УДК 658.5.012.1 DOI: http://doi.org/10.25728/pu.2019.2.6

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Д.С. Кузнецов, С.А. Котеленко, В.Е. Пятецкий

Рассмотрены подходы к построению графовой операционной модели управления производственным комплексом. Предложена графовая модель, состоящая из множества кластеров, в частности, ресурсного кластера, кластера материалов и кластера производственного календаря. Показано, что предложенная модель может применяться для решения таких задач планирования, как построение основного графика плана потребности в материалах и мощности. Отмечено, что главные достоинства новой модели — открытость для дальнейших изменений, возможность применения алгоритмов на графах для решения оптимизационных задач, совместимость с современными графовыми базами данных, возможность прямой работы с ней специалистов по оптимизации бизнеса.

Ключевые слова: производственное планирование, планирование потребности в материалах и мощности, интегральное планирование, графовая операционная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Современное металлургическое производство характеризуется сложной конфигурацией производственного оборудования, широким сортаментом выпускаемой продукции и постоянно меняющимися требованиями рынка. Сложная конфигурация оборудования и динамически меняющийся спрос характеризуются большим количеством стохастических процессов, которые влияют на эффективность управления производством и, в частности, на решение задачи интегрального планирования производства. Масштабы такого производства, в свою очередь, характеризуются несколькими тысячами сбытовых заказов в год, десятками тысяч номенклатурных позиций, сотнями поставщиков, широкой вариабельностью технологических маршрутов, применением динамических бизнес-моделей.

Большинство современных моделей управления производством [1] строится на платформе, реализующей реляционную модель данных. Такой подход имеет существенные недостатки при представлении данных со сложной иерархической структурой, каковыми и являются операционные модели. В рамках реляционной модели моделирование данных возможно лишь с помощью плоских отношений таблиц, при этом все отношения принадлежат одному уровню. Данное обстоятельство не позволяет вводить в модель множество значимых связей между данными либо такие связи реализуются на уровне приложений. Как результат, современные операционные модели управления производством, реализованные в рамках реляционного подхода, чрезмерно сложны, что оказывает непосредственное влияние на производительность, поскольку иерархическая структура данных модели управления производством оказывается распределенной среди множества таблиц и для извлечения данных требуется выполнять большое количество операций соединения. Кроме того, сопровождение и поддержка подобных моделей вызывают сложности и требуют специальных приложений.

Предложенные в работах [2—4] графовые операционные модели либо строятся исходя из модифицированной модели направленного асинхронного графа, либо являются развитием онтологических моделей с вводимой семантикой [3—5, 8]. В данной статье предлагается графовая операционная модель управления производственным комплексом [9], которая позволяет учесть особенности производства и может применяться для решения многоуровневых задач интегрального планирования производства. Особенность предлагаемого подхода состоит в возможности применения принципов семантической сети как для построения моде-

ли, так и для анализа и последующей обработки данных, при этом семантический анализ сочетается с возможностью применения графовых алгоритмов поиска и обнаружения кратчайшего пути.

Под управлением производственным комплексом понимаются разработка интегрального производственного плана и его выполнение с учетом своевременного реагирования на возникающие производственные сбои и изменяющиеся условия спроса.

Операционную модель предлагается строить в несколько этапов:

— эмпирическое агрегирование операций, составляющих производственные процессы;

— верификация отношений между отдельными процессами;

— формирование параметров операций и определение временных характеристик;

— описание модели на основе теории графов;

— введение семантики в графовую модель.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать графовую модель интегрированного производственного планирования для решения задачи построения планов и графиков производства, а также графиков изменения запасов для того чтобы минимизировать суммарную себестоимость производства на заданном горизонте планирования и обеспечить равномерную загрузку производственных агрегатов (ресурсов).

Рассматриваемая модель должна согласовываться с более общими моделями, используемыми в настоящее время для решения задач управления цепочками поставок (Supply Chain Management — SCM, или управления запасами) [1, 10], так как рассматриваемая в данной статье задача представляет собой частный случай построения модели SCM.

Рассмотрим формирование целевой функции интегрального планирования.

Пусть x_i — неотрицательное производство (выпуск) в период i, y_i — запасы на конец периода i, s_i — заданный спрос на отдельно взятый продукт в период i, $c_i(z)$ — затраты на производство $z \geq 0$ единиц продукции в период i, $h_i(z)$ — затраты на хранение $z \geq 0$ единиц продукции в период i, $i = 1, ..., n$. Предположим без потери общности, что $c_i(z) = h_i(z) = 0$ для всех i.

Задача состоит в том, чтобы выбрать производственный и ресурсный графики так, чтобы минимизировать затраты n-го периода

$$C(x, y) = \sum_{1}^{n}[c_i(x_i) + h_i(y_i)] \qquad (1)$$

с учетом ограничения сохранения запасов

$$x_i + y_{i-1} - y_i = s_i,\ i = 1, ..., n, \qquad (2)$$

и неотрицательности производства и запасов (последнее — чтобы гарантировать удовлетворение требований по мере их возникновения, без предварительных заказов)

$$x, y \geq 0, \qquad (3)$$

где для простоты установим $x_0 \equiv y_n \equiv 0$.

Целевая функция и ограничения в задаче (1)—(3) могут быть представлены в виде графовой модели (рис. 1) [1], где x — необходимый объем производства продукта, y — объем запаса продукта j на конец периода, s — заданный спрос на продукт j. Направленный граф (см. рис. 1) иллюстрирует общую задачу, решаемую производственным планированием, — минимизацию себестоимости продукции в каждом периоде. Данная модель также вводит понятие материального потока как движения материалов по переделам производства. Следует учитывать, что в данном случае под спросом понимается так называемый внутренний спрос, который определяет потребность в материалах на каждом переделе производства. Однако данная модель является предельно общей и требует последовательного усложнения. Кроме того, важнейшим параметром операционной модели должен быть горизонт планирования производства. Ряд характеристик объектов модели существуют только в заданном интервале (горизонте) планирования.

Представление модели в виде графа позволяет воспользоваться классической теорией графов для решения ряда задач управления. Однако в предлагаемой модели мы должны учитывать некоторые ограничения. В частности, граф только описывает отношения между вершинами, но не показывает физическое расположение узлов. К тому же, граф

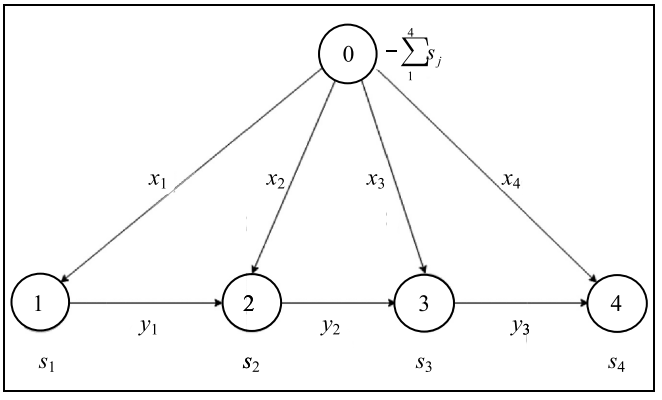

Рис. 1. Обобщенный направленный граф производственного планирования

отображает конфигурацию оборудования и материальные потоки между ними в терминах отношений между объектами управления: ресурсами, запасами, материалами и операциями [9].

В настоящей работе предлагается присваивать дугам некоторую семантическую определенность, устанавливая тип отношений между вершинами графа [2, 6]. Это обстоятельство позволяет рассматривать операционную графовую модель также и как семантическую сеть и соответственно применять к данной модели механизмы вывода, реализованные в специализированных системах. В рамках данной работы рассматривается применение графовой базы данных Neo4j [11], реализующей механизм вывода с помощью языка запросов Cypher. Это позволит воспользоваться уже реализованными алгоритмами [12], в том числе, алгоритмом Дейкстры, алгоритмом нахождения кратчайшего пути и др. Преимущество подхода, основанного на семантической сети, состоит в упрощении формальной модели данных и, как следствие, упрощении поддержки и сопровождения модели. Анализ данных осуществляется на основе механизма вывода, характерного для семантической сети [13]: запрос к данным в общем случае также отображается графом, что повышает эффективность поиска данных на основе формальных выражений, обеспечивая при этом значительный выигрыш в производительности [14].

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА В ВИДЕ ГРАФА

Расширим рассмотренную выше модель с учетом особенностей металлургического производства. Введем понятие производственного процесса и маршрута. Производственный процесс описывается как набор технологических маршрутов. Технологический маршрут есть последовательность ресурсов (оборудования), которые используются для изготовления заданного внешним спросом продукта. При этом производственная конфигурация предполагает наличие однотипных ресурсов, например, электросталеплавильных печей, машин непрерывного литья заготовок, нагревательных колодцев, агрегатов отжига и т. д. Каждый ресурс предполагает выполнение с его помощью одной или нескольких производственных операций. Детализация операций зависит от детализации (горизонта) планирования. Маршруты при этом подразделяются на основной и альтернативные. Основной маршрут — это последовательность ресурсов, которая наиболее целесообразна с технологической или финансовой точки зрения для данного продукта. Однако маршрут, который будет выбран в ходе построения плана, определяется текущей

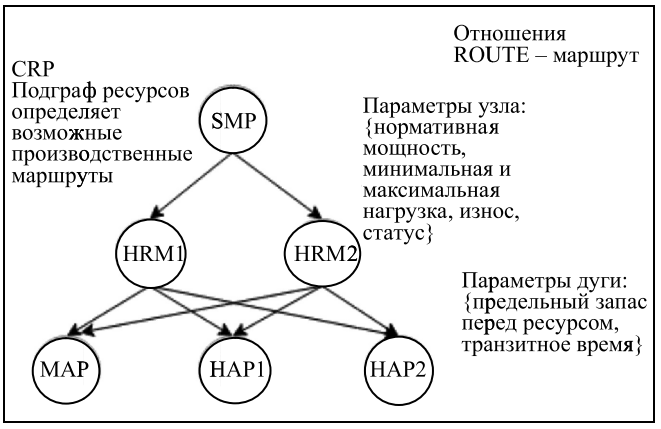

Рис. 2. Фрагмент подграфа ресурсов графовой операционной модели

производственной ситуацией и заданными ограничениями.

В данной статье рассматривается подход, при котором для моделирования технологических маршрутов применяется направленный ациклический граф (DAG, назовем его *ресурсный граф*). Каждый ресурс (рабочий центр) представляется в виде вершины (узла). Дуга между двумя ресурсами представляет часть маршрута. Операции, которые совершаются в заданном узле, моделируются не в модели маршрута, а в модели продукта (иерархии продуктов). Это связанно с тем, что для различных продуктов на одном и том же ресурсе могут выполняться различные операции и даже когда это не так, параметры одной и той же операции на заданном ресурсе будут различны для разных продуктов (материалов).

Особенность предлагаемой модели заключается во введении отношений между объектами модели: в частности, между вершинами ресурсного графа имеется единственный тип отношений ROUTE, семантически указывающий направление движения потока (рис. 2). При этом можно выделить исходную вершину s и конечную вершину t, которые, соответственно, определяют начало производственного маршрута и его окончание. К примеру, на рис. 2 исходная вершина s — агрегат SMP (разливка металла) — связана с двумя вершинами HRM1 и HRM2 (стан горячего проката 1 и 2). В свою очередь, эти вершины связаны с тремя линиями отжига MAP, HAP1 и HAP2. Конечная вершина не обозначена, но, как правило, для готовой продукции это склад для последующей отгрузки. Таким образом, на рис. 2 представлены все возможные маршруты производства от разливки металла до линий отжига включительно.

Дуги данного графа ассоциированы, помимо прочих характеристик, с двумя параметрами: мак-

симальным потоком (мощностью) и текущим значением. Потоки в таком графе верифицируются в соответствии с уравнением Кирхгофа, т. е. для каждого узла сумма входящих потоков будет равна сумме исходящих. Проблема максимального потока, таким образом, состоит в поиске максимального потока, соответствующего заданным ограничениям по мощности.

Параметры узлов R_n и дуг R_e на ресурсном графе: $R_n = \{u, l, m, w\}$, $R_e\{y, lt\}$, где u — нормативная мощность, l — минимальная загрузка, m — максимальная загрузка, w — износ ресурса, y — предельный запас перед ресурсом, lt — время передачи. Тип отношений на дуге — ROUTE, задающий направление движения материалопотока по технологическому маршруту.

3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЕРАРХИИ ПРОДУКТОВ В ВИДЕ ГРАФА

Подграф описания продуктов также представляет собой направленный ациклический граф, а тот, в свою очередь, — модель преобразования материалов от сырья до готовой продукции в ходе производства. Поскольку DAG представляет собой обобщение такой структуры данных, как дерево, то можно говорить, что подграф описания продуктов устанавливает так называемую иерархию продуктов. В данном графе вводятся три типа отношений: DERIVED, PROCESS и SUBS, определяющие направление преобразования материалов (гладкокатанный рулон из сляба, холоднокатанный рулон из гладкокатанного рулона и др.), привязку операций к заданному материалу, а также отношение замены материалов в производстве в случае отсутствия заданного.

Для отношения DERIVED устанавливаются параметры $R_{derived} = \{yield\}$, где $yield$ — нормативный выход годного, а для отношения OPR — параметры $R_{opr} = \{pref, sdt\}$, где $pref$ — предпочтительность выполнения операции на заданном агрегате, если одну и ту же операцию можно выполнить на различных агрегатах; sdt — стандартное время выполнения операции на заданном агрегате для соответствующего продукта. Вершины подграфа продуктов определяют все возможные в производстве

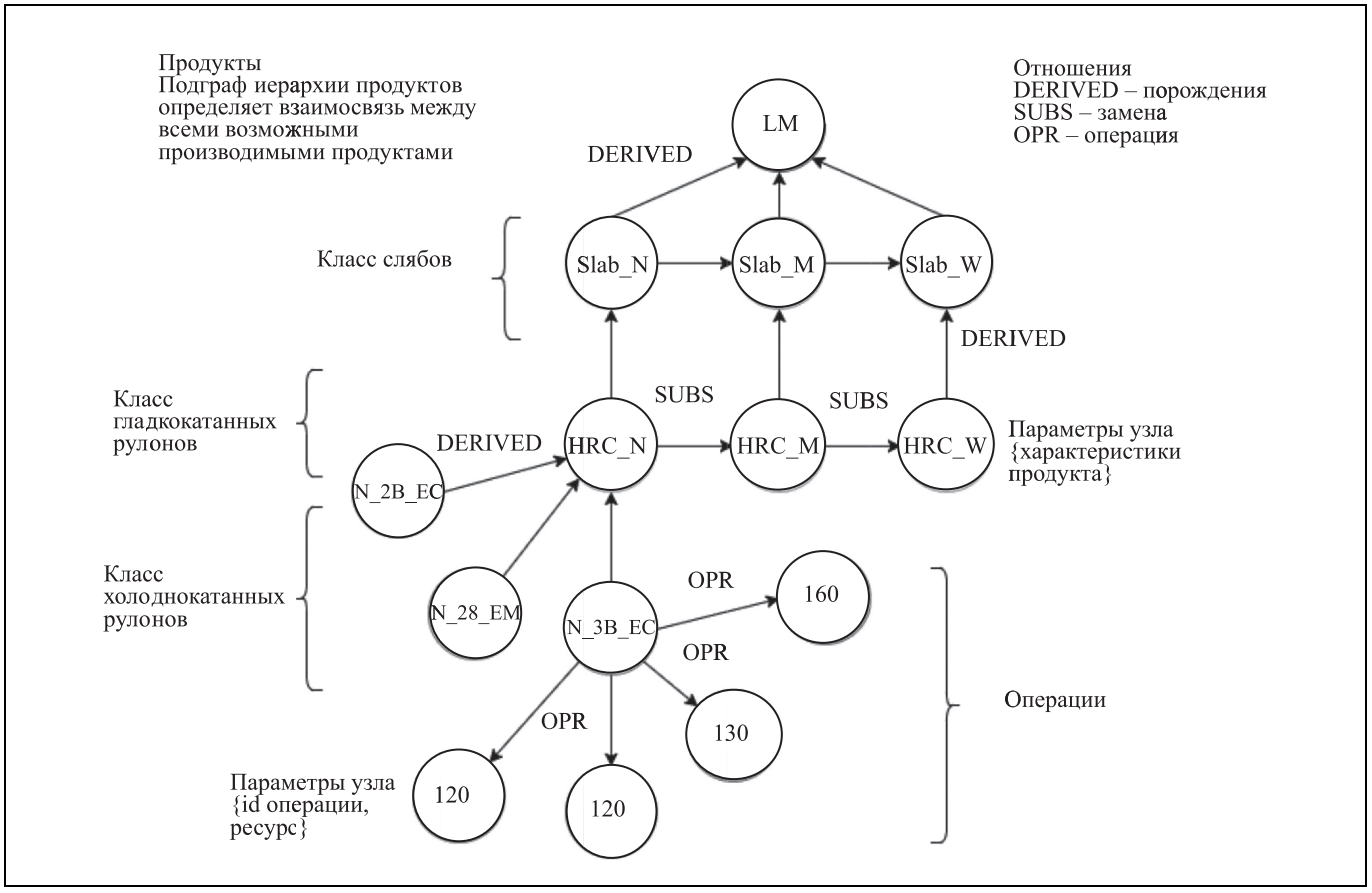

Рис. 3. Фрагмент подграфа иерархии продукта операционной модели

материалы от полуфабрикатов до готовой продукции. Кроме того, в данной модели вводится понятие классов (семейств продуктов). Каждый класс объединяет схожие по характеристикам продукты. Продукты одного класса (рис. 3) всегда находятся на одном и том же уровне иерархии и могут быть связаны отношением SUBS, позволяющим определять продукты (материалы) на замену в случае отсутствия необходимых на момент планирования. Характеристики вершины определяют значимые параметры продукта, формирующие его уникальность, и могут иметь вид:

$$R_n = \{f, desc, product_id, grade, th_aim, th_min, weight_aim, weight_min, width\},$$

где f — класс продукта, *desc* — описание продукта, *product_id* — номенклатурный номер продукта, *grade* — марка стали, *th_aim* — целевая толщина листа в рулоне, *th_min* — минимальная толщина листа, *weight_aim* — целевой вес рулона, *weight_min* — минимальный вес рулона, *width* — толщина рулона. Характеристики вершины определяют значимые параметры продукта, формирующие его уникальность.

4. ОПЕРАЦИОННАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ

Операционная производственная модель является графовой моделью и состоит из двух кластеров: кластера иерархии продуктов и кластера ресурсов. Связь между ними определяется через вершины операций в кластере иерархии и вершины ресурсов в кластере ресурсов (рис. 4). Таким образом задается новый тип отношений RES, определяющий ресурс, на котором выполняется заданная операция при производстве определенного продукта. В приведенном далее примере показаны производственные ресурсы, включающие в себя переделы разливки (SMP), горячего проката (HRM), отжига (MAP/HAP), холодного проката (CRM), линии гальванизации (CGL), отжига (CAP), резки (CUT) и упаковки (PKG). Для отношения RES устанавливаются параметры: $R_{res} = \{p, r\}$, где p — производительность ресурса при данной операции для производства соответствующего материала, r — плановые отходы для заданной операции на данном ресурсе.

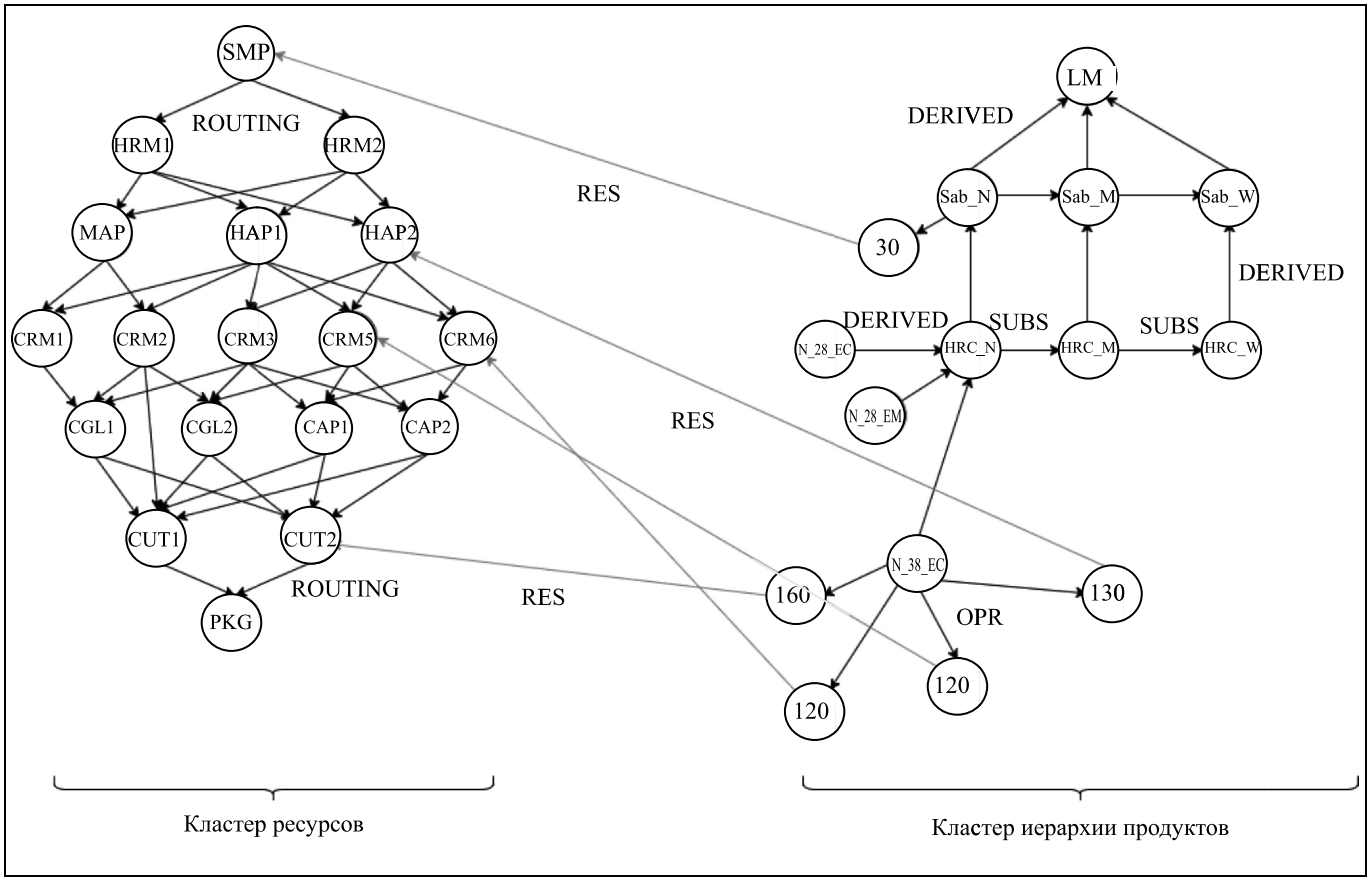

Рис. 4. Фрагмент операционной графовой модели

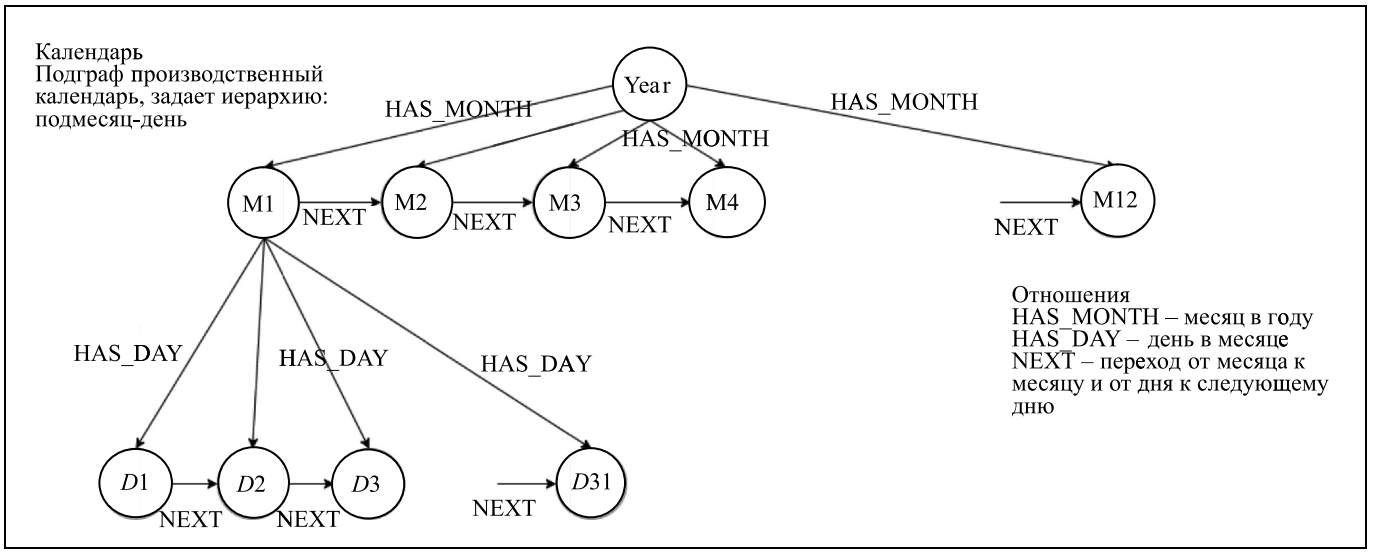

Рис. 5. Фрагмент подграфа календарного года

Операционная графовая модель позволяет решать задачу выбора технологического маршрута, учитывая возможность использования альтернативных ресурсов, расчет брутто- и нетто-потребности в материалах для производства заданного объема готовой продукции. Для решения задач планирования производства введем в рассмотренную выше модель время. Это позволит решать задачи планирования и привести операционную графовую модель к виду направленного графа производственного планирования. В частности, в данной работе будут рассмотрены принципы решения с помощью графовой модели задачи планирования материалов (MRP) и задачи планирования требуемой мощности (CRP). Построим графовую модель календарного года (рис. 5).

Вершины $M1$, $M2$, ..., $M12$ отражают 12 месяцев в году, отношение NEXT задает последовательность перехода от месяца к месяцу. Каждая вершина месяца связана с вершинами $D1$, $D2$, ..., задающими дни месяца отношением HAS_DAY.

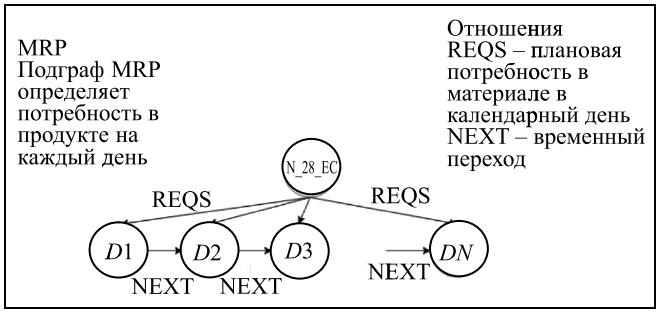

Рис. 6. Фрагмент операционной модели (плановой потребности в материалах)

Вершина Year определяет календарный год и связана с вершинами $M1$, $M2$, ... отношением HAS_MONTH.

Для решения задачи планирования материалов свяжем каждую вершину, определяющую продукт, с соответствующей вершиной календаря (рис. 6).

На рис. 6 показан фрагмент операционной производственной модели, иллюстрирующий связь каждого продукта (материала) с календарем. Отношение REQS определяет потребность в заданном материале (в данном случае, N_2B_EC) на каждый календарный день. Здесь важно отметить, что параметры дуги между узлом продукта и узлом календарного дня (отношение REQS) назначаются динамически и меняются каждый раз при пересчете плана потребности в материалах до момента реализации плана. Характеристики отношения $R_{REQS} = \{v_1/o_1, v_2/o_2, ..., v_n/o_n\}$, где каждая характеристика есть пара потребность определенного материала v_i в заданный календарный день в соответствии с заказом o_i.

Плановая мощность задается добавлением связи между узлами ресурсов операционной модели и календарем. На рис. 7 показан фрагмент модели, определяющий плановые мощности ресурсов CRM2 и CGL1 на заданном горизонте планирования (календарный месяц). Плановая мощность определяется как количество времени, запланированное к использованию данного ресурса в плановый период, в данном случае день. Характеристики отношения $R_{HAS_CPTY} = \{t_{p1}/o_1, t_{p2}/o_2, ..., t_{pn}/o_n\}$, где каждая характеристика есть плановое время работы заданного ресурса в заданный период времени для заказа o_i.

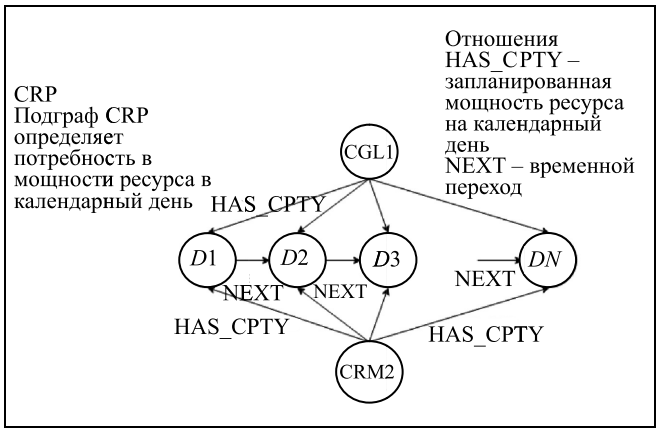

Рис. 7. Фрагмент операционной модели (плановой мощности)

Таким образом, мы усовершенствовали исходную модель производственного планирования, преобразовав исходный направленный граф в значительно более сложную структуру, в которой можно выделить несколько кластеров — временной, ресурсный и операционный. Переход к графовой модели такой структуры позволяет решать задачи производственного планирования, определяемые уже внешним спросом, т. е. спросом на готовую продукцию. Исходными данными для решения задачи производственного планирования по построенной модели может служить либо сформированный портфель заказов, либо прогноз, либо комбинация принятых заказов и прогноза, а также уровни запасов, включая незавершенное производство и готовую продукцию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная графовая операционная модель управления производственным комплексом позволяет решать задачи производственного планирования с горизонтом от нескольких недель до 12—16 мес. В зависимости от детализации исходных данных и точности планирования, данная модель позволяет решать задачу планирования продаж (S&OP), составления планов производства (MPS), расчета в потребности в материалах (MRP) и планирования требуемой мощности (CRP). Для управления производством необходимо обеспечить обратную связь от уровня исполнения производства. Дальнейшие исследования связаны с доработкой операционной модели, в частности, с обеспечением возможности построения детальных планов-графиков для каждого ресурса и контроля исполнения планов всех уровней путем разработки единой операционной модели как для планирования, так и для контроля (MES).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sokolov B., Ivanov D., Dolgui A., Pavlov A.* Structural quantification of the ripple effect in the supply chain // International Journal of Production Research. — 2016. — Vol. 54, N 1. — P. 152—169.
2. *Caux C., Barth M., De Guio R.* Graph Based Tools for Production Flows Analysis // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33, N 17. — P. 885—889.
3. *Zhang H.C., Kuo T.C.* A Graph-Based Approach to Disassembly Model for End-of-Life Product Recycling // Nineteenth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. — Austin, 1996. — P. 247—254.
4. *Tick J.* P-Graph-based workflow modelling // Acta Polytechnica Hungaria. — 2007. — Vol. 4, N 1. — P. 75—88.
5. *Kharlamov E., Grau B.C., Jiménez-Ruiz E.*, et al. Capturing industrial information models with ontologies and constraints // 15th Int. Semantic Web Conference. — Kobe, 2016. — P. 325—343.
6. *Petersen N., Galkin M., Lange C.,* et al. Monitoring and automating factories using semantic models // 6th Joint International Semantic Technology Conference. — Singapore, 2016. — P. 315—330.
7. *Rychtyckyj N., Raman V., Sankaranarayanan B.*, et al. Ontology reengineering: a case study from the automotive industry // Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Innovative Applications. — Phoenix, 2016. — P. 3974—3981.
8. *Tilstra A.H., Campbell M.I., Wood K.L., Seepersad C.C.* Comparing matrix-based and graph-based representations for product design // 12th international dependency and structure modelling conference. — Cambridge, 2010. — P. 195—206.
9. *Veinott A.F.* Lectures on Supply Chain Optimization. — Stanford University, 2005. — 261 p.
10. *Мауэргауз Ю.Е.* «Продвинутое» планирование и расписания (AP & S) в производстве и цепочках поставок. — М.: Экономика, 2012. — 574 с.
11. *Jordan. G.* Practical Neo4j. — N.-Y.: Apress, 2014. — 408 p.
12. *Jungnickel D.* Graphs, Networks and Algorithms, Algorithms and Computation in Mathematics. Vol. 5. — Berlin: Springer Verlag, 2005. — 615 p.
13. *Santoso A.F., Supriana I., Surendro K.* Designing Knowledge of The PPC with Semantic Network // Journal of Physics Conference Series. — 2017. — Vol. 801.
14. *Buerli M.* The Current State of Graph Databases / Technical Report, Department of Computer Science, Cal Poly, San Luis Obispo, 2012.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Кузнецов Денис Сергеевич — ассистент[1)], аспирант[2)],
✉ kuznetsov.ds@misis.ru,

Котеленко Сергей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент[1)],
✉ s.kotelenko@hotmail.com,

Пятецкий Валерий Ефимович — д-р техн. наук, зав. кафедрой[1)],
✉ 7621496@gmail.com,

[1)] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.
[2)] Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

Поступила в редакцию 23.07.2018, после доработки 05.10.2018.
Принята к публикации 17.10.2018.