

## Пояснительная записка

### Вычислительные техники решения задач линейного программирования в частично-целочисленной постановке и приемы работы с решателем SCIP

Подвойский А.О., Глазунова Е.В.

## Содержание

<b>1</b>	<b>Ключевые термины и определения</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Выявленные баги SCIP и тонкости процедуры поиска решения</b>	<b>2</b>
2.1	Недопустимое решение для релаксированной постановки задачи . . . . .	2
2.2	Неединственность релаксированного решения . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Общие сведения</b>	<b>3</b>
3.1	Замечание о стабильности работы решателя SCIP на различных операционных системах . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Приемы поиска решения</b>	<b>3</b>
4.1	Прием фиксации бинарно-целочисленных переменных в релаксированном решении	3
4.2	Прием подавления подгруппы первичных эвристик низкой эффективности . . . . .	4
4.3	Прием подбора порога бинаризации для бинарных переменных в релаксированном решении . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Описание вычислительных экспериментов на сценариях группы ИКП</b>	<b>6</b>
5.1	Общие замечания по процедуре поиска решения на сценариях <i>без</i> бинарных переменных . . . . .	6
5.1.1	Сценарий F398266B без бинарных переменных . . . . .	7
5.1.2	Сценарий 50197DF7 без бинарных переменных . . . . .	8
5.1.3	Сценарий 7FAC4231 без бинарных переменных . . . . .	9
5.1.4	Сценарий CA485A55 без бинарных переменных . . . . .	10
5.1.5	Сценарий 276 без бинарных переменных . . . . .	11
5.1.6	Сценарий 337 без бинарных переменных . . . . .	12
5.1.7	Сценарий 13D686AB без бинарных переменных . . . . .	12
5.1.8	Сценарий A78CBEAD без бинарных переменных . . . . .	13
5.2	Общие замечания по процедуре поиска решения на сценариях <i>с</i> бинарными переменными . . . . .	14
5.2.1	Сценарий A78CBEAD с бинарными переменными . . . . .	16
5.2.2	Сценарий 7FAC4231 с бинарными переменными . . . . .	17
5.2.3	Сценарий 50197DF7 с бинарными переменными . . . . .	18
5.2.4	Сценарий F398266B с бинарными переменными . . . . .	20

<b>6</b>	<b>Описание вычислительных экспериментов на сценариях группы MBO</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>Описание вычислительных экспериментов на сценариях MIPLIB 2017</b>	<b>26</b>
7.1	Сценарии со статусом «open»	26
7.1.1	Сценарий DLR2	26
7.1.2	Сценарий CVRPA-N64K9VRPI	26
7.2	Сценарии со статусом «hard»	26
7.2.1	Сценарий CRYPTANALYSISISKB128N5OBJ14	26
7.3	Сценарии со статусом «easy»	26
7.3.1	Сценарий NEOS-4332801-seret	26
	<b>Список иллюстраций</b>	<b>27</b>
	<b>Список таблиц</b>	<b>27</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>28</b>

## 1. Ключевые термины и определения

Задача линейного программирования (LP-задача) – это ...

Задача линейного программирования в частично-целочисленной постановке (MILP-задача) – это ...

## 2. Выявленные баги SCIP и тонкости процедуры поиска решения

### 2.1. Недопустимое решение для релаксированной постановки задачи

По состоянию на 18.06.2022 г. решатель SCIP версии 8.0.0 с оберткой PySCIPOpt версий 4.0.0 и 4.2.0 для операционной системы Windows 10 *релаксированную постановку задачи* (т.е. при снятых ограничениях на целочисленность переменных) оценивает как неспособную привести к допустимому решению.

SCIP версии 7.0.3 (PySCIPOpt 3.4.0) как на операционной системе Windows 10, так и на Unix-подобных операционных системах (в частности, MacOS Monterey 12.1 и Linux Centos 7) решает задачу в релаксированной постановке корректно.

### 2.2. Неединственность релаксированного решения

Если эвристические приемы строятся на базе релаксированного решения задачи, важно помнить, что релаксированные решения, полученные с помощью различных решателей с точки зрения распределения значений переменных могут существенно различаться<sup>1</sup>, не смотря на то, что во всех случаях зазор будет нулевым и целевая функция будет иметь одно и тоже значение (с оговоркой на допуск точности решателя).

<sup>1</sup>Потому как гиперплоскость целевой функции может касаться политопа не в вершине, а по грани

## 3. Общие сведения

### 3.1. Замечание о стабильности работы решателя SCIP на различных операционных системах

- Вычислительные эксперименты проводились на трех версиях решателя SCIP (7.0.0, 7.0.3, 8.0.0) и трех платформах: Windows 10, MacOS (Monterey 12), Linux (Centos 7). Разброс времени поиска решения для каждой конфигурации решателя оценивается минимум по 3 запускам сценария
- На текущий момент наиболее стабильные и наиболее адекватные результаты получаются
  - для ОС Linux (Centos 7) и ОС MacOS (Monterey12) на решателе SCIP версии 7.0.3 (обертка PySCIPOpt 3.4.0) и платформе Esole версии 0.7.3 , собранных для однопоточной реализации
  - для ОС Windows 10 на решателе SCIP версии 8.0.0 (обертка PySCIPOpt 4.0.0), собранном для однопоточной реализации
- Последняя доступная версия решателя SCIP 8.0.0 (PySCIPOpt 4.1.0) на MacOS (Monterey 12.1) и Linux (Centos 7) при тех же настройках, что и для SCIP версии 7.0.3, как правило, работает значительно медленнее (2.5-2.85 раза) и в большинстве случаев либо не успевает найти решение за отведенное время, либо «просаживает» целевую функцию

## 4. Приемы поиска решения

### 4.1. Прием фиксации бинарно-целочисленных переменных в релаксированном решении

Часто фиксация целочисленных переменных<sup>2</sup> в релаксированном решении приводит к приемлемому допустимому целочисленному решению, которое потом можно использовать как «теплый старат» или как базовое решение для других схем фиксации.

```
ZERO = 0.0
...
relax_sol: pd.Series = read_relax_sol(path_to_relax_sol)

model = pyscipopt.Model()
model.readProblem(path_to_lp_file)
model.readParams(path_to_set_file)

all_vars: t.List[pyscipopt.scip.Variable] = model.getVars()
bin_vars: t.List[pyscipopt.scip.Variable] = extract_vars_set_type(all_vars, BINARY)
int_vars: t.List[pyscipopt.scip.Variable] = extract_vars_set_type(all_vars, INTEGER)

all_zero_bin_vars: t.List[
    pyscipopt.scip.Variable
] = extract_from_relax_sol_zero_vars(
    relax_sol,
    sub_group_vars=bin_vars,
)
all_zero_int_vars: t.List[
    pyscipopt.scip.Variable
] = extract_from_relax_sol_zero_vars(
```

---

<sup>2</sup>Вообще говоря, фиксировать можно не только бинарные и целочисленные переменные

```

    relax_sol,
    sub_group_vars=int_vars,
)

for var in all_zero_bin_vars + all_zero_int_vars:
    model.fixVar(var, ZERO)

model.optimize()
...

```

## 4.2. Прием подавления подгруппы первичных эвристик низкой эффективности

В некоторых случаях отдельные первичные эвристики могут оказаться не способными справиться со своей задачей, не оказывая никакого влияния на процедуру поиска решения, и все же потреблять предоставленные ресурсы.

Такие эвристики – условимся их называть первичными эвристиками низкой эффективности (ПЭНЭ) – можно выявить путем анализа статистической сводки **stat**-файла в разделе Primal Heuristics

Фрагмент файла статистической сводки 337\_bin\_default.stat

...						
Primal Heuristics	:	ExecTime	SetupTime	Calls	Found	Best
LP solutions	:	0.00	-	-	0	0
relax solutions	:	0.00	-	-	0	0
pseudo solutions	:	0.00	-	-	0	0
...						
conflictdiving	:	0.00	0.00	0	0	0
crossover	:	0.00	0.00	0	0	0
dins	:	0.00	0.00	0	0	0
distributiondivin	:	0.00	0.00	0	0	0
dualval	:	0.00	0.00	0	0	0
farkasdiving	:	2032.89	0.00	1	0	0 # <- NB
feaspump	:	882.12	0.00	1	0	0 # <- NB
fixandinfer	:	0.00	0.00	0	0	0
...						
intdiving	:	0.00	0.00	0	0	0
intshifting	:	52.99	0.00	1	1	1
...						

В данном случае ПЭНЭ являются **farkasdiving** и **feaspump**. Чтобы подавить эти эвристики при следующем запуске **SCIP**, достаточно включить следующие строки в конфигурационный файл **scip.set**<sup>3</sup>

scip.set

```

...
heuristics/farkasdiving/freq = -1
heuristics/feaspump/freq = -1
...

```

Доступ к статистической сводке можно получить либо в сессии **SCIP**, либо через одну из оберток над решателем (например, с помощью **PySCIPOpt**)

<sup>3</sup>При запуске интерактивной сессии через утилиту командной строки **scip**, решатель ищет этот файл в текущей директории и, если находит, автоматически вычитывает. При работе через **PySCIPOpt** требуется явно передавать путь до файла методу модели **readParams()**

```
...
SCIP> read file.lp
SCIP> opt
SCIP> display stat
```

```
import pyscipopt

model = pyscipopt.Model()
model.readProblem("...")
model.readParams("...")
model.optimize()

model.printStatistics()
```

#### 4.3. Прием подбора порога бинаризации для бинарных переменных в релаксированном решении

Условимся *фиксацией* называть стратегию инициализации подгруппы переменных  $x_k$  (вещественных, бинарных или целочисленных), значения которых задаются на основе каких-либо эвристических соображений, например, касающихся специальных свойств матрицы ограничений, и способных в результате привести к такой постановке задачи, которую, используя механизмы первичных эвристик, сепараторов, пропагаторов и пр. можно развить в *допустимое целочисленное решение*.

Базовая идея построения *фиксации на бинарных переменных* заключается в том, чтобы значения бинарных переменных в релаксированном решении<sup>4</sup>  $\{r x_k^{(b)}\}_{k=1,\dots}$  интерпретировать как *степень уверенности* решателя в том, что рассматриваемую бинарную переменную можно выставить в единицу.

Если значение  $k$ -ой бинарной переменной  $r x_k^{(b)}$  превосходит некоторый *порог*  $\theta$ , то переменная выставляется в единицу, в противном случае – в ноль. Порог подбирается итерационно, начиная с некоторого нижнего значения  $\theta_l$  (по умолчанию  $\theta_l = 0$ ), увеличивая текущее значение порога на величину шага  $\Delta\theta$  и заканчивая верхним значением порога  $\theta_u$  (по умолчанию  $\theta_u = 1$ ).

Для практических целей достаточно остановиться на наименьшем значении порога  $\theta$ , который отвечает такой фиксации, которую решатель SCIP не отклоняет как неспособную привести к допустимому целочисленному решению.

Фрагмент лога решателя SCIP для случая фиксации, которую невозможно развить в допустимое целочисленное решение

```
...
SCIP Status      : problem is solved [infeasible]
Solving Time (sec) : 3.00
Solving Nodes    : 0
Primal Bound     : +1.0000000000000000e+20 (0 solutions)
Dual Bound      : +1.0000000000000000e+20
Gap              : 0.00 %
original problem has 740251 variables (2666 bin, 147789 int, 0 impl, 589796 cont) and 545350 constraints
```

<sup>4</sup>Верхний левый индекс « $r$ » указывает на релаксированное значение, а верхний правый « $(b)$ » – на то, что речь идет о бинарной переменной

После того как порог  $\theta$  подобран, бинарные переменные разбиваются на две подгруппы: подгруппу бинарных переменных, выставленных в ноль  $\{x_k^{(b_0)}\}$ , и подгруппу бинарных переменных, выставленных в единицу  $\{x_k^{(b_1)}\}$ . Долю бинарных переменных, выставленных в ноль обозначим через  $\delta_{b_0}$ , долю бинарных переменных, выставленных в единицу – через  $\delta_{b_1}$ , а целевую функцию, найденную при заданных долях – через  $f_\theta(\delta_{b_0}, \delta_{b_1})$ .

В результате получаем исследовательский инструмент, который дает возможность управлять решением через подбор долей  $\delta_{b_0}$  и  $\delta_{b_1}$  при найденном пороге  $\theta$ . Часто оказывается эффективным прием управления решением через подбор доли нулевых бинарных переменных  $\delta_{b_0}$ .

Целевая функция, вычисленная при единичной доле нулевых бинарных переменных  $f_\theta(\delta_{b_0} = 1)$ , как правило, значительно уступает целевой функции релаксированного решения  $f_r$ . Но тем не менее это решение может быть улучшено, сокращением доли  $\delta_{b_0}$  (см. рис. 1 и рис. 2).

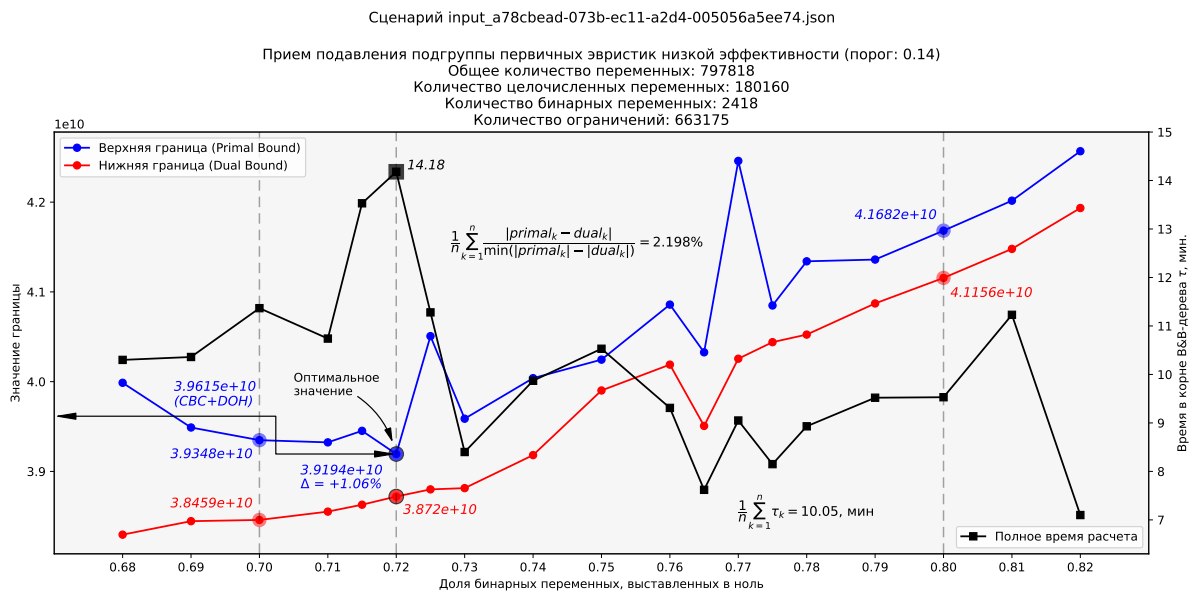


Рис. 1. Зависимость верхней границы решения от доли бинарных переменных, выставленных в ноль. Сценарий a78cbead

Как видно из графиков, на кривой изменения верхней границы решения существует точка с наименьшим значением целевой функции  $f_\theta(\delta_{b_0})$  допустимого целочисленного решения. Эта точка и будет «оптимальной» для рассматриваемого сценария.

## 5. Описание вычислительных экспериментов на сценариях группы ИКП

### 5.1. Общие замечания по процедуре поиска решения на сценариях без бинарных переменных

Метаконфигурация<sup>5</sup> SUH (Suppress Useless Heuristics) процедуры поиска решения сводится к приему подавления подгруппы первичных эвристик низкой эффективности.

<sup>5</sup>Под метаконфигурацией понимается совокупность конфигурации решателя и набора эвристических приемов

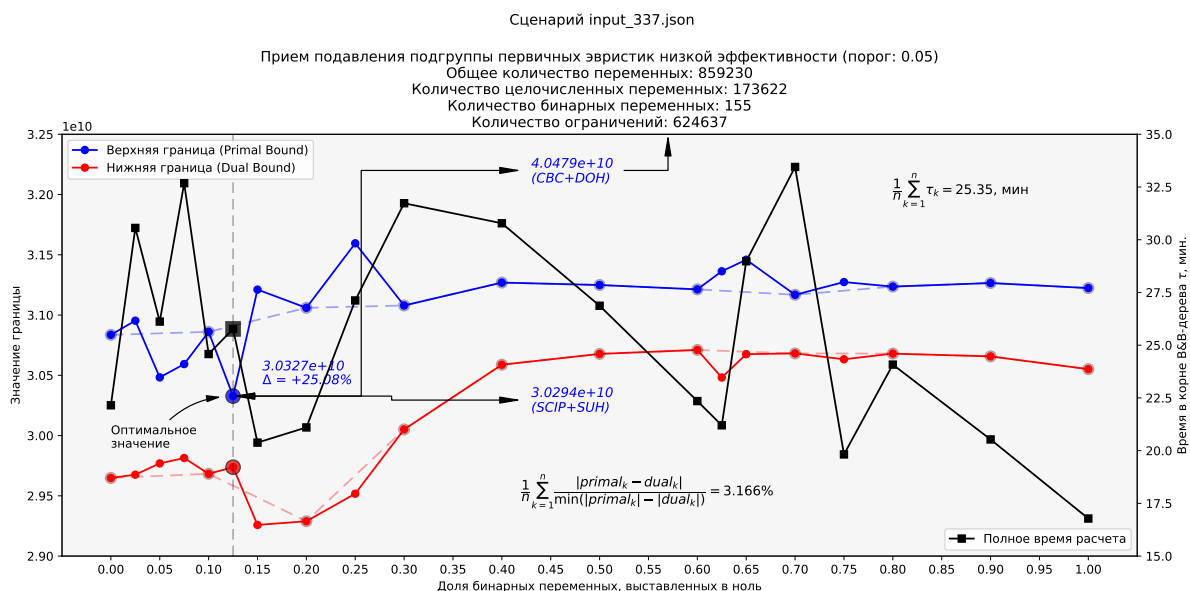


Рис. 2. Зависимость верхней границы решения от доли бинарных переменных, выставленных в ноль. Сценарий 337

#### Замечание

Решение получено без доменно-ориентированных эвристик, «теплого» старта и подбора параметров решателя

Конфигурация решателя SCIP для всех сценариев группы ИКП (без бинарных переменных) имеет вид

scip.set. Сценарии группы ИКП без бинарных переменных

```
# критерии останова и перезапуска
limits/time = 7200
limits/gap = 0.02 # решение останавливается при зазоре <= 2%

# подавление подгруппы первичных эвристик низкой эффективности
heuristics/farkasdiving/freq = -1
heuristics/feaspump/freq = -1
heuristics/randrounding/freq = -1
heuristics/shiftandpropagate/freq = -1
heuristics/shifting/freq = -1
```

Сводка результатов вычислительных экспериментов доступна по ссылке <https://docs.google.com/document/d/1V9fZLT9cXkbVQ5BvMCwzKrAiASZ2v4-01Z68jVBZUBU/edit?usp=sharing>.

#### 5.1.1. Сценарий F398266В без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 774901

Количество целочисленных переменных: 172449

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 650263

lp-файл: [https://disk.yandex.ru/d/o\\_eAb9475u5ueg](https://disk.yandex.ru/d/o_eAb9475u5ueg)

### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFING,
- RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/URRnZ8soTaJEgQ>

Файл статистической сводки доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/N2tfhj1N6RczzA>

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUH приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (OC Linux Centos 7) на 1.063% лучше в смысле целевой функции и на 10.20% – в смысле временных издержек (рис. 3).

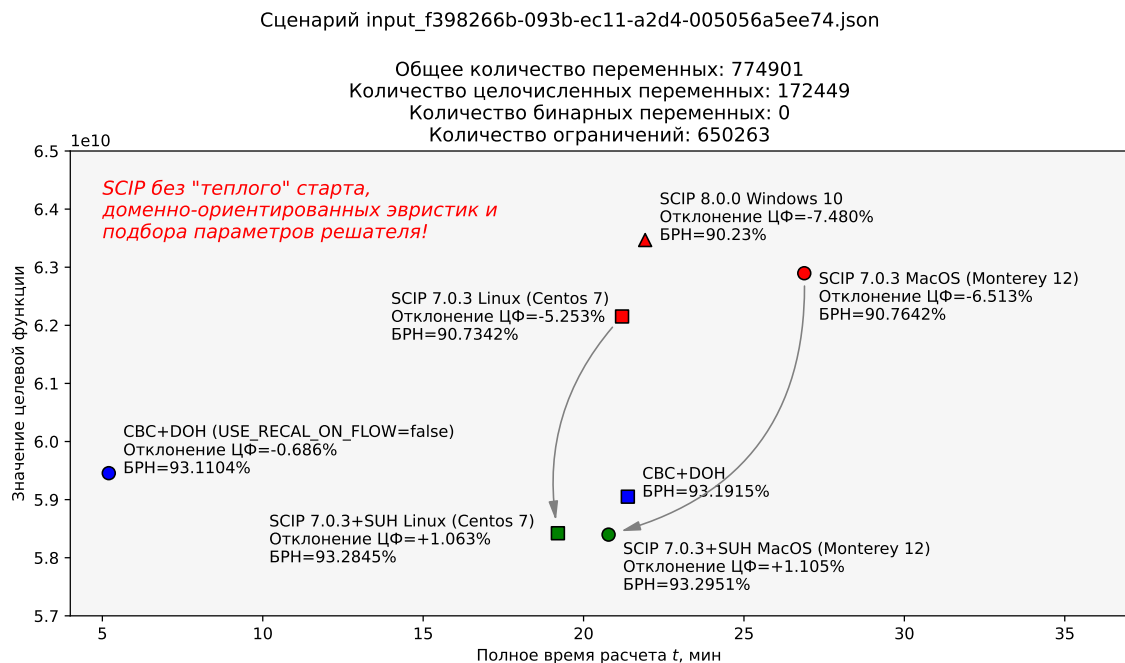


Рис. 3. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUH.  
Сценарий f398266b без бинарных переменных

#### 5.1.2. Сценарий 50197DF7 без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 718464

Количество целочисленных переменных: 159332

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 595797

lp-файл: [https://disk.yandex.ru/d/K0\\_xj9dkgUdcog](https://disk.yandex.ru/d/K0_xj9dkgUdcog)

### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:



- INTSHIFING,
- RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/R4B1fkTx-nE3tg>

Файл статистической сводки доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/BLvUmZ43vtMFKg>

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUN приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (ОС Linux Centos 7) на 1.25% лучше в смысле целевой функции и на 46.43% – в смысле временных издержек (рис. 4).

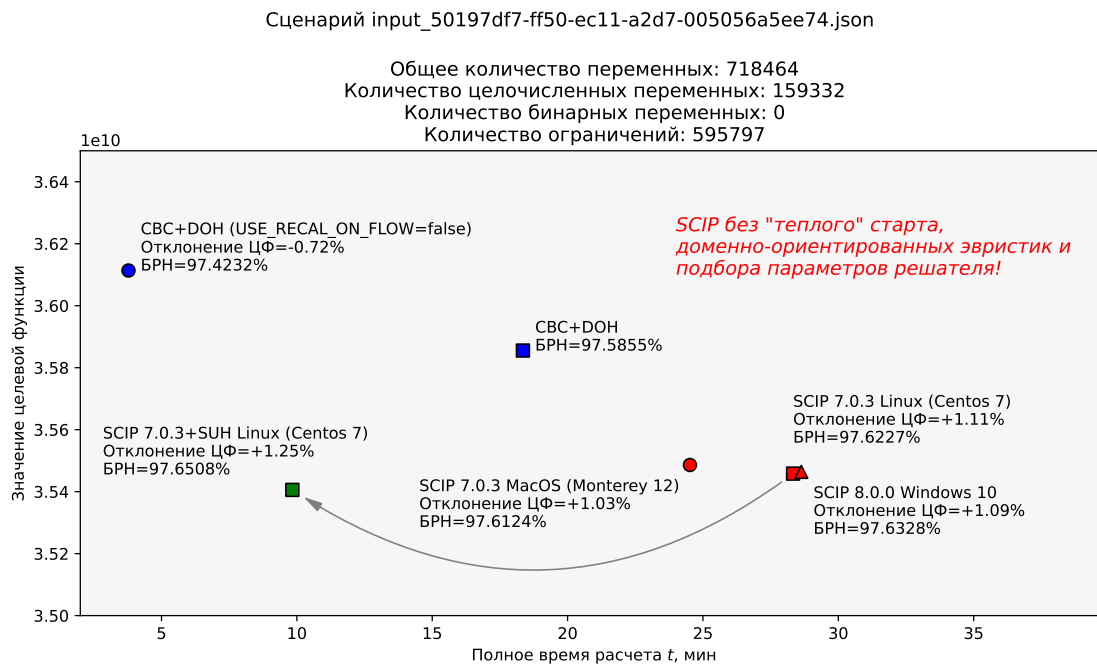


Рис. 4. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUN.  
Сценарий 50197df7 без бинарных переменных

### 5.1.3. Сценарий 7FAC4231 без бинарных переменных

#### Статистика

Общее количество переменных: 737585

Количество целочисленных переменных: 147789

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 540018

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/qiZAmraUNK1Peg>

#### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFING,
- RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке [https://disk.yandex.ru/d/20NeMuQ7NF\\_ccA](https://disk.yandex.ru/d/20NeMuQ7NF_ccA)

Файл статистической сводки доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/QxE0HoREHzgHQQ>

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUN приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (ОС Linux Centos 7) на 5.22% лучше в смысле целевой функции и на 27.10% – в смысле временных издержек (рис. 5).

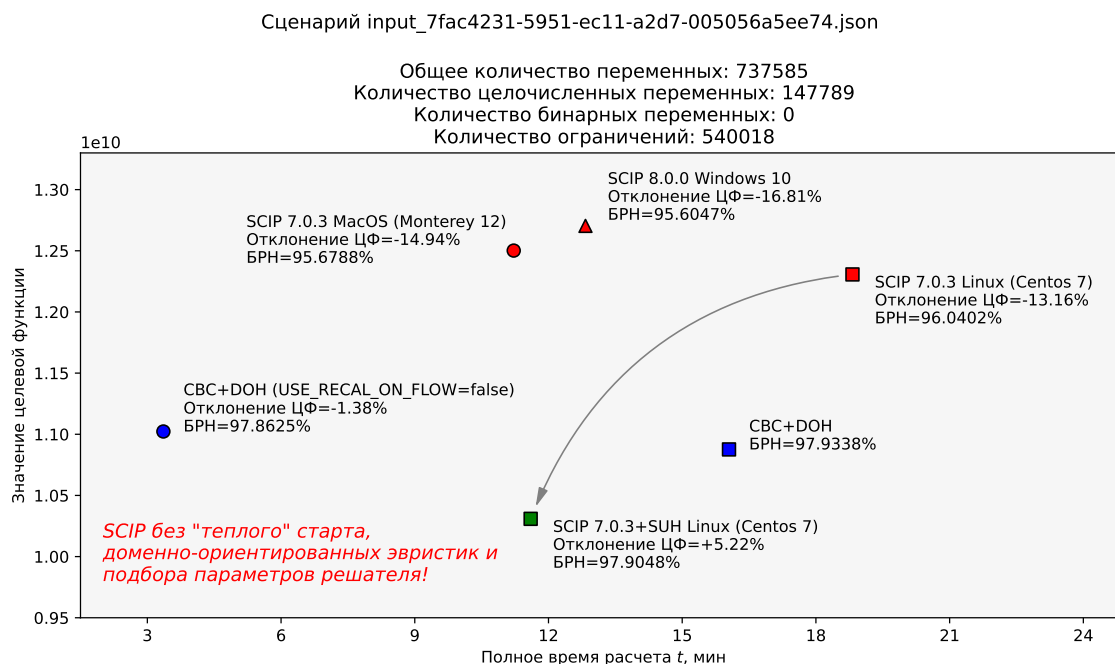


Рис. 5. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUN.  
Сценарий 7fac4231 без бинарных переменных

#### 5.1.4. Сценарий CA485A55 без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 718601

Количество целочисленных переменных: 140858

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 514229

lp-файл: [https://disk.yandex.ru/d/iSP6xrh4K\\_wHEQ](https://disk.yandex.ru/d/iSP6xrh4K_wHEQ)

##### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFING,
- RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке [https://disk.yandex.ru/d/\\_WzkmgoueNb2Bg](https://disk.yandex.ru/d/_WzkmgoueNb2Bg)

Файл статистической сводки доступен по ссылке

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUN приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках

(USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (ОС Linux Centos 7) на 0.683% лучше в смысле целевой функции и на 46.48% – в смысле временных издержек (рис. 6).

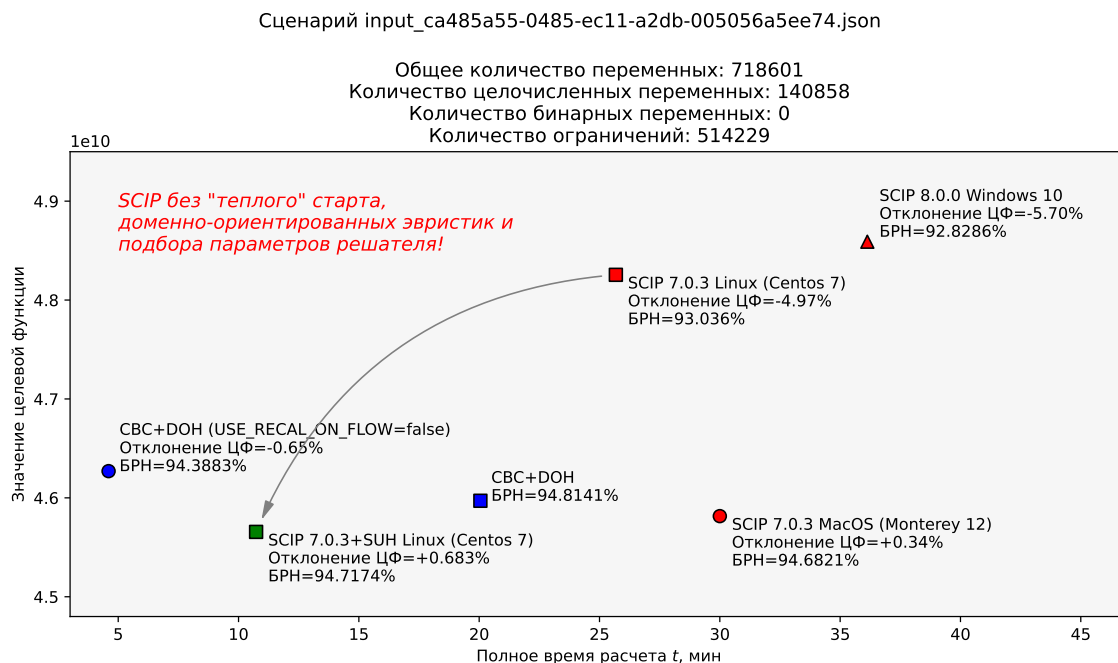


Рис. 6. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUH.  
 Сценарий ca485a55 без бинарных переменных

#### 5.1.5. Сценарий 276 без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 809224

Количество целочисленных переменных: 162562

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 602190

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/QaS5kd7VRZQ66A>

##### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFING,
- RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/M2V88djiiGM5PA>

Файл статистической сводки доступен по ссылке

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUH приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (ОС Linux Centos 7) на 3.67% лучше в смысле целевой функции и на 51.56% – в смысле временных издержек (рис. 7).

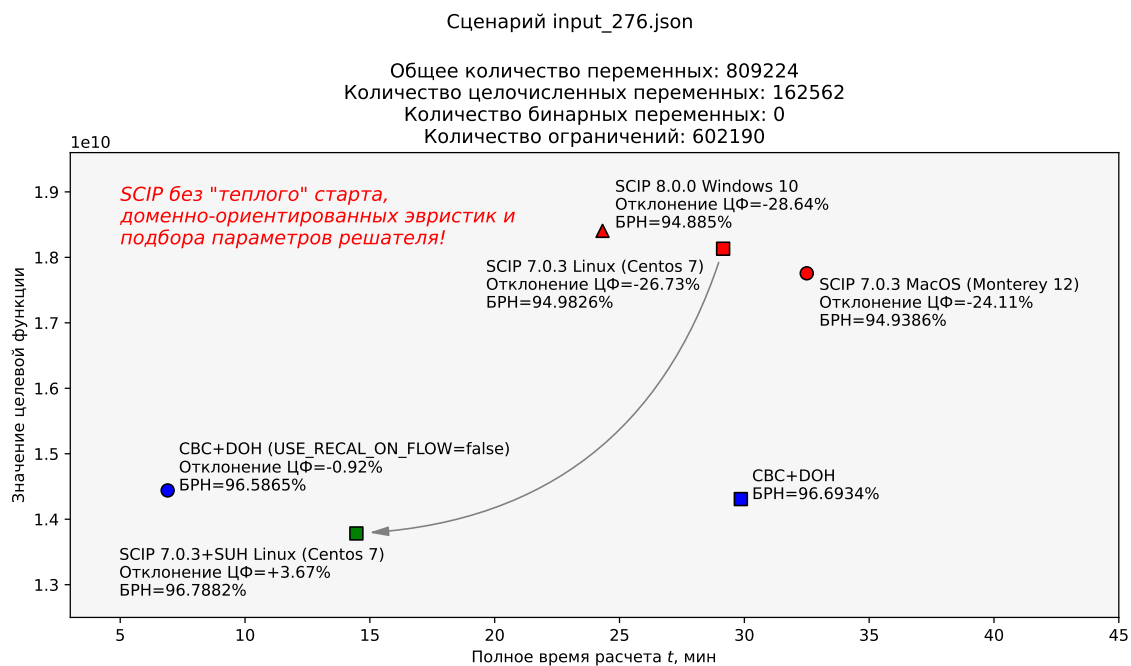


Рис. 7. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUH.  
Сценарий 276 без бинарных переменных

#### 5.1.6. Сценарий 337 без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 859075

Количество целочисленных переменных: 173622

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 624327

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/keyQLAagsD7Sbw>

##### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- o INTSHIFING,
- o RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/ZUIEo3dDq77FjA>

Файл статистической сводки доступен по ссылке

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUH приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (OC Linux Centos 7) на 22.12% лучше в смысле целевой функции и на 18.32% – в смысле временных издержек (рис. 8).

#### 5.1.7. Сценарий 13D686AB без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 786020

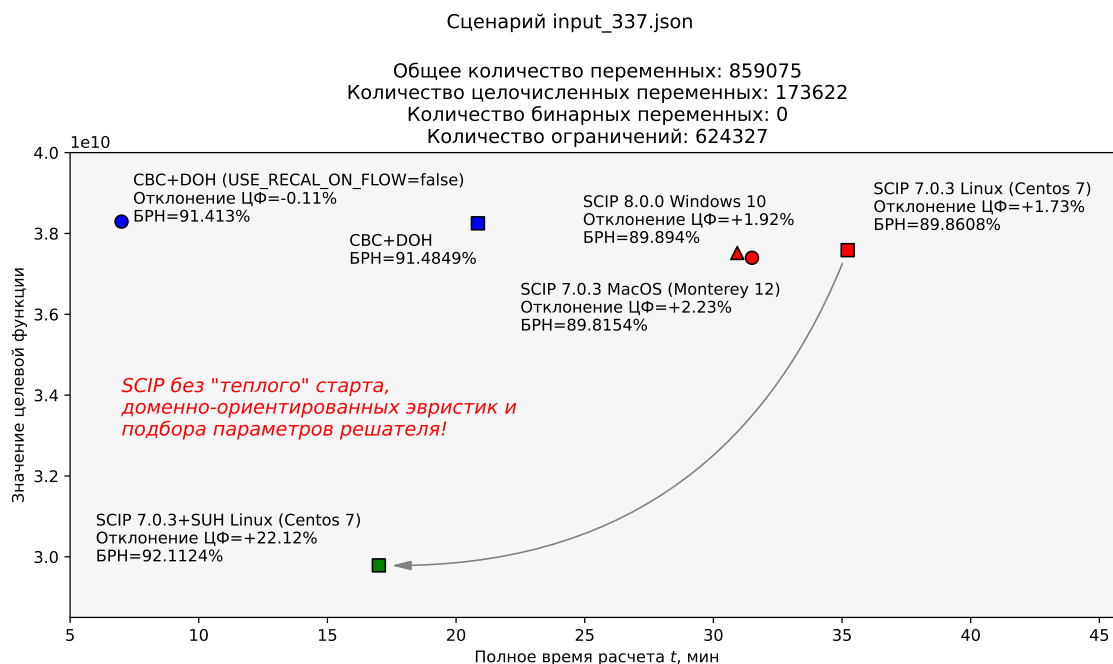


Рис. 8. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUH.  
Сценарий 337 без бинарных переменных

Количество целочисленных переменных: 168857

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 598414

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/3KkYKzNl3PjGdg>

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFING,
- RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/EXylMeX6Ytz4tg>

Файл статистической сводки доступен по ссылке

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUH приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (USE\_RECALCULATION\_ON\_FLOW=true) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (ОС Linux Centos 7) на 9.40% лучше в смысле целевой функции и на 33.03% – в смысле временных издержек (рис. 9).

#### 5.1.8. Сценарий A78CBEAD без бинарных переменных

##### Статистика

Общее количество переменных: 795400

Количество целочисленных переменных: 180160

Количество бинарных переменных: 0

Количество ограничений: 658339

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/vTPPa1H3VFD7tA>

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFING,

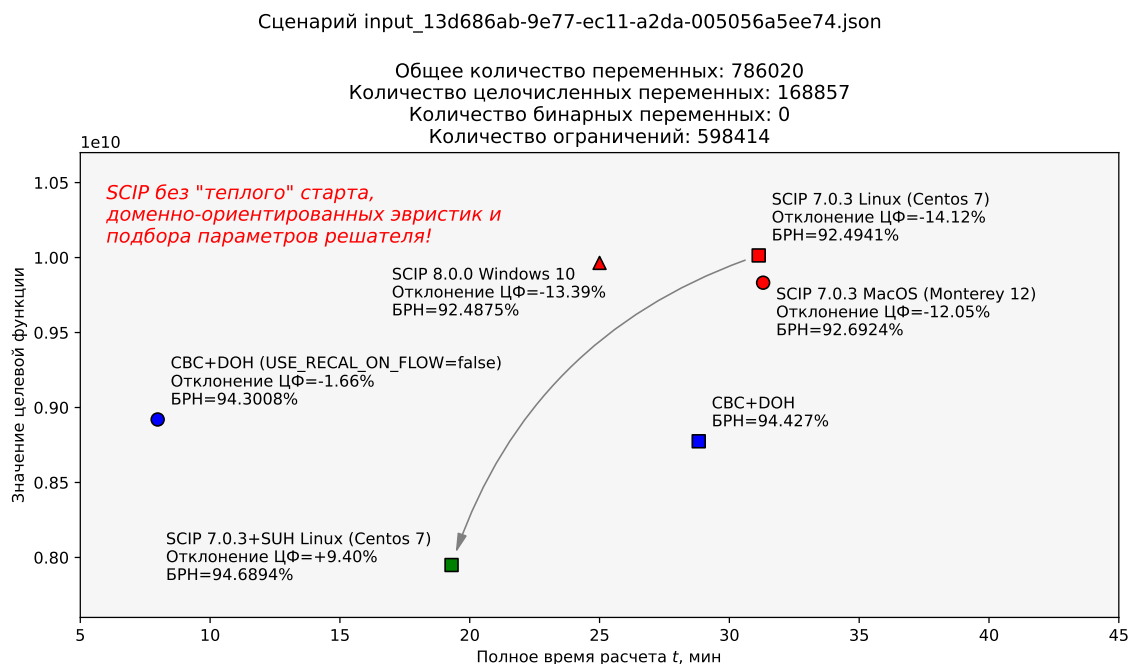


Рис. 9. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUH.  
Сценарий 13d686ab без бинарных переменных

о RENS.

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/fARVcHb66ToHxQ>

Файл статистической сводки доступен по ссылке

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация SUH приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках (`USE_RECALCULATION_ON_FLOW=true`) для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений (ОС Linux Centos 7) на 1.57% лучше в смысле целевой функции и на 23.30% – в смысле временных издержек (рис. 10).

## 5.2. Общие замечания по процедуре поиска решения на сценариях с бинарными переменными

На ранних стадиях изучения проблемы высокоразмерных сценариев с бинарными переменными, поиск решения осуществлялся в семь шагов:

1. Подавить подгруппу первичных эвристик низкой эффективности (см. раздел 4.2),
2. При разрешении конфликтов и ветвлении<sup>6</sup> отдавать предпочтение бинарным переменным,
3. Найти релаксированное решение задачи,
4. Подобрать порог бинаризации на релаксированном решении для бинарных переменных (см. раздел 4.3),
5. Зафиксировать нулевые 0-bin и единичные 1-bin бинарные переменные; подать фиксацию решателю,
6. В решении, найденном на предыдущей итерации, зафиксировать нулевые целочисленные 0-int и единичные бинарные 1-bin переменные; полученную фиксацию подать на вход решателю,

<sup>6</sup>К сожалению, на сценариях группы ИКП с бинарными переменными решателю SCIP не удастся найти решение в корне дерева

Сценарий input\_a78cbead-073b-ec11-a2d4-005056a5ee74.json

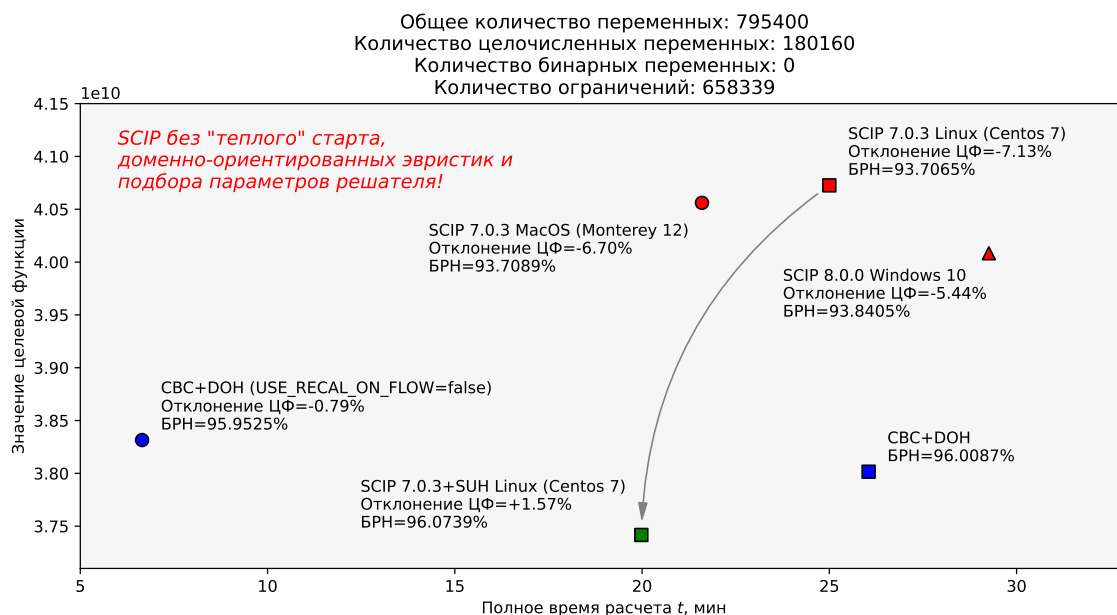


Рис. 10. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации SUH.  
Сценарий a78cbead без бинарных переменных

7. В решении, полученном на предыдущей итерации, зафиксировать *нулевые бинарные 0-bin* и *целочисленные 0-int переменные*; фиксацию подать на вход решателю.

Процедура поиска оказалась чувствительной к параметру `autorestartnodes`. Графическая интерпретация результатов вычислительных экспериментов с разверткой процедуры поиска верхней границы решения во времени приведена на рис. 11, 12, 13 и 14.

Позже описанную процедуру удалось упростить и свести к следующей *метаконфигурации* FZBIVSUHPB (Fixed Zero Binary and Integer Variables, Suppress Useless Heuristics, Prefer Binary):

1. Подавить подгруппу первичных эвристик низкой эффективности,
2. При разрешении конфликтов и ветвлении отдавать предпочтение *бинарным* переменным,
3. Зафиксировать *нулевые бинарные 0-bin* и *нулевые целочисленные 0-int переменные* в релаксированном решении (см. раздел 4.1).

Конфигурация решателя SCIP для всех сценариев группы ИКП (с бинарными переменными) имеет вид

scip.set. Сценарии группы ИКП с бинарными переменными

```
# критерии останова и перезапуска
limits/time = 7200
limits/autorestartnodes = -1
limits/gap = 0.02 # решение останавливается при зазоре <= 2%

# управление стратегиями анализа конфликтов и ветвления
conflict/preferbinary = True
branching/preferbinary = True

# подавление подгруппы первичных эвристик низкой эффективности
heuristics/farkasdiving/freq = -1
heuristics/feaspump/freq = -1
heuristics/randrounding/freq = -1
heuristics/shiftandpropagate/freq = -1
```

Все эксперименты проводились на виртуальной машине Linux (Centos 7) Intel Core™ i7 (8 CPUs), 3.6GHz, RAM 16Gb.

Сводка результатов вычислительных экспериментов доступна по ссылке <https://docs.google.com/document/d/1V9fZLT9cXkbVQ5BvMCwzKrAiASZ2v4-01Z68jVBZUBU/edit?usp=sharing>.

Кодовая база решения доступна по ссылке [https://gitdp.zyfra.com/ds\\_and\\_math\\_users/ml-dl-in-operations-reaseearches.git](https://gitdp.zyfra.com/ds_and_math_users/ml-dl-in-operations-reaseearches.git)

### 5.2.1. Сценарий A78CBEAD с бинарными переменными

#### Статистика

Общее количество переменных: 797818

Количество целочисленных переменных: 180160

Количество бинарных переменных: 2418

Количество ограничений: 663175

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/JbT3KR5Yi1ZomQ>

#### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- DISTRIBUTIOINDIVING,
- ONEOPT,
- GINS.

Фрагмент лога сессии SCIP

```
...
time | node | left | LP iter|LP it/n|mem/heur|mdpt |vars |cons |rows |cuts |sepa|confs|strbr|
dualbound | primalbound | gap | compl.
d1790s| 1881 | 1668 | 1010k| 296.9 |distrib| 93 | 50k| 43k| 43k| 0 | 1 | 385 |3585 |
3.757279e+10 | 3.894342e+10 | 3.65%| 7.70%
d1790s| 1881 | 1668 | 1010k| 296.9 |distrib| 93 | 50k| 43k| 43k| 0 | 1 | 385 |3585 |
3.757279e+10 | 3.894341e+10 | 3.65%| 7.70%
i1792s| 1882 | 1667 | 1011k| 297.0 | oneopt| 93 | 50k| 43k| 43k|8612 | 0 | 385 |3585 |
3.757279e+10 | 3.893993e+10 | 3.64%| 7.70%
1796s| 1900 | 1687 | 1016k| 297.0 | 3669M | 93 | 50k| 43k| 43k|8644 | 1 | 387 |3585 |
3.757279e+10 | 3.893993e+10 | 3.64%| 2.82%
L1902s| 1982 | 1769 | 1090k| 313.4 | gins| 93 | 50k| 43k| 43k|8935 | 1 | 398 |3590 |
3.757279e+10 | 3.875897e+10 | 3.16%| 2.83%
L1912s| 1982 | 1769 | 1090k| 313.4 | gins| 93 | 50k| 43k| 43k|8935 | 1 | 398 |3590 |
3.757279e+10 | 3.864257e+10 | 2.85%| 2.83%
i1920s| 1982 | 1769 | 1099k| 316.2 | oneopt| 93 | 50k| 43k| 43k|8935 | 1 | 398 |3590 |
3.757279e+10 | 3.864241e+10 | 2.85%| 2.83%
1954s| 2000 | 1787 | 1133k| 325.5 | 3731M | 93 | 50k| 43k| 43k|9004 | 1 | 398 |3591 |
3.757279e+10 | 3.864241e+10 | 2.85%| 2.83%
```

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/6FPE-S5VupA6iw>

Файл статистической сводки доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/9G-v54ywEK1TJA>

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений на 2.46% лучше в смысле целевой функции и на 19.64% – в смысле временных издержек (табл. 1).



В табл. 1 через SCIP+MC (a) обозначается решение, построенное на метаконфигурации SCIP, отвечающее *первому* допустимому целочисленному решению, верхняя граница которого не превышает верхнюю границу решения на доменно-ориентированных эвристиках, а через SCIP+MC (b) – решение, отвечающее *последнему* допустимому целочисленному решению в наборе полученных.

Синим цветом обозначен выигрыш в процентах.

Таблица 1. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации FZBIVSUHPB. Сценарий a78cbead с бинарными переменными

Способ	Полное время рас- чета, мин	Верхняя граница решения, $\times 10^{10}$
CBC+DON	39.82	3.961502
SCIP+MC (a)	29.83 +25.09%	3.894342 +1.70%
SCIP+MC (b)	32.00 +19.64%	3.864241 +2.46%

### 5.2.2. Сценарий 7FAC4231 с бинарными переменными

#### Статистика

Общее количество переменных: 740251

Количество целочисленных переменных: 147789

Количество бинарных переменных: 2666

Количество ограничений: 545350

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/3NbbjflW5zhejQ>

#### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFTING,
- ONEOPT,
- GINS,
- CROSSOVER,
- ALNS.

Фрагмент лога сессии SCIP

```
...
time | node | left | LP iter|LP it/n|mem/heur|mdpt |vars |cons |rows |cuts |sepa|confs|strbr|
dualbound | primalbound | gap | compl.
r 454s| 372 | 341 | 91171 | 102.3 | intshift| 309 | 41k| 33k| 34k|2788 | 5 | 57 |3711 |
1.053077e+10 | 1.309195e+10 | 24.32%| 0.78%
i 454s| 373 | 340 | 91171 | 102.0 | oneopt| 309 | 41k| 33k| 34k|2788 | 0 | 57 |3711 |
1.053077e+10 | 1.308634e+10 | 24.27%| 0.78%
463s| 400 | 369 | 93623 | 101.3 | 2493M | 309 | 41k| 33k| 34k|2950 | 1 | 57 |3761 |
1.053077e+10 | 1.308634e+10 | 24.27%| 0.29%
L 507s| 473 | 442 |106991 | 113.9 | gins| 309 | 41k| 33k| 34k|3084 | 1 | 57 |3813 |
1.053077e+10 | 1.297515e+10 | 23.21%| 0.29%
L 512s| 473 | 442 |106991 | 113.9 | gins| 309 | 41k| 33k| 34k|3084 | 1 | 57 |3813 |
1.053077e+10 | 1.292548e+10 | 22.74%| 0.29%
L 522s| 473 | 442 |106991 | 113.9 | gins| 309 | 41k| 33k| 34k|3084 | 1 | 57 |3813 |
1.053077e+10 | 1.289283e+10 | 22.43%| 0.29%
L 525s| 473 | 442 |106991 | 113.9 | gins| 309 | 41k| 33k| 34k|3084 | 1 | 57 |3813 |
1.053077e+10 | 1.286340e+10 | 22.15%| 0.29%
```

i 529s	473	442  112279	125.1	oneopt	309	41k	33k	34k 3084	1	57  3813
	1.053077e+10	1.285668e+10	22.09%	0.29%						
r 531s	474	443  120630	142.5	intshift	309	41k	33k	34k 3084	1	58  3813
	1.053077e+10	1.197786e+10	13.74%	0.29%						
i 532s	474	373  124926	151.6	oneopt	309	41k	33k	34k 3084	1	58  3813
	1.053077e+10	1.197230e+10	13.69%	0.29%						
536s	500	399  126496	146.9	2579M	309	41k	33k	34k 3181	1	58  3822
	1.053077e+10	1.197230e+10	13.69%	0.29%						
567s	600	499  158520	175.8	2613M	309	41k	33k	34k 3641	1	60  3933
	1.053095e+10	1.197230e+10	13.69%	0.29%						
L 739s	659	554  189783	207.6	gins	309	41k	33k	34k 4060	1	62  3978
	1.053095e+10	1.191898e+10	13.18%	0.29%						
i 741s	660	555  198453	220.4	oneopt	309	41k	33k	34k 4060	1	62  3981
	1.053095e+10	1.191889e+10	13.18%	0.30%						
794s	700	595  236166	261.7	2689M	309	41k	33k	34k 4418	1	62  4010
	1.053095e+10	1.191889e+10	13.18%	0.32%						
836s	800	695  277232	280.4	2728M	309	41k	33k	34k 4757	1	64  4027
	1.053219e+10	1.191889e+10	13.17%	0.32%						
L 967s	860	693  295017	281.5	crossove	309	41k	33k	34k 5000	1	64  4059
	1.053219e+10	1.154287e+10	9.60%	0.32%						
i 968s	860	693  300734	288.1	oneopt	309	41k	33k	34k 5000	1	64  4059
	1.053219e+10	1.154284e+10	9.60%	0.32%						
990s	900	733  312921	288.9	2793M	309	41k	33k	34k 5288	1	64  4139
	1.053219e+10	1.154284e+10	9.60%	0.33%						
1042s	1000	823  346085	293.2	2816M	309	41k	33k	34k 5725	1	65  4281
	1.053219e+10	1.154284e+10	9.60%	0.33%						
L1083s	1003	826  347173	293.4	alns	309	41k	33k	34k 5747	2	65  4284
	1.053219e+10	1.153273e+10	9.50%	0.33%						
i1084s	1004	827  352908	298.8	oneopt	309	41k	33k	34k 5747	1	65  4284
	1.053219e+10	1.118743e+10	6.22%	0.33%						
1113s	1100	699  373504	291.4	2860M	309	41k	33k	34k 6055	3	65  4323
	1.053219e+10	1.118743e+10	6.22%	0.44%						
1140s	1	0  419115	-	3039M	0	41k	34k	34k  0   0	65  4323	
	1.053219e+10	1.118743e+10	6.22%	unknown						

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/TmA6hqFV87eGTg>

Файл статистической сводки доступен по ссылке [https://disk.yandex.ru/d/CsGV\\_oal40Tx0Q](https://disk.yandex.ru/d/CsGV_oal40Tx0Q)

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений на 3.38% лучше в смысле целевой функции и на 33.07% – в смысле временных издержек (табл. 2).

В табл. 2 через SCIP+MC (a) обозначается решение, построенное на метаконфигурации SCIP, отвечающее *первому* допустимому целочисленному решению, верхняя граница которого не превышает верхнюю границу решения на доменно-ориентированных эвристиках, а через SCIP+MC (b) – решение, отвечающее *последнему* допустимому целочисленному решению в наборе полученных.

Синим цветом обозначен выигрыш в процентах.

### 5.2.3. Сценарий 50197DF7 с бинарными переменными

#### Статистика

Общее количество переменных: 720954

Количество целочисленных переменных: 159332

Количество бинарных переменных: 2490

Таблица 2. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации FZBIVSUHPB. Сценарий 7fac4231 с бинарными переменными

Способ	Полное время рас- чета, мин		Верхняя граница решения, $\times 10^{10}$	
CBC+DOH	27.00		1.157865	
SCIP+MC (a)	18.05	+33.15%	1.153273	+0.40%
SCIP+MC (b)	18.07	+33.07%	1.118743	+3.38%

Количество ограничений: 600777

lp-файл: <https://disk.yandex.ru/d/qWeSKb2WEs6kQA>

### Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- INTSHIFTING,
- ONEOPT,
- GINS.

Фрагмент лога сессии SCIP

...														
time	node	left	LP iter	LP it/n	mem/heur	mdpt	vars	cons	rows	cuts	sepa	confs	strbr	
dualbound			primalbound			gap		compl.						
r 836s	963	948	155676	53.5	intshift	409	41k	34k	35k	4367	1	69	7354	
3.554610e+10			3.676991e+10			3.44%		unknown						
i 836s	964	947	155676	53.5	oneopt	409	41k	34k	35k	4367	0	69	7354	
3.554610e+10			3.676497e+10			3.43%		unknown						
846s	1000	985	157559	53.4	2577M	409	41k	34k	35k	4396	1	69	7444	
3.554610e+10			3.676497e+10			3.43%		unknown						
L 885s	1064	1049	157869	50.5	gins	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7484	
3.554610e+10			3.659894e+10			2.96%		unknown						
L 931s	1064	1049	157869	50.5	gins	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7484	
3.554610e+10			3.656967e+10			2.88%		unknown						
i 962s	1064	1049	161589	54.0	oneopt	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7484	
3.554610e+10			3.656967e+10			2.88%		unknown						
969s	1100	1085	161769	52.4	2620M	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7532	
3.554610e+10			3.656967e+10			2.88%		unknown						
L 988s	1164	1149	161992	49.7	gins	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7557	
3.554610e+10			3.630031e+10			2.12%		unknown						
L 993s	1164	1149	161992	49.7	gins	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7557	
3.554610e+10			3.625804e+10			2.00%		unknown						
L1000s	1164	1149	161992	49.7	gins	409	41k	34k	35k	4397	1	69	7557	
3.554610e+10			3.623675e+10			1.94%		unknown						

Файл решения задачи доступен по ссылке [https://disk.yandex.ru/d/2\\_FDqS70qOUBqA](https://disk.yandex.ru/d/2_FDqS70qOUBqA)

Файл статистической сводки доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/SkRLorYzQDI-Aw>

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений на 2.87% лучше в смысле целевой функции и на 36.08% – в смысле временных издержек (табл. 3).

В табл. 3 через SCIP+MC (a) обозначается решение, построенное на метаконфигурации SCIP, отвечающее *первому* допустимому целочисленному решению, верхняя граница которого не пре-

вышает верхнюю границу решения на доменно-ориентированных эвристиках, а через SCIP+MC (*b*) – решение, отвечающее *последнему* допустимому целочисленному решению в наборе полученных. Синим цветом обозначен выигрыш в процентах.

Таблица 3. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации FZBIVSUNPB. Сценарий 50197df7 с бинарными переменными

Способ	Полное время рас- чета, мин	Верхняя граница решения, $\times 10^{10}$
CBC+DOH	28.27	3.730552
SCIP+MC (a)	13.93 +50.73%	3.676991 +1.44%
SCIP+MC (b)	18.07 +36.08%	3.623675 +2.87%

#### 5.2.4. Сценарий F398266В с бинарными переменными

## Статистика

Общее количество переменных: 777271

Количество целочисленных переменных: 172449

Количество бинарных переменных: 2370

Количество ограничений: 655003

Ир-файл: <https://disk.yandex.ru/d/4YFYJSB1I1wsmQ>

## Анализ решения

Пул решений задачи был найден с помощью следующих первичных эвристик:

- DISTRIBUTION DIVING,
- ONEOPT,
- CROSSOVER.

### Фрагмент лога сессии SCIP

time	node	left	LP iter	LP it/n	mem/heur	mdpt	vars	cons	rows	cuts	sepa	confs	strbr
dualbound		primalbound		gap		compl.							
d1163s	433	434	462507	790.8	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054807e+10		3.36%	unknown								
d1164s	433	434	462644	791.1	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054779e+10		3.36%	unknown								
d1164s	433	434	462746	791.3	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054778e+10		3.36%	unknown								
d1164s	433	434	462780	791.4	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054776e+10		3.36%	unknown								
d1164s	433	434	462801	791.4	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054776e+10		3.36%	unknown								
d1165s	433	434	462836	791.5	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054776e+10		3.36%	unknown								
d1165s	433	434	462856	791.6	distribu	51	59k	48k	49k	0	1	17	1387
5.857793e+10		6.054774e+10		3.36%	unknown								
i1167s	434	433	463020	790.1	oneopt	51	59k	48k	49k	4333	0	17	1387
5.857793e+10		6.053918e+10		3.35%	unknown								
1250s	500	501	531180	822.2	3321M	51	59k	48k	49k	4529	1	26	1402
5.857793e+10		6.053918e+10		3.35%	unknown								
1579s	600	601	663342	905.6	3398M	51	59k	48k	49k	5175	1	36	1426
5.857932e+10		6.053918e+10		3.35%	unknown								

L1892s	634	635  704819	922.5	crossove	55	59k	48k	49k 5448	2	41  1433
	5.858028e+10	6.021605e+10	2.79%	unknown						
i1895s	634	635  715376	939.1	oneopt	55	59k	48k	49k 5448	2	41  1433
	5.858028e+10	6.021603e+10	2.79%	unknown						
1952s	700	701  770566	929.4	3457M	63	59k	48k	49k 5644	1	50  1442
	5.858050e+10	6.021603e+10	2.79%	unknown						
2095s	800	801  879949	950.0	3489M	65	59k	48k	49k 5964	1	62  1476
	5.858065e+10	6.021603e+10	2.79%	unknown						

Файл решения задачи доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/KXzdrUx6TZbXEw>

Файл статистической сводки доступен по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/FEroaFsr5zbkja>

**Вывод по сценарию:** описанная выше метаконфигурация приводит к решению задачи, которое оказывается по отношению к результату на доменно-ориентированных эвристиках для последнего решения из пула допустимых целочисленных решений на 0.97% лучше в смысле целевой функции и на 56.24% – в смысле временных издержек (табл. 4).

В табл. 4 через SCIP+MC (a) обозначается решение, построенное на метаконфигурации SCIP, отвечающее *первому* допустимому целочисленному решению, верхняя граница которого не превышает верхнюю границу решения на доменно-ориентированных эвристиках, а через SCIP+MC (b) – решение, отвечающее *последнему* допустимому целочисленному решению в наборе полученных.

Синим цветом обозначен выигрыш в процентах.

Таблица 4. Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации FZBIVSUNPB. Сценарий f398266b с бинарными переменными

Способ	Полное время рас- чета, мин	Верхняя граница решения, $\times 10^{10}$
CBC+DOH	72.17	6.080841
SCIP+MC (a)	19.38 +73.15%	6.054807 +0.43%
SCIP+MC (b)	31.58 +56.24%	6.021603 +0.97%

Сценарий input\_a78sbead-073b-ec11-a2d4-005056a5ee74.json (1-ая и 2-ая фазы поиска решения)

Порог бинаризации: 0.14, релаксированное решение: SORT

Общее количество переменных: 797818

Количество целочисленных переменных: 180160

Количество бинарных переменных: 2418

Количество ограничений: 663175

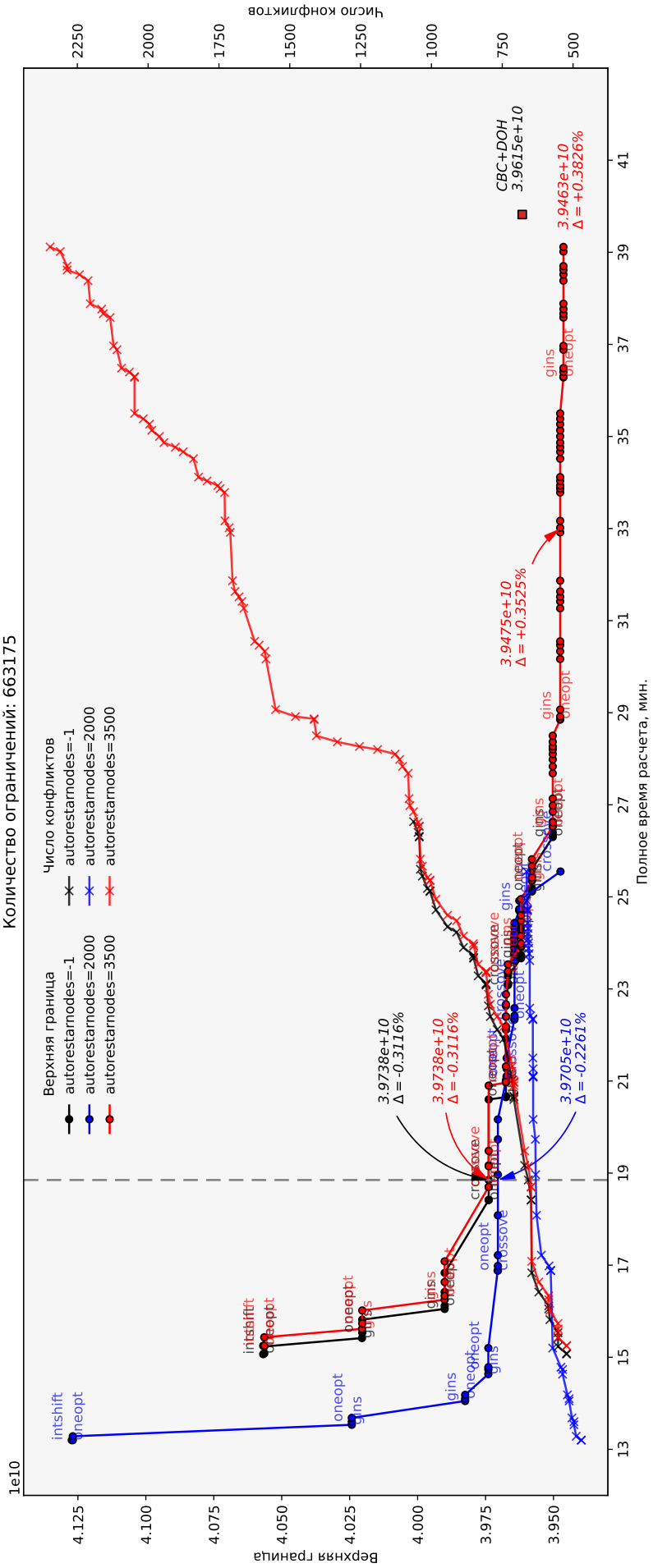


Рис. 11. Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра autorestartnodes. Сценарий input\_a78sbead. Первая и вторая фазы поиска решения

[illegible]

Рис. 12. Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра `autorestartnodes`. Сценарий `a78cbead`. Третья фаза поиска решения

**Верхняя граница**

- CBC+DOH  $3.7306e+10$

**Число ограничений: 600777**

**log(число конфликтов)**

**Полное время расчета, мин.**

**Верхняя граница**

**Число рестартов:**

- autorestartnodes=-1
- + autorestartnodes=700
- x autorestartnodes=1000
- x autorestartnodes=1200

**Алгоритмы:**

- oneopt
- gins
- rins
- crosssolve
- distribu
- vecblend

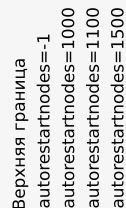
**Результаты для различных алгоритмов и параметров:**

- $3.6041e+10$ ,  $\Delta = +3.389\%$
- $3.5943e+10$ ,  $\Delta = +3.652\%$
- $3.5872e+10$ ,  $\Delta = +3.844\%$
- $3.5787e+10$ ,  $\Delta = +4.071\%$

Рис. 13. Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра `autorestartnodes`. Сценарий 50197df7. Третья фаза поиска решения



Количество ограничений: 545350



Стр. 25 из 28

## 6. Описание вычислительных экспериментов на сценариях группы МВО

## 7. Описание вычислительных экспериментов на сценариях MIPLIB 2017

### 7.1. Сценарии со статусом «open»

#### 7.1.1. Сценарий DLR2

<https://miplib.zib.de/WebData/instances/dlr2.mps.gz>

#### 7.1.2. Сценарий CVRPA-N64K9VRPI

<https://miplib.zib.de/WebData/instances/cvrpa-n64k9vrpi.mps.gz>

### 7.2. Сценарии со статусом «hard»

#### 7.2.1. Сценарий CRYPTANALYSISKB128N5OBJ14

<https://miplib.zib.de/WebData/instances/cryptanalysiskb128n5obj14.mps.gz>

### 7.3. Сценарии со статусом «easy»

#### 7.3.1. Сценарий NEOS-4332801-seret

<https://miplib.zib.de/WebData/instances/neos-4332801-seret.mps.gz>

## Список иллюстраций

1	Зависимость верхней границы решения от доли бинарных переменных, выставленных в ноль. Сценарий <code>a78cbead</code> . . . . .	6
2	Зависимость верхней границы решения от доли бинарных переменных, выставленных в ноль. Сценарий <code>337</code> . . . . .	7
3	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>f398266b</code> без бинарных переменных . . . . .	8
4	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>50197df7</code> без бинарных переменных . . . . .	9
5	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>7fac4231</code> без бинарных переменных . . . . .	10
6	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>ca485a55</code> без бинарных переменных . . . . .	11
7	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>276</code> без бинарных переменных . . . . .	12
8	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>337</code> без бинарных переменных . . . . .	13
9	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>13d686ab</code> без бинарных переменных . . . . .	14
10	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>SUN</code> . Сценарий <code>a78cbead</code> без бинарных переменных . . . . .	15
11	Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра <code>autorestartnodes</code> . Сценарий <code>input_a78cbead</code> . Первая и вторая фазы поиска решения . . . . .	22
12	Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра <code>autorestartnodes</code> . Сценарий <code>a78cbead</code> . Третья фаза поиска решения . . . . .	23
13	Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра <code>autorestartnodes</code> . Сценарий <code>50197df7</code> . Третья фаза поиска решения . . . . .	24
14	Динамика изменения верхней границы решения и числа конфликтов во времени в зависимости от значения параметра <code>autorestartnodes</code> . Сценарий <code>7fac4231</code> . Третья фаза поиска решения . . . . .	25

## Список таблиц

1	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>FZBIVSUNPB</code> . Сценарий <code>a78cbead</code> с бинарными переменными . . . . .	17
2	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>FZBIVSUNPB</code> . Сценарий <code>7fac4231</code> с бинарными переменными . . . . .	19
3	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>FZBIVSUNPB</code> . Сценарий <code>50197df7</code> с бинарными переменными . . . . .	20
4	Сводка результатов анализа эффективности метаконфигурации <code>FZBIVSUNPB</code> . Сценарий <code>f398266b</code> с бинарными переменными . . . . .	21

## Список литературы

1. *Иванов* Конспект по обучению с подкреплением, 2022