

Международный журнал по экономике

и

науке управления

Том 1, № 12, 2012, стр. 104-116

ЛОКОМОТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В СФЕРЕ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК ПО ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ МПОПОМЫ, СТАНЦИЯ В БУЛАВАЙО ЮЖНОГО РЕГИОНА, ЗИМБАБВЕ.

Даниэль Мапосал и Сифонескоси Д. Свен

Университет Монаш, Южная Африка, Школа бизнеса и экономики,

Рудерпорт, 1725, Южная Африка. E-mail: danmaposa@gmail.com или

daniel.maposa @ monash.edu (соответствующего автора).

Национальный университет науки и технологий, факультет торговли, Департамента страхования и актуарных наук,

АС939, Аскот, Булавайо, Зимбабве. E-mail: syphoed@gmail.com

АНОТАЦИЯ

В этой статье приводятся результаты решения проблемы планирования локомотивных перевозок, с которыми сталкиваются национальные железные дороги Зимбабве (NRZ). Частично исследовались подобные проблемы оптимизации в общественном транспорте. Эта статья фокусируется на планировании движения локомотива (LSM), где существует несколько типов вагонов и принимается решение относительно того, какой набор вагонов должен быть назначен для каждого поезда. Представлена интегрированная модель, которая определяет набор активных и загруженных вагонов для каждого поезда. Две другие модели: модель 2 и модель 3 также рассматриваются в этой статье. Сформулирована проблема, которая содержит 20 целочисленных переменных и 32 ограничений (модель 1). Использование LINGO 10 позволило решить метод в течение 2 минут времени.. Когда метод был реализован и рассмотрен, выяснилось, что, по сравнению с существующими сценариями, экономия составляет 38 вагонов, что приводит к экономии более десяти миллионов долларов в год.

Ключевые слова: *национальные железные дороги Зимбабве, тепловоз, планирование, локомотивы, смешанное целочисленное программирование, вагоны.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Задержки доставки товаров по различным направлениям привели к потере клиентов на национальных железных дорогах Зимбабве (NRZ), которые

перешли на альтернативные виды транспорта. Скоропортящиеся товары идут медлен из-за задержек.

Некоторые товары теряются на пути из-за вандализма и / или кражи, и это негативно сказывается на репутации организации для своих клиентов.

В статье рассматривается планирование движения поездов на станции Мпопома и сокращение времени ожидания вагонов для локомотивов, то есть минимизация количества простаивающих вагонов. Расписание также направлено на минимизацию расходов, понесенных железной дорогой, которые обычно являются непомерно высокие, так как есть высокие расходы, связанные с несвоевременной поставкой товаров клиентов.

Состав остальной части статьи является таким, что раздел 1 имеет три подраздела, которые описывают фон, определение сроков, и делимитация исследования. В разделе 2 дается краткий обзор литературы, в разделе 3 приведена методология, раздел 4 дает представление и анализ полученных результатов, в разделе 5 описаны выводы по статье.

1.1. Фон

Национальные железные дороги Зимбабве представляют собой интегрированное многопрофильное полугосударственное предприятие со штаб-квартирой в Булавайо. Ее основной деятельностью является перемещение пассажиров и грузов по железной дороге. Несмотря на значительные успехи в истории NRZ, в некоторых случаях по-прежнему испытывают проблемы.

NRZ сталкивается с проблемой планирования загрузки поездов, как загружать и выгружать. Это привело к временным задержкам грузовых поездов и сокращению количества заказов.. Такие задержки вынудили работать на полную мощность.

Станция Мпопома – станция, где все грузовые поезда начинают и прекращают движение. Операций на станции Мпопома сделаны последовательно. Все поезда переходят на сначала на прием, когда они входят во двор. Машинистов уведомляют мастера по станции при помощи сигнала, какие пути свободны, так как на станции имеются колеи в количестве девяти штук. Вагоны, полученные с разных точек, проверяются на наличие подхождимости, чтобы продолжить путешествие. Если признаны пригодными, то тогда они задействуются под любой груз в зависимости от направления.

Обслуживаются транзитные перевозки и состоит из шестнадцати рельс. На этом участке поезда классифицируются в зависимости от их назначения и в соответствии с вагонами, прикрепленными к локомотиву.

Поезда на участке Булавайо классифицируются в зависимости от их назначения следования, а именно Бельмонт, Северный Кельвин и Новый

Греин. На приеме, если поезда будут признаны непригодными к перевозке грузов, они отправляются в ремонтный цех железнодорожных путей разделе. Непригодные вагоны к загрузке и выгрузке фиксируются в этом цехе. Существуют два случая, когда поезда сортируются в этом цехе: когда обнаружен дефект или для общего обслуживания, и планового ремонта. Таким образом, поезда сортируются в цехе, если подходят для транзита, в целях обмена, если пригодный для Булавайо, или ремонт подъездных железнодорожных путей, если непригодны для продолжения путешествия.

Организация старается поддерживать текучесть поездов. Это означает, что, как только достаточно вагонов собрано, поезд отправляют. Как результат, время начала движения поездов не выровнены в некоторый график, они просто следуют оценкам и требованиям клиентов. Таким образом, предполагается, что поезда для перевозки грузов всегда и немедленно доступны. NRZ, однако, сталкивается с проблемами задержки в продвижении загрузки и выгрузки вагонов. Один из способствующих факторов этой проблемы - существует ограниченное количество локомотивов для перевозки вагонов и не оптимально запланированы мероприятия по устранению задержек локомотивов, в результате чего, товары поставляются с несколькими днями задержек.

Основная цель данного исследования заключается в возможности вычисления отправления и прибытия поездов таким образом, чтобы вагоны транспортировались как можно быстрее от начала следования до пункта назначения. На промежуточных станциях остановка вагонов не должна превышать определенных пределов. Конкретные цели данного исследования: снижение операционных расходов для использования нескольких локомотивов; возможность ввода в эксплуатацию всех поездов; планирование использования локомотивов таким образом, чтоб, по возможности, время доставки груза было минимальным. Остается надеяться, что результаты этого исследования помогут в управлении NRZ. Также есть надежда, что результаты этого исследования помогут в управлении и планировании использования локомотивов таким образом, чтоб полностью удовлетворить все поездки и это приведет к снижению эксплуатационных расходов.

1.2. Определение основных терминов

(I) Вагоны

Вагона подвижного состава для грузовых перевозок должны следовать от отправочной станции и пунктом назначения сети. Крупные клиенты производят и / или потребляют так много товаров, что они заказывают целые поезда. В таких случаях путь вагонов равен маршруту поезда. Мелкие клиенты заказывают отдельные вагоны, и вагоны различных клиентов затем собираются в поезда и доставляются поездом в промежуточный пункт

назначения (сортировочной станции), где поезда разбиваются, и вагоны собираются в другие поезда.

Поезда и станции, где производится передача вагонов между поездами, известны наперед. При изменении времени начала поезда, нужно позаботиться о том, эти переводы по-прежнему остаются.

Используемые вагоны: крытые вагоны (COV), открытые вагоны (DSI) и полуоткрытые вагоны (HSI).

Крытые вагоны идеальны для товаров, в которые не следует вмешиваться Человеческому фактору или природе дела по пути следования. Открытые вагоны идеальны для товаров, которые могут перекрывать друг друга.

Полуоткрытые вагоны имеют высокие стороны. Они идеально подходят для транспортировки минералов и сыпучих материалов, таких как уголь.

(II) Поезда

Грузовой поезд состоит из нескольких вагонов. Каждый поезд имеет начальную точку отправления и точку назначения; товары, транзитные станции. Время отправления и время прибытия поезда известны. Время в пути - разница во времени между началом хода и прибытием. Средняя скорость движения грузовых поездов не так высока, как на пассажирском транспорте, особенно в дневное время, когда пассажирские поезда имеют приоритет, такой, что некоторые поездки могут длиться до 3 дней. Поезда имеют разную длину и вес, и, следовательно, требуют локомотивов с достаточной мощностью привода. Поезд всегда имеет один локомотив. В начале хода локомотив прикрепляется к поезду, и на станции назначения он отсоединяется). Должны быть приняты во внимание проверки и заправки тепловозов (это время простоя поезда).

(III) Локомотивы

Локомотивы, которые в основном используются на станции Мпопома - DE6, DE9 и тепловозы. Основной разницей между локомотивами является движущая сила двигателей. DE6 могут буксировать среднюю валовую нагрузку в 1050 тонн, в то время как DE9 могут буксировать среднюю валовую нагрузку в 800 тонн.

(IV) Тягач

Проезд своим ходом без использования локомотива для поезда от станции назначения одного поезда к началу другого поезда. Продолжительность поездки зависит от расстояния между этими двумя точками и от типа локомотива.

(V) Состав поезда

Состав представляет собой набор локомотивов. Состав разбивается на подмножества для перевода в другие поезда. Состав поезда

нормальное явление на железных дорогах, поскольку потребность в локомотивах для поездов на станции отправления точно не совпадает с потребностями.

(VI) Транзитные перевозки

Это движение через промежуточные станции, груз не направляется в эти станции.

(VII) Терминал трафика

Это движение поезда, которое достигло пункта назначения, в этом случае это Булавайо.

(VIII) Станции

Это название места на железнодорожной линии, где находится дежурный в коммерческих целях и / или управляет поездом.

(X) Главный по станции

Начальник станции, является старшим работником, ответственный за станцию.

(XI) Механик

Работник, ответственный за разработку локомотива или мотор.

1.3. Делимитации изучения

Поскольку вагоны работают в национальном масштабе и точно не выделены станции, трудно осуществить обследование их только на станции Мпопома. Это исследование предполагает, что вагоны были распределены по различным станциям, использующих долю товаров, перемещаемых от станции к станции, и товаров, перемещаемых в общенациональной зависимости от числа функционирующих вагонов по всей стране. Сбор данных, однако, сосредоточен на южной части страны, которая состоит из следующих регионов: Виктория Фоллс Сомабхула, Хини Джункцион на Запад Николсон и Булавайо до границы Ботсваны. Это исследование концентрируется на поездках на поезде только в южном районе.

Также предполагается, что поезда начинают свои поездки неоднократно каждые 24 часа, и все железные дороги функционируют должным образом, т.е. никаких задержек в связи с инфраструктурой нет, дефекты не учтены в данном исследовании.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема локомотив планирования определяется Ахджа авторами. (2005), как назначение множества локомотивов для каждого поезда в расписание движения поездов, который предварительно планируется для того, чтобы предоставить им достаточную мощность, чтобы доставить их к месту назначения. Модели планирования являются одними из ключевых проблем в задачах планирования железнодорожных локомотивов (Краау и др., 1991; Край и Харкер, 1995; Уинстон, 2004; Ahuja и др., 2005; Vaseler и Гарсия 2006; Tormos и др., 2008; Lusby и др., 2009; Корман и др., 2010; Му и Dessouky; 2011).

Перевозка грузов по железной дороге является важнейшей частью экономики большинства развивающихся стран, таких как Зимбабве. Купер (1990) описал промышленность железнодорожного транспорта как очень богатую с точки зрения проблем, которые могут быть смоделированы и решены с помощью математических методов оптимизации. В исследованиях, связанных с железнодорожным планированием в наиболее ранние модели не удалось включить характеристики реальных приложений.

По словам Годвина и др. (2006) обычным явлением во многих развивающихся странах является то, что назначением и планированием работы грузового поезда считается движение грузовых поездов через пассажирские железнодорожные сети. Одним из препятствий для рассмотрения проблем локомотив является то, что пассажирские поезда двигаются в соответствии с установленным графиком в то время как грузовые поезда должны быть размещены на той же трассе, не мешая движению пассажирских поездов, которые закреплены. Аронссон (2006) высказал мнение, что гибкость планирования расписания железнодорожных перевозок больше, чем пассажирских до тех пор, пока клиента удовлетворяют требования. С конца 20-го века были сделаны значительные успехи в грузовых железнодорожных перевозках и пассажирских перевозках (Brannlund и др., 1998; Ньютон и др., 1998; Vaseler и Гарсия, 2006; Кэри и Карвилле, 2003; Чжоу и Чжун, 2007; Ahuja и др., 2005; Dessouky и др., 2006; Fuchsberger, 2007; Borndörfer и Schlechte, 2008; Cacchiani и др., 2010; Корман и др., 2010; Му и Dessouky, 2011).

Ахджа (2005) изучал проблему, тесно связанную с планированием движения грузовых поездов компании CSX . CSX - транспорт является одной из основных железнодорожных компаний в Соединенных Штатах Америки. Ахджа исследовал проблему назначения различных локомотивов поездам, используя смешанное целочисленное программирование (MIP), которое он

распространял на проблемы разложения целочисленного программирования в очень крупномасштабных окрестности поиска, чтобы получить оптимальное решение за приемлемое время работы. Их модель предусматривала назначение набора локомотивов каждого поезда в еженедельное расписание поездов таким образом, чтобы избежать заторов, в результате блокирования движения других поездов. Назначение набора локомотивов для одного поезда сильно ограничено: не более чем 4 локомотива на поезд на железных дорогах Зимбабве (NRZ), потому что функционирует ограниченное число локомотивов. Основная цель Ахджа: исследование минимизации общей стоимости суммы активных расходов локомотив, расходы на поездку и расходы локомотивов на их использование. Их решение должно обеспечить достаточную мощность, чтобы каждый поезд следовал по своему графику.

В НЖЗ в проблемах планирования распределения локомотивов мы используем такой же подход, что и Ахджа, но мы даем более высокий приоритет сокращения простоев вагонов, чем снижение времени поездки, так как высокие штрафы должны быть оплачены при опоздании.

Есть другие исследования, связанные с решением расписания локомотивов с помощью смешанного целочисленного программирования : Аронссон (2006), который изучал планирование для локомотивов в крупнейшем железнодорожном центре в Швеции; Фугенчук (2006), изучавший локомотивное и вагонное планирование для Deutsche Bahn AG в Германии. Во всех этих исследованиях крупногабаритного смешанного целочисленного программирования (MIP) оптимальное или близкое к оптимальному решение не может быть найдено в разумное время работы с использованием коммерчески доступного программного обеспечения, поэтому авторы хотели избежать этой проблемы, используя проблему разложения целочисленного программирования и очень большие масштабы поиска. Это исследование также использует целое программирование, чтобы решить проблему локомотив планирования в NRZ, но в меньшем масштабе.

Проблема планирования локомотива в NRZ похожа на планирование локомотивной проблемы, обсуждаемой в этой статье, где есть различные локомотивы, относящиеся к различным вагонам. Хотя она использует аналогичные подходы, как и в предыдущих исследованиях, простои вагонов являются нежелательными. Кроме того, модель локомотивного планирования в данной работе также включают в себя поиск переменной, которая стремится найти оптимальное количество локомотивов, которые потенциально могут быть сохранены, если некоторые универсальные переводы пропустили. Кроме того, проблема локомотивного планирования для NRZ формулируется как целое из нескольких товарных потоков с боковыми ограничениями. Это означает, что модель NRZ только присваивает целое число локомотивов поезду.

3. МЕТОДОЛОГИЯ

Модель формулируется в виде смешанной целой модели программирования. На станции Мпопома всегда есть немного гибкости в зоне отбытия и прибытия поезда, где должны вестись переговоры с клиентами. Представленная модель направлена на поддержку стратегического моделирования на будущее, например, имитируя нагрузку на сеть в области грузовых перевозок в 2015 году, NRZ будут выступать на максимально возможной мощности. Соответствующая модель называется циклической задачей календарного автомобиля с временными окнами (CVSPTW). Эта модель заботится о синхронизации отбытия поезда, графика вагона и передачи вагонов между поездами.

3.1. Модель обозначения

Приняты следующие обозначения и терминология, используемые в этом документе:

(I) Данные поезда: множество поездов L ; индекс определенного поезда l ; необходимая производительность поезда T_l ; лошадиные силы на тоннаж поезда V_l ; лошадиные силы требований поезда H_l ; штраф за использование одного локомотива E_l .

(II) Данные локомотива: множество всех локомотивов K ; индекс определенного поезда k ; лошадиные силы тепловоза h^k ; количество осей в тепловозе a^k ; размер парка локомотивов, то есть количество локомотивов доступных для назначения β^k .

(III) Активность локомотива (поезд-паровоз): затраты, понесенные при назначении активных тепловозов в поезд c_j^k ; обозначает затраты, понесенные тепловозом в тренировке d_j^k ; тоннаж тягового усилия при тренировке t_j^k .

Активная себестоимость c_j^k включает стоимость активов экономического локомотива на время поезда, топлива и эксплуатационных расходов. Провезенная стоимость d_j^k включает экономическую стоимость активов, сокращение расходов на техническое обслуживание и нулевой стоимости топлива. Для каждого поезда три непересекающихся множества локомотивов определяются следующим образом: указание на предпочтительные классы локомотивов; указание приемлемых (но не предпочтительных) классов локомотивов; указание запрещенных классов локомотивов. Только из классов перечисленных назначаются локомотивы. Существует также штраф, связанный с использованием локомотивов (Ахджа соавт., 2005).

(IV) Переменная для решения смешанной модели программирования (Ахджа и др., 2005): переменная, представляющая число активных локомотивов x_j^k ; целая переменная с указанием количества неактивных локомотивов y_j^k ; бинарная переменная для холостого хода, которая принимает значение 1, если по крайней мере один из локомотив связан, и 0 в противном случае z_i ; двоичная переменная, которая принимает значение 1, если есть поток отдельных локомотивов на железнодорожных маршрутах (дуг), и 0 в противном случае; целочисленная переменная, указывающая число неиспользованных локомотивов s^k .

3.2 Сбор данных

Данные, приведенные в таблицах 1, 2, 3 и 4 были составлены исходя из стратегической отрасли планирования национальных железных дорог Зимбабве. Для конкретных поездов HSI, DSI и COV и для конкретных локомотивов DE6 и DE9.

Table 1: Required minimum tonnage and horsepower for trains

l	Required Tonnage (tonnes): T_l	Horsepower per 20 tonnes (Watts): B_l	Horsepower (Watts): $H_l = B_l T_l$	Penalty (US\$): E_l
HIS	180	756	136080	250
DSI	165	756	124740	200
COV	175	756	132300	230

Table 2: Locomotive properties data

k	Horsepower: $h^{(k)}$	Number of axles: $\alpha^{(k)}$	Ownership costs: $G^{(k)}$	Fleet size: $\beta^{(k)}$	Fixed cost for light travelling: $F^{(k)}$
DE6	39690	16	550	40	400
DE9	30240	14	300	38	400

Table 3: Data for active and deadheaded locomotives

k	l	Costs for active locomotives: $c_l^{(k)}$	Costs for deadheaded locomotives: $d_l^{(k)}$	Tonnage pulling capacity: $t_l^{(k)}$
DE6	HSI	350	500	350
DE6	DSI	350	500	350
DE6	COV	350	500	350
DE9	HSI	350	500	350
DE9	DSI	350	500	350
DE9	COV	350	500	350

Table 4: Preferences of different trains for different locomotives

l	Most Preferred [l]	Less Preferred [l]	Prohibited [l]
HIS	DE6	-	DE9
DSI	DE9	DE6	-
COV	DE6	DE9	-

Для вагона HSI локомотива DE9 запрещается буксировать его в связи с тем, что HSI универсал обычно перевозит тяжелые тоннажа, чем DE9 локомотив способен буксировать. В большинстве случаев, если DE9 локомотиву

разрешается буксировать HSI вагон, то только на короткие расстояние. DE9 локомотиву предпочтительнее тянуть с DSI и менее предпочтительнее повозкой COV.

3.3. Смешанное целочисленное программирование (MIP) модель

Ограничения, использованные в данной работе для модели локомотивного планирования (LSM) те же, что и объяснил в Ахджа (2005), за исключением того, что для ограничений по размеру не больше 4 локомотивов (включая активные и провезенные) могут быть назначены поезда согласно политике NRZ бизнеса. Целевая функция также содержит условия, приведенные в статье Ахджа (2005), то есть: стоимость владения, обслуживания и заправки локомотивов, стоимость активных и провезенных локомотивов, стоимость света, проходящего локомотива; штраф за перебор; штраф за непоследовательность локомотивов в заданиях, а также штраф за использование одного локомотива .

Общая целевая функция для смешанного целочисленного программирования (MIP) модели (Ахджа и др., 2005.):

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in L} \sum_{k \in K} c_i^{(k)} x_i^{(k)} + \sum_{i \in K} \sum_{k \in K} d_i^{(k)} y_i^{(k)} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in L} F^{(k)} z_i + \sum_{i \in L} B z_i + \sum_{i \in L} E_i w_i - \sum_{k \in K} G^{(k)} s^{(k)},$$

где первый член обозначает стоимость активных вагонов на маршрутах поезда, второй член отражает стоимость провоза локомотивом поезда и легкие туристические маршруты, стоимость холостого хода локомотивов и стоимость состояния перебора, третий термин обозначает фиксированную стоимость света, проходящего локомотива; четвертый член представляет фиксированную стоимость состояния перебора, пятый член обозначает штраф, связанный с одним локомотивом, и шестой член обозначает сэкономленные средства от использования всех локомотивов, т.е. сохранение некоторых других локомотивов.

Используя данные, приведенные в таблицах 1, 2, 3 и 4 мы получаем смешанное целочисленное программирование (MIP) модель с 20 переменными решения и 32 ограничениями . Упрощение целевой функции для модели MIP:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z(\text{Total costs}) &= 350 [x_{HSI}^{(DE6)} + x_{DSI}^{(DE6)} + x_{COV}^{(DE6)} + x_{HSI}^{(DE9)} + x_{DSI}^{(DE9)} + x_{COV}^{(DE9)}] \\ &+ 500 [y_{HSI}^{(DE6)} + y_{DSI}^{(DE6)} + y_{COV}^{(DE6)} + y_{HSI}^{(DE9)} + y_{DSI}^{(DE9)} + y_{COV}^{(DE9)}] + 756 [z_{HSI} + z_{DSI} + z_{COV}] \\ &+ 250 w_{HSI} + 200 w_{DSI} + 230 w_{COV} - [550 s^{(DE6)} + 300 s^{(DE9)}] \end{aligned}$$

В соответствии с ограничениями
Набор 1

$$\begin{aligned} 350[x_{HSI}^{(DE6)} + x_{HSI}^{(DE9)}] &\geq 180 \\ 350[x_{DSI}^{(DE6)} + x_{DSI}^{(DE9)}] &\geq 165 \\ 350[x_{COV}^{(DE6)} + x_{COV}^{(DE9)}] &\geq 175 \end{aligned}$$

Это ограничение набора гарантирует, что локомотивы поезда обеспечивают необходимый минимум тоннажа.

Набор 2

$$\begin{aligned} 39690x_{HSI}^{(DE6)} + 30240x_{HSI}^{(DE9)} &\geq 136080 \\ 39690x_{DSI}^{(DE6)} + 30240x_{DSI}^{(DE9)} &\geq 124740 \\ 39690x_{COV}^{(DE6)} + 30240x_{COV}^{(DE9)} &\geq 132300 \end{aligned}$$

Это ограничение набора гарантирует, что назначенный локомотив обеспечит требуемый минимум мощности.

Набор 3

$$\begin{aligned} 16x_{HSI}^{(DE6)} + 14x_{HSI}^{(DE9)} &\geq 24 \\ 16x_{DSI}^{(DE6)} + 14x_{DSI}^{(DE9)} &\geq 24 \\ 16x_{COV}^{(DE6)} + 14x_{COV}^{(DE9)} &\geq 24 \end{aligned}$$

Это ограничение устанавливает ограничение, что количество активных осей назначенного поезда не превышает 24.

Набор 4

$$\begin{aligned} x_{HSI}^{(DE6)} + x_{HSI}^{(DE9)} + y_{HSI}^{(DE6)} + y_{HSI}^{(DE9)} &\leq 12 \\ x_{DSI}^{(DE6)} + x_{DSI}^{(DE9)} + y_{DSI}^{(DE6)} + y_{DSI}^{(DE9)} &\leq 12 \\ x_{COV}^{(DE6)} + x_{COV}^{(DE9)} + y_{COV}^{(DE6)} + y_{COV}^{(DE9)} &\leq 12 \end{aligned}$$

Это ограничение набора гарантирует, что каждому поезду назначается не более 12 локомотивов.

Набор 5

$$y_{HSI}^{(DE6)} + y_{DSI}^{(DE6)} + y_{COV}^{(DE6)} + y_{HSI}^{(DE9)} + y_{DSI}^{(DE9)} + y_{COV}^{(DE9)} \leq 4[z_{HSI} + z_{DSI} + z_{COV}]$$

Это ограничение набора (5) гарантирует, что не более 4х локомотивов назначаются одному поезду в соответствии с бизнес-политикой железных дорог NRZ. Фиксированная переменная в правой части неравенства становится равной 1, когда поезд проходит строго по маршруту или имеется легкий путь.

Набор 6

$$z_{HSI} + z_{DSI} + z_{COV} = 1$$

Это ограничение утверждает, что для каждого поезда, все входящие локомотивы используют только один маршрут соединения, то есть либо все локомотивы перейдут к соответствующему узлу либо все локомотивы перейдут к другому исходящему поезду (Ахджа соавт. 2005).

Набор 7

$$\begin{aligned} x_{HSI}^{(DE6)} + x_{HSI}^{(DE9)} + y_{HSI}^{(DE6)} + y_{HSI}^{(DE9)} + w_{HSI} &\geq 2 \\ x_{DSI}^{(DE6)} + x_{DSI}^{(DE9)} + y_{DSI}^{(DE6)} + y_{DSI}^{(DE9)} + w_{DSI} &\geq 2 \\ x_{COV}^{(DE6)} + x_{COV}^{(DE9)} + y_{COV}^{(DE6)} + y_{COV}^{(DE9)} + w_{COV} &\geq 2 \end{aligned}$$

Это ограничение набора (7) дает переменная, равная 1, если один локомотив состоит на тренировке.

Набор 8

$$\begin{aligned} x_{HSI}^{(DE6)} + y_{HSI}^{(DE6)} + s^{(DE6)} &= 40 \\ x_{HSI}^{(DE9)} + y_{HSI}^{(DE9)} + s^{(DE9)} &= 38 \\ x_{DSI}^{(DE6)} + y_{DSI}^{(DE6)} + s^{(DE6)} &= 40 \\ x_{DSI}^{(DE9)} + y_{DSI}^{(DE9)} + s^{(DE9)} &= 38 \\ x_{COV}^{(DE6)} + y_{COV}^{(DE6)} + s^{(DE6)} &= 40 \\ x_{COV}^{(DE9)} + y_{COV}^{(DE9)} + s^{(DE9)} &= 38 \end{aligned}$$

Это ограничение набора подсчитывает количество локомотивов, используемых в неделю. Разница между количеством локомотивов доступным и количеством локомотивов используемых дает число локомотивов сохраненных.

Набор 9

$$x_{HSI}^{(DE9)} = 0$$

Это ограничение гарантирует, что запрещенные локомотивы никогда не используются на железнодорожных маршрутах.

Набор 10

$$\begin{aligned} x_{HSI}^{(DE6)}, x_{DSI}^{(DE6)}, x_{COV}^{(DE6)}, x_{HSI}^{(DE9)}, x_{DSI}^{(DE9)}, x_{COV}^{(DE9)} &\geq 0 \text{ and integer} \\ y_{HSI}^{(DE6)}, y_{DSI}^{(DE6)}, y_{COV}^{(DE6)}, y_{HSI}^{(DE9)}, y_{DSI}^{(DE9)}, y_{COV}^{(DE9)} &\geq 0 \text{ and integer} \end{aligned}$$

Это ограничение набора гарантирует, что все числа активных и неактивных локомотивов – неотрицательные целые числа.

Набор 11

$$\begin{aligned} z_{HSI} &\in \{0,1\} \\ z_{DSI} &\in \{0,1\} \\ z_{COV} &\in \{0,1\} \end{aligned}$$

Набор 12

$$\begin{aligned} w_{HSI} &\in \{0,1\} \\ w_{DSI} &\in \{0,1\} \\ w_{COV} &\in \{0,1\} \end{aligned}$$

3.4. Анализ чувствительности

Для того чтобы получить высокое качество и приемлемые решения, чтобы общее время работы алгоритма было меньшим, фиксированные переменные смешанного целочисленного программирования (MIP) были устранены с использованием эвристических методов, модель была снижена до 17 переменных решения и 29 ограничений. Целевая функция для новой модели будет такова:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z(\text{Total costs}) &= 350[x_{HSI}^{(DE6)} + x_{DSI}^{(DE6)} + x_{COV}^{(DE6)} + x_{HSI}^{(DE9)} + x_{DSI}^{(DE9)} + x_{COV}^{(DE9)}] \\ &+ 500[y_{HSI}^{(DE6)} + y_{DSI}^{(DE6)} + y_{COV}^{(DE6)} + y_{HSI}^{(DE9)} + y_{DSI}^{(DE9)} + y_{COV}^{(DE9)}] + 250w_{HSI} + 200w_{DSI} \\ &+ 230w_{COV} - [550s^{(DE6)} + 300s^{(DE9)}] \end{aligned}$$

Все множества ограничений остаются такими же, как и в первой модели, за исключением ограничений, установленных в наборе 6 и 11, которые устранены. Устраним еще переменные, для получения наиболее точного решения, и новая модель будет иметь 14 переменных решения и 21 ограничение. Целевая функция для новой модели будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z(\text{Total costs}) &= 350[x_{HSI}^{(DE6)} + x_{DSI}^{(DE6)} + x_{COV}^{(DE6)} + x_{HSI}^{(DE9)} + x_{DSI}^{(DE9)} + x_{COV}^{(DE9)}] + 756[z_{HSI} + z_{DSI} + z_{COV}] \\ &+ 250w_{HSI} + 200w_{DSI} + 230w_{COV} - [550s^{(DE6)} + 300s^{(DE9)}] \end{aligned}$$

Все другие наборы ограничения в модели 1 сохраняются в модели 3, за исключением ограничений наборов 4, 5, 7 и 8, которые устранены. В следующем разделе представлены результаты всех трех моделей, а также результаты существующей модели для национальных железных дорог Зимбабве.

4. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные, полученные в национальных железных дорогах Зимбабве (NRZ) уточнили, что есть 528 поездов, каждый из которых работает несколько дней в неделю и 2 локомотива, доступные для его повседневной работы. Оптимальные решения для моделей, приведенных в разделе 3, представлены в этом разделе. Был использован оптимизационный пакет LINGO 10, чтобы прийти к оптимальному решению смешанной модели программирования. Количество поездов с различными частотами в неделю в течение NRZ была проанализирована с целью совершенствования модели. Результаты представлены в таблице 5. Были также представлены результаты анализа чувствительности и было сделано сравнение моделей для того, чтобы найти улучшения в модели (например, модель 1).

Table 5: Analysis of trains and their frequencies.

Train Frequency (days): P	Number of trains: N	P x N	Cumulative sum of P x N	Cumulative Percentage of P x N
7	201	1407	1407	55%
6	54	324	1731	67%
5	60	300	2031	79%
4	48	192	2223	86%
3	65	195	2418	94%
2	60	120	2538	98%
1	40	40	2578	100%

В первом столбце в таблице 5 приведены частоты поезда в неделю, то есть, как часто поезд курсирует в неделю. Во втором столбце таблицы 5 представлено число поездов в расписании движения поездов, например, есть 201 поездов, которые работают все 7 дней в неделю. Таблица 5 показывает, что 79% из поездов соответствуют поездам, которые работают по крайней мере, 5 дней в неделю, то есть, 5, 6 или 7 дней. Поезда, которые работают не менее 5 дней в неделю играют важную роль в нашей модели для последовательности.

4.1. Результаты вычислений для модели 1

Модель 1 была закодирована в LINGO 10 и результаты еженедельной проблемы планирования приведена в таблице 6, 7 и 8. В таблице 6 показано, что активный локомотив DE6, который соединен с любым из 3 типов вагонов. Число неактивных локомотивов не будет получено по этой модели (модель 1) и для DE6 и DE9 локомотивов, как показано в таблице 6. Таблица 7 показывает, что возможность иметь по крайней мере один локомотив, подключенный к вагонам, можно только для универсала COV. Таблица 8

показывает количество локомотивов, сохраненных с использованием модели 1. По отношению к числу локомотивов доступных для назначения на национальных железных дорогах Зимбабве, количество сохраненных локомотивов с использованием модели 1 вполне разумно. Цель решения функции для модели 1: общая стоимость в еженедельном планировании, составляет \$ 35 156. Проблема решения модели 1 заняла 2 минуты времени, используя решение LINGO 10 для получения оптимального целочисленного решения.

Table 6: Summary results of the number and type of locomotives used in the weekly schedule

Type of locomotives	Type of wagon	Number of active locomotives	Number of non-active locomotives
DE6	HSI	2	0
DE6	DSI	2	0
DE6	COV	2	0
DE9	HSI	0	0
DE9	DSI	0	0
DE9	COV	0	0

Table 7: Summary of the number and type of wagons used in the weekly schedule

Type of wagon	At least on locomotive connected	Flow of a single locomotive
HSI	0	0
DSI	0	0
COV	1	1

Table 8: Summary of the number and type of unused locomotives used in weekly schedule

Type of locomotives	Number of unused locomotives
DE6	38
DE9	38

4.2. Результаты вычислений для модели 2

В этом пункте мы подведем итоги влияния пустых вагонов. Результаты по количеству и типу локомотивов, используемых в еженедельном графике были точно такими же, как у модели 1 в таблице 6. Таким образом, модель 2 также показывают, что активный локомотив DE6 может быть соединен с любым из 3 типов вагонов. Также неактивные локомотивы не были получены в этой модели. Результаты для модели 2 не показали возможность использования одного локомотива для всех вагонов в отличие от модели 1. В модели 2 количество неиспользованных локомотивов типа DE6 и DE9 были 25 и 30 соответственно, что вполне разумно по отношению к числу локомотивов доступных для назначения на NRZ. Целью решения функции выигрыша для модели 2, которая является общей стоимостью в еженедельном планировании после устранения фиксированных переменных составляет \$ 34 400. Решение задачи по модели 2 занимает 1 минуту, чтобы получить оптимальное решение целого использованием при помощи пакета LINGO 10.

4.3. Результаты вычислений для модели 3

Краткое изложение результатов о количестве и типе локомотивов, используемых в еженедельном графике модели 3 приведены в таблице 9. Результаты в таблице 9 показывают случайное распределение количества активных локомотивов, которые связаны с любым из 3 типов вагонов. DE9 локомотив не имеет поручения на HSI универсал, так как запрещено возить HSI универсал DE9. Количество сохраненных (не используемых) локомотивов в модели 3 типа DE6 и DE9 были 30 и 32 соответственно, которое вполне разумно относительно количества доступных локомотива для назначения. Цель решения функции для модели 3 составляет \$ 28 900. Это общая стоимость в еженедельном планировании после устранения фиксированных переменных. Для решения задачи модель 3 потребовалось всего 45 секунд, используя LINGO 10 для получения оптимального целочисленного решения.

Table 9: Summary results of the number and type of locomotives used in the weekly schedule for Model 3

Type of locomotives	Type of wagon	Number of active locomotives	Number of non-active locomotives
DE6	HSI	2	0
DE6	DSI	1	0
DE6	COV	1	0
DE9	HSI	0	0
DE9	DSI	2	0
DE9	COV	2	0

4.4. Сравнение между тремя моделями и существующей системой

Было предложено три модели (модель 1, модель 2 и модель 3), сравнивались с существующей системой для того, чтобы найти, как влияет включение или исключение основного количества переменных в моделях. Рисунок 1 показывает сравнение активного DE6 локомотива подключен к 3 различным типам вагонов для модели 3 и существующей системы в NRZ. Из рисунка 1 можно легко увидеть, что модель 1 и модель 2 имеют равное количество активных локомотивов для DE6, подключенных к 3 различным типам вагонов за определенный период времени. Модель 3 имеет меньше активных локомотивов по сравнению со всеми другими моделями. Существующее количество активных локомотивов заметно больше, чем у всех предлагаемых моделей. Таким образом, предложенная модель достигает значительное снижение количества локомотивов по сравнению с существующей системой.

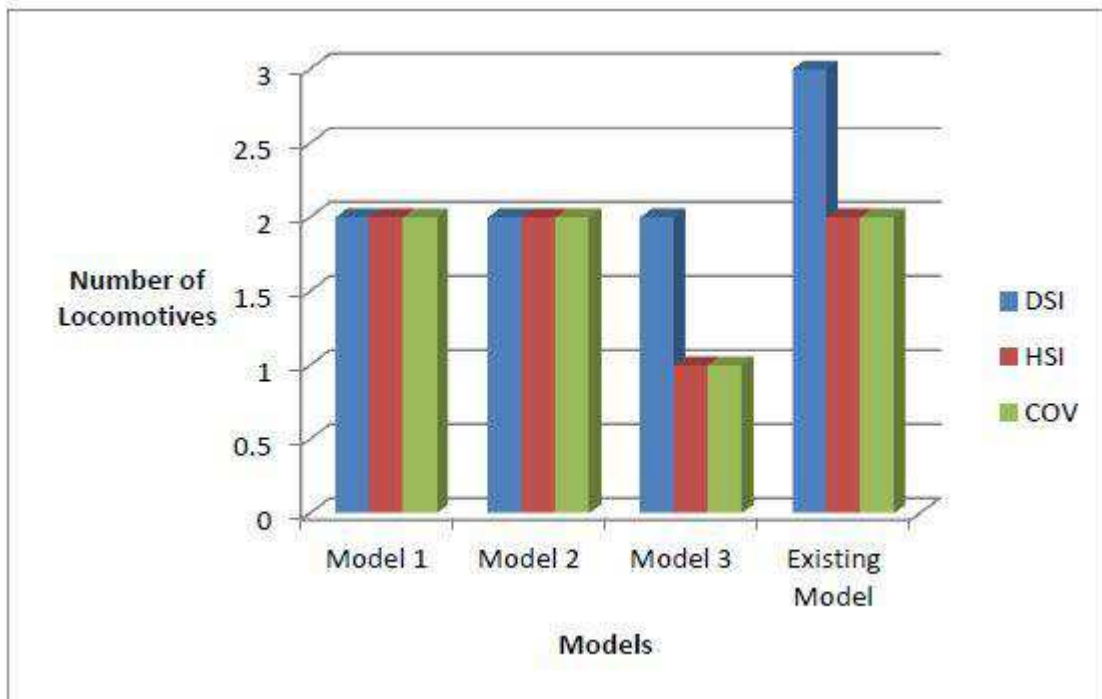


Рисунок 1. - Количество активных DE6 локомотивов в модели для 3 типов вагонов

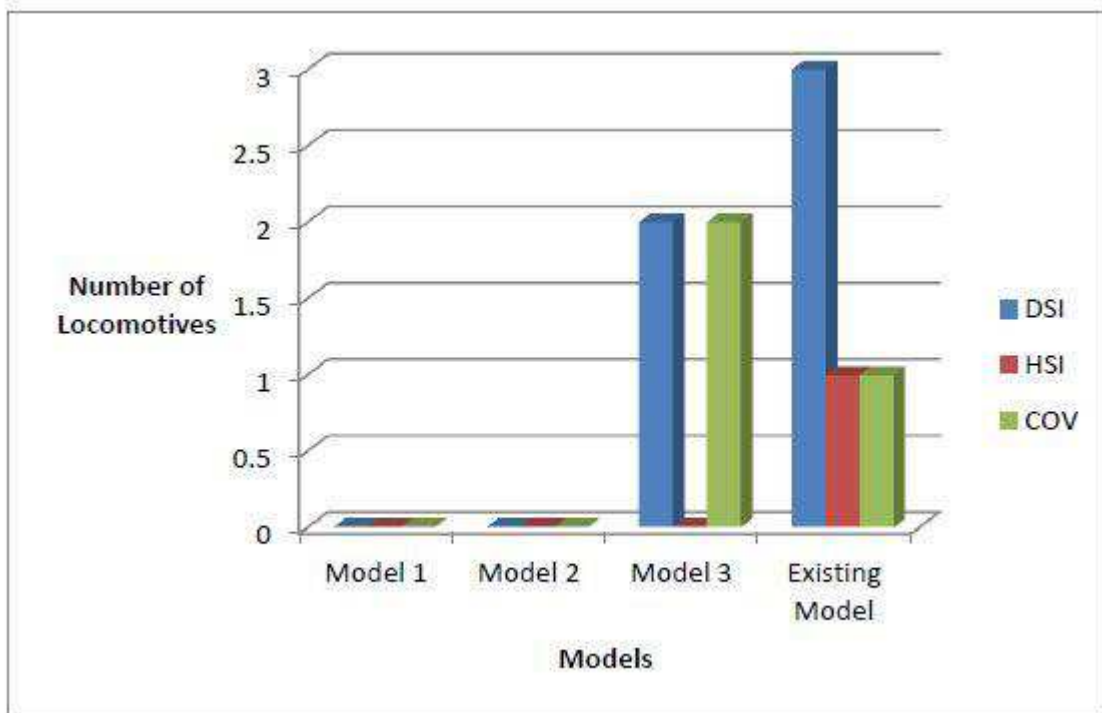


Рисунок 2. - Количество активных DE9 локомотивов в модели для 3 типов вагонов

Результаты на рисунке 2 показывают, что модель 1 и модель 2 не имеет активных DE9 локомотивов, которые подключены к 3 различным типам вагонов за определенный период времени. Модель 3 имеет больше активных DE9 локомотивов по сравнению с моделью 1 и моделью 2. Существующая модель в целом имеет наибольшее количество активных DE9 локомотивов по отношению к предлагаемой модели 3. На рисунке 3 показаны результаты сравнения количества неиспользованных (или сохраненных) локомотивов в модели 3 и существующей модели. Можно видеть, что модель 1 имеет наибольшее количество неиспользованных локомотивов, чем модель 2. Модель 3 не считает неиспользуемые локомотивы, поэтому она не включена в график. Существующая модель имеет наименьшее количество неиспользованных (сохраненных) что очень плохо, а именно расточительно.

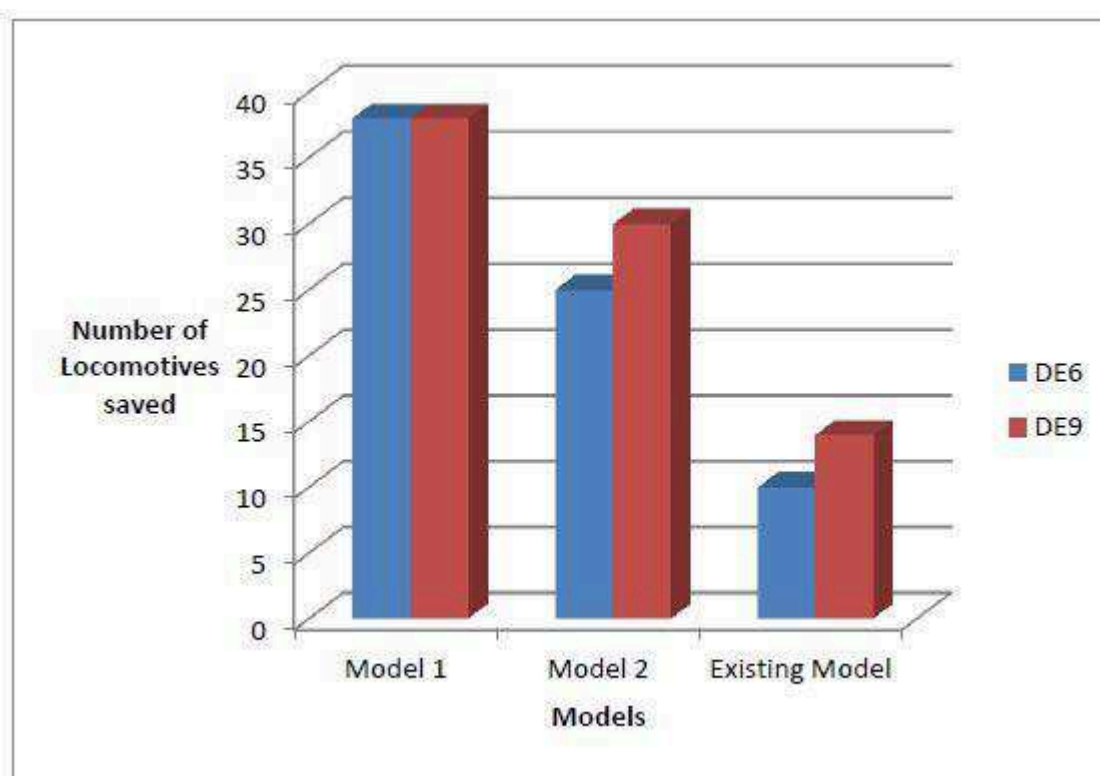


Рисунок. 3- Число неиспользованных (сохраненных) локомотивов в модели

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в этом исследовании, показывают, что три модели значительно увеличивают производительность локомотива. Резкое сокращение количества локомотивов предлагаемой модели по отношению к существующей системе может быть связано с тем, что в настоящее время нет конкретного графика, используемого на NRZ для назначения локомотивов в вагоны, то есть, если есть достаточное количество вагонов, то выбираются любые локомотивы, которые доступны, независимо от мощности. Другой

причиной значительного снижения количества активных DE9 локомотивов для предлагаемой модели относительно существующей модели является то, что предлагаемые модели учитывать тот факт, что DE9 локомотив слабее по перевозке емкости и скорости по сравнению с DE6.

Для того, чтобы снизить эксплуатационные расходы, модель, которая не включает в себя провоз и расходы, связанные с ним, будет наиболее оптимальной. Чтобы использовать несколько локомотивов, насколько это возможно, что эквивалентно увеличению количества неиспользованных локомотивов, наиболее оптимальной моделью будет модель.

Исходя из результатов, представленных в разделе 4 и обсуждения в этом разделе оптимальной модели, которая может быть рекомендована для национальных железных дорог Зимбабве, то это модель 1: большинство вагонов должны быть подключены к DE6 локомотиву, поскольку он имеет большую возможность перевозки, большую скорость и в целом сильнее, чем DE9 локомотив. DE9 локомотив склонен к частым сбоям.

В будущем NRZ должны рассмотреть вопрос о расширении, а именно пункты заправки и обслуживания локомотивов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Ahuja, R.K., J. Liu, J.B. Orlin, D. Sharma, L.A. Shughart. 2005. Solving real-life locomotive-scheduling problems. *Transportation Science* **39**(4), 503-517.
- 2.Aronsson, M., P. Kreuger, J. Gjerdrum. 2006. An efficient MIP model for locomotive scheduling with time windows. *6th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways*. OASICS-Vol5-ATMOS2006.
- 3.Baceler, A., A. Garcia. 2006. An optimization approach to the locomotive scheduling problem in Brazilian railways [online]. In: Conference on Railway Engineering (2006: Melbourne, Vic). Rail Achieving Growth: *Conference Proceedings*, Melbourne, Vic, RTSA: 493-500. Available on <http://search.informit.com.au>.
- 4.Borndörfer, R., T. Schlechte. 2008. Solving railway track allocation problems. *Operations Research Proceedings 2007*, Kalcsics, J., S. Nickel, Springer-Verlag 117-122.
- 5.Brannlund, U.P., P.O. Lindberg, A. Nou, J.-E. Nilsson. 1998. Railway timetabling using Lagrangian relaxation. *Transportation Science* **32**, 358-369.
- 6.Cacchiani, V., A. Caprara, P. Toth. 2010. Scheduling extra freight trains on railway networks. *Transportation Research Part B* **44**(2), 215-231.
- 7.Carey, M., S. Carville. 2003. Scheduling and platforming trains at busy complex stations. *Transportation Research* **1**, 195-224.
- 8.Cooper, B.R. 1990. *Introduction to Queueing Theory*, 4th Edition. Creep Press Books, Washington.
- 9.Corman, F., A. D'Ariano, D. Pacciarelli, M. Pranzo. 2010. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. *Transportation Research Part B* **44**(1), 175-192.

10. Fuchsberger, M. 2007. Solving the train scheduling problem in a main station area via a resource constrained space-time integer multi-commodity flow. *Master Thesis*, ETH Zurich.
11. Fügenschuh, A., H. Homfeld, A. Huck, A. Martin. 2006. Locomotive and wagon scheduling in freight transport. *6th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways*. OASICS-Vol5-ATMOS2006.
12. Godwin, T., R. Gopalan, T.T. Narendran. 2006. Locomotive assignment and freight train scheduling using genetic algorithms. *International Transactions in Operations Research* **13**, 299-332.
13. Kraay, D.R., P.T. Harker, B. Chen. 1991. Optimal pacing of trains in freight railroads: model formulation and solution. *Operations Research* **39**(1), 82-99.
14. Kraay, D.R., P.T. Harker. 1995. Real-time scheduling of freight railroads. *Transportation Research Part B* **29**(3), 213-229.
15. Lusby, R.M., J. Larsen, M. Ehrgott, D. Ryan. 2009. Railway track allocation: models and methods. *OR Spectrum* **31**, 1-41.
16. Mu, S., M. Dessouky. 2011. Scheduling freight trains travelling on complex networks. *Transportation Research Part B: Methodological* **45**(7), 1103-1123.
17. Newton, H.N., C. Barnhart, P.H. Vance. 1998. Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs. *Transportation Science* **32**, 330-345.
18. Tormos, P., A. Lova, F. Barber, L. Ingolotti, M. Abril, M.A. Salido. 2005. A genetic algorithm for railway scheduling problems. *Studies in Computational Intelligence* **128**, 255-278.
19. Winston, L.W. 2004. *Operations Research: Applications and Algorithms*, 4th Edition. Thomson Brooks/Cole, International.
20. Zhou, X., M. Zhong. 2007. Single-track train timetabling with guaranteed optimality: branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds. *Transportation Research Part B* **41**(3), 320-341.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Мы благодарим членов стратегической отрасли планирования железных дорог Зимбабве за их сотрудничество в сборе данных, используемые в работе. Особая благодарность, г-н Ф. Боуден, г-н Маконя, г-н П. Гвизи и г-н Мукожо. Благодарим также университет Монаш Южной Африке и Национальный университет науки и технологии в обеспечения научно-исследовательских учреждений.