



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Факультет Бизнеса и менеджмента,  
кафедра Бизнес-аналитики

Сопроводительная презентация на конкурс Digital Wave от EY

# РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ ТРАНСПОРТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОМПАНИИ

Студент Карнаух Е. С.  
к-т физ.-мат. наук, доцент  
Белоусов Ф. А.

Москва, 2019



# АННОТАЦИЯ

---

## Описание работы

В работе решается задача поиска оптимального плана грузоперевозок на основе располагаемого парка ж/д вагонов некоторой железнодорожной логистической компании с учетом актуального списка заявок железнодорожных грузоперевозок. Критерием оптимальности плана является максимизация прибыли за месяц, в рамках которого должны быть осуществлены грузоперевозки. На вход оптимизационной программе подается, во-первых, список заявок на грузоперевозки. Каждая заявка содержит информацию о заказчике, типе перевозимого груза, пункте отправления, пункте назначения, объеме перевозимого груза, а также указывается ставка, которую заказчик готов заплатить за осуществления транспортировки одного вагона указанного груза. Во-вторых, на вход оптимизационной программе подается информация об известной на данный момент текущей и будущей дислокации подвижного состава. На выходе оптимизационная программа должна выдавать такую цепочку груженых и порожних перегонов вагонов, реализовав которую фирма сможет получить максимально возможную прибыль за расчетный месяц. Таким образом, с помощью оптимизационной программы из всего списка заявок должны выбираться наиболее выгодные для компании заявки и должен быть определен план управления парком вагонов, в соответствии с которым будут выполнены выбранные заявки.

## Ключевые пункты заявки на перевозку грузов от клиентов:

- Откуда
- Куда
- Необходимое количество вагонов
- Ставка, которую готов платить заказчик за каждый перевезенный вагон с грузом
- Время движения по указанному маршруту (эта информация известна из внутренних данных логистической компании)



# ПРЕДПОСЫЛКИ

## Объект и предмет исследования

Объект - транспортная железнодорожная компания «Х», зарегистрированная в РФ, название которой нельзя раскрывать из-за конфиденциальности информации; предмет - планирование исполнения заявок на груженные перегоны в компании «Х»

## Контекст проблемы

Ежемесячно менеджеры отдела продаж транспортных железнодорожных компаний формируют список заявок на перевозку грузов в следующем месяце от различных клиентов. В последнюю неделю месяца сбор заявок закрывается и менеджеры отбирают заявки вручную с учетом интересов компании. Как известно, для транспортных компаний важно выбирать наиболее маржинальные заявки, но нельзя забывать и о том, что в некоторых ситуациях лучше сработать в убыток, чтобы в будущем извлечь наибольшую прибыль. К примеру, есть три железнодорожные станции А, Б и В. Изначально все вагоны компании находятся на станциях А и Б, при этом у компании есть заявка на перегон со станции В в Б. Именно в такой ситуации лучше сработать в убыток и перегнать вагоны с А и Б в В, чтобы в будущем извлечь прибыль. В данной работе объект исследования будет обладать парком вагонов в 30 000 штук, поэтому составление подобных цепочек исполнения заявок вручную не представляется возможным и нуждается в автоматизации.

## Цель исследования

Цель работы заключается в разработке нового подхода для усовершенствования процесса планирования и выбора заявок для исполнения по грузовым перевозкам между железнодорожными станциями для логистической компании

## Задачи

- Сформировать математическую модель поставленной проблемы (описать задачу линейного программирования с ограничениями)
- Создать оптимизационную модель выбора заявок на перевозки согласно математической модели выше
- Привести примеры использования результатов моделирования



# ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

## Этап 1. Сбор заявок на перевозки.

Ежемесячно менеджеры отдела продаж транспортных железнодорожных компаний формируют список заявок на перевозку грузов в следующем месяце от различных клиентов.

## Этап 2. Отбор заявок к исполнению.

В последнюю неделю месяца сбор заявок закрывается и менеджеры отбирают заявки вручную с учетом интересов компании. Процесс отбора заявок происходит в Excel неоптимальным образом.

## Этап 3. Исполнение заявок и сбор новых заявок.

Выполнение отобранных перевозок и накопление новых заявок на перевозки в следующем месяце.

## Этап 2. Необходимость в автоматизации процесса.

Процесс отбора заявок нуждается в автоматизации, в связи с чем можно создать оптимизационную модель отбора заявок на перевозки, решая задачу максимизации прибыли компании с помощью линейного программирования.

заявки на перевозку (откуда, куда, время движения,  
количество вагонов, прибыль с одного вагона) →

модель

1) заявки к исполнению (в какой день месяца, откуда,  
куда, сколько вагонов из заявки)  
2) вспомогательные порожние перегоны (откуда,  
куда, сколько вагонов, в какой день месяца)



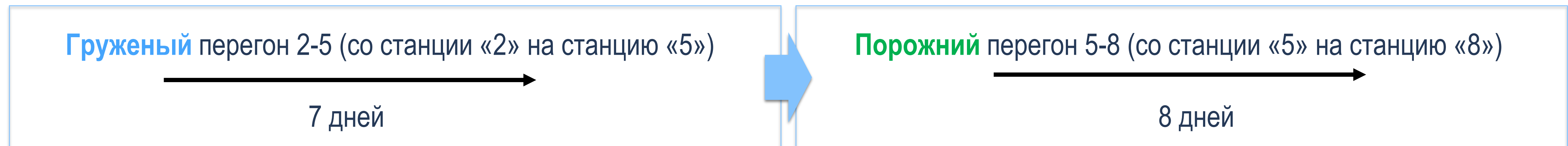


# ФОРМИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ТРЕБОВАНИЙ

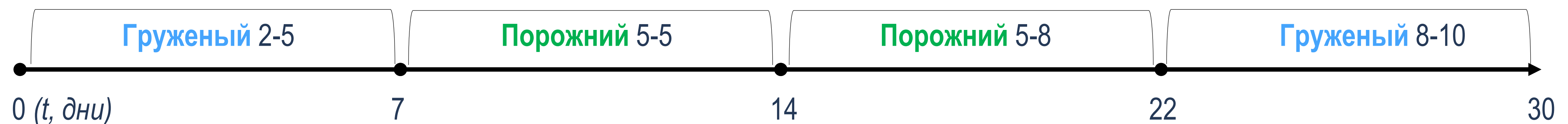
БТ1: на стадии планирования исполнения заявок на перевозки важно выбрать такое подмножество заявок, которое обеспечит логистической компании максимальную прибыль

$\text{Max } f$ : Выручка от исполненных **груженых** перегонов – Расходы от вспомогательных **порожних** перегонов

БТ2: разрабатываемый подход должен учитывать фактор времени перемещения вагона между двумя станциями



БТ3: процедура планирования исполнения заявок осуществляется на 1 месяц вперед и минимальным шагом для управления является 1 день





# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

$$\sum_{t=1}^T \left( \sum_{i,j \in E1} (rev_{ij} * x_{ij}^t) - \sum_{i,j \in E2} (cost_{ij} * y_{ij}^t) \right) \rightarrow \max (x_{ij}^t, y_{ij}^t), \text{ где}$$

$T$  – горизонт планирования (к примеру, 30 дней);

$x_{ij}^t$  – число груженых перегонов по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором в момент времени  $t$ ;

$y_{ij}^t$  – число груженых перегонов по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором в момент времени  $t$ ;

$rev_{ij}$  – чистая прибыль груженого перегона по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором;

$cost_{ij}$  – фиксированная себестоимость порожнего перегона по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором;

$E1 = \{<i, j>\}$ ,  $<i, j>$  - комбинация станций из существующих заявок на груженные перегоны;

$E2 = \{<i, j>\}$ , причем  $i = \overline{1, N}$  и  $j = \overline{1, N}$ ; где  $N$  – количество железнодорожных, обслуживаемых логистическим оператором



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ОГРАНИЧЕНИЯ

$$\sum_{t=1}^T \left( \sum_{i,j \in E1} (rev_{ij} * x_{ij}^t) - \sum_{i,j \in E2} (cost_{ij} * y_{ij}^t) \right) \rightarrow \max (x_{ij}^t, y_{ij}^t)$$

1) Начальное положение железнодорожного парка, которое ограничивает количество перегонов после первой временной отсечки:

$$\sum_{i=1}^N (x_{ij}^1 + y_{ij}^1) = NI_i^0,$$

где  $NI_i^0$  – количество вагонов, изначально расположенных на станции  $i$  у оператора

2) Число груженых перегонов между  $i$  и  $j$  не должно превышать значения из матрицы заявок на перевозки между  $i$  и  $j$

$$\sum_{t=1}^T x_{ij}^t \leq Z_{ij},$$

3) Не отрицательность груженых и порожних перегонов:

$$x_{ij}^t \geq 0, y_{ij}^t \geq 0.$$



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ОГРАНИЧЕНИЯ

4) Балансирующее ограничение на число приехавших вагонов к моменту времени  $t$  на станцию  $j$  и числу уехавших со станции  $j$  числа вагонов в момент времени  $(t+1)$ , а именно:

$$\left( \sum_{tt=1}^t \sum_{i=1}^N (x_{ij}^{tt} + y_{ij}^{tt}) \right) + NI_j^t = \sum_{i=1}^N (x_{ji}^{t+1} + y_{ji}^{t+1}), \quad (10)$$

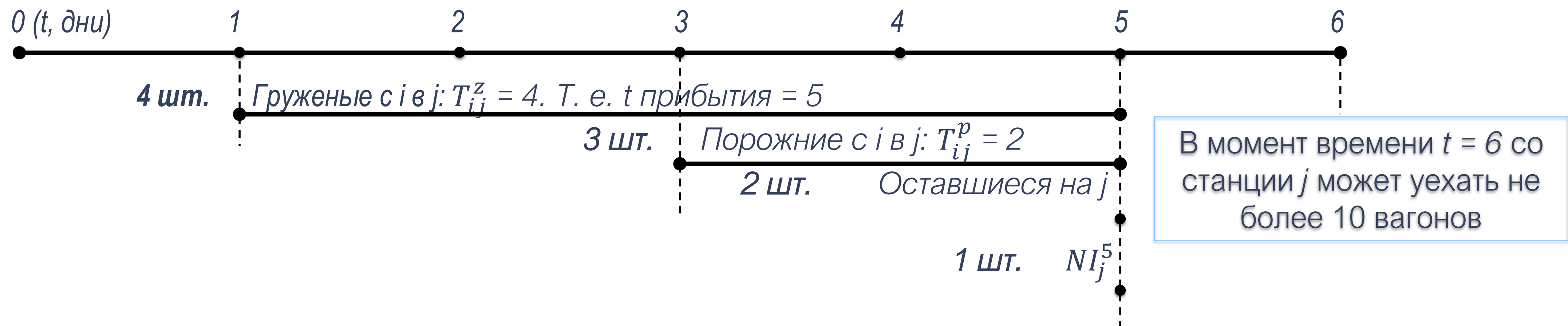
причем  $x_{ij}^{tt}$ :  $tt + T_{ij}^z = t$ , где  $T_{ij}^z$  – время движения груженого перегона по направлению от  $i$  к  $j$  станции;

$y_{ij}^{tt}$ :  $tt + T_{ij}^p = t$ , где  $T_{ij}^p$  – время движения порожнего перегона по направлению от  $i$  к  $j$  станции;

$t <$ ;

$NI_j^t$  – число вагонов, приезжающих на станцию  $j$  к моменту времени  $t$  (доступные начиная с  $t$ )

Рассмотрим пример:  $t = 5$ , следовательно  $tt \in [1; 5]$







# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ДОПОЛНЕНИЕ

$$\sum_{t1=1}^{T1} \left( \sum_{i,j \in E1} (rev_{ij} * x_{ij}^{t1}) - \sum_{i,j \in E2} (cost_{ij} * y_{ij}^{t1}) \right) + \sum_{t2=1}^{T2} \left( \sum_{i,j \in E1} (rev_{ij} * x_{ij}^{t2}) - \sum_{i,j \in E2} (cost_{ij} * y_{ij}^{t2}) \right) \rightarrow \max (x_{ij}^{t1}, y_{ij}^{t1}, x_{ij}^{t2}, y_{ij}^{t2}), \text{ где}$$

$T1$  – первый горизонт планирования,  $T2$  – второй горизонт планирования, где  $t1$  момент времени из  $T1$ , а  $t2$  – из  $T2$ ;

$x_{ij}^{t1}, x_{ij}^{t2}$  – число груженых перегонов по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором в момент времени  $t1$  и  $t2$ ;

$y_{ij}^{t1}, y_{ij}^{t2}$  – число груженых перегонов по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором в момент времени  $t1$  и  $t2$ ;

$rev_{ij}$  – чистая прибыль груженого перегона по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором;

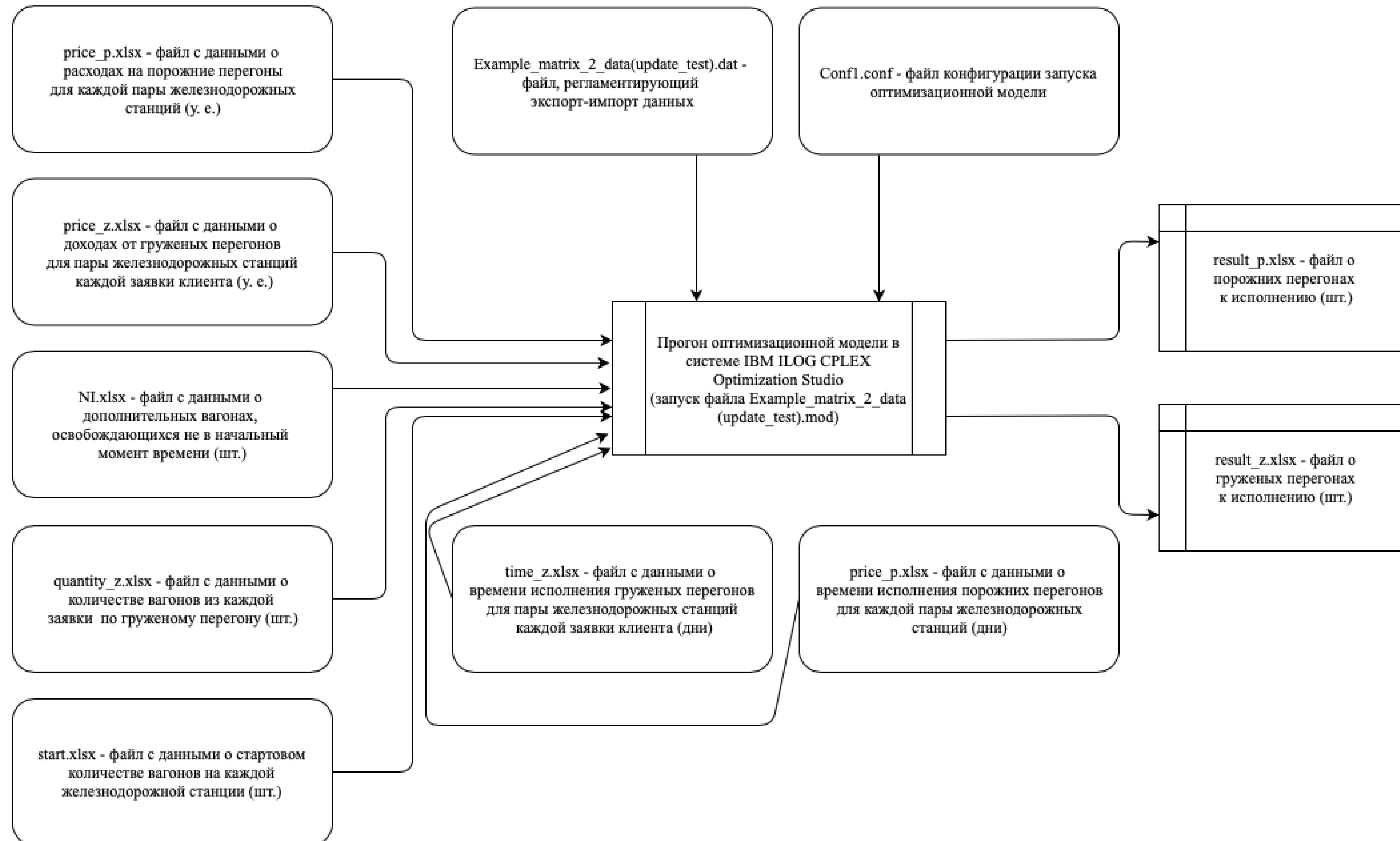
$cost_{ij}$  – фиксированная себестоимость порожнего перегона по направлению от  $i$  к  $j$  станции, выполняемых оператором;

$E1 = \{<i, j>\}$ ,  $<i, j>$  - комбинация станций из существующих заявок на груженные перегоны;

$E2 = \{<i, j>\}$ , причем  $i = \overline{1, N}$  и  $j = \overline{1, N}$ ; где  $N$  – количество железнодорожных, обслуживаемых логистическим оператором



# ДИАГРАММА ПОТОКОВ ДАННЫХ





# СТРУКТУРА ДАННЫХ (ПРИМЕР МАЛОЙ РАЗМЕРНОСТИ)

## Входные данные

## Выходные данные

price\_p.xlsx (расходы на пустой перегон)

time\_p.xlsx  
(время движения)

Переменная решения y (для каждого дня).  
Сколько вагонов, откуда и куда

Порожние

Станции	1	2	3
1	0	0,12	0,19
2	0,12	0	0,2
3	0,19	0,2	0

Станции	1	2	3
1	0	2	1
2	2	0	2
3	1	2	0

	1	2	3		1	2	3		1	2	3
1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
2	0	0	0	2	0	0	2	2	0	0	0
3	1	0	0	3	1	1	0	3	1	1	0

Данные о  
расположении  
вагонов

start.xlsx

Станция	
1	9
2	0
3	0

ni.xlsx

Станции	1	2	3
1	0	0	0
2	0	1	0
3	0	1	0

1 день

2 день

3 день

price\_z.xlsx  
(доходы от груженого перегона)

quantity\_z.xlsx  
(количество вагонов)

time\_z.xlsx  
(время движения)

Переменная решения x (для каждого дня).  
Сколько вагонов, откуда и куда

Груженные

Станции	1	2	3
1	0	1,20	1,9
2	1,2	0	2
3	1,9	2	0

Станции	1	2	3
1	0	2	2
2	3	0	2
3	1	1	0

Станции	1	2	3
1	0	3	2
2	3	0	4
3	2	4	0

	1	2	3		1	2	3		1	2	3
1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
2	0	0	0	2	0	0	2	2	0	0	0
3	1	0	0	3	1	1	0	3	1	1	0



# МОДЕЛИРОВАНИЕ В IBM ILOG CPLEX

The screenshot displays the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio interface. The main window shows a CPLEX model named 'Example\_matrix\_2\_data(update\_test).mod'. The model is written in CPLEX syntax and includes the following components:

- Parameters:** `n` (number of stations), `t` (number of days in the planning horizon), `iterations_1` and `iterations_2` (planning horizons), `Price_p` and `Price_z` (fare rates), `Time_p` and `Time_z` (empty and loaded train times), `Quantity_z` (demand), and `Start` (initial train positions).
- Variables:** `x` (loaded trains), `y` (empty trains), `x2` (loaded trains in the second horizon), and `y2` (empty trains in the second horizon).
- Expressions:** `revenue1`, `cost1`, `revenue2`, and `cost2` are calculated based on the variables and parameters.
- Objective:** Maximize profit, calculated as `revenue1 - cost1 + revenue2 - cost2`.
- Constraints:** The model includes constraints for train positions, demand, and balance.

The right sidebar shows the 'Schema' view, which lists the model's components and their types. The bottom status bar indicates the current state of the model, including 'Неполадки' (Errors), 'Протокол...' (Log), 'Решения' (Solutions), 'Конфлик...' (Conflicts), 'Релаксация' (Relaxation), 'Протокол...' (Log), 'Статистика' (Statistics), 'Классиф...' (Classification), 'DOplexcl...' (DOplexcl), and 'Серверы...' (Servers).





# МОДЕЛИРОВАНИЕ В IBM ILOG CPLEX

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

Файл Правка Навигация Поиск Выполнить Окно Справка

Проекты OPL Ошибка

- Example\_matrix
  - Example\_matrix\_2\_data(update\_test)
    - Конфигурации запуска
      - Conf1 (по умолчанию)
        - Example\_matrix\_2\_data(update\_test).mod : CPLEX
        - Example\_matrix\_2\_data(update\_test).dat
      - Example\_matrix\_2\_data(update\_test).mod : CPLEX
      - Example\_matrix\_2\_data(update\_test).dat
      - ni.xlsx
      - price\_p.xlsx
      - price\_z.xlsx
      - quantity\_z.xlsx
      - result\_p.xlsx
      - result\_z.xlsx
      - start.xlsx
      - time\_p.xlsx
      - time\_z.xlsx

Браузер не... (x)= Переменные Точки пре...

Имя	Значение
-----	----------

```
42  загрузка.
43  sum(t in iterations) x[t][i][j] <= Quantity_z[i][j];
44  // балансовое уравнение: сумма вагонов, приехавших к t должна быть равна сумме уехавших вагонов в
45  // интерпретация: все, что уезжает в момент времени t (период 1 день), может уехать в
46  // любой момент этого дня, главное не в следующий день
47  forall (i in stations, t in iterations: t<10)
48  balans:
49  sum(tt in iterations: tt<=t)
50  (sum(ii in stations: tt+Time_z[ii][i]==t) x[tt][ii][i]
51  +sum(ii in stations: tt+Time_p[ii][i]==t) y[tt][ii][i])
52  +NI[i][t]
53  -sum(jj in stations) (x[t+1][i][jj]+y[t+1][i][jj])=0;
54  // дополнительный блок для учета двух одинаковых горизонтов планирования
55  // стартовое положение вагонов
56  forall(i in stations)
57  start2:
58  sum(t in iterations: t==10) (y[t][i][i]) ==
59  sum(j in stations, t in iterations2: t == 11) (x2[t][i][j]+y2[t][i][j]);
60  // груженные перегоны не должны превышать объем заявок
61  forall(i in stations, j in stations)
62  zayvki2:
63  sum(t in iterations2) x2[t][i][j] <= Quantity_z[i][j];
64  // балансовое уравнение: сумма вагонов, приехавших к t должна быть равна сумме уехавших вагонов в
65  // интерпретация: все, что уезжает в момент времени t (период 1 день), может уехать в
66  // любой момент этого дня, главное не в следующий день
67  forall (i in stations, t in iterations2: t<20)
68  balans2:
69  sum(tt in iterations2: tt<=t)
70  (sum(ii in stations: tt+Time_z[ii][i]==t) x2[tt][ii][i]
71  +sum(ii in stations: tt+Time_p[ii][i]==t) y2[tt][ii][i])
72  +sum(t1 in iterations)
73  (sum(iii in stations: t1+Time_z[iii][i]==t) x[t1][iii][i]
74  +sum(iii in stations: t1+Time_p[iii][i]==t) y[t1][iii][i])
75  -sum(jj in stations) (x2[t+1][i][jj]+y2[t+1][i][jj])=0;
76  }
77  // записываем список груженных и порожних перегонов в файл Excel
78  tuple Tuple{
79  int t;
80  int i;
81  int j;
82  int value;
83  }
84  {Tuple} Setz = {<t,i,j,x[t][i][j]> | t in iterations, i in stations, j in stations: x[t][i][j]>0};
85  {Tuple} Setp = {<t,i,j,y[t][i][j]> | t in iterations, i in stations, j in stations: y[t][i][j]>0};
```

Схема

- использование CPLEX
  - Внутренние данные (4)
    - iterations : range
    - iterations2 : range
    - iterations\_1 : range
    - stations : range
  - Внешние данные (9)
    - n : int
    - NI : int[stations][iterations]
    - Price\_p : float[stations]
    - Price\_z : float[stations]
    - Quantity\_z : int[stations]
    - Start : int[stations]
    - t : int
    - Time\_p : int[stations][iterations]
    - Time\_z : int[stations][iterations]
  - Переменные решения (4)
    - x : dvar int+[iterations]
    - x2 : dvar int+[iterations]
    - y : dvar int+[iterations]
    - y2 : dvar int+[iterations]
  - Выражения решения (5)
    - cost1 : dexpr float
    - cost2 : dexpr float
    - profit (используется в)
    - revenue1 : dexpr float
    - revenue2 : dexpr float
  - Цель: простая

Свойства

Свойство	Значение
----------	----------

Неполадки Протокол... Решения Конфлик... Релаксац... Протокол... Статистика Классиф... DOcplexl... Серверы ...



# ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ 1

## Экспорт данных в Excel грузеных перегонов

День / Откуда / Куда / Количество

1	1	2	2
1	1	3	1
1	1	5	3
2	4	2	1
3	4	2	1
3	5	2	1
3	5	3	2
4	1	3	1
4	3	2	1
4	4	3	1
4	5	4	1
5	2	3	2
5	2	5	1
5	5	2	2
6	3	5	1
6	5	4	1
7	3	4	1
7	4	5	1
8	2	1	1
8	3	5	2
9	2	1	1
9	4	1	3
10	2	1	1
10	2	4	1
10	3	1	1
10	3	4	1
10	5	1	4

Приведен пример вывода грузеных перегонов к исполнению в первый день планируемого периода времени

Эффект: работа менеджера отдела планирования автоматизирована. Оптимизационная модель выводит план управления грузеными перегонами. Пример: грузеные перегоны в 1-ый день

День 1				
Сумма по полю (число вагонов)	Куда (номер станции)			
Откуда (номер станции)	2	3	5	Общий итог
1	2	1	3	6
Общий итог	2	1	3	6



# ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ 2

## Экспорт данных в Excel порожних перегонов

День / Откуда / Куда / Количество

1	1	1	18
1	1	4	1
2	1	1	15
2	1	5	3
3	1	1	15
4	1	1	13
4	1	5	1
4	5	5	2
5	1	1	13
6	1	1	12
6	1	4	1
6	2	5	1
7	1	1	13
7	3	3	2
8	1	1	13
9	1	1	13
9	3	3	1
10	1	1	13
10	3	3	1

Приведен пример вывода порожних перегонов к исполнению в первый день планируемого периода времени

Эффект: работа менеджера отдела планирования автоматизирована. Оптимизационная модель выводит план управления порожними перегонами. Пример: порожние перегоны в 1-ый день. (На первой станции остается 18 вагонов, с 1-ой станции на 4-ую станцию отправляется 1 вагон).

День	1
------	---

Сумма по полю (число вагонов)	Куда		Общий итог
	1	4	
Откуда			
1	18	1	19
Общий итог	18	1	19





# РЕЗУЛЬТАТЫ

---

## Решенные задачи

- составлена и описана математическая модель предлагаемого подхода для оптимизации процесса планирования перевозок;
- реализована оптимизационная модель в системе IBM ILOG CPLEX Optimization Studio на основе разработанного подхода;
- приведены примеры использования результатов моделирования в системе IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.

## Автоматизация процесса планирования

С помощью разработанной оптимизационной модели можно автоматизировать процесс планирования управления подвижным составом в железнодорожной логистической компании.

## Дальнейшее исследование

В качестве дальнейшей перспективы исследования может быть рассмотрено и доказано предположение о том, что разработанная модель может быть применима в процессе планирования исполнения заявок на перевозки и в других логистических железнодорожных компаниях.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

E-mail: [egorkarnaukh@yandex.ru](mailto:egorkarnaukh@yandex.ru)

E-mail : [fbelousov@hse.ru](mailto:fbelousov@hse.ru)