

Идеальный раскрой

Как сделать нарезку бумаги более эффективной

Ииро Харьюковски, Симо Сейневирта

Общепринятым является факт, что успех сложных операций часто определяется тем, насколько они продуманы. В результате детальное планирование производственной деятельности требует сосредоточения значительных сил и средств менеджмента. И хотя автоматизированное планирование всё ещё далеко от того, чтобы соперничать с гибкостью аналитического мышления человека, всё больше и больше задач решаются компьютерами как минимум не хуже, чем людьми.

На предприятии по выпуску бумаги гигантский бумажный рулон на выходе производственного процесса должен быть разрезан на рулоны меньших размеров сообразно потребностям заказчиков. Для оператора определение схемы раскроя большого рулона требует много времени и не гарантирует оптимального результата или отсутствия отходов. Задача усложняется ещё более, когда часть бумаги из-за несоответствия качеству приходится браковать. Нет двух одинаковых задач, а вариантов решения – бесчисленное множество. Компания АББ предлагает пакет ПО для расчета наилучшей стратегии раскроя.



Измерение и управление

Во многих производственных процессах ещё имеется значительный потенциал снижения ожидаемых затрат всего лишь за счёт совершенствования планирования расхода времени и исходного материала. В настоящей статье обсуждается улучшенная стратегия оптимизации, сочетающая автономное планирование с повышением качества в процессе производства. В этой стратегии учитывается различие качественных характеристик по длине исходного бумажного рулона и их влияние на схему раскроя для получения нарезанных рулонов оптимального качества. В результате получается полное геометрическое решение для так называемой задачи «потеря раскроя». Рассматриваемый подход приводит к оптимальным или близким к ним решениям, позволяющим достичь значительной экономии путём исключения экономических потерь из-за снижения качества продукции. Среди получаемых при этом преимуществ снижение расхода энергии и исходного сырья, более полное удовлетворение запросов заказчиков и большая прибыльность за счёт снижения общих производственных затрат.

Разрезание бумаги

Из типовой бумагоделательной машины лист бумаги десятиметровой ширины выходит со скоростью 120 км/ч (или 33 м/с, т.е. каждую секунду выпускается более 5200 листов формата A4). При плотности 80 г/м² это соответствует 97 тоннам бумаги ежесекундно. Качество планирования столь стремительного процесса решающим образом влияет на конечный результат, на эффективность и прибыльность производства. Компания АББ уже готова предложить всеобъемлющий и полностью интегрированный пакет решений для управления производством бумаги, включающий самые современные средства такие, как опережающий контроль качества (QCS¹) и система веб-отображения (WIS). Заметим, что программное обеспечение от компании АББ для планирования производства обычно считается образцом. Поэтому вполне естествен-

но, что компания АББ ищет пути, как сделать уже существующие решения ещё лучше и экономичнее. Это означает, что нужная заказчикам бумага производилась бы с наибольшей возможной эффективностью в смысле производственных затрат, влияния на окружающую среду и расхода энергии и материалов.

Типовая бумагоделательная машина каждую секунду выпускает столько бумаги, что её хватило бы более, чем на 5200 листов формата A4.

Разрезание исходных больших рулонов на меньшие по размерам производится на намоточном устройстве сразу же по выходе бумаги из бумагоделательной машины. Главной целью при этом является минимизация потерь раскроя, т.е. отходов, возникающих в случаях, когда полная ширина исходного рулона не соответствует суммарной ширине требуемых рулонов. Например, заказчику нужна бумага шириной 1,5 м, следовательно после разрезания рулона шириной 10 м останется полоса шириной 1 м, т.е. целых 10 % изготовленной бумаги, которая пойдёт в отход. Задача, заключающаяся в том, чтобы попытаться найти раскладку раскроя бумаги с минимальным отходом, обычно называется задачей «потеря раскроя». В ходе решения этой задачи определяются шаблоны, по которым устанавливаются ножи в устройстве для продольной резки (рис. 1). При решении этой задачи преследуются две основных цели:

- отыскание такой стратегии разрезки, при которой рулоны требуемой ширины получаются при минимально возможных расходах бумаги, иначе говоря, с минимальными потерями раскроя;
- сведение к минимуму числа разных шаблонов и задание такой их последовательности, при которой исключаются ненужные перестановки ножей, что в конечном счёте повышает эффективность производства.

Применяемый в достижении этих противоречивых целей подход даёт сильное расхождение в достигаемом конечном результате. Поскольку число возможных установок ножей весьма велико, оптимизация процесса разрезки не обходится без сложных математических операций. Часто число возможных вариантов размещения отрезаемых рулонов на исходном рулоне исчисляется миллионами и при анализе вариантов очень быстро становится ясным, что практически невозможно перебрать их все даже при использовании самого лучшего и эф-

фективного суперкомпьютера. С ростом числа отрезаемых рулонов масштаб задачи резко возрастает из-за большого числа альтернативных стратегий разрезки исходного рулона. Тем не менее существует много математико-эвристических методов эффективного решения такой задачи. Но ни один из них не гарантирует универсального решения по оптимизации. Эти методы, в том числе такие, как эвристика с округлением, генерация столбцов и пр., решают задачу оптимизации лишь частично, как и другие немногочисленные алгоритмы «ранцевого» типа²). При рассматривании такой коллекции существующих подходов может показаться, что задачу можно решить. Но можно ли получить практические результаты для случая разрезки бумаги с помощью одного отдельно взятого метода?

Учёт качества бумаги

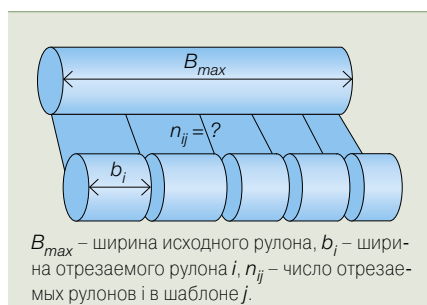
На современных целлюлозно-бумажных предприятиях проблема отходов разрезания на выходе из бумагоделательных машин обычно решается как составная часть производственного планирования и задолго до того, как бумага начнёт сходиться с этих машин.

Такое предварительное планирование является вполне адекватным лишь в предположении, что выпускаемая бумага однородна (т.е. оптимальна) по качеству. К сожалению, это не всегда так и местные дефекты качества всё-таки случаются. В процессе производства бумаги с различных измерительных и сканирующих устройств в реальном времени считывается большой объём данных, касающихся оценки качества бумаги по различным критериям. Затем эти данные обрабатываются и тщательно анализируются. Большая часть полученной в итоге информации может быть использована сразу же после того, как исходный рулон выпущен и ожидает разрезки. На рис. 2 отклонение от заданного качества показано цветовым кодом.

При учёте реального распределения качества по выпускаемому листу бумаги заранее составленный план раскроя может оказаться далёким от оптимального. Например, наиболее ценные для заказчика рулоны при предварительном планировании могут оказаться расположенными в исходном рулоне так, что если следовать запланированному раскрою, на них попадут области с дефектами и их придётся забраковать.

В прежних, основанных на моделировании, подходах к оптимизации разрезки аспект качества не учитывался, поскольку при решении стандартной задачи «потеря раскроя» не принималось во внимание точное положение каждого рулона в шаблоне для разрезки. Главным было количество рулонов определённого размера.

1 Разрезка исходного рулона бумаги и проблема потерь раскроя: как наилучшим образом отрезать от большого рулона рулоны меньшего, но заданного размера?



Измерение и управление

Новаторский программно-математический подход

Информация о качестве бумаги собирается системой контроля качества путём сканирования вдоль оси бумажного рулона. Измерение таких параметров бумаги, как влажность, толщина, степень белизны производится поперек листа через каждые 10-50 мм, а по направлению намотки – через каждые несколько сотен метров (конкретные цифры определяются скоростью бумагоделательной машины и скоростью перемещения сканирующего устройства по ширине листа). На практике это означает, что даже в машине небольших размеров измерения качества по каждому критерию должны проводиться в десятках тысяч точек.

Примером другой технологии от компании АББ является система веб-отображения. В этой системе выявление визуальных дефектов (отверстий, разрывов, складок и т.п.) производится с помощью камер, а полученное изображение эффективно анализируется нейронно-сетевыми методами. Это обеспечивает быструю и надёжную обработку в процессе выявления дефектов и их классификации.

Наряду с такими методами оперативного контроля, быстро дающими точную информацию, анализ качества производится автономно, в лабораториях. Это требует больше времени и более удобно для выявления общих тенденций качества, нежели его кратковременных изменений. Лабораторный анализ производится по отобраным образцам, по его результатам может быть забракован весь исходный рулон.

Встраивание всех этих аспектов качества в стандартную математическую модель для решения задачи «потеря раскройки» ещё больше увеличивает их сложность и делает их невосприимчивыми к изменениям из-за большого количества дополнительных (и невыполнимых) требований и отдельных частных решений. Нужен альтернативный подход, основанный на моделировании и на оптимизации разрезки с учётом качества бумаги. Компания АББ разработала абсолютно новый программно-математический подход для автоматического расчёта оптимизированного решения рассматриваемой задачи. Эта модель предполагает наличие уже существующего плана и способна охватить различные профили качества исходного рулона через геометрическое представление при производстве разрезки. Опираясь на жёсткие требования к характеристикам, математическая модель имеет модульную структуру, при этом в первом подходе каждый раз

2 Анализ качества бумаги в исходном рулоне с помощью системы АББ CPM.



рассматривается только один шаблон разрезки (расположение ножей). Перестановка рулонов в шаблоне производится с учётом их текущего положения в исходном рулоне, а также информации о качестве бумаги по ширине исходного рулона.

В процессе производства бумаги с различных измерительных и сканирующих устройств в реальном времени считывается большой объём данных, касающихся оценки качества по различным критериям.

Во втором подходе рассматривается рулон в целом и изменение наилучшим образом порядка чередования шаблонов разрезки. Эти два подхода можно произвольно комбинировать посредством интеллектуального алгоритма, который также позволяет использовать все шаблоны, когда-либо использовавшиеся в производственном процессе.

При этом неявным образом учитывается, что некоторые зоны на исходном рулоне могут быть объединены, а некоторые – удалены. В результате находится решение оптимальное или близкое к таковому, сводящее к минимуму потери в качестве и экономические потери, которые значительно зависят от снижения качества. Всё это повышает рентабельность производства, а равно и обязательность по отношению к заказчикам: ведь менеджмент, уделяющий качеству повышенное внимание, безусловно хорош для заказчика.

Два шага к успеху

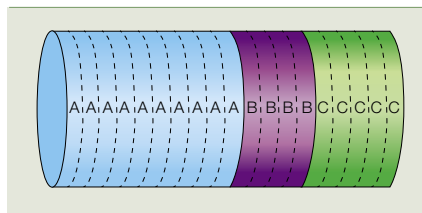
Для того чтобы большая и очень сложная задача оптимизации оказалась решаемой, в новом математическом

подходе имеется два основных этапа. На первом этапе исходный рулон «дискретизируется» путём деления на диски-«ломтики», (рис. 3а). Качество каждого такого диска-«ломтика» сравнивается с требованиями заказчика. Результирующая модель оптимизации исходит из 3-уровневой классификации уровней качества, например, А, В и С. Окончательный уровень качества каждого отрезаемого рулона рассчитывается на основе сочетания карты распределения качества с ключевыми требованиями к отрезаемому рулону. Такой основанный на дискретизации метод представляет собой хорошее приближение к оптимальному решению.

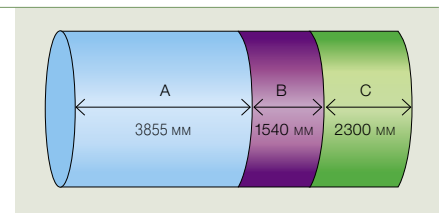
На втором этапе найденное решение подвергается дальнейшему улучшению, непрерывно приближаясь по точности к окончательному решению. Это, кстати, одновременно позволяет плавно регулировать положение режущих кромок. Непрерывное приближение основывается на делении исходного рулона на протяжённые зоны качества (секторы, рис. 3б) сообразно изменяющимся требованиям к качеству каждого отрезаемого рулона. Каждому сектору ставится в соответствие некоторый уровень качества (А, В, С). Как и на первом

3 Два подхода к отысканию оптимального способа раскройки исходного рулона.

а Дискретный подход: бумага растеризуется с помощью определённого алгоритма, а все изменения производятся только в виде дискретных шагов.



б Непрерывный подход: величина изменений может быть любая, но оптимизировать в этом случае гораздо труднее, чем в предыдущем.



Измерение и управление

этапе, расчёт производится на основе сочетания карты распределения качества с некоторыми ключевыми параметрами отрезаемого рулона. Итогом второго этапа является оптимальная стратегия разрезки, учитывающая распределение уровней качества по ширине исходного рулона.

Компания АББ разработала абсолютно новый программно-математический подход для автоматического расчёта оптимизированного решения задачи «потеря раскроя».

Хотя ни одна из двух описанных стратегий в отдельности не может во всех случаях давать точное и эффективное решение, всё же двухэтапный подход является достаточно мощным и эффективным. Он позволяет как-бы преодолеть несходимость задачи оптимизации и гарантирует быстрое нахождение решения, близкого к оптимальному.

Хорошо замаскированная математика

Пользователю нет необходимости вникать в математическую основу или алгоритмы, а вся функциональность может полностью встраиваться в существующую среду. Вся работа по оптимизации разрезки происходит на заднем плане, что даёт заказчикам дополнительные преимущества. Для тех же, кто хотел бы заглянуть «за кулисы», ниже рассказывается о некоторых основных чертах.

Применяемый подход включает в себя решение задач смешанного численно-линейного программирования средствами специализированных алгоритмов и использует мощные и отработанные технологии. Математические модели заключают в себе некоторое подобие процесса производственного планирования в том смысле, что и в моделировании, и в планировании содержатся важные логические решения. При планировании время представляется в дискретном виде конечным числом точек, при этом каждой точке посредством двоичной переменной ставится в соответствие определённая технологическая операция. В конкретном случае оптимизации разрезки исходного рулона место переменной времени занимает одно из измерений рулона – ширина или длина.

Рассмотрим один приём разрезки. Предположим, что отрезаемый рулон представлен индексом r , а каждый отдельный диск-«ломтик» – индексом j . Тогда двоичная (0–1) переменная xd_{rj}

соответствует одной из позиций j на исходном рулоне, с которой начинается (левым краем) отрезаемый рулон r . Чтобы осуществить оптимизацию и максимизировать общее значение цены всего комплекта отрезаемых рулонов, нужно ввести ещё и ценовой коэффициент c_{rj} , характеризующий цену отрезаемого рулона r на месте j в исходном рулоне. Целевая функция очень проста: найти для каждого отрезаемого рулона r такое место в исходном рулоне, чтобы общая цена всего комплекта отрезаемых рулонов была наибольшей. Это можно выразить следующим уравнением (1):

$$\max \sum_{r,j} c_{rj} \times xd_{rj} \quad (1)$$

$$xd_{rj} \in \{0,1\},$$

при этом $xd_{r1} = 1$, если отрезаемый рулон r начинается (левым краем) с позиции j в исходном рулоне.

Вся работа по оптимизации разрезки происходит на заднем плане, что даёт заказчикам дополнительные преимущества.

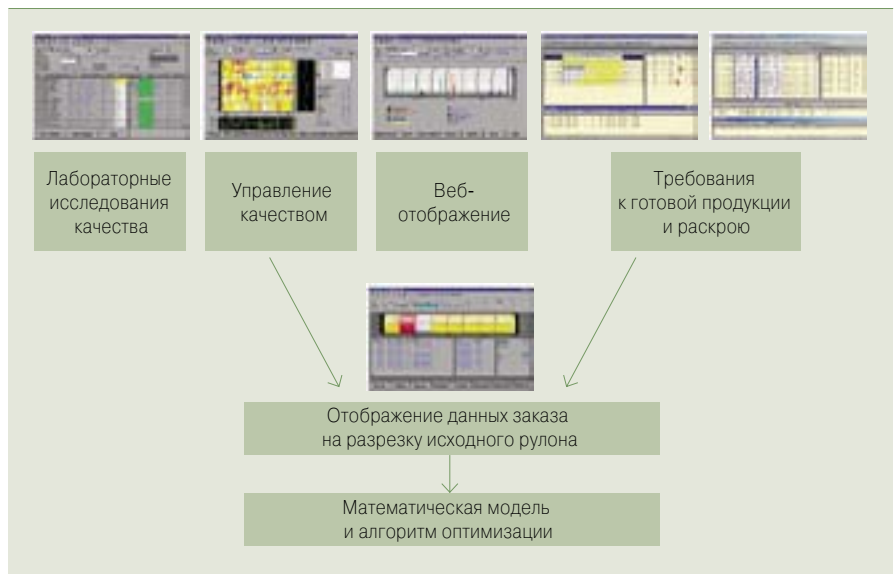
Чтобы всё определить математически корректно, необходимо ввести уравнения, отражающие отсутствие наложения отрезаемых рулонов друг

на друга и то, что каждый рулон отрезается только один раз. Это может показаться тривиальным, но иногда сложность таких уравнений превосходит все ожидания.

После произведённой дискретизации формируется оптимальный план разрезки применительно к выбранному шагу координатной сетки. Для типовых ширин исходных рулонов до 10000 мм минимальный шаг 1 мм сделал бы задачу практически неразрешимой, поэтому выбирается более крупный шаг (10–20 мм). Однако ширину отрезаемых рулонов при этом придётся округлять в сторону уменьшения (например, вместо желаемой ширины рулона 578 мм при шаге координатной сетки 10 мм следует выбрать ширину 570 мм). Возникающие при округлении подобные ошибки исправляются в ходе следующего непрерывного шага.

Этот следующий шаг также напоминает некоторые стратегии планирования тем, что делит исходный рулон слева направо на области с гибкими границами, т.е. с подстраиваемой под требования заказчика шириной. Каждому отрезаемому рулону посредством двоичных переменных ставится в соответствие строго одна такая область и строго один сектор с определённым уровнем качества бумаги. В приводимых ниже уравнениях (2) – (5) такие области обозначены через n , а секторы качества через s . Таким образом двоичная переменная x_{rn} принимает значение 1 только, если отрезаемый рулон r соответствует области n , подобным же образом значение 1 двоичной переменной x_{rs} означает, что этот рулон r находится в секторе качества s . Параметр W_r – это ширина

4 Построение математической модели и алгоритма оптимизации: в ходе этого учитывается множество факторов.



отрезаемого рулона r , r_r^{start} – положение левого края рулона r , W_n^B и W_n^E – начало (левый край) и конец (правый край) области n исходного рулона, наконец, S_s^B и S_s^E – начало (левый край) и конец (правый край) сектора качества s .

$$W_n^E = W_n^B + \sum x_{rm} \cdot W_r \quad (2)$$

$$r_r^{start} = W_n^B \text{ если } x_{rm} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_s x_{rs} = 1 \quad (4)$$

$$S_s^B \leq r_r^{start} \leq S_s^E \text{ если } x_{rs} = 1 \quad (5)$$

$$x_{rm}, x_{rs} \in \{0,1\},$$

при этом:

$x_{rm} = 1$, если отрезаемый рулон r соответствует области n

$x_{rs} = 1$, если отрезаемый рулон r находится в секторе качества s

Коротко говоря, уравнение (2) характеризует подбор ширины области в зависимости от соответствующего ей отрезаемого рулона. Область должна начинаться строго с левого края отрезаемого рулона, что выражается уравнением (3). Тот факт, что рулон может относиться только к одному сектору качества, выражается уравнением (4), а нахождение рулона в пределах этого одного сектора выражается уравнением (5). Таковы некоторые основные ограничения, вытекающие из данной задачи, выраженные математически и логически.

Применение интеллектуального алгоритма позволяет снизить потери в качестве до физически возможного минимума. Это гарантирует, что текущее планирование всегда идёт в ногу с требованиями качества.

Как сложить всё вместе

Визуализация компонентов, о которых говорилось выше, показана на рис. 4. Более важным, нежели владение математическим аппаратом, представляется понимание того, как всё сложить в одну ясную и стройную концепцию. Чтобы это проиллюстрировать, вновь обратимся к исходной задаче. Изложенные выше два аспекта математического моделирования в сочетании с двухэтапным подходом приводят к эффективному решению задачи разрезки исходного рулона с учётом требований качества. Практически реализовать полученное решение можно по-разному: или изменить расположение отрезаемых рулонов в один приём по всему исходному рулону (рис. 5а), или изменить последовательность чередования различных комплектов (рис. 5б).

В первом случае, расположение всех отрезаемых рулонов задается одновременно и таким обра-

зом, чтобы общая цена с учётом качества была как можно выше, тем самым сводится к минимуму влияние отклонений качества. В самом простом случае это означает, что наиболее ценный рулон должен быть помещён в хорошее место исходного рулона (и впоследствии вырезан оттуда). На рис. 5а красный цвет означает, что рулон следует забраковать, жёлтый цвет означает, что имеют место незначительные дефекты качества бумаги (уровень качества В).

Такой же приём может быть применён для изменения последовательности чередования различных комплектов. Действуя по вышеописанному принципу, можно, сочетая информацию о распределении качества в пределах исходного рулона с планом его раскроя, улучшить качество на выходе. Это достигается установкой комплектов в такие положения, в которых общая цена будет наибольшей.

Применение интеллектуального алгоритма, который решает эти две задачи в заданной последовательности позволяет снизить потери в качестве до физически возможного минимума. Это гарантирует, что текущее планирование всегда идёт в ногу с требованиями качества. Автоматическое объединение и исключение областей на исходном рулоне в направлении поперёк рулона можно превратить в оптимальное решение, как и шаблоны разрезки, применявшиеся ранее. В заключение отметим, что перекрёстные связи между производственным планированием и управлением качеством открывают дополнительные возможности для того, чтобы сделать продукцию более привлекательной с точки зрения экономичности и экологичности.

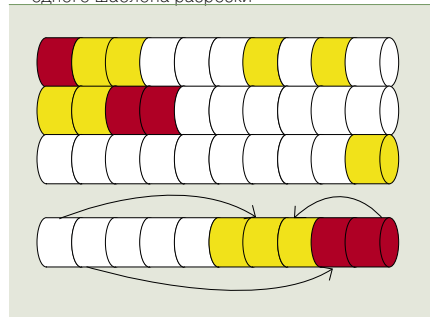
Пример для иллюстрации

Ниже рассматривается простой пример. Предполагается, что шаблон разрезки такой, как на вставке на с. 58.

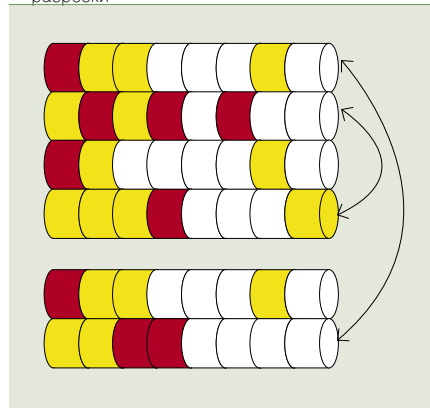
В данном примере полезная ширина исходного рулона 8000 мм. Суммарная ширина всех отрезаемых рулонов 7915 мм, следовательно потери раскроя составляют 85 мм. Требования качества ко всем отрезаемым рулонам абсолютно одинаковы, поэтому рассмотрение можно упростить, просто разделив исходный рулон (по ширине) на зоны с разным качеством бумаги. Если отрезаемый рулон по ширине перекрывает несколько зон качества бумаги, качество такого рулона считается по зоне с наихудшим качеством бумаги. Для наглядности распределение качества бумаги в исходном рулоне показано на рис. 6а различными цветами и тремя уровнями (А, В, С). Для рассматриваемой в данном примере проблемы оптимизации разрезки цена каждого отрезаемого рулона рассчитана, исходя из следующего: длина бумаги в исходном рулоне 5896 м, плотность

5 Два различных подхода в оптимизации.

а Перестановка отрезаемых рулонов в пределах одного шаблона разрезки



б Изменение порядка чередования шаблонов разрезки



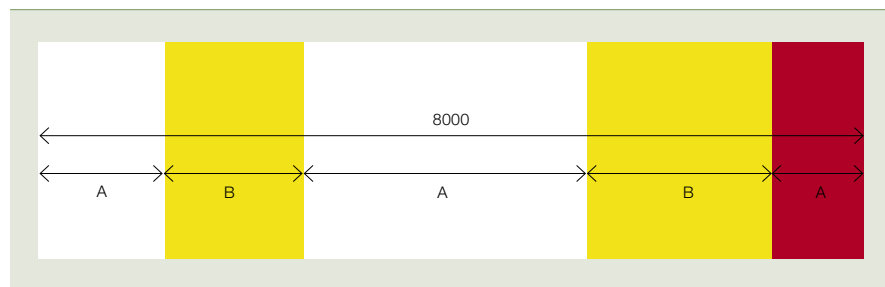
Рулоны бумаги, снятые с намоточного устройства бумагоделательной машины и готовые к упаковке



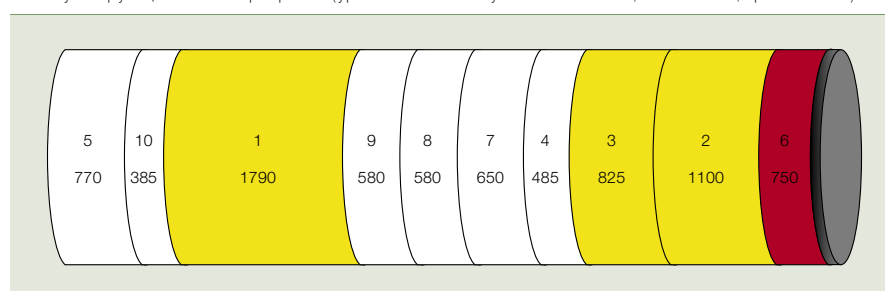
Измерение и управление

6 Решение задачи оптимальной разрезки исходя из распределения качества бумаги в исходном рулоне.

а Карта распределения качества бумаги в исходном рулоне



б Результирующий шаблон разрезки (уровни качества бумаги: белый – А, жёлтый – В, красный – С)



Данные к рис. 6 (ширина отрезаемых рулонов или шаблон разрезки)

Номер рулона	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина рулона, мм	1790	1100	825	485	770	750	650	580	580	385

бумаги 80 г/м², цена 500 евро за тонну. При уровне качества А (высокое качество) цена полная, при уровне В (мелкие дефекты) цена снижается на 30%, при уровне качества С (брак) продукция заказчиком не оплачивается.

Расположение всех отрезаемых рулонов задается одновременно и таким образом, чтобы общая цена с учётом качества была как можно выше, тем самым сводится к минимуму влияние отклонений качества.

Если не прибегать к оптимизации, а просто задать распределение ширины отрезаемых рулонов в как показано во вставке, общая прибыль составит 1236 евро. Использование алгоритма оптимизации на основе учёта качества даёт прибыль 1427 евро (т.е. увеличение на 15%). Эффективность оптимизации может меняться и всегда

существует возможность компромисса между качеством и эффективностью. Но в любом случае применение комбинированной стратегии даёт хороший результат за приемлемое время.

Главной целью является минимизация потерь раскроя, т.е. отходов, возникающих в случаях, когда полная ширина исходного рулона не соответствует суммарной ширине требуемых рулонов.

Отходы раскроя

Рассматриваемое решение не снимает проблему качества полностью, но сводит её к минимуму за счёт отыскания наиболее выгодного варианта и максимально эффективного использования текущего качества. Более того, растущая компетентность в вопросах качества повышает культуру планирования в целом и позволяет более основательно анализировать эффективность производства, исходя из вопросов качества.

Уменьшение потерь качества означает:

- сокращение затрат времени на изготовление;
- сокращение объёма переработки бракованной бумаги;
- сокращение расхода энергии и материалов;
- более полное удовлетворение требований заказчика по качеству;
- более точное соблюдение сроков поставок;
- меньшее воздействие на окружающую среду;
- меньшие общие затраты на производство;
- сокращение числа претензий по качеству;
- большая удовлетворённость заказчиков.

Всё это звучит тривиально. Но предлагаемое решение способствует тому, что все эти моменты становятся повседневной реальностью.

Ииро Харьюковски

ABB Corporate Research
Ладенбург, Германия
i.iro.harjunkoski@de.abb.com

Симо Сейневирта

ABB Process Industries
Хельсинки, Финляндия
simo.saynevirta@fi.abb.com

¹⁾ QCS: Quality Control System

²⁾ Задача рюкзака – комбинаторная задача оптимизации, целью которой является определение такого подмножества из заданного множества объектов, что сумма их стоимостей может быть как угодно близка к заданному пределу, не превышая его. Название задачи происходит от аналогии с рюкзаком, в ограниченный объём которого надо поместить как можно больше вещей.