

УДК 658

Процесс комплектования заказов на складе. Обзор

Коробков Е. В.^{1,*}

^{*}eug.korobkov@gmail.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Процесс комплектования заказов — наиболее времязатратная операция на складе — это процесс поиска и извлечения товаров из ячеек хранения с целью удовлетворения потребительского заказа. В данной статье представлена основная информация о складских функциях и перемещениях, а также дана классификация систем комплектования заказов по наличию ручного труда и уровню проработанности системы. Рассматриваются такие подзадачи комплектования заказов как проектирование планировки склада, распределение товаров по зоне хранения, группирование заказов по партиям, зонирование и накопление и сортировка. Статья является открывающей в цикле статей «Процесс комплектования заказов на складе».

Ключевые слова: склад, комплектование заказов, планировка, распределение, партии, зонирование, накопление, сортировка

Введение

Поставщик и потребитель товаров в общем случае представляют собой две системы, связанные логистическим каналом, т.е. некоторым множеством посредников, которые осуществляют доведение товаров от поставщика к потребителю. После конкретизации непосредственных участников данного процесса логистический канал преобразуется в логистическую цепь — линейно упорядоченное множество участников логистического процесса, целью которых является достижение товаром потребителя. В типовой логистической цепи могут быть выделены следующие главные звенья:

- снабжение материалами, сырьем и полуфабрикатами;
- хранение и управление запасами;
- товаропроизводство;
- распределение товаров;
- потребление готовой продукции.

В связи с большим числом логистических посредников, а также широким ассортиментом материальных ресурсов, использующихся при производстве товаров, на практике выделяют логистические цепи меньшей длины, например снабженческие или транспортно-складские, которые в совокупности представляют собой логистическую сеть.

Внутри логистической цепи материалы, сырье и готовая продукция должны быть физически перемещены из одного звена в другое (например, от места производства к месту потребления, от производителей к конечным пользователям). Во время данного процесса в течение определенного времени любые материальные ценности могут храниться в специально отведенных помещениях — складах.

Среди складских функций можно выделить комплектование заказов как наиболее важную. Комплектование заказов (*order picking*) — это процесс поиска и извлечения товаров из ячеек хранения с целью удовлетворения потребительского заказа. Процесс комплектования заказов может достигать по разным оценкам до 55% [1], 60% [2], 65% [3], 70% [4] от всех трудозатрат на складе. Таким образом, возможно заключить, что задача комплектования заказов является приоритетным направлением улучшения эффективности процесса складирования.

В последние десятилетия роль складов в целом, и процесса комплектования заказов в частности, в производственной цепочке существенно возросла. Очевидная задача хранения (*warehousing*) товаров дополнилась задачами проверки качества товара (*quality checking*), сборки заказов (*assembling*), упаковки товаров (*packaging*), группирования заказов по партиям (*batching*), реверсивной логистикой (возврат товаров, *reverse logistics*) и т.д.

Важную роль в усложнении задачи внутренней логистики склада играют персонализация заказов, узкие временные окна для комплектования заказов, точность и качество сборки, реверсивная логистика и защита окружающей среды — необходимые компоненты успешного склада как части логистической цепи предприятия, и всего предприятия в целом.

Основными мотивами использования складов являются [5]:

- экономия при транспортировке;
- экономия при производстве;
- экономия при использовании количественных скидок при закупках и скидок от закупок впрок;
- обслуживание точки коммерческого предложения;
- поддержка стратегии предприятия по обслуживанию потребителей;
- соответствие изменчивым условиям рынка (таким как, сезонность, флуктуация спроса, конкуренция);
- уменьшение временных и физических расстояний, существующих между производителем и потребителем;
- экономия на логистике соразмерно выбранному уровню обслуживания потребителей;
- поддержка логистической концепции «Точно в срок»;
- обеспечение возможности заказа различных товаров одновременно, а не в разных заказах;

– обеспечение временного хранения материалов перед утилизацией или переработкой;

– обеспечение перевалочного пункта при прямых поставках или кросс-докинге.

Статья является открывающей в цикле статей «Задача комплектования заказов на складе». Структура статьи следующая. В п. 1 представлена информация о складских функциях, операциях и перемещениях. В п. 2 приводится информация о системах комплектования заказов. В п. 3 представлен литературный обзор по подзадачам процесса комплектования заказов.

1. Складские функции, операции и перемещения

На рис. 1 представлены типовые складские операции (прямоугольники) и перемещения (стрелки). Существует три основные складские функции — перемещение (*movement*), хранение (*storage*) и передача информации (*information transfer*).

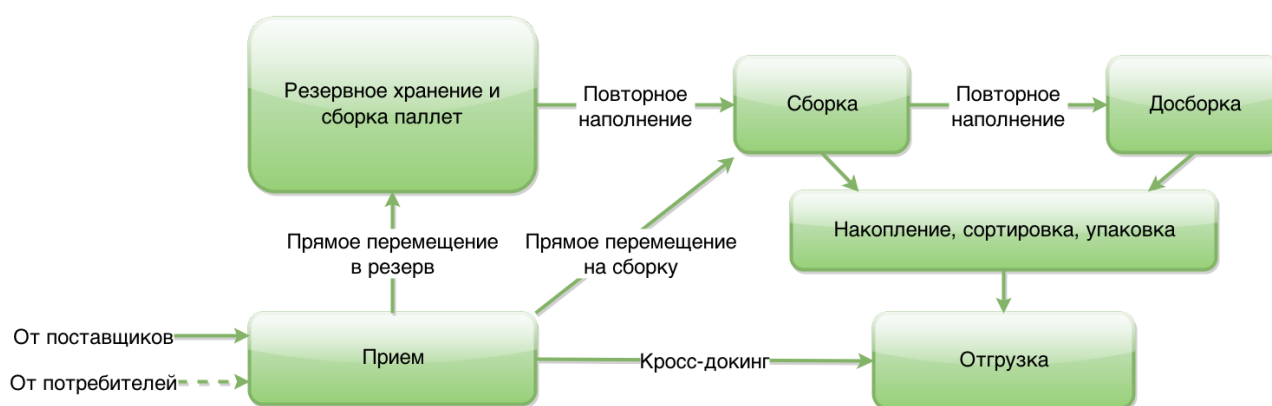


Рис. 1. Складские операции (прямоугольники) и перемещения (стрелки)

Функция перемещения может быть разделена на следующие действия: прием (*receiving*), перемещение (*transfer*) и распределение в ячейку хранения (*put away*), сборка заказов (*order picking*), накопление/сортировка (*accumulation/sortation*), кросс-докинг (*cross-docking*), отгрузка (*shipping*). Прием товаров включает в себя разгрузку транспортных средств перевозчиков, обновление записей инвентаризации, проверку целостности и соответствия. Перенос представляет собой перемещение принятых товаров к ячейкам хранения. На данном этапе также возможна переупаковка (например, целой паллеты в меньшие контейнеры) и физическое перемещение (из цеха приемки в различные функциональные зоны или между ними). Сборка включает в себя процесс получения необходимого числа требуемых товаров для множества потребительских заказов. Накопление/сортировка собранных товаров в индивидуальные потребительские заказы является необходимой операцией при поступлении партии заказов. Кросс-докинг представляет собой непосредственное перемещение поступивших товаров сразу в зону отгрузки, при этом возможна некоторая выдержка или обслуживание товаров на складе, без необходимости в сборке.

Функция хранения — это физическое сбережение товаров, ожидающих потребительского спроса. Форма хранения зависит от размера, количества и характеристик обслуживания товаров [6].

Передача информации — третья складская функция — возникает одновременно как с перемещением, так и с хранением. Она включает в себя информацию об инвентаризации, ячейках хранения, поставщиках и потребителях, приемках и отгрузках и т.д.

2. Комплектование заказов

Задача комплектования заказов включает в себя процессы кластеризации и планирования потребительских заказов, выборку товаров из ячеек хранения и отпуск собранных заказов на отгрузку.

2.1. Системы комплектования заказов

Существует множество систем комплектования заказов, причем внутри одного склада возможно сосуществование нескольких систем [7]. На рис. 2 представлена классификация систем комплектования заказов по наличию ручного труда.



Рис. 2. Классификация систем комплектования заказов по наличию ручного труда

Большинство складов требует участия человека при комплектации заказов (*manual-pick systems*). Наиболее распространены *picker-to-parts*-системы (далее *Pi2Pa*-системы), в которых сборщик заказов проходит или проезжает вдоль проходов для сборки товаров.

Pi2Pa-системы могут быть разделены на низко- (*low-level*) и высокоуровневые (*high-level*). Для первых характерно полочное складирование в коробках или ящиках. Сборщик заказов проходит вдоль стеллажей с тележкой подобно покупателям в супермаркете. В высокоуровневых *Pi2Pa*-системах сборщик заказов управляет погрузчиком или штабелером, с помощью которого он оперирует паллетами с товаром, расположенными и на высоте нескольких метров.

Parts-to-picker-системы (далее *Pa2Pi*-системы) включают в себя автоматические системы складирования (*AS/RS*-системы, *automated storage/retrieval systems*), чаще всего использующие специальные краны, которые могут перемещаться вдоль целого прохода для переноса товаров из ячеек хранения к месту сборки, в котором сборщик вручную собирает необходимое количество товара. Также, *Pa2Pi*-системы могут быть построены с использованием вертикальных подъемных модулей (*vertical lift models, VLM*) или каруселей (*carousels*), которые также предоставляют товары сборщику, ответственному за взятие необходимого количества.

Комбинированные системы комплектации заказов с ручной сборкой сочетают в себе принципы *Pi2Pa*- и *Pa2Pi*-систем.

Возможны сборка по товару (сборка по партиям, *batch picking*) и сборка по заказу (дискретная сборка, *discrete picking*). В случае сборки по товару несколько потребительских заказов (партия) собираются одним сборщиком одновременно. При этом, если сборщик сразу же во время продвижения начинает сортировку товара по отдельным заказам, то говорят о стратегии сортировки по время сборки (*sort-while-pick*-стратегия), а если сортировка начинается только по завершении процесса сборки, то — о стратегии сборки и сортировки (*pick-and-sort*-стратегия).

Еще одним критерием классификации систем комплектования заказов является зонирование (*zoning*). Зонирование подразумевает разбиение целого склада или его части на участки, на каждом из которых действует свой сборщик. В зависимости от стратегии сборки зонирование может быть двух видов — прогрессивное, или последовательное (*progressive/sequential*), и синхронизированное (*synchronized*). Под прогрессивной стратегией зонирования подразумевается, что каждая партия собирается в один момент времени только в одной зоне, и, соответственно, в один момент времени в каждой зоне собираются различные партии. Таким образом, партия может быть собрана только после последовательного посещения всех зон. При использовании стратегии синхронизированного зонирования все сборщики в один момент времени могут собирать только одну партию заказов.

Термин волновая сборка (*wave picking*) употребляется, если заказы для одного получателя (в фиксированное время с помощью одного перевозчика) отправляются на отгрузку с различных складских зон одновременно. Как правило, такая стратегия используется совместно с разбиением заказов по партиям. Следующая волна сборки начинается только по завершении предыдущей.

2.2. Сложность систем комплектования заказов

Проектирование реальных систем комплектования заказов является сложной задачей, в связи с большим числом внешних и внутренних факторов, влияющих на выбор конкретных решений. К внешним факторам относятся [8]:

- маркетинговые каналы;
- структура потребительского спроса;

- структура пополнения запасов и уровень инвентаризации поставщика;
- общий спрос на продукцию;
- состояние экономики.



Рис. 3. Сложность систем комплектования заказа

Внутренние факторы включают в себя системные характеристики, организацию и операционные правила системы комплектования заказов. Системные характеристики состоят из уровня механизации (*mechanization level*), доступности информации (*information ability*) и размерности склада (*warehouse dimensionality*) (рис. 3). Организация и операционные правила главным образом включают пять факторов — маршрутизацию (*routing*), хранение (*storage*), разбиение по партиям (*batching*), зонирование (*zoning*) и режим отпуска на отгрузку (*order release mode*). На рис. 3 представлен уровень сложности систем комплектования заказов (сложность увеличивается по мере отдаления от центра).

2.3. Цели проектирования комплектования заказов

Наиболее общей целью проектирования систем комплектования заказов является максимизация уровня обслуживания при условии ограничений по ресурсам — трудовым, аппаратным и капитальным [8]. Уровень обслуживания включает в себя множество факторов, таких как среднее время доставки заказа, целостность заказа и аккуратность. Связующим звеном между комплектованием заказов и уровнем обслуживания является то, что чем быстрее заказ будет отправлен на отгрузку, тем быстрее он станет доступным для покупателя. Таким образом, минимизация времени отправления заказа на отгрузку необходима для любой системы комплектования заказов. На рис. 4 представлены

временные затраты при комплектовании заказов в типовом распределительном центре. Около 50% времени занимает перемещение. В большинстве случаев минимизация времени перемещения является основным критерием оптимизации проектируемой системы комплектования заказов.



Рис. 4. Типовое распределение времени сборщика заказов

Очевидно, что минимизация среднего пройденного расстояния (или общего пройденного расстояния) является лишь одной из многих возможностей оптимизации всего процесса комплектования заказов. Другой важной целью является минимизация полной стоимости, которая включает как стоимость инвестиций, так и операционные расходы. Другими заслуживающими рассмотрения критериями оптимизации при проектировании склада являются:

- минимизация длительности производственного цикла заказа;
- минимизация общего времени производственного цикла;
- максимизация используемого пространства;
- максимизация используемого оборудования;
- максимизация используемых трудовых ресурсов;
- максимизация доступности всех товаров.

Данные цели должны рассматриваться согласно их актуальности в конкретной ситуации.

3. Подзадачи процесса комплектования заказов

Задачи планирования и оперирования процессом комплектования заказов рассматриваются как на функциональном, так и на операционном уровнях [9]. С точки зрения организации, задачами на данных уровнях являются:

- проектирование планировки (*layout design*) и размеров (*dimensioning*) складской системы;
- распределение товаров (*storage assignment*) по ячейкам хранения;

- распределение по партиям и зонирование;
- маршрутизация сборщиков заказов;
- накопление заказов/сортировка.

Вопросы проектирования складских систем рассмотрены в работах [1, 6, 9–12]. Задача управления процессом комплектования заказов рассмотрена в работах [8, 13–17]. Библиографический обзор по системам комплектования заказов представлен в работах [9, 13, 18–20]. Подзадача маршрутизации сборщиков заказов посвящены следующие работы в цикле статей «Задача комплектования заказов на складе».

3.1. Проектирование планировки

В контексте задачи комплектования заказов, задача проектирования планировки (*layout design problem*) включает в себя как планировку здания, содержащего систему комплектования заказов, так и планировку внутри системы.

Первая задача, как правило, относится к задаче проектирования планировки сооружения (*facility layout problem*). Ее решение позволяет определить расположение различных секций склада (приемка, сборка, сортировка, отгрузка и т.д.). При этом принимаются во внимание меж-секционная деятельность, затрагивающая более одной секции. Основной целью является минимизация стоимости обслуживания, которая во многих случаях может быть представлена линейной функцией от пройденного расстояния. Описание нескольких эффективных процедур по проектированию планировки представлено в работе [6]. Литературный обзор по задаче проектирования планировки представлен в работе [21].

Вторая задача относится к задаче проектирования внутренней планировки (*internal layout design problem*), или задаче конфигурации проходов (*aisle configuration problem*). Она затрагивает определение числа блоков (*blocks*) склада, а также числа, длины и ширины проходов (*aisles*) внутри каждого блока секции сборки. Блок представляет собой несколько сборочных ячеек различных сборочных проходов, ограниченных поперечными проходами, т.е. проходами, используемыми только для перемещения, но не для хранения. Основная цель заключается в нахождении наилучшей планировки склада с учетом определенных целевых функций среди планировок, отвечающих ограничениям и требованиям. Основной целевой функцией также является пройденное расстояние, подлежащее минимизации.

Основополагающей статьей, посвященной задаче проектирования внутренней планировки, является работа [22]. Авторы описывают несколько детерминированных моделей определения размеров склада таким образом, чтобы пройденное расстояние, затраченное время, неиспользуемое пространство были минимизированы. В работе [23] с помощью как аналитических методов, так и моделирования, исследуется влияние стратегии хранения (т.е., способа распределения товаров по ячейкам хранения) на внутреннюю планировку склада. Исследование влияния стохастического спроса и

различных уровней обслуживания на планировку склада и его вместимость представлено в работе [24].

В работе [13] предлагается нелинейная целевая функция (среднее время сборки заказов в зависимости от числа посещаемых за маршрут ячеек и числа сборочных проходов) для определения конфигурации проходов для складов со случайным распределением, в результате чего минимизируется средняя длина маршрута сборщика заказов. Те же цели достигаются в работе [25] для двухблочных складов (т.е. складов с одним поперечным проходом) с распределением по индексу *COI* (*Cube-per-Order-Index* — отношение занимаемого трехмерного пространства к числу заказов [26]). В работах [27–28] предлагаются решения для двухблочных складов с классовым распределением. В работе [29] доказывается влияние длины проходов и числа блоков на общее время сборки заказов.

3.2. Распределение товаров

Товар (или единица складского учета, *Stock Keeping Unit, SKU*) должен быть помещен в ячейку хранения перед тем, как он будет использован для сборки потребительского заказа. Метод распределения (*storage assignment method*) — это набор правил, используемых для распределения товаров по ячейкам хранения. В специализированной литературе выделяют следующие методы распределения.

Случайное распределение (*random storage assignment*). Данный метод распределения случайным образом размещает товары по доступным ячейкам хранения. Метод широко освещен в научных работах, и используется в качестве тестового для сравнения с разрабатываемыми методами.

Распределение в ближайшую свободную ячейку (*closest-open-location storage assignment*). На практике, поступающий товар часто распределяется в наиболее близкую свободную ячейку. Близость определяется преодолеваемым расстоянием от пункта приема/отгрузки товаров (или, базы, *input/output point, depot*) до ячейки хранения. Данный метод является наиболее легким и зачастую реализуется в случае, когда работники склада самостоятельно выбирают ячейки хранения. В результате, товары не привязаны к определенной ячейке и, в долгосрочной перспективе, их ячейки хранения оказываются разбросанными по всей зоне хранения. В работе [30] показывается, что в долгосрочной перспективе распределение в ближайшую свободную ячейку и случайное распределение сходятся друг к другу.

Выделенное распределение (*dedicated storage assignment*). При использовании данного метода, каждому товару ставится в соответствие ячейка хранения. Для минимизации преодолеваемого расстояния наиболее близкие к базе ячейки, как правило, резервируются для товаров с высоким ходом и низким занимаемым при хранении пространством. Ранним видом данного метода распределения является метод распределения с использованием индекса *COI*, который определяется отношением между пространством, занимаемым товаром при хранении, и частотой заказов, содержащий

данный товар. *COI*-ориентированное распределение исследуется в работах [26, 31–37]. *COI*-ориентированные методы сортируют товары по мере возрастания индекса *COI*, а ячейки хранения — по мере удаленности от базы. Затем, товары последовательно распределяются в ячейки таким образом, что товар с наименьшим индексом *COI* попадает в ближайшую к базе ячейку.

Объемно-ориентированное (частотно-ориентированное, ходовое, оборотное, *volume-based, frequency-based, turnover-based storage assignment*) распределение представляет собой еще один вид выделенного распределения. Ему уделяется внимание в работах [16, 38–42]. При использовании данного метода, товары размещаются в ячейки хранения согласно их (ожидаемому) объему выборок. Высокоходовые товары располагаются, как правило, поблизости от базы. Объем выборок может быть выражен в виде количества товара, необходимого для удовлетворения всех потребительских заказов за определенный промежуток времени, либо определен числом заказов, в которых необходим данный товар. Различия между данным методом и *COI*-ориентированным распределением заключается в том, что объемно-ориентированное распределение не учитывает занимаемое товарами при хранении пространство, а основывается только на популярности.

Распределение по классам (*class-based, group-based, ABC storage assignment*). Классовый (класс-ориентированный, групповой, ABC-метод) метод распределения размещает товары по ячейкам хранения на основе классов. Товары распределяются по классам в зависимости от своего оборота (общее количество, число заказов с данным товаром). На рис. 5 представлен пример распределения товаров на три класса.

Классы товаров сортируются по мере уменьшения оборота, складские ячейки сортируются по классам по мере удаления от базы. Затем, классы товаров распределяются по классам складских ячеек. Внутри класса ячеек товары размещаются случайным образом. Главным различием между данным методом и объемно-ориентированным распределением в том, что классовый метод размещает товары на основании классов, в то время как объемно-ориентированный метод — на основании товаров.

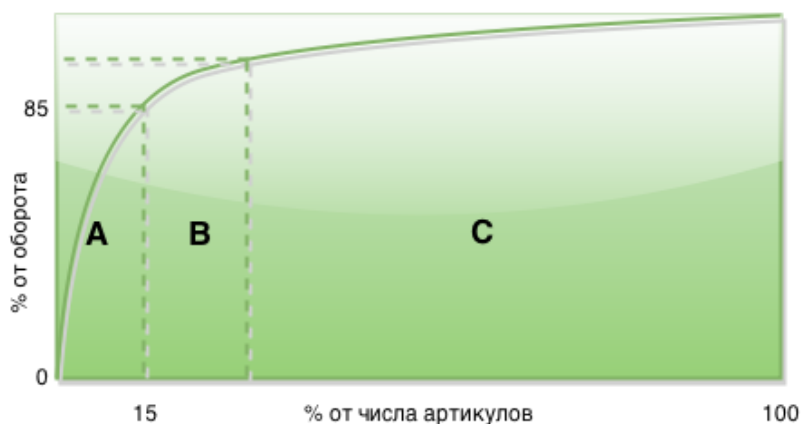


Рис. 5. Пример распределения товаров по классам

На рис. 6 представлены несколько вариантов распределения товаров с использованием классового метода распределения. Данный метод может быть рассмотрен как комбинация объемно-ориентированного и случайного методов распределения товаров. Однако, по сравнению со случайным распределением, классовое дает выигрыш в расстоянии. Недостатком данного метода является то, что он включает в себя несколько нетривиальных подзадач.



Рис. 6. Примеры распределения товаров по классам на складе

Первой подзадачей является определение классов. В теории управления запасами классическим способом разбиения товаров по классам в зависимости от их популярности является метод Парето. Его идея заключается в том, чтобы сгруппировать товары таким образом, чтобы наиболее ходовой товар (А-класса) содержал около 15% товаров от общего числа, но составлял около 85% от всего оборота. В работе [42] даются рекомендации, что для низкоуровневых систем комплектования заказов с ручной сборкой число классов должно варьироваться в промежутке от двух до четырех.

В специализированной литературе нет четких правил определения стратегии разбиения на классы. Как правило, число классов ограничивается тремя — А, В и С (для высоко-, средне- и низкоходовых товаров), вследствие чего данный метод также называется *ABC*-распределением. Однако, возможно разбиение и на большее число классов.

После разбиения товаров на классы необходимо предусмотреть достаточное для хранения товаров определенных классов складское пространство. При этом следует учитывать габариты товаров и упаковки, а также хранящееся количество. *ABC*-распределение может быть применено как к общему числу хранящегося товара, так и для резервирования под будущее хранение. Для определения местоположения классов на складе используется близость к базе, которая может меняться в зависимости от используемых методов маршрутизации.

Помимо вышеупомянутых классовому методу распределения посвящены публикации [27–28, 43–49].

Распределение по семействам (*family-grouping storage assignment*). Идея данного метода заключается в том, что товары, которые, как правило заказываются вместе, должны быть собраны за один обход и расположены близко друг к другу, и, таким образом, общее преодолеваемое расстояние снизится. Также, различные товары могут храниться рядом, если они поступили от одного поставщика. Для группирования по семействам необходимо знать, либо сделать допущение о статистической корреляции между товарами [50, 51]. Данный метод распределения товаров также может быть использован в комбинации с другими. Например, возможно сгруппировать товары, основываясь на их статистической корреляции, определить оборачиваемость каждого класса и затем распределить классы по складу на основании их оборота.

Выделяют два вида распределения товаров по семействам. Первый, основанный на комплементарности (*complimentary-based*), метод состоит из двух основных фаз. Во время первой фазы товары кластеризуются по группам на основании величины совместных запросов («комплемментарности»). Во время второй — товары распределяются внутри кластера как можно ближе друг к другу [14]. В работе [52] доказывается, что задача кластеризации может быть сформулирована в виде задачи о нахождении p -медианы. Для нахождения расположения кластеров, в работе [53] предлагается расположение наиболее ходовых товаров вблизи базы (объемно-ориентированная стратегия), в то время как в работе [54] предлагается учитывать также и занимаемое пространство (*COI*-ориентированная стратегия).

Второй метод распределения товаров по семействам кластеризует товары по группам, основываясь на контактной частоте (*contact-based*). Для заданного (оптимального) маршрута контактная частота (*contact frequency*) между i -ым и j -ым товарами определяется как число раз, когда сборщик собирает i -ый товар непосредственно после j -ого, или наоборот. Однако, оптимальный маршрут зависит от расположения товаров, что приводит к сильной взаимосвязи между расположением и маршрутизацией. Метод контактной частоты рассматривается в работах [55–56].

3.3. Группирование по партиям

В связи с высокой грузоподъемностью устройств транспортировки, крупные заказы могут собираться независимо от остальных (например, один заказ за один обход). Такой способ сборки относится к дискретной сборке. Однако, когда заказы небольшие, возможно уменьшить затраты на расстояние (и, таким образом, повысить эффективность) с помощью сборки набора заказов за один обход. Группирование по партиям (*batching*) — это метод группирования набора заказов в некоторое число поднаборов, каждый из которых собирается за один обход. Согласно работе [57], существует два критерия группирования по партиям — близость сборочных ячеек и смежность временных окон.

Группирование по близости (*proximity order batching*). Группирование по близости распределяет каждый заказ по партиям на основании близости сборочных ячеек заказа к сборочным ячейкам других заказов. Основной задачей при группировании по близости является определение «близости» заказов, что неявно подразумевает определение последовательности посещения набора ячеек. В работе [58] задача группирования по

близости рассматривается для складов с ручной волновой сборкой. Необходимо минимизировать максимальное время выполнения каждой партии (это, в частности, также является целью волновой сборки). Авторами доказывается, что в данном случае группирование является *NP*-трудной задачей. Авторами предлагается метод границ и ветвей для точного решения данной задачи для небольших размерностей и эвристическая процедура *2-opt* для больших размерностей.

В работе [59] задача распределения по партиям рассматривается для систем комплектования заказов с ручной сборкой. Авторы ставят более общую цель — минимизировать общее время передвижения. Доказывается, что задача является *NP*-трудной при числе заказов в партии более двух. Авторами разработан модифицированный метод ветвей и границ для близкого к оптимальному решению задачи при небольших размерностях. Для больших размерностей предлагается использование итерационного метода градиентного спуска.

В работе [60] для определения «близости» заказов принимается во внимание уровень перекрытия (или объединения, *association*) между заказами (заказы, имеющие большое число одинаковых товаров имеют высокий уровень перекрытия и могут сформировать партию). Авторы предлагают модель кластеризации для максимизирования общего перекрытия партий.

Вследствие того, что группирование по партиям является *NP*-трудной задачей, большое число работ посвящено разработке эвристических методов ее решения. Для систем комплектования заказов с ручной сборкой, возможно выделить два вида эвристик — посевные (*seed algorithms*) и сберегательные (*saving algorithms*) алгоритмы.

Посевные алгоритмы составляют партии в две фазы — выбор начального заказа и определение конгруэнтных заказов. Правила отбора начального алгоритма определяют первый заказ для каждой партии. Примерами правил отбора начального алгоритма могут являться: а) выбор случайного заказа; б) выбор заказа с наибольшим числом позиций; в) выбор заказа с наибольшим маршрутом сборки; г) выбор заказа с наиболее удаленными (от базы) ячейками хранения; д) выбор заказа с наиболее удаленными друг от друга сборочными проходами, которые необходимо посетить [61]. Правила конгруэнтности заказов определяют, какой нераспределенный заказ должен быть добавлен следующим в текущую партию. Как правило, включаемый в партию заказ выбирается на основе определения «расстояния» от начального заказа в партии. Например, а) число дополнительных проходов, которые необходимо будет посетить при включении заказа в партию; б) разница между центрами притяжения начального и добавляемого заказов; в) сумма расстояний между всеми ячейками заказа и ближайшими ячейками начального заказа [61]. Посевные алгоритмы рассматриваются в работах [27, 52, 61–65].

Сберегательные алгоритмы основаны на алгоритме Кларка–Райта для задачи маршрутизации транспорта: экономия расстояния достигается путем комбинирования набора небольших по расстоянию обходов в меньший набор больших по расстоянию обходов. В работе [61] приводится комплексное сравнение посевных и сберегательных эвристик для многопроходных *Pi2Pa*-систем комплектования заказов. Эффективность алгоритмов рассчитывается на двух различных эвристических методах маршрутизации

сборщиков заказов — *S*-образном (*S-shaped*) и с захождением на наибольший интервал (*largest gap*). Эвристики группирования по партиям сравниваются по времени передвижения, числу сформированных партий и по применимости на практике. Авторами заключается, что а) даже простые методы группирования по партиям приводят к существенному улучшению в сравнении с *FIFO*-стратегией; б) посевные алгоритмы имеют большую эффективность в сочетании с *S*-образным методом маршрутизации и высокой грузоподъемностью штабелеров, в то время как сберегательные алгоритмы имеют большую эффективность в сочетании с методом маршрутизации с захождением на наибольший интервал и низкой грузоподъемностью штабелеров.

Группирование по временным окнам (*time-window batching*). При группировании по временным окнам заказы, прибывающие в течение одного временного интервала (фиксированной или переменной длины), называемого временным окном, группируются в партию. Данные заказы обрабатываются совместно на последующих шагах. Если разбиение заказов не допускается (т.е. сборщик заказов собирает за один обход набор заказов целиком), то возможна сортировка товаров по заказам во время процесса сборки (стратегия сортировки во время сборки). Если разбиение заказов допускается, то после сборки необходимо проведение сортировки (стратегия сборки и сортировки). В работах [44, 66–70] рассматриваются различные методы группирования по временным окнам со стохастическим приходом заказов на системах комплектования заказов с ручной сборкой.

Упомянутые выше публикации не принимают во внимание время комплектования заказов и штрафы за превышение данного времени. В работе [71] рассматривается задача группирования по временным окнам в системе комплектования заказов с полуавтоматическим управлением с минимизацией штрафов и опозданий. Авторами предлагается эвристика, которая сначала производит группировку по партиям, а затем определяет времена завершения процессов комплектования для каждой партии.

3.4. Зонирование

Тесно связанная с группированием по партиям задача зонирования (*zoning*) — это задача разделения всей области сборки на некоторое число меньших областей (зон); каждой зоне назначается один или более сборщик, ответственный за сборку товаров из своей зоны. Основным преимуществом зонирования является уменьшение затрат на перемещение (из-за меньшей пересекаемой области, а также большей осведомленности сборщика о месторасположении товаров внутри своей зоны) и снижение трафика. В зависимости от стратегии сборки, зонирование может быть разделено на два типа — прогрессивное (*progressive*) и синхронизированное (*synchronized*).

Авторами работы [72] рассматривается влияние конфигурации проходов, правил складирования, а также правил зонирования и группирования заказов по партиям. Предлагается комбинация группирования по партиям и зонирования, позволяющая существенно повысить эффективность процесса сборки.

Согласно работе [29], конфигурация зон (число проходов в зоне, длина проходов), среднее число товаров в сборочном листе, а также правила хранения оказывают

существенное влияние на среднее расстояние, преодолеваемое сборщиками заказов внутри своей зоны.

В работе [73] изучается влияние трех стратегий внутри системы комплектования заказов — сборки одного заказа, сортировки во время сборки и сборки и сортировки. Авторами предлагается аналитический механизм, позволяющий быстро вычислять различные альтернативы без использования моделирования.

Несколько эвристических алгоритмов балансировки загрузки сборщиков заказов и определения размеров зон для флуктуаций объемов заказов в системе комплектования заказов с прогрессивным зонированием рассматриваются в работе [74].

Авторами работы [75] рассматривается задача эвристического распределения товаров по зонам в синхронизированной системе комплектования заказов. Предложенный метод основывается на совместном появлении товаров из одной зоны в одном заказе.

В работе [76] рассматривается задача определения оптимального числа проходов (для заданной области сборки) в сборочно-упаковочной системе комплектования заказов. Целью авторов является максимизирование пропускной способности системы.

Особым способом зонирования является т.н. метод «пожарной бригады» (*bucket brigade*), при котором сборщики последовательно собирают заказ вдоль поточной линии. Если рабочие расположены вдоль линии от самого медленного к самому быстрому (по отношению к направлению линии продукции), то спонтанно возникает сбалансированное распределение работы [77–81]. В системах с прогрессивным зонированием также возможно применение «пожарных бригад» [82]. Когда последний из сборщиков завершает комплектование заказа, он передает его на отгрузку или сортировку и возвращается к предпоследнему сборщику и принимает собранный им товар для завершения комплектования, и т.д. до первого сборщика, начинающего комплектование заказов. Важно, чтобы начинал комплектование наиболее медленный сборщик, а заканчивал — наиболее быстрый. «Пожарные бригады» могут рассматриваться как особый вид зонирования с изменяющимися размерами зон. В работе [82] показывается, что применение стратегии «пожарных бригад» может увеличить пропускную способность склада и уменьшить управленческие затраты.

«Пожарные бригады» также исследуются в работах [83–86].

3.5. Накопление/сортировка

Как правило, при применении группирования по партиям и/или зонирования некоторый дополнительный выигрыш возможно получить путем разбиения партий и объединения товаров по потребительским заказам или по путям назначения, по которым товары проследуют после отгрузки. Данный процесс называется накоплением/сортировкой (*Accumulation/Sortation, A/S*).

На рис. 7 представлена типовая A/S-система [87–88]. Товары группы заказов (волны заказов), которые необходимо отгрузить в конкретное число грузовиков, собираются в зоне сборки. Как правило, товары из одного заказа распределены по нескольким сборщикам заказов (для обеспечения большей эффективности), и сборщики заказов следуют заранее определенным маршрутам движения для сборки товаров. После этого

сборщики помещают товары на транспортировочный конвейер, по которому они доставляются сортировщику. Вследствие распределения заказов по более, чем одному сборщику, товары одного заказа пребывают к сортировщику в случайной последовательности. Товары поступают на круговой конвейер сортировщика и передаются на определенную отгрузочную линию только после того, как на конвейер поступили все определенные заказом товары. В противном случае, товары рециркулируют по круговому конвейеру. После отгрузки, отгрузочная линия становится свободной для очередного заказа. Пропускная способность A/S-системы зависит не только от мощности оборудования, но и от операционных правил, например от распределения заказов по линиям отгрузки.

Задача распределения заказов по линиям является ключевой во многих A/S-системах в связи с тем, что, как правило, число отгрузочных линий меньше числа заказов, что может приводить к блокированию заказов на подходе к линиям.

Число публикаций по A/S-системам невелико. В работе [89] исследуются преимущества использования рециркуляционного конвейера во избежание блокирования A/S-систем, когда отгрузочные линии заняты, подразумевая, что каждая линия отдана одному заказу. A/S-системам также посвящены работы [90–91].

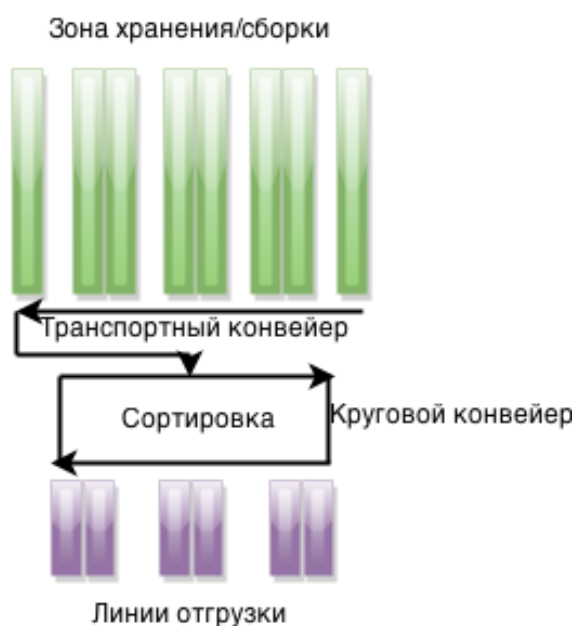


Рис. 7. Типовая система напекления/сортировки

Заключение

В статье представлен литературный обзор по таким подзадачам процесса комплектования заказов, как проектирование планировки, распределение товаров, группирование заказов по партиям, зонирование, накопление и сортировка. В продолжении цикла статей «Задача комплектования заказов на складе» будут

рассмотрены подзадача маршрутизации, эвристические методы ее решения, а также сравнение их эффективности.

Список литературы

1. Bartholdi III J.J., Hackman S.T. Warehouse and Distribution Science Release 0.94. Atlanta, GA: The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2011. 300 p.
2. Baumann H. Order Picking Supported by Mobile Computing. PhD Dissertation. University of Bremen, 2013. 190 p.
3. Coyle J., Bardi E., Langley J. The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective. Mason, OH: South-Western/Thomson Learning, 2003. 707 p.
4. Nave M. Einführung und Grundlagen // In: Kommissionierung: Effizient Picken und Packen. Handbuch / ed. by M. Pulverich, J. Schietinger. München: Verlag Heinrich Vogel, 2009. P. 16–29. (in German).
5. Lambert D.M., Stock J.R., Ellram L.M. Fundamentals of Logistics Management. Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill, 1998. 512 p.
6. Tompkins J.A. Facilities planning. New York, NY: John Wiley & Sons, 2010. 750 p.
7. De Koster R. How to Assess a Warehouse Operation in a Single Tour. Technology Report. Erasmus University, Netherlands, 2004. 18 p.
8. Goetschalckx M., Ashayeri J. Classification and Design of Order Picking // Logistics Information Management. 1989. Vol. 2, no. 2. P. 99–106. DOI: [10.1108/eb007469](https://doi.org/10.1108/eb007469)
9. Rouwenhorst B., Reuter B., Stockrahm V., Van Houtum G.J., Mantel R.J., Zijm W.H.M. Warehouse Design and Control: Framework and Literature Review // European Journal of Operational Research. 2000. Vol. 122, no. 3. P. 515–533. DOI: [10.1016/S0377-2217\(99\)00020-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00020-X)
10. Ashayeri J., Gelders L.F. Warehouse Design Optimization // European Journal of Operational Research. 1985. Vol. 21, no. 3. P. 285–294. DOI: [10.1016/0377-2217\(85\)90149-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90149-3)
11. Van den Berg J.P. A Literature Survey on Planning and Control of Warehousing Systems // IIE Transactions. 1999. Vol. 31, no. 8. P. 751–762. DOI: [10.1080/07408179908969874](https://doi.org/10.1080/07408179908969874)
12. Van den Berg J.P., Zijm W.H.M. Models for Warehouse Management: Classification and Examples // International Journal of Production Economics. 1999. Vol. 59, no. 1. P. 519–528. DOI: [10.1016/S0925-5273\(98\)00114-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00114-5)
13. Roodbergen K.J. Layout and Routing Methods for Warehouses. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2001. 172 p. (ERIM PhD Series Research in Management). Available at: <http://hdl.handle.net/1765/861>, accessed 01.02.2015.
14. Wäscher G. Order Picking: A Survey of Planning Problems and Methods // In: Supply Chain Management and Reverse Logistics / ed. by H. Dyckhoff, R. Lackes, J. Reese. Springer Berlin Heidelberg, 2004. P. 323–347. DOI: [10.1007/978-3-540-24815-6_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24815-6_15)

15. Le-Duc T. Design and Control of Efficient Order Picking Processes. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2005. 192 p. (ERIM PhD Series Research in Management). Available at: <http://hdl.handle.net/1765/6910> , accessed 01.02.2015.
16. Petersen C.G., Aase G. A Comparison of Picking, Storage, and Routing Policies in Manual Order Picking // International Journal of Production Economics. 2004. Vol. 92, no. 1. P. 11–19. DOI: [10.1016/j.ijpe.2003.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.09.006)
17. Park B.C. Order Picking: Issues, Systems and Models // In: Warehousing in the Global Supply Chain / ed. by R. Manzini. London: Springer, 2012. P. 1–30. DOI: [10.1007/978-1-4471-2274-6_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6_1)
18. Goetschalckx M., Wei R.P. Bibliography on Order Picking Systems (Vol. 1). Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, 1994. 29 p.
19. De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K.J. Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review // European Journal of Operational Research. 2007. Vol. 182, no. 2. P. 481–501. DOI: [10.1016/j.ejor.2006.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009)
20. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L.F. Research on Warehouse Design and Performance Evaluation: A Comprehensive Review // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 203, no. 3. P. 539–549. DOI: [10.1016/j.ejor.2009.07.031](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031)
21. Meller R.D., Gau K.Y. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives // Journal of Manufacturing Systems. 1996. Vol. 15, no. 5. P. 351–366. DOI: [10.1016/0278-6125\(96\)84198-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)84198-7)
22. Bassan Y., Roll Y., Rosenblatt M.J. Internal Layout Design of a Warehouse // AIIE Transactions. 1980. Vol. 12, no. 4. P. 317–322. DOI: [10.1080/05695558008974523](https://doi.org/10.1080/05695558008974523)
23. Rosenblatt M.J., Roll Y. Warehouse Design with Storage Policy Considerations // International Journal of Production Research. 1984. Vol. 22, no. 5. P. 809–821. DOI: [10.1080/00207548408942501](https://doi.org/10.1080/00207548408942501)
24. Rosenblatt M.J., Roll Y. Warehouse Capacity in a Stochastic Environment // International Journal of Production Research. 1988. Vol. 26, no. 12. P. 1847–1851. DOI: [10.1080/00207548808947999](https://doi.org/10.1080/00207548808947999)
25. Caron F., Marchet G., Perego A. Optimal Layout in Low-Level Picker-to-Part Systems // International Journal of Production Research. 1963. Vol. 38, no. 1, P. 101–117. DOI: [10.1080/002075400189608](https://doi.org/10.1080/002075400189608)
26. Heskett, J. L. Cube-per-Order Index — A Key to Warehouse Stock Location // Transportation and Distribution Management. 1963. Vol. 3, no. 1. P. 27–31.
27. Le-Duc T., De Koster R. Travel Distance Estimation and Storage Zone Optimization in a 2-Block Class-Based Strategy Warehouse // International Journal of Production Research. 2005. Vol. 43, no. 17. P. 3561–3581. DOI: [10.1080/00207540500142894](https://doi.org/10.1080/00207540500142894)
28. Le-Duc T., De Koster R. Layout Optimization for Class-Based storage Strategy Warehouses // In: Managing Supply Chains: Challenges and Opportunities / ed. by R. De Koster, W. Delfmann. Copenhagen: Copenhagen Business School Press DK, 2007. P. 191–214.

29. Petersen C. Considerations in Order Picking Zone Configuration // International Journal of Operations and Production Management. 2002. Vol. 22, no. 7. P. 793–805. DOI: [10.1108/01443570210433553](https://doi.org/10.1108/01443570210433553)
30. Schwarz L.B., Graves S.C., Hausman W.H. Scheduling Policies for Automatic Warehousing Systems: Simulation Results // AIIE Transactions. 1978. Vol. 10, no. 3. P. 260–270. DOI: [10.1080/05695557808975213](https://doi.org/10.1080/05695557808975213)
31. Heskett J.L. Putting the Cube-per-Order Index to Work in Warehouse Layout // Transportation and Distribution Management. 1964. Vol. 4, no. 8. P. 23–30.
32. Kallina C., Lynn J. Application of the Cube-per-Order Index Rule for Stock Location in a Distribution Warehouse // Interfaces. 1976. Vol. 7, no. 1. P. 37–46. DOI: [10.1287/inte.7.1.37](https://doi.org/10.1287/inte.7.1.37)
33. Malmberg C.J., Krishnakumar B. On the Optimality of the Cube per Order Index for Conventional Warehouses with Dual Command Cycles // Material Flow. 1987. Vol. 4, no. 3. P. 169–175.
34. Malmberg C.J., Krishnakumar B. Optimal Storage Assignment Policies for Multiaddress Warehousing System // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1989. Vol. 19, no. 2. P. 197–204. DOI: [10.1109/21.31026](https://doi.org/10.1109/21.31026)
35. Malmberg C.J., Krishnakumar B. A Revised Proof of Optimality for the Cube-per-Order Index Rule for Stored Item Location // Applied Mathematical Modelling. 1990. Vol. 14, no. 2. P. 87–95. DOI: [10.1016/0307-904X\(90\)90076-H](https://doi.org/10.1016/0307-904X(90)90076-H)
36. Malmberg C.J. Optimization of Cube-per-Order Index Warehouse Layouts with Zoning Constraints // International Journal of Production Research. 1995. Vol. 33, no. 2. P. 465–482. DOI: [10.1080/00207549508930160](https://doi.org/10.1080/00207549508930160)
37. Malmberg C.J. Storage Assignment Policy Tradeoffs // International Journal of Production Research. 1996. Vol. 34, no. 2. P. 363–378.
38. Petersen II C.G. An Evaluation of Order Picking Routeing Policies // International Journal of Operations and Production Management. 1997. Vol. 17, no. 11. P. 1098–1111. DOI: [10.1108/01443579710177860](https://doi.org/10.1108/01443579710177860)
39. Petersen II C.G. The Impact of Routing and Storage Policies on Warehouse Efficiency // International Journal of Operations and Production Management. 1999. Vol. 19, no. 10. P. 1053–1064. DOI: [10.1108/01443579910287073](https://doi.org/10.1108/01443579910287073)
40. Petersen II C.G. An Evaluation of Order Picking Policies for Mail Order Companies // Production and Operations Management. 2000. Vol. 9, no. 4. P. 319–335. DOI: [10.1111/j.1937-5956.2000.tb00461.x](https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2000.tb00461.x)
41. Petersen II C.G., Schmenner R.W. An Evaluation of Routing and Volume-Based Storage Policies in an Order Picking Operation // Decision Sciences. 1999. Vol. 30, no. 2. P. 481–501. DOI: [10.1111/j.1540-5915.1999.tb01619.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1999.tb01619.x)
42. Petersen II C.G., Aase G.R., Heiser D.R. Improving Order-Picking Performance through the Implementation of Class-Based Storage // International Journal of Physical Distribution and

Logistics Management. 2004. Vol. 34, no. 7. P. 532–544. DOI:

[10.1108/09600030410552230](https://doi.org/10.1108/09600030410552230)

43. Jarvis J.M., McDowell E.D. Optimal Product Layout in an Order Picking Warehouse // IIE Transactions. 1991. Vol. 23, no. 1. P. 93–102. DOI: [10.1080/07408179108963844](https://doi.org/10.1080/07408179108963844)
44. Tang L.C., Chew E P. Order Picking Systems: Batching and Storage Assignment Strategies // Computers and Industrial Engineering. 1997. Vol. 33, no. 3. P. 817–820. DOI: [10.1016/S0360-8352\(97\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00245-3)
45. Adil G.K. A Branch and Bound Algorithm for Class Based Storage Location Assignment // European Journal of Operational Research. 2008. Vol. 189, no. 2. P. 492–507. DOI: [10.1016/j.ejor.2007.05.050](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.050)
46. Chiang D.M.H., Lin C.P., Chen M.C. The Adaptive Approach for Storage Assignment by Mining Data of Warehouse Management System for Distribution Centres // Enterprise Information Systems. 2011. Vol. 5, no. 2. P. 219–234. DOI: [10.1080/17517575.2010.537784](https://doi.org/10.1080/17517575.2010.537784)
47. Berglund P., Batta R. Optimal Placement of Warehouse Cross-Aisles in a Picker-to-Part Warehouse with Class-Based Storage // IIE Transactions. 2012. Vol. 44, no. 2. P. 107–120. DOI: [10.1080/0740817X.2011.578608](https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.578608)
48. Rao S.S., Adil G.K. Class-Based Storage with Exact S-Shaped Traversal Routeing in Low-Level Picker-to-Part Systems // International Journal of Production Research. 2013. Vol. 51, no. 16. P. 4979–4996.
49. Rao S.S., Adil G.K. Optimal Class Boundaries, Number of Aisles, and Pick List Size for Low-Level Order Picking Systems // IIE Transactions. 2013. Vol. 45, no. 12. P. 1309–1321.
50. Frazee E.A., Sharp G.P. Correlated Assignment Strategy Can Improve Any Order-Picking Operation // Industrial Engineering. 1989. Vol. 21, no. 4. P. 33–37.
51. Brynzer H., Johansson M.I. Storage Location Assignment: Using the Product Structure to Reduce Order Picking Times // International Journal of Production Economics. 1996. Vol. 46. P. 595–603. DOI: [10.1016/0925-5273\(94\)00091-3](https://doi.org/10.1016/0925-5273(94)00091-3)
52. Rosenwein M.B. An Application of Cluster Analysis to the Problem of Locating Items within a Warehouse // IIE Transactions. 1994. Vol. 26, no. 1. P. 101–103. DOI: [10.1080/07408179408966588](https://doi.org/10.1080/07408179408966588)
53. Liu C. Clustering Techniques for Stock Location and Order-Picking in a Distribution Center // Computers and Operations Research. 1999. Vol. 26, no. 10-11. P. 989–1002. DOI: [10.1016/S0305-0548\(99\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00026-X)
54. Lee M.K. A Storage Assignment Policy in a Man-Aboard Automated Storage/Retrieval System // International Journal of Production Research. 1992. Vol. 30, no. 10. P. 2281–2292.
55. Van Oudheusden D.L., Tzen Y.J.J., Ko H. Improving Storage and Order Picking in a Person-on-Board AS/R System: A Case Study // Engineering Costs and Production Economics. 1988. Vol. 13, no. 4. P. 273–283. DOI: [10.1016/0167-188X\(88\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0167-188X(88)90013-4)

56. Van Oudheusden D.L., Zhu W. Storage Layout of AS/RS Racks Based on Recurrent Orders // *European Journal of Operational Research*. 1992. Vol. 58, no. 1. P. 48–56. DOI: [10.1016/0377-2217\(92\)90234-Z](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90234-Z)
57. Il-Choe K., Sharp G. Small Parts Order Picking: Design and Operation. Available at: <http://www.isye.gatech.edu/logisticstutorial/order/article.thm> , accessed October 2014.
58. Gademann A.J.R.N., van den Berg J.P., van der Hoff H.H. An Order Batching Algorithm for Wave Picking in a Parallel-Aisle Warehouse // *IIE Transactions*. 2001. Vol. 33, no. 5. P. 385–398. DOI: [10.1080/07408170108936837](https://doi.org/10.1080/07408170108936837)
59. Gademann N., Velde S. Order Batching to Minimize Total Travel Time in a Parallel-Aisle Warehouse // *IIE Transactions*. 2005. Vol. 37, no. 1. P. 63–75. DOI: [10.1080/07408170590516917](https://doi.org/10.1080/07408170590516917)
60. Chen M.C., Wu H.P. An Association-Based Clustering Approach to Order Batching Considering Customers Demand Patterns // *Omega*. 2005. Vol. 33, no. 4. P. 333–343. DOI: [10.1016/j.omega.2004.05.003](https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.05.003)
61. De Koster R., van der Poort E.S., Wolters M. Efficient Orderbatching Methods in Warehouse // *International Journal of Production Research*. 1999. Vol. 37, no. 7. P. 1479–1504.
62. Hsu C.M., Chen K.Y., Chen M.C. Batching Orders in Warehouses by Minimizing Travel Distance with Genetic Algorithms // *Computers in Industry*. 2005. Vol. 56, no. 2. P. 169–178. DOI: [10.1016/j.compind.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compind.2004.06.001)
63. Ho Y.C., Tseng Y.Y. A Study on Order-Batching Methods of Order-Picking in a Distribution Centre with Two Cross-Aisles // *International Journal of Production Research*. 2006. Vol. 44, no. 1. P. 3391–3417. DOI: [10.1080/00207540600558015](https://doi.org/10.1080/00207540600558015)
64. Ho Y.C., Su T.S., Shi Z.B. Order-Batching Methods for an Order-Picking Warehouse with Two Cross Aisles // *Computers and Industrial Engineering*. 2008. Vol. 55, no. 2. P. 321–347. DOI: [10.1016/j.cie.2007.12.018](https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.018)
65. Tsai C.Y., Liou J.J., Huang T.M. Using a Multiple-GA Method to Solve the Batch Picking Problem: Considering Travel Distance and Order Due Time // *International Journal of Production Research*. 2008. Vol. 46, no. 2. P. 6533–6555. DOI: [10.1080/00207540701441947](https://doi.org/10.1080/00207540701441947)
66. Chew E.P., Tang L.C. Travel Time Analysis for General Item Location Assignment in a Rectangular Warehouse // *European Journal of Operational Research*. 1999. Vol. 112, no. 3. P. 582–597. DOI: [10.1016/S0377-2217\(97\)00416-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00416-5)
67. Le-Duc T., De Koster R. An Approximation for Determining the Optimal Picking Batch Size for Order Picker in Single Aisle Warehouses // In: *Progress in Material Handling Research 2002* / ed. by M.K. Ogle, B.A. Peters, R. Meller, J. Usher. Charlotte: Material Handling Institute, 2003. P. 267–286.
68. Le-Duc T., De Koster R. Travel Time Estimation and Order Batching in a 2-Block Warehouse // *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 176, no. 1. P. 374–388. DOI: [10.1016/j.ejor.2005.03.052](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.052)

69. Van Nieuwenhuysen I., De Koster R. Evaluating Order Throughput Time in 2-Block Warehouses with Time Window Batching // *International Journal of Production Economics*. 2009. Vol. 121, no. 2. P. 654–664. DOI: [10.1016/j.ijpe.2009.01.013](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.01.013)
70. Yu M., De Koster R. The Impact of Order Batching and Picking Area Zoning on Order Picking System Performance // *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 198, no. 2. P. 480–490. DOI: [10.1016/j.ejor.2008.09.011](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.09.011)
71. Elseyyed E.A., Lee M.K., Kim S., Scherer E. Sequencing and Batching Procedures for Minimizing Earliness and Tardiness Penalty of Order Retrievals // *International Journal of Production Research*. 1993, Vol. 31, no. 3. P. 727–738. DOI: [10.1080/00207549308956753](https://doi.org/10.1080/00207549308956753)
72. Mellema P.M., Smith C.A. Simulation Analysis of Narrow-Aisle Order Selection Systems // *Proceedings of the 20th Conference on Winter Simulation (WSC'88)*. 1988. P. 597–602. DOI: [10.1145/318123.318273](https://doi.org/10.1145/318123.318273)
73. Choe K.I., Sharp G.P., Serfozo R.S. Aisle-Based Order Pick Systems with Batching, Zoning and Sorting // In: *Progress in Material Handling Research*. Charlotte, NC: The Material Handling Industry of America, 1993. P. 245–276.
74. Jane C.C. Storage Location Assignment in a Distribution Center // *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*. 2000. Vol. 30, no. 1. P. 55–71. DOI: [10.1108/09600030010307984](https://doi.org/10.1108/09600030010307984)
75. Jane C.C., Lai Y. A Clustering Algorithm for Item Assignment in a Synchronized Zone Order Picking System // *European Journal of Operational Research*. 2005. Vol. 166, no. 2. P. 489–496. DOI: [10.1016/j.ejor.2004.01.042](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.042)
76. De Koster R., Le-Duc T., Zaerpour N. Determining the number of zones in a pick-and-sort order picking system // *International Journal of Production Research*. 2012. Vol. 50, no. 3. P. 757–771. DOI: [10.1080/00207543.2010.543941](https://doi.org/10.1080/00207543.2010.543941)
77. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D. A Production Line That Balances Itself // *Operations Research*. 1996. Vol. 44, no. 1. P. 21–34.
78. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D. Using Bucket Brigades to Migrate from Craft Manufacturing to Assembly Lines // *Manufacturing and Service Operations Management*. 2005, Vol. 7, no. 2. P. 121–129. DOI: [10.1287/msom.1040.0059](https://doi.org/10.1287/msom.1040.0059)
79. Bartholdi III J.J., Bunimovich L.A., Eisenstein D.D. Dynamics of Two- and Three-Worker «Bucket Brigade» Production Lines // *Operations Research*. 1999. Vol. 47, no. 3. P. 488–491.
80. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D., Foley R.D. Performance of Bucket Brigades When Work Is Stochastic // *Operations Research*. 2001. Vol. 49, no. 5. P. 710–719. DOI: [10.1287/opre.49.5.710.10609](https://doi.org/10.1287/opre.49.5.710.10609)
81. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D., Lim Y.F. Bucket Brigades on In-Three Assembly Networks // *European Journal of Operational Research*. 2006. Vol. 168, no. 3. P. 870–879. DOI: [10.1016/j.ejor.2004.07.034](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.034)

82. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D. Bucket Brigades: A Self-Organizing Scheme for Sharing Work (working paper). School of Industrial Engineering. USA, 1998. 12 p.
83. Bratcu A.I., Dolgui A. A Survey of the Self-Balancing Production Lines («Bucket Brigades») // Journal of Intelligent Manufacturing. 2005. Vol. 16, no. 2. P. 139–158.
84. Armbruster D., Gel E.S., Murakami J. Bucket Brigades with Worker Learning // European Journal of Operational Research. 2007. Vol. 176, no. 1. P. 264–274. DOI: [10.1016/j.ejor.2005.06.052](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.052)
85. Koo P.H. The Use of Bucket Brigades in Zone Order Picking Systems // OR Spectrum. 2009. Vol. 31, no. 4. P. 759–774. DOI: [10.1007/s00291-008-0131-x](https://doi.org/10.1007/s00291-008-0131-x)
86. De Carlo F., Borgia O., Tucci M. Bucket brigades to increase productivity in a luxury assembly line // International Journal of Engineering Business Management. 2013. Vol. 5. P. 1–9. DOI: [10.5772/56837](https://doi.org/10.5772/56837)
87. Meller R.D. Optimal Order-to-Lane Assignments in an Order Accumulation/Sortation System // IIE Transactions. 1997. Vol. 29, no. 4. P. 293–301. DOI: [10.1080/07408179708966335](https://doi.org/10.1080/07408179708966335)
88. Johnson M.E. The Impact of Sorting Strategies on Automated Sortation System Performance // IIE Transactions. 1997. Vol. 30, no. 1. P. 67–77. DOI: [10.1080/07408179808966438](https://doi.org/10.1080/07408179808966438)
89. Bozer Y.A., Sharp G.P. An Empirical Evaluation of a General Purpose Automated Order Accumulation and Sortation System Used in Batch Picking // Material Flow. 1985. Vol. 2, no. 2–3. P. 111–131.
90. Bozer Y.A., Quiroz M.A., Sharp G.P. An Evaluation of Alternative Control Strategies and Design Issues for Automated Order Accumulation and Sortation Systems // Material Flow. 1988. Vol. 4, no. 4. P. 265–282.
91. Johnson M.E., Lofgren T. Model Decomposition Speeds Distribution Center Design // Interfaces. 1994. Vol. 24, no. 5. P. 95–106. DOI: [10.1287/inte.24.5.95](https://doi.org/10.1287/inte.24.5.95)

Warehouse Order-Picking Process. Review

E.V. Korobkov^{1,*}

^{*}eug.korobkov@gmail.com

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: warehouse, order-picking, warehouse layout problem, storage assignment, batching, zoning, accumulation, sortation

This article describes basic warehousing activities, namely: movement, information storage and transfer, as well as connections between typical warehouse operations (reception, transfer, assigning storage position and put-away, order-picking, hoarding and sorting, cross-docking, shipping). It presents a classification of the warehouse order-picking systems in terms of manual labor on offer as well as external (marketing channels, consumer's demand structure, supplier's replenishment structure and inventory level, total production demand, economic situation) and internal (mechanization level, information accessibility, warehouse dimensionality, method of dispatch for shipping, zoning, batching, storage assignment method, routing method) factors affecting the designing systems complexity. Basic optimization considerations are described. There is a literature review on the following sub-problems of planning and control of order-picking processes.

A layout design problem has been taken in account at two levels — external (facility layout problem) and internal (aisle configuration problem). For a problem of distributing goods or stock keeping units the following methods are emphasized: random, nearest open storage position, and dedicated (COI-based, frequency-based) distribution, as well as class-based and family-grouped (complimentary- and contact-based) one. Batching problem can be solved by two main methods, i.e. proximity order batching (seed and saving algorithms) and time-window order batching. There are two strategies for a zoning problem: progressive and synchronized, and also a special case of zoning — bucket brigades method. Hoarding/sorting problem is briefly reviewed. Order-picking routing problem will be thoroughly described in the next article of the cycle “Warehouse order-picking process”.

References

1. Bartholdi III J.J., Hackman S.T. *Warehouse and Distribution Science Release 0.94*. Atlanta, GA, The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2011. 300 p.

2. Baumann H. *Order Picking Supported by Mobile Computing*. PhD Dissertation. University of Bremen, 2013. 190 p.
3. Coyle J., Bardi E., Langley J. *The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective*. Mason, OH, South-Western/Thomson Learning, 2003. 707 p.
4. Nave M. Einführung und Grundlagen. In: Pulverich M., Schietinger J., eds. *Kommissionierung: Effizient Picken und Packen. Handbuch*. München, Verlag Heinrich Vogel, 2009, pp. 16–29. (in German).
5. Lambert D.M., Stock J.R., Ellram L.M. *Fundamentals of Logistics Management*. Boston, MA, Irwin/McGraw-Hill, 1998. 512 p.
6. Tompkins J.A. *Facilities planning*. New York, NY, John Wiley & Sons, 2010. 750 p.
7. De Koster R. *How to Assess a Warehouse Operation in a Single Tour*. Technology Report. Erasmus University, Netherlands, 2004. 18 p.
8. Goetschalckx M., Ashayeri J. Classification and Design of Order Picking. *Logistics Information Management*, 1989, vol. 2, no. 2, pp. 99–106. DOI: [10.1108/eb007469](https://doi.org/10.1108/eb007469)
9. Rouwenhorst B., Reuter B., Stockrahm V., Van Houtum G.J., Mantel R.J., Zijm W.H.M. Warehouse Design and Control: Framework and Literature Review. *European Journal of Operational Research*, 2000, vol. 122, no. 3, pp. 515–533. DOI: [10.1016/S0377-2217\(99\)00020-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00020-X)
10. Ashayeri J., Gelders L.F. Warehouse Design Optimization. *European Journal of Operational Research*, 1985, vol. 21, no. 3, pp. 285–294. DOI: [10.1016/0377-2217\(85\)90149-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90149-3)
11. Van den Berg J.P. A Literature Survey on Planning and Control of Warehousing Systems. *IIE Transactions*, 1999, vol. 31, no. 8, pp. 751–762. DOI: [10.1080/07408179908969874](https://doi.org/10.1080/07408179908969874)
12. Van den Berg J.P., Zijm W.H.M. Models for Warehouse Management: Classification and Examples. *International Journal of Production Economics*, 1999, vol. 59, no. 1, pp. 519–528. DOI: [10.1016/S0925-5273\(98\)00114-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00114-5)
13. Roodbergen K.J. *Layout and Routing Methods for Warehouses*. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2001. 172 p. (ERIM PhD Series Research in Management). Available at: <http://hdl.handle.net/1765/861> , accessed 01.02.2015.
14. Wäscher G. Order Picking: A Survey of Planning Problems and Methods. In: Dyckhoff H., Lackes R., Reese J., eds. *Supply Chain Management and Reverse Logistics*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 323–347. DOI: [10.1007/978-3-540-24815-6_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24815-6_15)
15. Le-Duc T. *Design and Control of Efficient Order Picking Processes*. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2005. 192 p. (ERIM PhD Series Research in Management). Available at: <http://hdl.handle.net/1765/6910> , accessed 01.02.2015.
16. Petersen C.G., Aase G. A Comparison of Picking, Storage, and Routing Policies in Manual Order Picking. *International Journal of Production Economics*, 2004, vol. 92, no. 1, pp. 11–19. DOI: [10.1016/j.ijpe.2003.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.09.006)
17. Park B.C. Order Picking: Issues, Systems and Models. In: Manzini R., ed. *Warehousing in the Global Supply Chain*. London, Springer, 2012, pp. 1–30. DOI: [10.1007/978-1-4471-2274-6_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6_1)

18. Goetschalckx M., Wei R.P. *Bibliography on Order Picking Systems (Vol. 1)*. Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, 1994. 29 p.
19. De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K.J. Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. *European Journal of Operational Research*, 2007, vol. 182, no. 2, pp. 481–501. DOI: [10.1016/j.ejor.2006.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009)
20. Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L.F. Research on Warehouse Design and Performance Evaluation: A Comprehensive Review. *European Journal of Operational Research*, 2010, vol. 203, no. 3, pp. 539–549. DOI: [10.1016/j.ejor.2009.07.031](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031)
21. Meller R.D., Gau K.Y. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 1996, vol. 15, no. 5, pp. 351–366. DOI: [10.1016/0278-6125\(96\)84198-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)84198-7)
22. Bassan Y., Roll Y., Rosenblatt M.J. Internal Layout Design of a Warehouse. *AIIE Transactions*, 1980. Vol. 12, no. 4, pp. 317–322. DOI: [10.1080/05695558008974523](https://doi.org/10.1080/05695558008974523)
23. Rosenblatt M.J., Roll Y. Warehouse Design with Storage Policy Considerations. *International Journal of Production Research*, 1984, vol. 22, no. 5, pp. 809–821. DOI: [10.1080/00207548408942501](https://doi.org/10.1080/00207548408942501)
24. Rosenblatt M.J., Roll Y. Warehouse Capacity in a Stochastic Environment. *International Journal of Production Research*, 1988, vol. 26, no. 12, pp. 1847–1851. DOI: [10.1080/00207548808947999](https://doi.org/10.1080/00207548808947999)
25. Caron F., Marchet G., Perego A. Optimal Layout in Low-Level Picker-to-Part Systems. *International Journal of Production Research*. 1963, vol. 38, no. 1, P. 101–117. DOI: [10.1080/002075400189608](https://doi.org/10.1080/002075400189608)
26. Heskett, J. L. Cube-per-Order Index — A Key to Warehouse Stock Location. *Transportation and Distribution Management*, 1963, vol. 3, no. 1. pp. 27–31.
27. Le-Duc T., De Koster R. Travel Distance Estimation and Storage Zone Optimization in a 2-Block Class-Based Strategy Warehouse. *International Journal of Production Research*, 2005, vol. 43, no. 17, pp. 3561–3581. DOI: [10.1080/00207540500142894](https://doi.org/10.1080/00207540500142894)
28. Le-Duc T., De Koster R. Layout Optimization for Class-Based storage Strategy Warehouses. In: De Koster R., Delfmann W., ed. *Managing Supply Chains: Challenges and Opportunities*. Copenhagen, Copenhagen Business School Press DK, 2007, pp. 191–214.
29. Petersen C. Considerations in Order Picking Zone Configuration. *International Journal of Operations and Production Management*, 2002, vol. 22, no. 7, pp. 793–805. DOI: [10.1108/01443570210433553](https://doi.org/10.1108/01443570210433553)
30. Schwarz L.B., Graves S.C., Hausman W.H. Scheduling Policies for Automatic Warehousing Systems: Simulation Results. *AIIE Transactions*, 1978, vol. 10, no. 3, pp. 260–270. DOI: [10.1080/05695557808975213](https://doi.org/10.1080/05695557808975213)
31. Heskett J.L. Putting the Cube-per-Order Index to Work in Warehouse Layout. *Transportation and Distribution Management*, 1964, vol. 4, no. 8, pp. 23–30.

32. Kallina C., Lynn J. Application of the Cube-per-Order Index Rule for Stock Location in a Distribution Warehouse. *Interfaces*, 1976, vol. 7, no. 1, pp. 37–46. DOI: [10.1287/inte.7.1.37](https://doi.org/10.1287/inte.7.1.37)
33. Malmborg C.J., Krishnakumar B. On the Optimality of the Cube per Order Index for Conventional Warehouses with Dual Command Cycles. *Material Flow*, 1987, vol. 4, no. 3, pp. 169–175.
34. Malmborg C.J., Krishnakumar B. Optimal Storage Assignment Policies for Multiaddress Warehousing System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1989, vol. 19, no. 2, pp. 197–204. DOI: [10.1109/21.31026](https://doi.org/10.1109/21.31026)
35. Malmborg C.J., Krishnakumar B. A Revised Proof of Optimality for the Cube-per-Order Index Rule for Stored Item Location. *Applied Mathematical Modelling*, 1990, vol. 14, no. 2, pp. 87–95. DOI: [10.1016/0307-904X\(90\)90076-H](https://doi.org/10.1016/0307-904X(90)90076-H)
36. Malmborg C.J. Optimization of Cube-per-Order Index Warehouse Layouts with Zoning Constraints. *International Journal of Production Research*, 1995, vol. 33, no. 2, pp. 465–482. DOI: [10.1080/00207549508930160](https://doi.org/10.1080/00207549508930160)
37. Malmborg C.J. Storage Assignment Policy Tradeoffs. *International Journal of Production Research*, 1996, vol. 34, no. 2, pp. 363–378.
38. Petersen II C.G. An Evaluation of Order Picking Routeing Policies. *International Journal of Operations and Production Management*, 1997, vol. 17, no. 11, pp. 1098–1111. DOI: [10.1108/01443579710177860](https://doi.org/10.1108/01443579710177860)
39. Petersen II C.G. The Impact of Routing and Storage Policies on Warehouse Efficiency. *International Journal of Operations and Production Management*, 1999, vol. 19, no. 10, pp. 1053–1064. DOI: [10.1108/01443579910287073](https://doi.org/10.1108/01443579910287073)
40. Petersen II C.G. An Evaluation of Order Picking Policies for Mail Order Companies. *Production and Operations Management*, 2000, vol. 9, no. 4, pp. 319–335. DOI: [10.1111/j.1937-5956.2000.tb00461.x](https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2000.tb00461.x)
41. Petersen II C.G., Schmenner R.W. An Evaluation of Routing and Volume-Based Storage Policies in an Order Picking Operation. *Decision Sciences*, 1999, vol. 30, no. 2, pp. 481–501. DOI: [10.1111/j.1540-5915.1999.tb01619.x](https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1999.tb01619.x)
42. Petersen II C.G., Aase G.R., Heiser D.R. Improving Order-Picking Performance through the Implementation of Class-Based Storage. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 2004, vol. 34, no. 7, pp. 532–544. DOI: [10.1108/09600030410552230](https://doi.org/10.1108/09600030410552230)
43. Jarvis J.M., McDowell E.D. Optimal Product Layout in an Order Picking Warehouse. *IIE Transactions*, 1991, vol. 23, no. 1, pp. 93–102. DOI: [10.1080/07408179108963844](https://doi.org/10.1080/07408179108963844)
44. Tang L.C., Chew E P. Order Picking Systems: Batching and Storage Assignment Strategies. *Computers and Industrial Engineering*, 1997, vol. 33, no. 3, pp. 817–820. DOI: [10.1016/S0360-8352\(97\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00245-3)
45. Adil G.K. A Branch and Bound Algorithm for Class Based Storage Location Assignment. *European Journal of Operational Research*, 2008, vol. 189, no. 2, pp. 492–507. DOI: [10.1016/j.ejor.2007.05.050](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.050)

46. Chiang D.M.H., Lin C.P., Chen M.C. The Adaptive Approach for Storage Assignment by Mining Data of Warehouse Management System for Distribution Centres. *Enterprise Information Systems*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 219–234. DOI: [10.1080/17517575.2010.537784](https://doi.org/10.1080/17517575.2010.537784)
47. Berglund P., Batta R. Optimal Placement of Warehouse Cross-Aisles in a Picker-to-Part Warehouse with Class-Based Storage. *IIE Transactions*, 2012, vol. 44, no. 2, pp. 107–120. DOI: [10.1080/0740817X.2011.578608](https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.578608)
48. Rao S.S., Adil G.K. Class-Based Storage with Exact S-Shaped Traversal Routeing in Low-Level Picker-to-Part Systems. *International Journal of Production Research*, 2013, vol. 51, no. 16, pp. 4979–4996.
49. Rao S.S., Adil G.K. Optimal Class Boundaries, Number of Aisles, and Pick List Size for Low-Level Order Picking Systems. *IIE Transactions*, 2013, vol. 45, no. 12, pp. 1309–1321.
50. Frazee E.A., Sharp G.P. Correlated Assignment Strategy Can Improve Any Order-Picking Operation. *Industrial Engineering*, 1989, vol. 21, no. 4, pp. 33–37.
51. Brynzer H., Johansson M.I. Storage Location Assignment: Using the Product Structure to Reduce Order Picking Times. *International Journal of Production Economics*, 1996, vol. 46, pp. 595–603. DOI: [10.1016/0925-5273\(94\)00091-3](https://doi.org/10.1016/0925-5273(94)00091-3)
52. Rosenwein M.B. An Application of Cluster Analysis to the Problem of Locating Items within a Warehouse. *IIE Transactions*, 1994, vol. 26, no. 1, pp. 101–103. DOI: [10.1080/07408179408966588](https://doi.org/10.1080/07408179408966588)
53. Liu C. Clustering Techniques for Stock Location and Order-Picking in a Distribution Center. *Computers and Operations Research*, 1999, vol. 26, no. 10-11, pp. 989–1002. DOI: [10.1016/S0305-0548\(99\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00026-X)
54. Lee M.K. A Storage Assignment Policy in a Man-Aboard Automated Storage/Retrieval System. *International Journal of Production Research*, 1992, vol. 30, no. 10, pp. 2281–2292.
55. Van Oudheusden D.L., Tzen Y.J.J., Ko H. Improving Storage and Order Picking in a Person-on-Board AS/R System: A Case Study. *Engineering Costs and Production Economics*, 1988, vol. 13, no. 4, pp. 273–283. DOI: [10.1016/0167-188X\(88\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0167-188X(88)90013-4)
56. Van Oudheusden D.L., Zhu W. Storage Layout of AS/RS Racks Based on Recurrent Orders. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 58, no. 1, pp. 48–56. DOI: [10.1016/0377-2217\(92\)90234-Z](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90234-Z)
57. Il-Choe K., Sharp G. *Small Parts Order Picking: Design and Operation*. Available at: <http://www.isye.gatech.logisticstutorial/order/article.thm>, accessed October 2014.
58. Gademann A.J.R.N., van den Berg J.P., van der Hoff H.H. An Order Batching Algorithm for Wave Picking in a Parallel-Aisle Warehouse. *IIE Transactions*, 2001, vol. 33, no. 5, pp. 385–398. DOI: [10.1080/07408170108936837](https://doi.org/10.1080/07408170108936837)
59. Gademann N., Velde S. Order Batching to Minimize Total Travel Time in a Parallel-Aisle Warehouse. *IIE Transactions*, 2005, vol. 37, no. 1, pp. 63–75. DOI: [10.1080/07408170590516917](https://doi.org/10.1080/07408170590516917)

60. Chen M.C., Wu H.P. An Association-Based Clustering Approach to Order Batching Considering Customers Demand Patterns. *Omega*, 2005, vol. 33, no. 4, pp. 333–343. DOI: [10.1016/j.omega.2004.05.003](https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.05.003)
61. De Koster R., van der Poort E.S., Wolters M. Efficient Orderbatching Methods in Warehouse. *International Journal of Production Research*, 1999, vol. 37, no. 7, pp. 1479–1504.
62. Hsu C.M., Chen K.Y., Chen M.C. Batching Orders in Warehouses by Minimizing Travel Distance with Genetic Algorithms. *Computers in Industry*, 2005, vol. 56, no. 2, pp. 169–178. DOI: [10.1016/j.compind.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compind.2004.06.001)
63. Ho Y.C., Tseng Y.Y. A Study on Order-Batching Methods of Order-Picking in a Distribution Centre with Two Cross-Aisles. *International Journal of Production Research*, 2006, vol. 44, no. 1, pp. 3391–3417. DOI: [10.1080/00207540600558015](https://doi.org/10.1080/00207540600558015)
64. Ho Y.C., Su T.S., Shi Z.B. Order-Batching Methods for an Order-Picking Warehouse with Two Cross Aisles. *Computers and Industrial Engineering*, 2008, vol. 55, no. 2, pp. 321–347. DOI: [10.1016/j.cie.2007.12.018](https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.018)
65. Tsai C.Y., Liou J.J., Huang T.M. Using a Multiple-GA Method to Solve the Batch Picking Problem: Considering Travel Distance and Order Due Time. *International Journal of Production Research*, 2008, vol. 46, no. 2, pp. 6533–6555. DOI: [10.1080/00207540701441947](https://doi.org/10.1080/00207540701441947)
66. Chew E.P., Tang L.C. Travel Time Analysis for General Item Location Assignment in a Rectangular Warehouse. *European Journal of Operational Research*, 1999, vol. 112, no. 3, pp. 582–597. DOI: [10.1016/S0377-2217\(97\)00416-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00416-5)
67. Le-Duc T., De Koster R. An Approximation for Determining the Optimal Picking Batch Size for Order Picker in Single Aisle Warehouses. In: Ogle M.K., Peters B.A., Meller R., Usher J., eds. *Progress in Material Handling Research 2002*. Charlotte, Material Handling Institute, 2003, pp. 267–286.
68. Le-Duc T., De Koster R. Travel Time Estimation and Order Batching in a 2-Block Warehouse. *European Journal of Operational Research*, 2007, vol. 176, no. 1, pp. 374–388. DOI: [10.1016/j.ejor.2005.03.052](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.052)
69. Van Nieuwenhuysen I., De Koster R. Evaluating Order Throughput Time in 2-Block Warehouses with Time Window Batching. *International Journal of Production Economics*, 2009, vol. 121, no. 2, pp. 654–664. DOI: [10.1016/j.ijpe.2009.01.013](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.01.013)
70. Yu M., De Koster R. The Impact of Order Batching and Picking Area Zoning on Order Picking System Performance. *European Journal of Operational Research*, 2009, vol. 198, no. 2, pp. 480–490. DOI: [10.1016/j.ejor.2008.09.011](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.09.011)
71. Elseyed E.A., Lee M.K., Kim S., Scherer E. Sequencing and Batching Procedures for Minimizing Earliness and Tardiness Penalty of Order Retrievals. *International Journal of Production Research*, 1993, vol. 31, no. 3, pp. 727–738. DOI: [10.1080/00207549308956753](https://doi.org/10.1080/00207549308956753)
72. Mellema P.M., Smith C.A. Simulation Analysis of Narrow-Aisle Order Selection Systems. *Proceedings of the 20th Conference on Winter Simulation (WSC'88)*, 1988, pp. 597–602. DOI: [10.1145/318123.318273](https://doi.org/10.1145/318123.318273)

73. Choe K.I., Sharp G.P., Serfozo R.S. Aisle-Based Order Pick Systems with Batching, Zoning and Sorting. In: *Progress in Material Handling Research*. Charlotte, NC, The Material Handling Industry of America, 1993, pp. 245–276.
74. Jane C.C. Storage Location Assignment in a Distribution Center. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 2000, vol. 30, no. 1, pp. 55–71. DOI: [10.1108/09600030010307984](https://doi.org/10.1108/09600030010307984)
75. Jane C.C., Lai Y. A Clustering Algorithm for Item Assignment in a Synchronized Zone Order Picking System. *European Journal of Operational Research*, 2005, vol. 166, no. 2, pp. 489–496. DOI: [10.1016/j.ejor.2004.01.042](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.042)
76. De Koster R., Le-Duc T., Zaerpour N. Determining the number of zones in a pick-and-sort order picking system. *International Journal of Production Research*, 2012, vol. 50, no. 3, pp. 757–771. DOI: [10.1080/00207543.2010.543941](https://doi.org/10.1080/00207543.2010.543941)
77. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D. A Production Line That Balances Itself. *Operations Research*, 1996, vol. 44, no. 1, pp. 21–34.
78. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D. Using Bucket Brigades to Migrate from Craft Manufacturing to Assembly Lines. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2005, vol. 7, no. 2, pp. 121–129. DOI: [10.1287/msom.1040.0059](https://doi.org/10.1287/msom.1040.0059)
79. Bartholdi III J.J., Bunimovich L.A., Eisenstein D.D. Dynamics of Two- and Three-Worker «Bucket Brigade» Production Lines. *Operations Research*, 1999, vol. 47, no. 3, pp. 488–491.
80. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D., Foley R.D. Performance of Bucket Brigades When Work Is Stochastic. *Operations Research*, 2001, vol. 49, no. 5, pp. 710–719. DOI: [10.1287/opre.49.5.710.10609](https://doi.org/10.1287/opre.49.5.710.10609)
81. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D., Lim Y.F. Bucket Brigades on In-Three Assembly Networks. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 168, no. 3, pp. 870–879. DOI: [10.1016/j.ejor.2004.07.034](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.034)
82. Bartholdi III J.J., Eisenstein D.D. *Bucket Brigades: A Self-Organizing Scheme for Sharing Work* (working paper). School of Industrial Engineering, USA, 1998. 12 p.
83. Bratcu A.I., Dolgui A. A Survey of the Self-Balancing Production Lines (“Bucket Brigades”). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2005, vol. 16, no. 2, pp. 139–158.
84. Armbruster D., Gel E.S., Murakami J. Bucket Brigades with Worker Learning. *European Journal of Operational Research*, 2007, vol. 176, no. 1, pp. 264–274. DOI: [10.1016/j.ejor.2005.06.052](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.052)
85. Koo P.H. The Use of Bucket Brigades in Zone Order Picking Systems. *OR Spectrum*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 759–774. DOI: [10.1007/s00291-008-0131-x](https://doi.org/10.1007/s00291-008-0131-x)
86. De Carlo F., Borgia O., Tucci M. Bucket brigades to increase productivity in a luxury assembly line. *International Journal of Engineering Business Management*, 2013, vol. 5, pp. 1–9. DOI: [10.5772/56837](https://doi.org/10.5772/56837)
87. Meller R.D. Optimal Order-to-Lane Assignments in an Order Accumulation/Sortation System. *IIE Transactions*, 1997, vol. 29, no. 4, pp. 293–301. DOI: [10.1080/07408179708966335](https://doi.org/10.1080/07408179708966335)

88. Johnson M.E. The Impact of Sorting Strategies on Automated Sortation System Performance. *IIE Transactions*, 1997, vol. 30, no. 1, pp. 67–77. DOI: [10.1080/07408179808966438](https://doi.org/10.1080/07408179808966438)
89. Bozer Y.A., Sharp G.P. An Empirical Evaluation of a General Purpose Automated Order Accumulation and Sortation System Used in Batch Picking. *Material Flow*, 1985, vol. 2, no. 2–3, pp. 111–131.
90. Bozer Y.A., Quiroz M.A., Sharp G.P. An Evaluation of Alternative Control Strategies and Design Issure for Automated Order Accumulation and Sortation Systems. *Material Flow*, 1988, vol. 4, no. 4, pp. 265–282.
91. Johnson M.E., Lofgren T. Model Decomposition Speeds Distribution Center Design. *Interfaces*, 1994, vol. 24, no. 5, pp. 95–106. DOI: [10.1287/inte.24.5.95](https://doi.org/10.1287/inte.24.5.95)