**Модель с непрерывным временем для краткосрочного планирования многопродуктовых процессов**

**Аннотация**

В химической промышленности часто встречаются производственные системы, характеризующиеся наличием одной стадии или ранее определенной стадии узкого места, с несколькими неидентичными параллельными станциями и с затратами на установку, которые зависят от последовательности производства. В этой статье предлагается смешанная целочисленная модель планирования производства, которая определяет размер лота и последовательность продуктов, которые максимизируют прибыль. Он учитывает несколько типичных отраслевых условий, таких как штрафы за несоблюдение или периоды неработоспособности производственных подразделений (или станций) для профилактического обслуживания. Модель была подтверждена реальными данными нефтехимической компании. С целью анализа его производительности мы применили модель к 155 экземплярам производства, которые были получены с использованием метода Монте-Карло на исторических производственных данных той же компании. Мы получили среднее снижение себестоимости продукции на 12% и предполагаемую прибыль на 19%.

**Ключевые слова:** MIP-моделирование, целевое программирование, планирование пакетных процессов, краткосрочное планирование, математическая формулировка, симуляция метода Монте-Карло.

**Введение**

Химическая промышленность характеризуется наличием повторяющихся производственных операции, в которых химические реакции происходят либо партиями, либо в непрерывном потоке жидкого или газообразного материала, а не в отдельных единицах. Этот аспект, наряду с ограничениями нескольких процессов, делает планирование производственного процесса более сложным, чем в обрабатывающей промышленности.

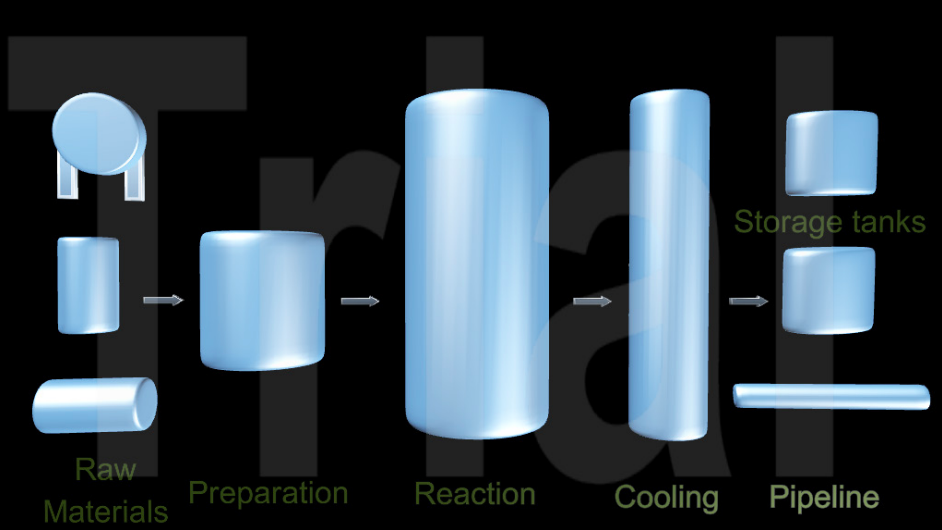
На рисунке 1 представлена ​​схема процесса. Основная особенность этого производственного процесса состоит в том, что он включает в себя несколько уровней, но есть основной уровень узкого места, который использует самые дорогие операционные ресурсы завода. Этими ресурсами являются химические реакторы, в дальнейшем именуемые технологическими единицами или просто единицами. Этот факт вынуждает другие уровни процесса подчиняться этим подразделениям и позволяет упростить процесс планирования до стадии с одним узким местом, как в (Marchetti & Cerdá, 2009). Это также требует наиболее эффективного использования этих устройств, используя их при максимальной нагрузке и минимизируя время настройки. Время настройки часто связано с операциями очистки, сменой инструмента и формой машины. Неидентичные единицы подразумевают разные мощности и разное время обработки для данного продукта. Это также подразумевает, что есть подмножество единиц, которые могут обрабатывать конкретный продукт. Задача планирования также включает планирование операций обслуживания.

Рисунок 1 – Иллюстрация процесса химического потока

Процесс планирования производства обычно включает в себя этап, предшествующий этапу планирования, на котором группируются различные заказы продукта, и после проверки состояния запасов определяется «общий спрос на продукт» для каждого продукта. Продукты могут иметь промежуточные сроки исполнения, то есть некоторые частичные или общие потребности в конкретном продукте могут иметь более одной конкретной даты исполнения в пределах этапа планирования для одного и того же или разных клиентов. Затем модель должна учитывать целевую функцию с наказанием за нарушения в целях спроса и других политиках с учетом операционных ограничений (то есть последовательности, совместимости продукта с единицей и времени подготовки, зависящего от последовательности).

Хотя в этой области были предприняты важные исследовательские усилия (Harjunkoski, et al., 2014; Mendez, Cerdá, Grossmann, Harjunkoski, & Fahl, 2006), были выявлены некоторые проблемы, связанные со способностью академических предложений представлять, а) фактические особенности производственных проблем (Novara, Novas, & Henning, 2016), и б) размер проблем, которые могут быть реально решены с помощью этих методов.

Эта статья решает первую задачу, решая кратковременное планирование партии для химической компании. Эксплуатационные вопросы, рассмотренные в этой работе, еще не были рассмотрены ранее: (a) совместимость продукта, выраженная в зависимости от последовательности приготовления, которая определяется числом процедур мойки устройства, требуемых между двумя последовательными продуктами, и стоимостью, зависящей от последовательности; то есть затраты, которые зависят от количества операций стирки; (b) Гибкость, заключающаяся в частичном или полном отказе от обработки конкретного продукта в течение определенного периода времени, также учитывается с учетом требований; (c) Не идентичные параллельные единицы; (d) точки переоценки запасов и пределы запасов (минимальные и максимальные) для каждого продукта; (d) перепроизводство, которое является основной проблемой из-за ограничений хранения, контролируется с верхними границами; (e) Приоритеты продукта также рассматриваются исходя из условий сбыта; (f) возможность иметь несколько партий на заказ; и g) монолитный подход в том смысле, что он не ограничивается определением количества и размера партии одного и того же продукта, но одного и того же порядка и их последовательности. Этот подход показал, что дает лучшие решения, чем те, которые получены двухэтапными методами (Castro & Novais, 2009).

Более того, вычислительная сложность этих типов задач (то есть NP-сложных) оказалась очень чувствительной к нескольким параметрам и их взаимозависимости (Koçlar, 2005; Transchel, Minner, Kallrath, Löhndorf, & Eberhard, 2011). Несмотря на это, эффективность некоторых из подходов была оценена численно с небольшим количеством примеров, иногда небольших, или с реальными данными, предоставленными очень специфическими условиями (Harjunkoski, et al., 2014; Novara, Novas, & Henning, 2016). Таким образом, для решения второй проблемы надежность этого предложения была подтверждена с использованием набора данных, сгенерированных с использованием метода Монте-Карло из реальных данных, что является необычным подходом для тестирования моделей такого типа.

**Литературный обзор**

Оптимальному планированию серийного производства уделяется большое внимание в последние годы из-за его положительного влияния на эффективность производства и экономический эффект (Xue & Sun, 2010). Последние коррективы задач планирования пакетов можно найти в Allahverdi, Ng, Cheng, & Kovalyov (2008), Harjunkoski, et al. (2014); Jans & Degraeve (2008), Karimi, Ghomi & & Wilson (2003), Mendez, Cerdá, Grossmann, Harjunkoski & Fahl (2006) и в Zeballos, Novas & Henning (2011). Последние четыре были посвящены промышленным моделям. Проблемы планирования с учетом технического обслуживания можно найти в (Chang & Manikas, 2009; Tsai & Wang, 2017). Обширная часть литературы посвящена проблеме размера и программирования партий с дискретными временными интервалами (Harjunkoski, et al., 2014; Merchan, Lee, & Maravelias, 2016; Velez, Dong, & Maravelias, 2017). Хотя это, пожалуй, самый общий подход (Harjunkoski, et al., 2014), его главный недостаток связан с точностью данных, и, как говорят Jans и Degraeve (2008): «Основным ограничением этого подхода является ненужное увеличение общего размера задачи из-за введения дополнительных двоичных переменных, связанных с каждым дискретным интервалом времени». Эти недостатки привели к разработке моделей непрерывного времени.

Кроме того, были предложены многопродуктовые и многоступенчатые модели MILP с непрерывным программированием времени. Они рассматривают зависимые от последовательности сроки подготовки, зависимые от единицы сроки подготовки и сроки выполнения (Afzalirad & Rezaeian, 2016; Atan & Akturk, 2008; Castro & Novais, 2009; Karimi & Liu, 2005; Mendez, Henning, & Cerda, 2000; Xue & Sun, 2010). Novara, Novas & & Henning (2016) провели обзор проблем планирования многостадийных серийных установок с ограниченными ресурсами. Они разделили методы на две группы: те, которые принимают одну партию на заказ, а после 2008 года - подходы, которые управляют заказами, состоящими из нескольких партий. В таблице 1 приведено краткое описание некоторых проблем непрерывного краткосрочного планирования нескольких продуктов, встречающихся в литературе. Однако ни один из них не является полностью адаптируемым к условиям, обсуждавшимся ранее.

Среди последних предложений, Novara, Novas & & Henning (2016) и Afzalirad & Rezaeian (2016) касаются нескольких особенностей промышленной среды (например, запрещенные назначения продукта-оборудования, задачи переключения в зависимости от последовательности, разнородные параллельные блоки на каждом этапе и т. д.). Первые предложили модель программирования ограничений для многопродуктовых задач многоступенчатого планирования. Они обрабатывали заказы с несколькими партиями, определяя режим работы кампании, что является распространенным на практике, но может привести к неоптимальным решениям, поскольку режим кампании состоит из планирования заранее определенного числа (или диапазона) партий одного и того же продукта. Afzalirad & Rezaeian (2016) сформулировали дискретную модель, предложили два метаэвристических алгоритма для ее решения и утвердили их на 14 случайно сгенерированных примерах. Недавно Хиндер и Мейсон (Hinder & Mason) (2017) использовали известные на основе порядка свойства оптимальных решений для более простой одностадийной программы, времени установки семейства и задачи планирования одной машины. В этом случае создаются крупномасштабные экземпляры и решаются до 1080 задач и 270 семейств.

Таблица 1 – Некоторая литература MILP для многопродуктовых краткосрочных задач планирования (S – один, M – несколько, SD – зависит от последовательности, UD – зависит от единицы, I – независимый, F: Семейство, PUnits – Параллельные блоки, Im – идентичные машины, Rm – несвязанные машины)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Авторы** | **Стадия** | **Установка** | **PUnits** | **Цели и комментарии** |
| (Hinder  & Mason, 2017) | S | F- | - | * Минимальное опоздание. * Ветви и Границы, теория жестких границ. * 75 экземпляров, сгенерированных для каждой комбинации # заданий и # семей (до 120, 10). |
| (Afzalirad  & Rezaeian, 2016) | M | SD  UD | Rm | * Минимальный период обработки. * Один пример: 6 заданий, 2 единицы. * 14 случайно сгенерированных экземпляров для оценки 2 метаэвристики (до 6 заданий, 3 единицы). |
| (Novara, Novas,  & Henning,  2016) | M | SD | Rm | * Минимальная продолжительность приготовления, полное запаздывание и # запоздалые партии. * Операции на основе компании. * 5 примеров – до 22 заказов. |
| (Nekoiemehr  & Moslehi,  2011) | S | SD | S | * Максимальная преждевременность, минимальное опоздание. * Алгоритм полиномиального времени. * 1 пример: 5 заданий. * 3840 экземпляров 8-25 заданий. |
| (Jin, Gupta,  Song, & Wu,  2010) | S | SD | Rm | * Минимальная максимальная задержка. * Реальные данные и случайно сгенерированные данные. Поиск Табу. |
| (Xue & Sun,  2010) | M | SD | Im | * Максимальный вес времени завершения. Штрафы за запоздалые заказы. * Проверка с примерами. |
| (Subbiah,  Tometzki,  Panek, & Engell,  2009) | M | SD | Rm | * Минимальное опоздание. * Промежуточные сроки. * Автоматизированная модель времени. * Анализ достижимости. 2 случая. * До 29 заказов. 6-8 операций. |
| (Atan & Akturk,  2008) | S | I | S | * Максимальная прибыль. Штрафы за опоздание. * Принятие / отклонение заказа. Контролируемое время обработки. |
| (He & Hui,  2008) | S | SD  UD | Rm | * Минимальное время обработки и полное опоздание (многоцелевое). * Штраф за нарушение сроков. * 8 примеров. Большой масштаб: 50 заказов. |
| (Osorio G.,  Castrillón M.,  Toro C., & Ore-  juela C, 2008) | S | SD | Im | * Минимальное время обработки. * С перерывами. * Работа цеха переработки. * Пример: 13 операций. |
| (Omar & Teo,  2006) | M | SD | Im | * Минимальная сумма преждевременности/опоздания. * Иерархический метод. Проверка с помощью реальных данных. |
| (Liu & Karimi,  2005) | M | I | Rm | * Минимальное время обработки. * Проверка с примерами. |
| (Hassin & Shani,  2005) | S | I | Im | * Преждевременность/опоздание. Штрафы за неисполнение. * Полиномиальные алгоритмы. Отдельные сроки исполнения. |
| Эта работа | S | SD  UD | Rm | * Максимальная прибыль. Штрафы за частичное исполнение и опоздание. * Рассмотрены приоритеты, уровни обслуживания и инвентаря. * Несколько партий для промежуточных сроков. * Реальные данные и случайно сгенерированные экземпляры: 155: до 28 продуктов. |

**Описание задачи**

Проблема может быть классифицирована согласно Mendez et al. (2006), как показано в таблице 2, и в соответствии с Allahverdi et al. (2008), как R | STsd, b | TSC, где R относится к несвязанным машинам, STsd, b относится ко времени приготовления, зависящему от последовательности партии или семейства продуктов, а TSC относится к производительности, направленной на минимизацию времени приготовления или изменения. Хотя в этом случае он измеряется с помощью составной целевой функции, включающей задержки, сроки выполнения и политику инвентаризации.

Таблица 2 – Классификация задачи

|  |  |
| --- | --- |
| **Топология процесса** | Одноступенчатые, параллельные блоки |
| **Назначение оборудования** | Исправлено |
| **Подключение оборудование** | Выполнено |
| **Политика хранения запасов** | Конечное окончательное хранение |
| **Передача материала** | Мгновенная |
| **Размер лота** | Переменная |
| **Время обработки партии** | Переменная |
| **Модели спроса** | Сроки: один или несколько.  Уровень: переменная |
| **Обмены** | Зависимая последовательность |
| **Ресурсные ограничения** | Отсутствует |
| **Ограничения по времени** | Техническое обслуживание |
| **Стоимость** | Оборудование, материал, обмены |
| **Степень уверенности** | Детерминистический |

Условия и допущения, рассматриваемые в этой проблеме: (а) спрос, мощность, время обработки, единицы, подходящие для каждого продукта, пределы запасов (минимальные и максимальные) и сроки исполнения для временного уровня известны и фиксированы; (б) сырье, единицы и другие ресурсы всегда доступны; (c) Нет никаких перерывов, незапланированных поломок или переработок агрегата; (d) параллельные блоки не идентичны, работают при полной нагрузке и могут обрабатывать не более одной партии за раз; (e) время и стоимость установки зависят от степени совместимости между двумя последовательными продуктами; (f) продукт может быть обработан в более чем одной единице, но не более одного раза в каждой единице в течение временного уровня; (g) заказ может быть разделен на несколько партий в соответствии с промежуточными сроками исполнения; (h) временной уровень для каждой единицы независим и является подмножеством общего уровня планирования; и поскольку единицы составляют очень ограниченный ресурс, даже временной интервал может быть нарушен (и, следовательно, оштрафован); (i) учитывая краткосрочный уровень, программирование первого продукта в каждой единице учитывает его совместимость с последним продуктом, запрограммированным в этой единице в течение предыдущего уровня; (j) операции по профилактическому техническому обслуживанию переводятся в требования к техническому обслуживанию, а затем рассматриваются как продукты со своим собственным временем и целями подготовки.

Основное рассмотренное предположение заключается в том, что проблему можно упростить до одностадийного процесса, сосредоточив внимание на планировании узких мест, при котором время передачи, а также политика переноса хранения не имеют значения.

Основными решениями, которые необходимо принять, являются последовательность продуктов в каждой единице, размер партии, который представляет собой количество последовательных партий продукта в одной единице, и время начала (непрерывного) времени каждой партии. Другие переменные решения контролируют нарушения различных эксплуатационных соображений.

**Математическая модель**

Предложенная модель использует непрерывное представление времени с уравнениями сетевого потока (для продуктов и единиц), где размер лота и график определяются одновременно. Событие происходит в глобальный момент времени, учитывая непосредственный приоритет, с целевой функцией максимизации прибыли с учетом штрафов, связанных с невыполнением требований, сроками исполнения, запасами и затратами. Модель основана на проблеме самого длинного пути, со многими побочными ограничениями, через многоуровневую сеть, в которой каждый маршрут представляет расписание одного блока. Каждый путь имеет определенный начальный узел, но все пути заканчиваются на одном и том же узле-приемнике. Узел любого уровня представляет событие обработки продукта, которое отслеживает информацию о последовательности с двоичной переменной, размер пакета с целочисленной переменной и время начальной обработки с непрерывной переменной. Наконец, сформулированы последовательность, ограничения спроса и временные ограничения. Отслеживание последнего продукта, обработанного в единице в течение предыдущего уровня планирования, позволяет принять его в качестве входных данных для следующего периода, чтобы определить совместимость первого продукта.

По умолчанию срок выполнения для каждого продукта устанавливается в конце уровня планирования. Когда продукт имеет более одной даты исполнения (т.е. частичные поставки с разными датами исполнения), тогда этот продукт делится на продукты R + 1 - оригинальные плюс псевдопродукты R - каждая со своей конкретной датой оплаты и спросом, который называется «Частичный спрос». Таким образом, сумма производства этих продуктов R + 1 является общей потребностью в исходном продукте.

Установки

IP – Набор продуктов плюс необходимые процедуры обслуживания, исходные узлы для каждого устройства и один конечный узел | IP = {1, ..., N}.

I – Набор продуктов со спросом, превышающим минимальный порог i, j ∈ I, I ⊆ IP.

IM – Подмножество IP, включающее только процедуры обслуживания IM ⊆ IP.

IQ – Подмножество продуктов IP, включая продукты со спросом и процедурами обслуживания IQ ⊆ IP = I ∪ IM.

IR – Подмножество псевдопродуктов с конкретными датами исполнения IR ⊆ I. Если продукт i ∈ IQ и имеет даты поставки до уровня планирования, продукт раскладывается на псевдопродукты, каждый со своим собственным спросом и датой поставки. Спрос на псевдопродукты меньше или равен спросу на продукт, из которого он разлагается.

K – Множество единиц k ∈ K

Переменные решения

Yik - Размер партии продукта i запланированный в единицах k.

tik - Время начала обработки продукта i в единице k.

bdi - Непокрытый спрос на продукт i ∈ IQ (для достижения точки заказа)

bpari - Непокрытый спрос на псевдопродукт i ∈ IR

bmi - Непокрытый спрос на продукт i ∈ IQ (для достижения минимального уровня запасов)

sdi - Производственный избыток продукта i ∈ IQ (т.е. по отношению к точке заказа).

smxi - Производственный избыток продукта i ∈ IQ (т.е. по отношению к максимальному уровню запасов).

latei - Опоздание для продукта i ∈ IQ (то есть по отношению к дате оплаты)

zu – Значение целевой функции.

Параметры

di - Производственный спрос на продукт i ∈ IQ (для достижения точки заказа)

dmi - Производственный спрос на продукт i ∈ IQ (для достижения минимального уровня запасов)

dmxi - Производственный спрос на продукт i ∈ IQ (для достижения максимального уровня запасов)

Pi,k – Время обработки продукта i в блоке k

wi,j - Количество процедур мойки, требуемых в последовательности i - j.

DDi - Срок оплаты для продукта i ∈ IR

spri – Цена продажи продукта i.

pri - Приоритет продукта i.

QRij - QRi, j = 1, если псевдопродукт i ∈ IR имеет ту же дату платежа, что и продукт i ∈ IQ, из которого он был разложен; QRi,j = 0 в противном случае.

RRi,j - RRi, j = 1, если срок оплаты для продукта i ∈ IR раньше, чем для продукта j ∈ IR. Оба i, j являются псевдопродуктами из одного и того же продукта i ∈ IQ. RRi,j = 0 в противном случае.

Mk – Уровень планирования для единицы k.

Ck – Вместимость единицы k.

t0k - Планирование времени начала на блоке k. 0 ≤ t0k <Mk

WTk – Продолжительность процедуры чистки в единице k.

ri,k - Ri, j = 1, если продукт i может быть обработан в единице k, Ri, j = 0 в противном случае.

vci,k - Обработка переменной удельной себестоимости товара i в единицу k.

fck - Фиксированная стоимость обработки в час в единице k.

pd - Единица штрафа за несоблюдение требований

pm, pmx - Штраф за нарушение минимальных и максимальных пределов производства

ppar - Штраф за несоблюдение частичного спроса (то есть спроса на псевдопродукцию)

pw - Штраф или стоимость мойки

plate - Штраф за нарушение сроков.

mtk - Мультипликативный фактор уровня планирования (для получения очень большого числа)

mks - Максимально допустимое нарушение уровня программирования.

MIP-модель







Целевая функция в уравнении (1) - максимизация прибыли, оштрафованная нарушением некоторых эксплуатационных ограничений. Первый член в правой части вычисляет доход, полученный от общего произведенного количества, за вычетом излишка по отношению к спросу. Второе слагаемое вычисляет стоимость производства, включая затраты на подготовку, и, наконец, третье слагаемое определяется уравнением (2). Это уравнение штрафует (а) включение процедур стирки, (б) запоздалое производство, (в) производство за пределами запасов, (г) частичные поставки не выполнены и (д) отличия от точек заказа.

Уравнения (3) - (8) связаны с упорядочиванием. Уравнение (3) предотвращает перекрытие и идентифицирует последовательность. Уравнения баланса являются уравнениями (4). Уравнения (5) и (6) вычисляют размер партии Yik. Уравнения (9) и (10) ограничивают начальный и конечный узлы последовательности каждого блока.

Уравнения (9) - (13) имеют дело со спросом. Уравнение (9) вычисляет объем запланированного производства и разницу от спроса до точки заказа. Уравнение (10) вычисляет отклонения от частичных поставок, а уравнения (11) и (12) отклонения от минимального и максимального уровней запасов. Уравнение (13) ограничивает размер партии обслуживания до 1.

Относительно времени, уравнение (14) вычисляет нарушение в сроки выполнения, уравнения (15) и (16) гарантируют, что расписание данного блока k начинается в собственное время уровня, а уравнение (17) обеспечивает упорядочение времени между псевдопродуктами. Наконец, уравнения (18) - (20) дают область переменных.

**Численные эксперименты**

Предложенная модель была проверена и подтверждена набором примеров, сгенерированных из реальной исторической информации от химической компании в Мексике. Рисунок 2 показывает процесс эксперимента.



Рисунок 2 – Схема экспериментального процесса.

Через интерфейс в Excel® пользователь передает модель и вызывает решатель. Затем вывод снова переводится через интерфейс в выходной файл Excel. Модель была закодирована в программном обеспечении GAMS® с помощью решателя CPLEX® версии 22.6 и работают на компьютере с 1,99 ГБ ОЗУ, с процессором Intel Xeon® 5150 со скоростью 2,66 ГГц, работающий под ОС windows XP.

Предварительная обработка

Были определены следующие тривиальные ситуации, чтобы перед запуском модели были зафиксированы переменные уровни, что уменьшило размер задачи:

1. Все Xiik = 0;
2. Xijk = 0 если продукты i и j несовместимы;
3. Xijk = 0 если j – первое произведение в последовательности k;
4. X’last’jk = 0;
5. Xijk = 0 если rij = 0 или rjk = 0.

Проверка модели

Для проверки модели использовались входные параметры от мексиканской химической компании, соответствующие типичному месяцу производства, в котором было произведено 30 продуктов, 6 из которых были включены для производства, и не были запрограммированы частичные поставки. Используемый уровень был один месяц. Общие результаты приведены в таблице 3. Затраты и прибыль сравниваются с базовым уровнем (фактические значения реального случая) по 100-балльной шкале.

Таблица 3 – Результаты модели против базовых значений

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Базовые значения** | **Модель** |
| Общее время производства (ч) | 2695 | 2645 |
| Общая стоимость производства (нач. 100) | 100 | 88 |
| Общая прибыль (нач. 100) | 100 | 119 |
| Время процессора (сек) |  | 22 |

Случайно сгенерированные экземпляры

Тесты на пригодность были применены к историческим 9-месячным данным для описания спроса на продукцию. В частности, была определена вероятность того, что продукт будет востребован в течение месяца (т. е. Использовался уровень программирования), а также среднее и стандартное отклонение спроса на каждый продукт. Используя метод Монте-Карло, было сгенерировано 155 экземпляров с набором продуктов не более 30, как показано в таблице 4; некоторые из них имеют максимум две частичные поставки (с разными сроками исполнения) и с включенными 4 единицами.

Таблица 4 – Описание сгенерированных экземпляров (p: количество продуктов; n: количество переменных, m: количество уравнений, AvPn: средняя производительность)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Месяц** | **Экземпляр** | **p** | **n** | **m** | **AvPn (тонн)** |
| 1 | 1-20 | 28 | 2650-3360 | 1796-2262 | 2596 |
| 2 | 21-40 | 28 | 3707-4369 | 2416-2873 | 2584 |
| 3 | 41-60 | 14 | 2453-2903 | 1698-2014 | 1453 |
| 4 | 61-80 | 17 | 2308-2776 | 1579-1907 | 2384 |
| 5 | 80-95 | 14 | 2167-2237 | 1370-1604 | 1694 |
| 6 | 96-110 | 23 | 2053-2123 | 1290-1532 | 1602 |
| 7 | 111-125 | 28 | 1940-2010 | 1188-1449 | 1811 |
| 8 | 126-140 | 17 | 2651-2723 | 1636-1893 | 2750 |
| 9 | 141-155 | 19 | 1804-1876 | 1146-1373 | 1701 |

**Результаты и обсуждение**

Модель запускалась с трехцелевой функцией: а) только временной компонент уравнения (1); б) только компонент затрат уравнения (1), - в этом случае, чтобы минимизировать, - и в) полное уравнение (1). Результаты, полученные из 155 сгенерированных экземпляров, представлены в таблице 5. Кроме того, был рассмотрен вариант ослабления ограничений (11) и (12), относящихся к минимальному и максимальному уровням производства (то есть «без границ» в таблице 5).

Таблица 5 – Результаты численных экспериментов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | # моющие процедуры | Неудовлетворенный спрос (%) в отношении: | | % случаев в соответствии с временем процессора | | |
| # продукты | Объем | ≤ 1 мин | 1-5 мин | ≤ 30 мин |
| Без ограничений | | | | | | |
| Минимальное время | 175 | 39% | 14% | 80 | 20 | 0 |
| Минимальная стоимость | 124 | 45% | 16% | 100 | 0 | 0 |
| Максимальная прибыль | 155 | 40% | 22% | 100 | 0 | 0 |
| С ограничениями | | | | | | |
| Минимальное время | 250 | 25% | 2% | 80 | 0 | 0 |
| Минимальная стоимость | 215 | 18% | -1% | 100 | 0 | 0 |
| Максимальная прибыль | 203 | 27% | 6% | 100 | 0 | 0 |

Из таблицы 5 видно, что подавляющее большинство случаев были разрешены менее чем за одну минуту; однако в случае минимизации времени с помощью квот 20% случаев не могут быть разрешены за полчаса. Намного лучшая производительность с точки зрения соблюдения спроса также наблюдается при рассмотрении ограничений границ; но лучшая производительность с точки зрения количества процедур мытья показана, когда они не включены. Отрицательное значение неудовлетворенного спроса относится к среднему производству на 1% выше точки заказа. Наконец, ни одна целевая функция не является доминирующей с точки зрения производительности.

**Выводы**

Была изучена проблема единой производственной системы машин с зависящим от последовательности временем настройки и несколькими практическими ограничениями.

Было проведено сравнительное исследование производительности между математической моделью и реальными данными химической компании, в результате чего были получены следующие результаты с предложенной моделью: сокращение времени обработки продукта на 2%, сокращение общего объема себестоимости продукции на 12% и увеличение на 19% расчетной прибыли. Модель оптимизации позволяет интегрировать решение о порядке обработки продуктов на разных производственных машинах, количестве партий для производства каждого продукта, времени начала обработки каждого продукта и других решениях, которые стремятся дать количественную оценку. соблюдение требований и сроков. Наконец, благодаря моделированию по методу Монте-Карло были созданы экземпляры для проверки правильности модели, получения решений в короткие вычислительные сроки на настольном компьютере (то есть полчаса) для размеров, аналогичных промышленным.

**Благодарность**

Авторы благодарят инженеров Фелипе Андреса Санчеса Баталласа за участие в программировании интерфейса, Вальтер Вальдеррама и Эмилио Руис Самано за их участие в численных экспериментах.