

Экспериментальное сравнение задач и моделей планирования биохимического производства.

В. В. Пырзу, С. А. Тренин

kondratiukvitalik@gmail.com; s.trenin@gmail.com

Целью данной научной работы является комплексное исследование задачи оперативного планирования производства для биохимической промышленности. Исследуются различные постановки задачи составления оптимальных расписаний, учитывающие различные ограничения, приходящие из практики: особенности хранения промежуточных веществ, требования к работе производственных узлов и особенности подготовки станков, такие как наладка и очистка между запусками. Основной класс рассматриваемых математических моделей - смешанное целочисленное линейное программирование, что означает, что рассматриваемые задачи являются NP-трудными. Сложность заключается в том, что схожие задачи могут решаться одинаковыми методами с разной степенью эффективности, что негативно сказывается на процессе внедрения моделей в практику. Для решения этого вопроса проводится экспериментальный запуск моделей, разработанных для одной предметной области, в задачах из другой, интерпретация полученных результатов и предложение эвристик для ускорения алгоритмов.

Ключевые слова: *planning; scheduling; MILP*

DOI:

1 Введение

На сегодняшний день наблюдается высокая конкуренция в разных областях биохимического производства, а так же усложнение производственных процессов, увеличение числа этапов, количества оборудования и объемов продукции. Это неизбежно влечёт появление естественных требований к алгоритмам планирования: они должны быть масштабируемыми, работать за разумное время, находить качественные приближения к оптимальному расписанию и быть гибкими к изменению начальных условий. Основной объект исследования — это различные варианты постановки задачи создания расписания как задачи оптимизации, методы её решения и эвристики, учитывающие индивидуальные особенности задач. На данный момент широкое распространение получили модели смешанного целочисленного линейного программирования (ЦЛП), так как соответствующие задачи хорошо изучены и существуют алгоритмы для их решения. Однако временные затраты и степень оптимальности найденных решений сильно зависят от количества переменных и ограничений в модели, что делает процесс моделирования значимым для создания плана. Большинство статей в данной области посвящены конкретным постановкам задач, приходящим из практики и созданию конкретных моделей для их решения. При этом задачи сходны друг другу, хоть и принадлежат разным предметным областям: фармацевтической, пищевой, химической и др. Это, в свою очередь, позволяет применять идеи, высказанные для решения одной задачи к решению другой. Применение имеющихся моделей и эвристик к задачам, для которых они не были разработаны изначально позволит перенять имеющийся опыт, а так же провести тонкую настройку модели под конкретную постановку, что должно привести к улучшению качества.

Некоторые авторы предлагают пути упрощения модели с целью ускорить процесс получения результата без значительной потери его качества. Примером подобной эвристики

является двухступенчатая схема, представленная в [1]. В работе проводится анализ других способов упрощения модели и сравнительная оценка результатов.

2 Описание имеющихся данных

Так как авторы статьи поставили одной из своих целью собрать различные варианты постановок задач планирования из разных предметных областей, то в первую очередь необходимо эти задачи описать. Что есть задача автоматического планирования? Пусть описан некоторый процесс производства продукта в виде последовательности операций, которые необходимо произвести с имеющимися прекурсорами.

Определение 1. Прекурсор — вещество, имеющееся изначально на складе, из которого будут произведены все требуемые продукты. Также **промежуточным прекурсором** будем называть вещество, получаемое после некоторых этапов производства, но не требуемое для получения в финале.

В описание задачи входят описания всех прекурсоров, описание производственных узлов — сущностей, способных проводить реакции и описания рецептов приготовления промежуточных прекурсоров и финальных продуктов. Рецепт представляет собой описание одной операции: сколько нужно обрабатывать, на каком оборудовании и какие прекурсоры в какой пропорции, чтобы получить продукт.

Вещества разрешается хранить на складе, который описывается максимальной вместимостью. Некоторые вещества, возможно, хранить нельзя вовсе.

В данной работе рассматривается только **пакетное производство**. В этом случае на узел подаётся пакет некоторого размера и обрабатывается. Продуктом является пакет вещества-продукта. Для каждого узла известен максимальный и минимальный размер пакета, который можно подать. Этот подход является альтернативным к **непрерывному производству**, где узлы оперируют с непрерывными потоками данных, но это требует другого подхода к созданию моделей, и поэтому не рассматривается для перекрёстного запуска моделей.

В зависимости от задачи, время обработки пакета может как зависеть, так и не зависеть от его размера. В дальнейшем мы опишем, какие модели способны работать с неравными временами обработки пакета и насколько изменится время получения расписания.

Об оборудовании может быть известно время, необходимое для его настройки в начале производства, выключение в конце и очистку/перенастройку между запусками. О важности этих ограничений написано в [2], где помимо этого присутствуют данные о реальном процессе производства йогуртов. Будет изучено, как добавление этих ограничений влияет на скорость и сложность модели.

Зададимся вопросом о том, что есть хорошее расписание? Этот вопрос сводится к тому, какие величины входят в целевую функцию. В [3] описаны несколько видов целевой функции: общее время работы системы перед получением требуемых продуктов, разного рода стоимости (стоимости запуска узлов, хранения продуктов и др.), максимизация выгоды от продажи продуктов. Частью поставленного исследования является изучение влияния целевой функции на время получения расписания и его качество.

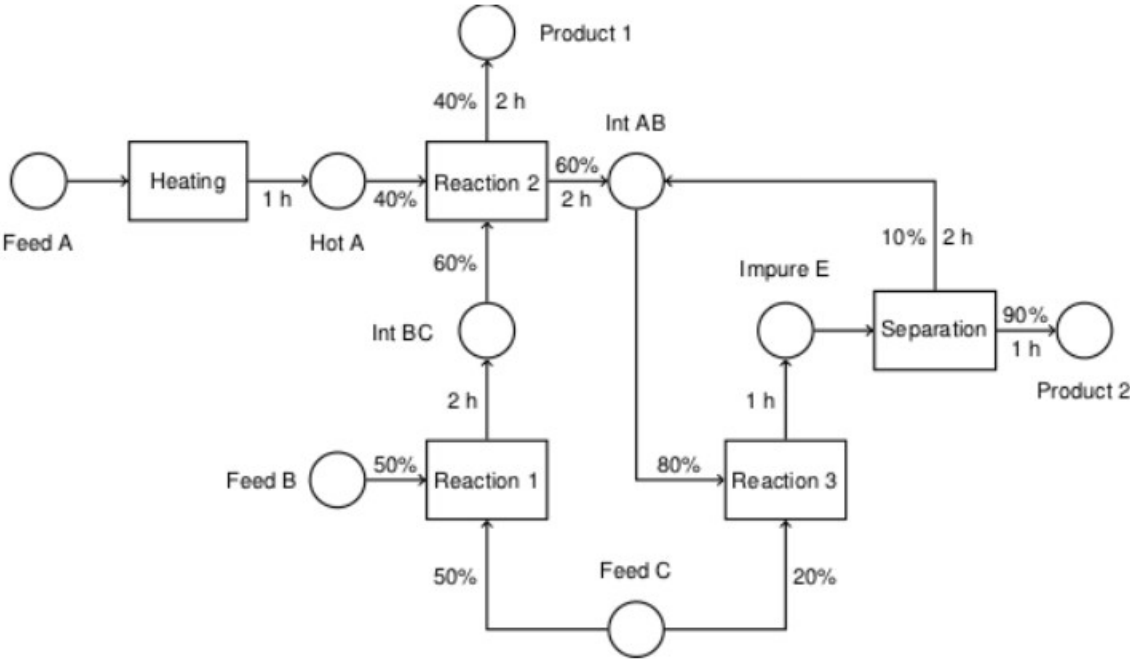
Процессы, в зависимости от их структуры делятся на две большие группы: последовательные и сетевые.

Определение 2. Последовательный процесс — процесс, который может быть разделён на несколько стадий, упорядоченных во времени, и пакеты передаются на произ-

водство только от предыдущей стадии к следующей. В зависимости от числа стадий эти процессы делятся на **одноступенчатые** и **многоступенчатые**.

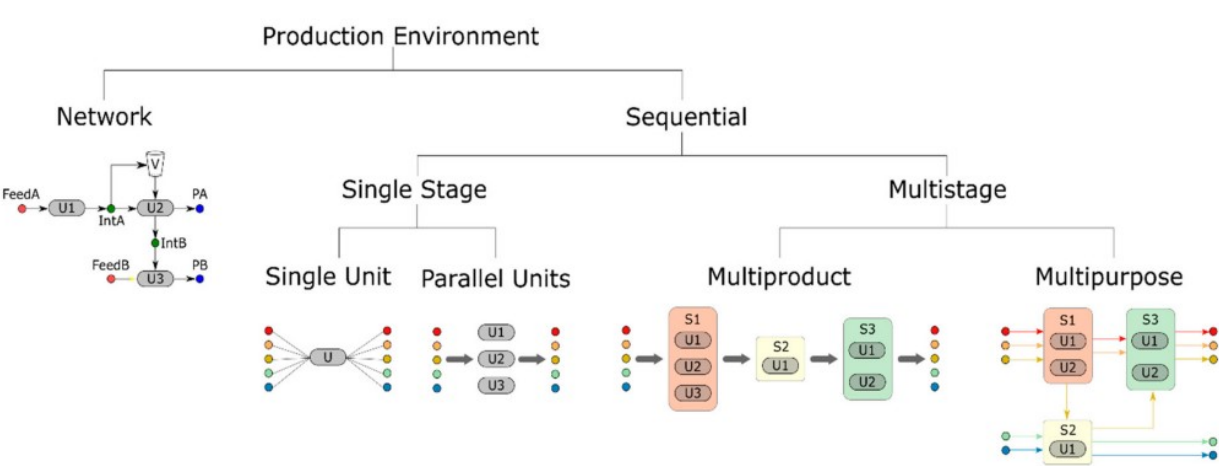
Собственно, **сетевой** процесс — это тот процесс, что не является последовательным. Как будет показано далее, сетевые процессы являются более общими, но и более сложными для моделирования.

Рис. 1 Пример STN некоторого процесса



Процессы (в особенности сетевые) удобно представлять себе в виде графов состояний (STN), впервые предложенных в работе [6]. Пример такого графа можно видеть на рисунке

Рис. 2 Классификация процессов



Классификация 2 взята из [3] где она является более подробной, но в этой статье параллелизм и наличие многих продуктов/прекурсоров являются параметрами модели. Основной вопрос состоит в том, как переход от последовательных процессов к сетевым изменяет модель и какие методы, изобретённые для последовательных моделей применимы к сетевым и наоборот.

3 Описание моделей

Моделью в рамках данной работы будем называть задачу смешанного целочисленного линейного программирования в общей форме. На данном этапе необходимо закодировать решения, принимаемые системой составления расписаний в переменные, которые будут называться **решающими переменными**. Далее T будет обозначать множество промежутков времени и переменные, с ним связанные. Другими большими латинскими буквами (с индексами) будут обозначаться непрерывные решающие переменные, малыми — бинарные решающие переменные и индексы (в некоторых моделях бинарные переменные и являются своеобразными «индексами» того, что какое-то утверждение верно или нет), а греческие буквы будут обозначать параметры — значения, которые фиксируются до старта составления расписания, но меняются от задачи к задаче. Большими латинскими буквами также будут обозначаться множества.

Опишем все обозначения, которые будут встречаться в эксперименте.

1. Множества:

- U — множество производственных узлов. Индексы у этого множества означают:
 - j — узлы, способные производить задачу $j \in J$.
- P — множество продуктов (как прекурсоры, так и те, что получаются в процессе реакций). Индексы у этого множества означают:
 - P_j^{in} — продукты, потребляемые задачей $j \in J$.
 - P_j^{out} — продукты, производимые задачей $j \in J$.
 - P^i — продукты, которые надо произвести к концу (заказ).
- T — множество временных промежутков
- J — множество задач (задача есть производство некоторого вещества по его рецепту). Индексы у этого множества означают:
 - J_p^{in} — задачи, потребляющие продукт $p \in P$.
 - J_p^{out} — задачи, производящие продукт $p \in P$.
 - J^u — задачи, которые могут быть произведены на узле $u \in U$.

4 Заключение

Желательно, чтобы этот раздел был, причём он не должен дословно повторять аннотацию. Обычно здесь отмечают, каких результатов удалось добиться, какие проблемы остались открытыми.

Литература

- [1] *F. Blomer, H.-O. Gunther* LP-based heuristics for scheduling chemical batch processes, 2010 International Journal of Production Research, 38:5, 1029-1051 doi: <http://dx.doi.org/10.1080/002075400189004>.
- [2] *Georgios P. Georgiadis, Georgios M. Kopanos, Antonis Karkaris, Harris Ksafopoulos and Michael C. Georgiadis* Optimal Production Scheduling in the Dairy Industries, 2019 Industrial & Engineering Chemistry Research 58 (16), 6537-6550 doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05710>.

- [3] *Georgiadis, Georgios P. and Elekidis, Apostolos P. and Georgiadis, Michael C.* Optimization-Based Scheduling for the Process Industries: From Theory to Real-Life Industrial Applications, 2019 Industrial & Engineering Chemistry Research 58 (16), 6537-6550 doi: <http://dx.doi.org/10.3390/pr7070438>.
- [4] *Siqun Wang, Monique Guignard* Hybridizing Discrete- and Continuous-Time Models For Batch Sizing and Scheduling Problems, 2006 Computers & Operations Research Volume 33, Issue 4 doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2004.11.013>.
- [5] *Christos T. Maravelias and Ignacio E. Grossmann* Minimization of the Makespan with a Discrete-Time State-Task Network Formulation, 2003 Industrial & Engineering Chemistry Research doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ie034053b>.
- [6] *E.Kondili, C.C.Pantelides, R.W.H.Sargent* A general algorithm for short-term scheduling of batch operations—I. MILP formulation, 1993 Computers & Chemical Engineering doi: [http://dx.doi.org/10.1021/ie034053b10.1016/0098-1354\(93\)80015-F](http://dx.doi.org/10.1021/ie034053b10.1016/0098-1354(93)80015-F).

Поступила в редакцию