

АНТОН ИГОРЕВИЧ ШАБАЕВ

кандидат технических наук, директор Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ashabaev@petrsu.ru

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuznetcv@mail.ru

МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ СПИРИЧЕВ

программист Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
MaxSpirichev@gmail.com

ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ КОСИЦЫН

кандидат технических наук, заместитель директора Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kositsyn@petrsu.ru

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ СКВОЗНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ*

Представлен подход к созданию новой автоматизированной системы оптимального планирования «Лесопереработка» для повышения эффективности управления сквозными процессами использования древесины от леса до конечной продукции.

Ключевые слова: управление производством, лесопромышленный комплекс, методы оптимизации, исследование операций

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) – один из важнейших секторов экономики России. Россия занимает 1-е место в мире по площади лесов и 2-е – по запасам древесины [2]. Лесные богатства России позволяют ей стать крупнейшим производителем продукции ЛПК в мире, однако на ее долю приходится всего 2 % мирового производства бумаги и картона (14-е место в мире на 2009 год [4]). При этом Финляндия, располагающая лишь 0,5 % мировых лесных ресурсов, является 5-м в мире крупнейшим производителем бумаги и картона и 7-м – лесопильной продукции.

В настоящее время одной из тенденций в добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности (в том числе ЛПК, ЦБП и пр.) является создание территориально распределенных многоуровневых холдингов, включающих в себя от 3 до 30 (и даже более) предприятий (то есть общее количество предприятий составляет более 500) и осуществляющих полный цикл производства: заготовку сырья, его комплексную переработку с получением готовой продукции и транспортировку потребителям. Это позволяет (а иногда вынуждает) решать задачу выполнения одного крупного заказа несколькими (в том числе территориально удаленными друг от друга) предприятиями холдинга.

Примерами таких распределенных холдинговых структур в отраслях ЦБП и ЛПК России являются ЗАО «Инвестлеспром», ОАО «Группа Илим», ОАО «SFT Group» и др. Например, у ЗАО «Инвестлеспром» территориальные управления расположены в Москве, Вологде и Петрозаводске, а предприятия – в Республике Карелия, Кировской, Вологодской, Архангельской, Томской областях, Пермском крае, а также в 11 странах мира. У ОАО «Группа Илим» центральный офис расположен в Санкт-Петербурге, предприятия – в Архангельской и Иркутской областях, а также имеется централизованное сервисное предприятие («Финтранс»), оказывающее логистические и транспортные услуги в Ленинградской, Архангельской и Иркутской областях.

Среди зарубежных компаний ЛПК можно привести в качестве примера холдинг UPM Kymmene (Финляндия). Объем продаж холдинга в 2011 году превысил 10 млрд евро, более 45 его производственных предприятий расположены в 16 странах и сгруппированы в 9 бизнес-линий, включая централизованную службу лесоснабжения. Также среди компаний дальнего зарубежья можно упомянуть Abitibi-Bowater, West Fraser, Canfor (Канада), Weyerhaeuser (США) и многие другие.

ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Предприятия в составе вертикально-интегрированного операционного лесопромышленного холдинга, как правило, создают стоимость по цепочке «лес → древесина → целлюлоза → бумага → продукция», требуют высокого уровня интеграции и должны быть мотивированы на повышение прибыли по всей этой цепочке. Схема процессов использования древесины представлена на рис. 1 [6].

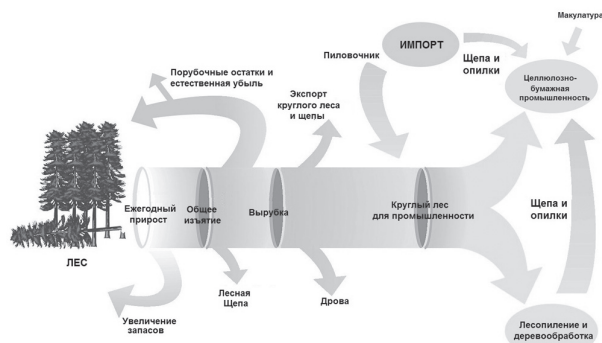


Рис. 1. Сквозная схема процессов использования древесины

Структура активов лесопромышленного холдинга:

- Лесозаготовительные (валка и первичная транспортировка). Основная продукция – «сырая» древесина. Интересны только в том случае, если связаны с поставками на предприятия холдинга.
- Лесопильные и деревообрабатывающие. Сырье – круглая древесина (пиловочник). Основная продукция – пиломатериалы и многое другое (фанера, плиты, мебель и т. д.). Сопутствующие виды продукции включают технологическую и энергетическую щепу и опилки. Активы интересны только в привязке к другим цепочкам создания стоимости, где за счет более высокого передела создается добавленная стоимость.
- Целлюлозно-бумажные. Сырье – круглая древесина, щепы. Основная продукция – целлюлоза, бумага, картон и многое другое.
- Производство упаковки, мешков и прочей продукции. Сырье – картон собственного или внешнего производства.

Примерная структура активов лесопромышленного холдинга изображена на рис. 2.



Рис. 2. Примерная структура активов лесопромышленного холдинга

Большое количество вовлеченных предприятий приводит к необходимости разработки процессов и процедур поиска решений «на стыках» во избежание внутренних конфликтов между продавцами и потребителями леса внутри холдинга, в том числе процессов:

- сквозного планирования цепочки поставок и интегрированного управления логистическими потоками внутри холдинга;
- закрепления решения задач взаимодействия между дивизионами в целях повышения EBITDA цепочки «лес → бумага → продукция» в регламентах и системе мотивации;
- рассмотрения заводов не как отдельных бизнесов, а как производственных элементов общей цепочки создания стоимости;
- оперативного учета данных о состоянии и параметрах производственного оборудования.

Необходимо выделить следующие задачи:

- Исследование лесосырьевой базы в целях определения номенклатуры и объемов заготовки и потребления лесосырья с учетом возможностей продажи части лесосырья определенного вида и качества непосредственно на лесосеке или его закупки у внешних поставщиков. Цель ее решения – расчеты оптимальных объемных показателей для каждой лесосеки и лесозаготовительного предприятия в целом (объемов заготовки, поставки, перевозки, внешних продаж) с целью минимизации суммарных затрат.
- Специализация предприятий холдинга и формирование номенклатуры продукции. Цель решения – определить для каждого предприятия номенклатуру наиболее подходящей продукции и используемые технологии, чтобы снизить себестоимость продукции, более эффективно использовать производственное оборудование, повысить качество продукции для максимизации общего экономического эффекта.
- Задача оптимального развития (реконструкции) предприятий и производственной инфраструктуры с учетом стратегии развития и специализации предприятий. Цель решения – оптимизация экономического эффекта холдинга от капиталовложений в развитие инфраструктуры, лесозаготовительной и иной производственной базы.
- Задача оптимального распределения операций по переработке и транспортировке лесосырья и продуктов его переработки (переделов) различного уровня в рамках цепочки «лес → древесина → целлюлоза → бумага → продукция». Цель решения – минимизация транспортно-производственных затрат предприятий холдинга для выработки всей требуемой продукции.
- Совместное решение задач производства и транспортировки продукции. Цель – составление плана производства продукции группой

предприятий и транспортировки сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

- Задача управления запасами лесосырья и продуктов, а также транспортными потоками с учетом сезонности и спроса на продукцию. Цель решения – оптимальное управление логистикой в рамках холдинга. Себестоимость лесозаготовок в течение года может различаться до 25 %.

В целом теоретической и методологической основой решения задач планирования и управления производственными процессами являются достаточно хорошо известные методы исследования операций и математического программирования [5], [7], [8], однако «классические» задачи редко встречаются в чистом виде. Прикладные задачи существенно усложняются необходимостью учета дополнительных требований и факторов, в том числе:

- Учет стохастических факторов и элементов неопределенности, обусловленных неполнотой или возможными искажениями нормативной и оперативной информации. К примеру, лесозаготовка и транспортировка лесосырья существенно зависят от сезона и погодных условий.
- Многоцелевой характер задач планирования и управления.
- Учет большого количества альтернативных технологий переработки древесины в целях выбора согласованных режимов переработки лесосырья, обеспечивающих минимальные потери материала.
- Требование комплектности производства некоторых видов продукции, то есть пропорциональности объемов их производства, с поправкой на имеющиеся запасы по каждому виду.
- Неделимость и целочисленность производства некоторых видов лесопроductии и расходования лесосырья.
- Дискретность в выборе номенклатуры и текущих объемов выработки продукции, суть которой заключается в принятии решения либо не производить лесопроductию определенного вида, либо производить ее в объеме, не меньшем установленной нижней границы.
- Учет большого количества самых разных технологических особенностей лесопереработки. Например, чтобы заказ не находился на границе раскроя, он выпускался на определенном агрегате, чтобы шел парной доской, исключал сердцевину бревна и т. д.
- Возможность частичной взаимозамены лесосырья и лесопроductии различного вида, к примеру, замены части шпонов или переработки фанеры с неудачными внешними слоями в ламинат.
- Степень загрузки и состояние оборудования.

Для решения задач с указанными дополнительными требованиями необходимы спе-

циальные средства преобразования решений, полученных методами линейного программирования. Нередко объем вычислений, связанных с подобными преобразованиями, существенно выше, чем при решении основной задачи. Расширение объекта планирования при переходе от одного предприятия к группе (холдингу и т. д.) приводит к необходимости решения дискретных линейных и нелинейных задач сложной структуры и большой размерности, что требует исследования и разработки схем декомпозиции возникающих оптимизационных задач.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Сформулируем основную математическую задачу. Пусть $p \in P$ – множество территориально распределенных производственных звеньев (предприятий). Каждое производственное звено $p \in P$ может организовывать собственную работу в соответствии с производственным заданием холдинга в целом.

Обозначим $N_p \subset N$ – подмножество технологических операций (технологий), выполняемых производственным звеном с индексом $p \in P$; их объединение обозначим $N = \bigcup_{p \in P} N_p$, множества N_p будем считать непересекающимися для различных $p \in P$. Поскольку решение производственной задачи может быть связано с использованием различных технологий, основные управляющие факторы – интенсивности использования соответствующих технологий, которым сопоставим переменные x_j ($j \in N$). Эти переменные ограничены сверху неотрицательными величинами d_j , а их совокупность в силу ряда производственных условий содержится в некотором множестве Ω_p . Затраты, связанные с использованием технологий, отражает функционал $F_p(x[N_p]): \Omega_p \rightarrow \mathbb{R}^1$.

Кроме собственных ресурсов производственная программа различных звеньев $p \in P$ может включать обработку множества S внешних ингредиентов (переделов) технологической системы. Типичные примеры ресурса $s \in S$ – баланс, щепа, целлюлоза, картон. Предполагается, что каждый ингредиент $s \in S$ связан по меньшей мере с двумя производственными звеньями.

Интенсивности технологий производства $p \in P$ определяют объемы выработки и потребления ресурсов $\omega_p[S] = (\omega_p^1, \omega_p^2, \dots, \omega_p^{|S|})$, что отражает оператор: $G_p(x[N_p]): \Omega_p \rightarrow \mathbb{R}^{|S|}$, то есть $\omega_p[S] = G_p(x[N_p])$. Отметим, что $\omega_p[S] \geq 0$ – для пункта производства p продукта s , $\omega_p[S] \leq 0$ – для пункта потребления p продукта s , $\omega_p[S] = 0$ – если производство p не связано с потреблением или выработкой продукта s .

Для пункта $p \in P$ будем считать объемы внешней выработки и потребления ресурса s равными z_p^s и ограниченными сверху и снизу значениями $H_p^s \geq h_p^s$ ($p \in P, s \in S$). Значения H_p^s и h_p^s могут быть близки или даже равны нулю для

производственного передела $s \in S$; положительны, если s – индекс вырабатываемой продукции для пункта p , и отрицательны, если s – некоторый внешний (ввозимый) ресурс для пункта p . Стоимость ресурса s в пункте p обозначим c_p^s ($p \in P, s \in S$).

В силу пространственной распределенности потоки материальных ресурсов являются транспортными потоками y_{pq}^s ($p, q \in P, s \in S$). Эти потоки неотрицательны, затраты, связанные с транспортировкой ресурсов, будем считать линейными и пропорциональными значениям σ_{pq}^s при $p, q \in P, s \in S$.

Построим целевую функцию:

- $\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_p^s z_p^s$ – суммарная прибыль и затраты, связанные с внешней выработкой и потреблением ресурсов,
 - $\sum_{p \in P} F_p(x[N_p])$ – суммарные затраты, связанные с производством,
 - $\sum_{s \in S} \sum_{p, q \in P} y_{pq}^s \sigma_{pq}^s$ – суммарные затраты, связанные с транспортировкой ресурсов,
- получим суммарную прибыль

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_p^s z_p^s - \sum_{p \in P} F_p(x[N_p]) - \sum_{s \in S} \sum_{p, q \in P} y_{pq}^s \sigma_{pq}^s.$$

Построим ограничение на баланс ресурса s в пункте p :

- $\omega_p[s_j]$ – объемы выработки и потребления ресурса,
 - z_p^s – объемы внешней выработки и потребления ресурса,
 - $\sum_{q \in P} y_{qp}^s$ – суммарный объем привезенного ресурса из других пунктов,
 - $\sum_{q \in P} y_{pq}^s$ – суммарный объем вывезенного ресурса в другие пункты,
- получим $\omega_p[s_j] - z_p^s + \sum_{q \in P} y_{qp}^s - \sum_{q \in P} y_{pq}^s = 0$.

Добавим ограничения на интенсивность производства $x[N_p] \in \Omega_p$, ограничения на объемы внешней выработки и потребления ресурса $h_p^s \leq z_p^s \leq H_p^s$, неотрицательность транспортных потоков $y_{pq}^s \geq 0$.

Таким образом получим задачу следующего вида:

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_p^s z_p^s - \sum_{p \in P} F_p(x[N_p]) - \sum_{s \in S} \sum_{p, q \in P} y_{pq}^s \sigma_{pq}^s \rightarrow \max$$

$$\omega_p[s_j] - z_p^s + \sum_{q \in P} y_{qp}^s - \sum_{q \in P} y_{pq}^s = 0, \forall p \in P, s \in S,$$

$$x[N_p] \in \Omega_p, \forall p \in P$$

$$h_p^s \leq z_p^s \leq H_p^s,$$

$$y_{pq}^s \geq 0, \forall p, q \in P, s \in S.$$

ИМЕЮЩИЙСЯ ЗАДЕЛ

Следует отметить, что в Петрозаводском государственном университете под нашим руководством и при

нашем непосредственном участии уже проводились исследования, нацеленные на решение частных задач, и осуществлялись разработки, ориентированные на внедрение программных систем на предприятиях ЦБП и ЛПК [1], [3]. Имеются отраслевые свидетельства о регистрации программных систем для решения отдельных задач оптимального планирования и управления производственными процессами предприятий.

В частности, был разработан модуль UPS Solver («универсальный решатель»). В его составе реализован так называемый «матричный конструктор», главная цель которого – построение структуры данных для хранения матрицы ограничений в прикладных задачах оптимизации. Матричный конструктор позволяет удобно и корректно формировать матрицу ограничений с учетом ее блочной структуры, а также эффективно организовать работу с матрицей для получения данных, операций с ней, модификации в случае изменения условий задачи или необходимости ее адаптации для другого предприятия и т. д. С использованием матричного конструктора реализованы алгоритмы эффективного решения задач линейного, динамического и дискретного программирования, ряда задач выпуклого программирования; задач высокой размерности; многоцелевых задач с комбинированными критериями и др. Это позволяет с минимальными затратами находить решение широкого круга оптимизационных задач планирования и управления предприятием [3].

Для реализации пользовательского интерфейса программных систем разработана библиотека UPS Framework, которая включает большое количество тесно интегрированных друг с другом программных компонент, позволяющих унифицировать процессы и ускорить разработку модулей системы, упростить программное описание моделей данных, уменьшить количество ошибок. Все компоненты UPS Framework интегрированы в среду программирования MS Visual Studio .NET [1].

Поскольку ранее разработанные программные системы ориентированы на отдельные предприятия, то требуются дополнительные исследования и разработки для их адаптации к использованию в условиях холдинга, состоящего из нескольких (или нескольких десятков) территориально распределенных предприятий. Тем не менее имеющийся опыт позволяет осуществить постановку многопродуктовой производственно-транспортной задачи, провести ее исследование и предложить методы решения возникающих задач и подзадач с целью широкого тиражирования, внедрения и сопровождения новой автоматизированной системы оптимального планирования (АСОП) «Лесопереработка» для оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный поиск не выявил прямых аналогов разрабатываемой АСОП «Лесопереработка». Имеются только условные аналоги, общим существенным недостатком которых является отсутствие использования сложных математических алгоритмов для решения задач планирования производства с учетом большого количества дополнительных ограничений, обусловленных

особенностями производств и технологий предприятий ЛПК.

АСОП «Лесопереработка» ориентирована как на внутренний, так и на внешние рынки сбыта. Математические модели и методы решения задач обладают достаточной общностью и могут использоваться для планирования и управления производствами на не менее 500 предприятий отраслей ЦБП и ЛПК России и других стран.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., а также при поддержке госконтракта № 14.514.11.4004 Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А. В., Шабает А. И., Печников А. А. Конвейерная технология разработки программного обеспечения для управления производственными ресурсами и процессами // Перспективы науки. 2010. Т. 4. С. 95–99.
2. Выступление руководителя Федерального агентства лесного хозяйства В. Н. Маслякова [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rosleshoz.gov.ru/media/appearance/68>
3. Кузнецов В. А., Печников А. А., Шабает А. И. Многофункциональная программная система разработки приложений для задач раскроя материалов и комплектования изделий // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 11. С. 10–14.
4. Список стран, производящих бумагу и картон [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран,_производящих_бумагу_и_картон
5. Таха Х. А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
6. Forest.fi [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.forest.fi>
7. Stevenson W. J. Operations Management. Boston: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2011. 908 p.
8. Wang L., Shen W. Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing. London: Springer, 2007. 430 p.