. and Chem. Eng. 2004, no. 28, pp. 863–870. URL: <http://cite.seerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.6859&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 27.01.2016).
9. Al-Qahtani K.Y., Elkamel A. Planning and Integration of Refinery and Petrochemical Operations. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Germany, 2010, 209 p.
10. Lebreton B., Meyr H., Rosiè H., Seipl C., Wetterauer U. Architecture of selected APS. Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies. 5th ed. H. Stadtler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 341–361.
11. Global Tax Planning. 2013, 2 p. URL: <https://tax.thomsonreuters.com/wp-content/pdf/global-tax/GlobalTaxPlanning.pdf> (дата обращения: 27.01.2016).
12. Nieckels L. Transfer Pricing in Multinational Firms: A Heuristic Programming Approach and a Case Study. NY, John Wiley Publ., 1976, 202 p.
13. Cohen M.A., Fisher M., Jaikumar R. International manufacturing and distribution networks: a normative model framework. Managing International Manufacturing. K. Ferdows (Ed.). North-Holland, Amsterdam, 1989, pp. 67–93.
14. Cohen M.A., Lee H.L. Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks. Jour. of Manufacturing Operations Management. 1989, no. 2, pp. 81–104.
15. Vidal C.J., Goetschalckx M. A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. European Jour. of Operational Research. 2001, no. 129, pp. 134–158.
16. Vidal Holguin C.J., Goetschalckx M. A solution to the transfer pricing problem by successively reducing the duality gap. Heuristica. 2008, vol. 15, pp. 107–131.
17. Miller T., de Matta R. A global supply chain profit maximization and transfer pricing model. Jour. of Business Logistics. 2008, vol. 1, no. 29, pp. 175–199.
18. de Matta R., Miller T. Formation of a strategic manufacturing and distribution network with transfer prices. European Jour. of Operational Research. 2015, vol. 241, iss. 2, pp. 435–448.
19. Perron S., Hansen P., Le Digabel S., Mladenovic N. Transfer Pricing in a Global Supply Chain. GERAD, February 17, 2008, 31 p.
20. Сухобоков А.А. Исследование и разработка моделей и архитектуры средств контроллинга для межрегиональных предприятий в составе систем класса ERP II: дисс. ... канд. техн. наук, М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. 196 с.
21. Tikhonov I. Using Big Data for the optimization of internal supply chains of multinational companies. Cloud of Science. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 419–429. URL: https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_419.pdf (дата обращения: 27.01.2016).
22. Кочетов Ю.А., Младенович Н., Хансен П. Локальный поиск с чередующимися окрестностями // Дискретный анализ и исследование операций. 2003. Т. 10. № 1. С. 11–43.
23. Кривоножко В.Е. Развитие конечных методов решения

задач оптимизации. Декомпозиционный подход: дисс. ... д.ф.-м.н. М.: ИСА РАН, 1996. 273 с.

24. Хохлюк В.И. Параллельные алгоритмы целочисленной оптимизации. 2007. 140 с. URL: <http://math.nsc.ru/LBRT/u1/hohl/book.pdf> (дата обращения: 27.01.2016).

25. Brown H., Schumm C. Parallelization of SAP SCM optimizer using grid computing. Proc. Conf. Supply Network and Logistics Management. SAP Univ. Publ., St. Leon-Rot, 2007.

26. Сухобоков А.А., Лаквич Д.С. Влияние инструментария Big Data на развитие научных дисциплин, связанных с моделированием // Наука и образование. 2015. № 3. С. 207–240. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/761354.html> (дата обращения: 27.01.2016).

27. Lakhvich D. Supply chains and transfer prices optimization using Apache Hadoop infrastructure and IBM ILOG CPLEX solver. Cloud of Science. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 430–436. URL: https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_430.pdf (дата обращения: 27.01.2016).

28. Stadler H., Kilger C., Meyr H. Conclusions and Outlook. Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts,

Models, Software, and Case Studies. 5th ed.: H. Stadler, C. Kilger, H. Meyr (eds). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 501–509.

29. Wurm F. Planning and Controlling Consolidated Earnings based on Consolidated Cost of Goods Manufactured. Controlling, iss. 5, June 2005, Version 1.0-15.11.05, IM&C GmbH, 19 p. URL: http://www.im-c.net/fileadmin/imc/daten/Financial_Management_GCP/artikel_original_EN.pdf (дата обращения: 27.01.2016).

30. Presentation GCP Engine for Corporate Controlling. IM&C, 2011. 47 p. URL: http://www.im-c.net/fileadmin/imc/daten/Financial_Management_GCP/Supply_Value_Chain_EN.pdf (дата обращения: 27.01.2016).

31. Gruat-La-Forme F.A., Botta-Genoulaz V., Campagne J.-P., Millet P.-A. Advanced planning and scheduling system: an overview of gaps and potential sample solutions. Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering and Systems Management. 2005, Marrakech, Morocco, 2005, pp. 683–695. URL: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00395107/document> (дата обращения: 27.01.2016).

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.116.005-014

Received 10.02.16

2016, vol. 29, no. 4, pp. 5–14

APS FOR MULTINATIONAL COMPANIES: PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

A.A. Sukhobokov¹, Ph.D. (Engineering), artem.sukhobokov@yandex.ru

A.V. Sukhobokov², Cofounder, andrey.sukhobokov@optimalmngmnt.com

D.S. Lakhvich³, Postgraduate Student, dmitry.lakhvich@optimalmngmnt.com

I.V. Tikhonov³, Postgraduate Student, ilya.tikhonov@optimalmngmnt.com

¹ SAP CIS, Kosmodamianskaya Emb. 52/2, Moscow, 115054, Russian Federation

² Optimal Management, LLC, Festivalnaya St. 22/6, Moscow, 125581, Russian Federation

³ Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya St. 5, Moscow, 105005, Russian Federation

Abstract. The article presents the common architecture of the Advanced Planning System (APS). It shows that mathematical models and methods of linear programming, which are now applied for the master planning, are not able to solve a key problem of profit optimization for multinational companies. The paper also considers the evolution of mathematic models and methods used for optimizing profit after the tax in multinational companies. In current situation in order to optimize the supply chain of big multinational companies it is necessary to solve a problem of great dimensionality, because data matrices contain dozens of billions columns and lines and have bilinear and trilinear constraints. Approaches to parallelization of numeral algorithms for this problem are also under consideration. The main stress is on a most prospective approach which uses Big Data platforms for solving great dimensionality problems. Hereafter, the article defines the additional functionality of a supply chain design module and a demand planning module, so that APS could be of use in multinational companies. The authors also define the additional functionality of financial supply chain management modules and of neighboring ERP-system's controlling modules. It is shown that prospective APS for multinational companies should be developed on the basis of a complex of two integrated technology platforms: the In-Memory platform and the Big Data platform. The functional architecture of APS for multinational companies is presented in the context of the general enterprise management system as a whole. In addition, the architecture of APS master planning module is detailed one level deeper. It solves optimization problems for one time period, as well as for a finite number of time periods.

Keywords: APS, multinational company, intercompany Supply Chains, transfer prices, goods traffic, bilinear optimization problem, parallelization of optimization algorithms, Master Planning, APS architecture, Big Data platforms.

References

1. Blackstone J.H. Jr. (Ed.), *APICS Dictionary*. 13th ed., APICS Publ., 2011, 164 p.
2. *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. 5th ed. H. Stadler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, 572 p.
3. Meyr H., Wagner M., Rohde J. Structure of advanced planning systems. *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. 5th ed. H. Stadler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 99–106.
4. Fleischmann B., Koberstein A. Strategic network design. *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. 5th ed. H. Stadler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 107–123.

5. Ivert L.K. *Use of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems to support manufacturing planning and control processes*. PhD thesis. Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden, 2012, 111 p. Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/162616/162616.pdf> (accessed January 27, 2016).
6. Jonsson P., Kjellsdotter L., Rudberg M. Applying advanced planning systems for supply chain planning: three case studies. *Int. Jour. of Physical Distribution & Logistics Management*. 2007, vol. 37, iss. 10, pp. 816–834.
7. Kallrath J., Maindl T.I. *Real Optimization with SAP® APO*. Springer, Berlin, Heidelberg, NY, 2006, 340 p.
8. Lasschuit W., Thijssen N. Supporting supply chain planning and scheduling decisions in the oil and chemical industry. *Comp. and Chem. Eng.* 2004, no. 28, pp. 863–870. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.6859&rep=rep1&type=pdf> (accessed January 27, 2016).
9. Al-Qahtani K.Y., Elkamel A. *Planning and Integration of Refinery and Petrochemical Operations*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Germany, 2010, 209 p.
10. Lebreton B., Meyr H., Rosič H., Seipl C., Wetterauer U. Architecture of selected APS. *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. 5th ed. H. Stadtler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 341–361.
11. *Global Tax Planning*. 2013, 2 p. Available at: <https://tax.thomsonreuters.com/wp-content/pdf/global-tax/GlobalTaxPlanning.pdf> (accessed January 27, 2016).
12. Nieckels L. *Transfer Pricing in Multinational Firms: A Heuristic Programming Approach and a Case Study*. NY, John Wiley Publ., 1976, 202 p.
13. Cohen M.A., Fisher M., Jaikumar R. International manufacturing and distribution networks: a normative model framework. *Managing International Manufacturing*. K. Ferdows (Ed.). North-Holland, Amsterdam, 1989, pp. 67–93.
14. Cohen M.A., Lee H.L. Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks. *Jour. of Manufacturing Operations Management*. 1989, no. 2, pp. 81–104.
15. Vidal C.J., Goetschalckx M. A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. *European Jour. of Operational Research*. 2001, no. 129, pp. 134–158.
16. Vidal Holguin C.J., Goetschalckx M. A solution to the transfer pricing problem by successively reducing the duality gap. *Heuristica*. 2008, vol. 15, pp. 107–131.
17. Miller T., de Matta R. A global supply chain profit maximization and transfer pricing model. *Jour. of Business Logistics*. 2008, vol. 1, no. 29, pp. 175–199.
18. de Matta R., Miller T. Formation of a strategic manufacturing and distribution network with transfer prices. *European Jour. of Operational Research*. 2015, vol. 241, iss. 2, pp. 435–448.
19. Perron S., Hansen P., Le Digabel S., Mladenovic N. *Transfer Pricing in a Global Supply Chain*. GERAD, February 17, 2008, 31 p.
20. Sukhobokov A.A. *Issledovanie i razrabotka modeley i arkhitektury sredstv kontrollinga dlya mezhregionalnykh predpriyatiy v sostave sistem klassa ERP II* [Research and Development of Models and Architecture for Controlling Methods used for Multiregional Companies as a part of ERP II Systems]. PhD thesis, 2009, 196 p. (in Russ.).
21. Tikhonov I. Using Big Data for the optimization of internal supply chains of multinational companies. *Cloud of Science*. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 419–429. Available at: https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_419.pdf (accessed January 27, 2016).
22. Kochetov Yu.A., Mladenovich N., Hansen P. Local search with alternating neighborhoods. *Diskretny analiz i issledovanie operatsy* [Discrete Analysis and Operations Research]. 2003, vol. 10, no. 1, pp. 11–43 (in Russ.).
23. Krivonozhko V.E. *Razvitiye konechnykh metodov resheniya zadach optimizatsii. Dekompozitsionny podkhod* [Development of Finite Methods for Solving Optimization Problems Using Decomposition]. PhD thesis. ISA RAS, 1996 (in Russ.).
24. Khokhlyuk V.I. *Parallelnye algoritmy tselochislennoy optimizatsii* [Parallel Algorithms for Integer Optimization]. 2007, 140 p. Available at: <http://math.nsc.ru/LBRT/u1/hohl/book.pdf> (accessed January 27, 2016) (in Russ.).
25. Brown H., Schumm C. Parallelization of SAP SCM optimizer using grid computing. *Proc. Conf. Supply Network and Logistics Management*. 2007, SAP Univ. Publ., St. Leon-Rot, 2007.
26. Sukhobokov A.A., Lakhvich D.S. Big Data tools influence on the development of simulation scientific disciplines. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2015, no. 3, pp. 207–240. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/761354.html> (accessed January 27, 2016) (in Russ.).
27. Lakhvich D. Supply chains and transfer prices optimization using Apache Hadoop infrastructure and IBM ILOG CPLEX solver. *Cloud of Science*. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 430–436. Available at: https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_430.pdf (accessed January 27, 2016).
28. Stadtler H., Kilger C., Meyr H. Conclusions and Outlook. *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies*. 5th ed.: H. Stadtler, C. Kilger, H. Meyr (eds.). Springer, Heidelberg, NY, Dordrecht, London, 2015, pp. 501–509.
29. Wurm F. Planning and Controlling Consolidated Earnings based on Consolidated Cost of Goods Manufactured. *Controlling*, iss. 5, June 2005, Version 1.0-15.11.05, IM&C GmbH, 19 p. URL: http://www.im-c.net/fileadmin/imc/daten/Financial_Management_GCP/artikel_original_EN.pdf (accessed January 27, 2016).
30. *Presentation GCP Engine for Corporate Controlling*. IM&C, 2011, 47 p. Available at: http://www.im-c.net/fileadmin/imc/daten/Financial_Management_GCP/Supply_Value_Chain_EN.pdf (accessed January 27, 2016).
31. Gruat-La-Forme F.A., Botta-Genoulaz V., Campagne J.-P., Millet P.-A. Advanced planning and scheduling system: an overview of gaps and potential sample solutions. *Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering and Systems Management*. 2005, Marrakech, Morocco 2005, pp. 683–695. Available at: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00395107/document> (accessed January 27, 2016).