

Автоматическое обнаружение гонок при параллельной сборке с использованием утилиты Make

Студент: Артем Климов

Научный руководитель: Дмитрий Мельник

Научные консультанты: Владислав Иванишин, Александр Монаков

X июня 2024 г.



- **Введение.** Состояния гонок в Makefile. Примеры и формулировка проблемы.
- **Обзор существующих решений.**
- **Теоретический метод** автоматического обнаружения состояний гонок.
- **Реализация** метода в виде сантизатора для Make.
- **Оценка** сантизатора на реальных проектах, **сравнение** с существующими решениями. **Заключение.**

Введение

Состояние гонки — ситуация, когда несколько потоков работают с одним и тем же ресурсом одновременно, и результат выполнения программы зависит от порядка выполнения потоков.

- Одновременное чтение и запись по одному и тому же адресу;
- Создание каталога и одновременная работа с его содержимым;
- Удаление ресурса без ожидания окончания его использования.

Введение: Состояния гонок

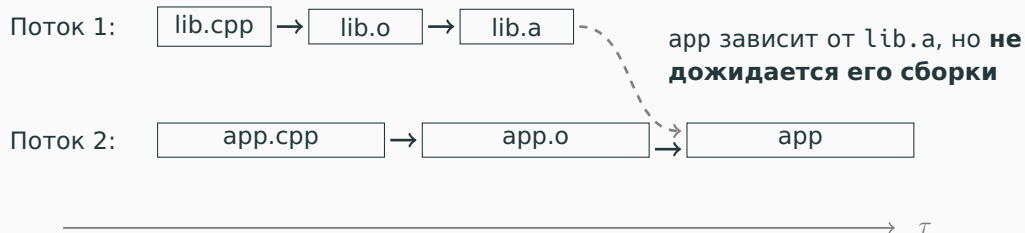
Пример: Два потока пытаются увеличить переменную counter, если она меньше 1.

```
1  std::atomic<int> counter = 0;
2
3  void thread1() {
4      if (counter < 1)
5          counter++;
6  }
7
8  void thread2() {
9      if (counter < 1)
10         counter++;
11 }
```

С неудачным планированием переменная может быть увеличена дважды, и окончательное значение будет равно 2.

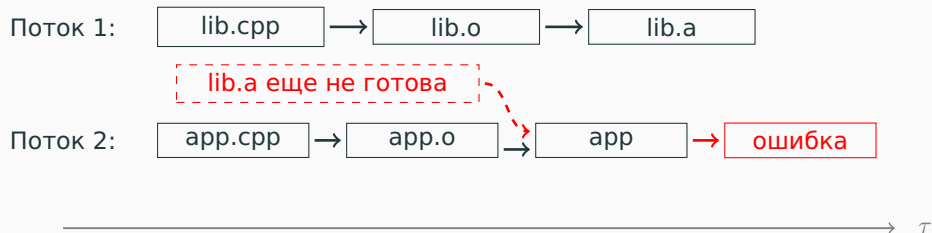
Введение: Состояния гонки в схемах сборки

- Цели сборки могут собираться параллельно;
- При отсутствии необходимой синхронизации могут возникать гонки.



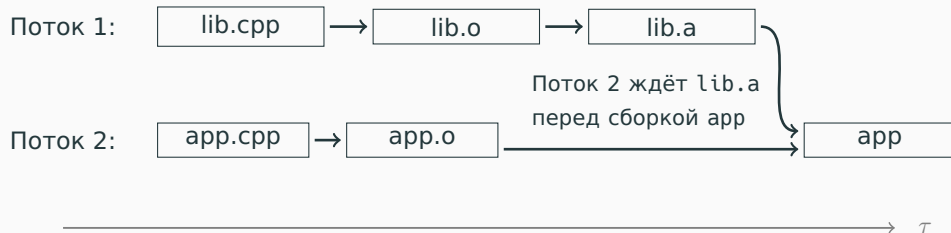
Введение: Состояния гонки в схемах сборки

- Если сборка библиотеки затянется, произойдет ошибка:



Введение: Состояния гонки в схемах сборки

- **Решение:** Определить пропущенную зависимость и добавить ее в схему сборки.



Введение: Состояния гонок в реальных проектах

Ошибки сборки, связанные с состояниями гонок, часто становятся предметом обсуждения на форумах:

Bug 351559 (parallel-make) - [TRACKER] packages failing to use parallel make

Status: CONFIRMED

Reported: 2011-01-13 13:58 UTC by Dane Smith (RETIRED)

Alias: parallel-make

Product: Quality Assurance

Depends on: [259117](#) [295724](#) [299224](#) [312407](#) [343617](#) [410065](#) [413581](#) [458968](#) [483948](#) [493950](#) [494244](#) [500574](#) [500752](#) [509498](#) [514092](#) [554464](#) [654130](#) [687924](#) [752042](#) [754321](#) [775107](#) [798657](#) [837875](#) [843458](#) [870196](#) [879547](#) [879847](#) [880057](#) [880151](#) [880159](#) [880169](#) [880189](#) [880319](#) [880321](#) [880323](#) [880327](#) [880367](#) [880371](#) [880599](#) [880621](#) [880921](#) [881009](#) [881033](#) [883045](#) [889569](#) [895704](#) [911843](#) [913354](#) [914429](#) [915679](#) [919576](#) [921613](#) [922896](#) [924672](#) [926513](#) [246863](#) [259033](#) [265188](#) [266739](#) [326493](#) [333049](#) [351592](#) [352119](#) [359123](#) [373473](#) [380373](#) [403023](#) [427844](#) [434018](#) [405032](#) [481338](#) [430380](#) [434030](#) [300378](#) [301378](#) [303702](#) [374282](#) [373700](#)

Состояния гонок в схемах сборки являются актуальной проблемой:

- Сценарий гонки может редко воспроизводиться;
- Состояния гонок могут приводить не только к ошибкам сборки, но и к уязвимостям и проблемам в успешно собранном проекте.

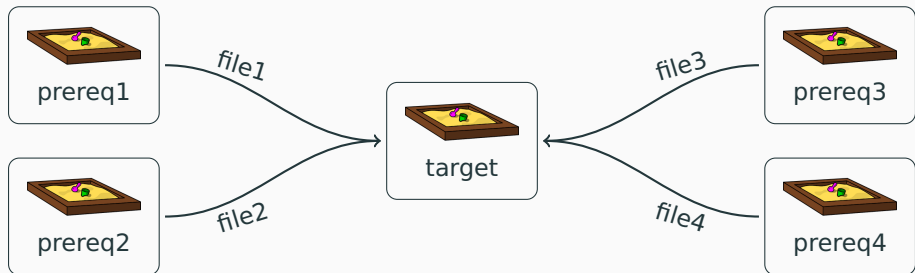
Цель исследования: Облегчить для разработчиков поиск и отладку состояний гонок в их схемах сборки путём разработки санитайзера. Требования к нему:

- Обнаруживать все гонки, связанные с отсутствующими зависимостями;
- Выдавать детерминированный результат;
- Легко встраиваться в проекты;
- Не требовать ~ 1 или многократных пересборок.

Обзор существующих решений

Обзор существующих решений: Bazel

- Система сборки Bazel — использует песочницы для устранения случайности.
- Каждая цель собирается в своей песочнице.
- Каждая песочница имеет только файлы, собранные целями-зависимостями.



- `make --shuffle` — перемешивает список пререквизитов каждой цели.
- Это увеличивает вероятность проявления гонки, но помогает не всегда.

`target: prereq1, prereq2, prereq3, ...`



`target: prereq5, prereq2, prereq4, ...`

Теоретический метод

Самые частые состояния гонок, встречающиеся в реальных проектах, можно разделить на три категории:

- **Гонка на содержимом файла.**
- **Гонка на пути к файлу.**
- **Гонка между созданием каталога и файлом в нем.**

- **Гонка на содержимом файла.**
- Гонка на пути к файлу.
- Гонка между созданием каталога и файлом в нем.

Теоретический метод: Гонка на содержимом файла

В следующем Makefile присутствует гонка на содержимом файла `file.out`

```
1 all: write_a append_b
2
3 write_a:                                'a' записывается в file.out
4     echo 'a' > file.out                из цели write_a.
5
6 append_b:                                'b' добавляется к
7     echo 'b' >> file.out                тому же файлу из цели
                                         append_b.
```

Теоретический метод: Гонка на содержимом файла

В следующем Makefile присутствует гонка на содержимом файла `file.out`

```
1 all: write_a append_b
2
3 write_a:                                'a' записывается в file.out
4     echo 'a' > file.out                из цели write_a.
5
6 append_b:                                'b' добавляется к
7     echo 'b' >> file.out              тому же файлу из цели
                                       append_b.
```

`write_a` и `append_b` независимы, их порядок выполнения не определен.
`file.out` может содержать `'ab'` или `'a'`.

Теоретический метод: Гонка на содержимом файла

В следующем Makefile присутствует гонка на содержимом файла file.out

```
1 all: write_a append_b
2
3 write_a:                                'a' записывается в file.out
4     echo 'a' > file.out                из цели write_a.
5
6 append_b: write_a                       'b' добавляется к
7     echo 'b' >> file.out                тому же файлу из цели
                                         append_b.
```

write_a и **append_b** независимы, их порядок выполнения не определен.
file.out может содержать 'ab' или 'a'.

Решение: Добавить зависимость между append_b и write_a

Теоретический метод: Гонка на содержимом файла

Strace — утилита Linux, которая перехватывает и выводит системные вызовы и сигналы.

```
1 $ strace -f -e trace=%file make
2 ...
3 # echo 'a' > file.out:
4 [pid 1060] openat(AT_FDCWD, "file.out", O_WRONLY|O_CREAT|O_TRUNC, 0666) = 3
5 [pid 1060] +++ exited with 0 +++
6 ...
7 # echo 'b' >> file.out:
8 [pid 1061] openat(AT_FDCWD, "file.out", O_WRONLY|O_CREAT|O_APPEND, 0666) = 3
9 [pid 1061] +++ exited with 0 +++
10 ...
```

Согласно журналу strace, при сборке file.out открывается на запись двумя процессами.

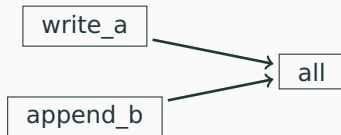
Зная соответствие между процессами и породившими их целями, можно утверждать, что:

1. Цель **write_a** производит запись в `file.out`
2. Цель **append_b** тоже производит запись в `file.out`

Зная соответствие между процессами и породившими их целями, можно утверждать, что:

1. Цель **write_a** производит запись в `file.out`
2. Цель **append_b** тоже производит запись в `file.out`

Граф зависимостей схемы сборки выглядит следующим образом:

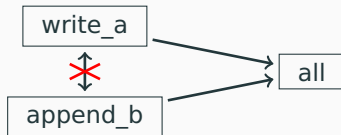


Теоретический метод: Гонка на содержимом файла

Зная соответствие между процессами и породившими их целями, можно утверждать, что:

1. Цель **write_a** производит запись в file.out
2. Цель **append_b** тоже производит запись в file.out

Граф зависимостей схемы сборки выглядит следующим образом:



Так как между write_a и append_b нет ориентированного пути, цели являются независимыми и образуют гонку.

Обзор алгоритма:

1. Запустить сборку под `strace`;
2. Сопоставить процессы с целями;
3. Получить граф зависимостей;
4. Найти недостающие зависимости между доступами к одному и тому же пути .

Обзор алгоритма:

1. Запустить сборку под strace;
2. Сопоставить процессы с целями; — Как?
3. Получить граф зависимостей; — Как?
4. Найти недостающие зависимости между доступами к одному и тому же пути .

Обзор алгоритма:

1. Запустить сборку под strace;
2. Сопоставить процессы с целями; — Как?
3. Получить граф зависимостей; — Как?
4. Найти недостающие зависимости между доступами к одному и тому же пути . — Всегда ли путь = файл?

Теоретический метод: Гонка на содержимом файла

Жесткие ссылки - это несколько имен для одного и того же файла в файловой системе. Они создаются с помощью команды `ln`.

```
1  all: file.out write_a append_b
2  file.out:
3      touch file.out
4      ln -f file.out hardlink_a hardlink_a и hardlink_b - жесткие
5      ln -f file.out hardlink_b ссылки на file.out
6
7  write_a: file.out
8      echo 'a' > hardlink_a      'a' записывается в hardlink_a из цели
9                                  write_a
10
11 append_b: file.out
12     echo 'b' >> hardlink_b     'b' добавляется к hardlink_b из цели
                                   append_b
```

Журнал `strace` для предыдущей сборки укажет на следующее:

- Цель **file.out** производит запись в `file.out`
- Цель **write_a** производит запись в `hardlink_a`
- Цель **append_b** производит запись в `hardlink_b`

Все три пути различаются. Состояние гонки найти не удастся.

Решение: Использовать **номера inode** вместо путей к файлам.

Номер inode — уникальный идентификатор файла в файловой системе. У жестких ссылок на один и тот же файл номер inode совпадает. Для предыдущего примера:

- Цель **file.out** производит запись на inode 100000
- Цель **write_a** производит запись на inode 100000
- Цель **append_b** производит запись на 100000

Обновленный алгоритм:

1. Запустить сборку под трассировщиком с логированием inode;
2. Сопоставить процессы с целями;
3. Получить граф зависимостей;
4. Найти недостающие зависимости между доступами к одному и тому же **пути файла** **номеру inode**

Этот алгоритм может найти состояния гонок даже при использовании жестких ссылок.

- Гонка на содержимом файла.
- **Гонка на пути к файлу.**
- Гонка между созданием каталога и файлом в нем.

Теоретический метод: Гонка на пути к файлу

В следующем Makefile присутствует гонка на пути tmp_file

```
1  all: something something_else
2
3  something:
4      generate_something > tmp_file      tmp_file используется как
5      do_something_with tmp_file          временный файл.
6      rm tmp_file                        Он удаляется после сборки цели.
7
8  something_else:
9      generate_something_else > tmp_file  То же имя используется для
10     do_something_else_with tmp_file      временного файла в другой
11     rm tmp_file                          цели.
```

Цели образуют гонку: rm может удалить файл, пока другая цель ещё использует его.

Последовательность событий для примера выше:

- Цель **something** создаёт inode 10000
- Цель **something** удаляет inode 10000
- Цель **something_else** создаёт inode 10001
- Цель **something_else** удаляет inode 10001

Номера inode не помогут обнаружить гонку на пути к файлу.

Последовательность событий для примера выше:

- Цель **something** создаёт inode 10000
- Цель **something** удаляет inode 10000
- Цель **something_else** создаёт inode 10001
- Цель **something_else** удаляет inode 10001

Номера inode не помогут обнаружить гонку на пути к файлу.

Решение: Использовать и пути, и номера inode для поиска гонок.

- Гонка на содержимом файла.
- Гонка на пути к файлу.
- **Гонка между созданием каталога и файлом в нем.**

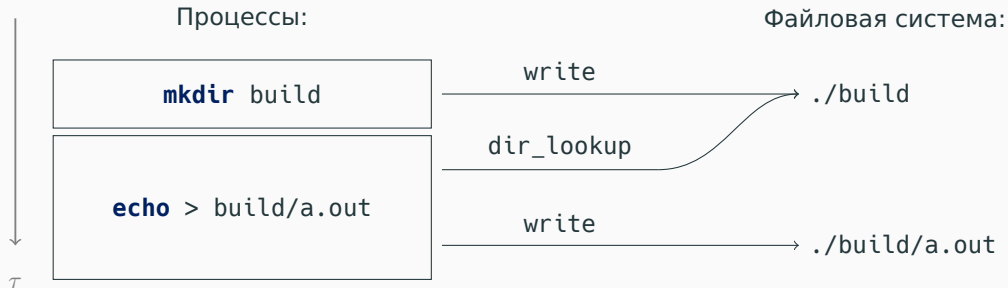
Makefile ниже содержит гонку между созданием каталога и файлом в нем:

```
1 all: build build/file.out
2
3 build:
4     mkdir -p build
5
6 build/a.out:
7     echo "a" > build/a.out
```

Если доступ к директории (**echo**) выполнится раньше её создания (**mkdir**), произойдет ошибка.

Теоретический метод: Гонка на каталоге

Решение: Сопровождать каждый доступ к файлу событием **dir_lookup** для родительской директории:



Теоретический метод: Гонка на каталоге

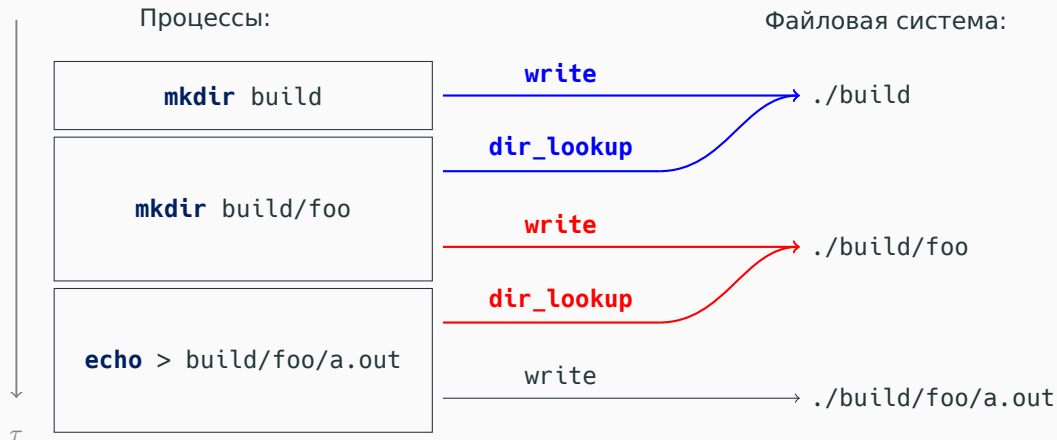
Решение: Сопровождать каждый доступ к файлу событием **dir_lookup** для родительской директории:



Конфликт между `write` и `dir_lookup` для `build` позволит найти гонку.

Теоретический метод: Гонка на каталоге

Такой подход работает с любой глубиной вложенности:

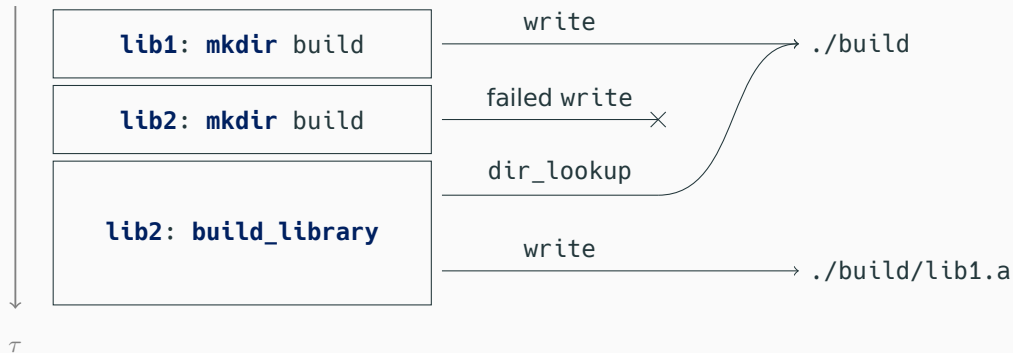


Проблема: Каталоги могут создаваться по необходимости из разных мест:

```
1 all: lib1 ... lib9
2
3 lib1:
4     mkdir -p build
5     build_library build/lib1.a
6 ...
7
8 lib9:
9     mkdir -p build
10    build_library build/lib9.a
```

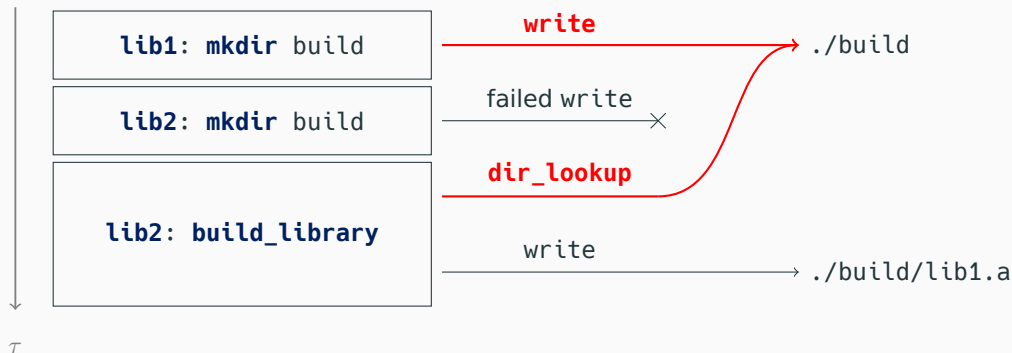

Теоретический метод: Гонка на каталоге

- При множественных **mkdir** алгоритм выдаст ложные срабатывания.



Теоретический метод: Гонка на каталоге

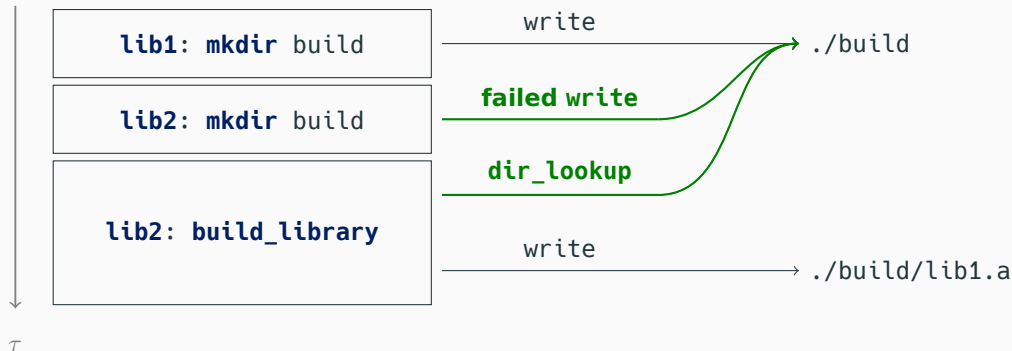
- При множественных **mkdir** алгоритм выдаст ложные срабатывания.



- Доступы из **lib1** и **lib2** будут считаться конфликтующими, хотя это не так.

Теоретический метод: Гонка на каталоге

- **Решение:** Для **dir_lookup** искать любой зависимый предшествующий **write**, даже если он неуспешный.



- Оба выделенных доступа относятся к **lib2**, поэтому гонки нет.

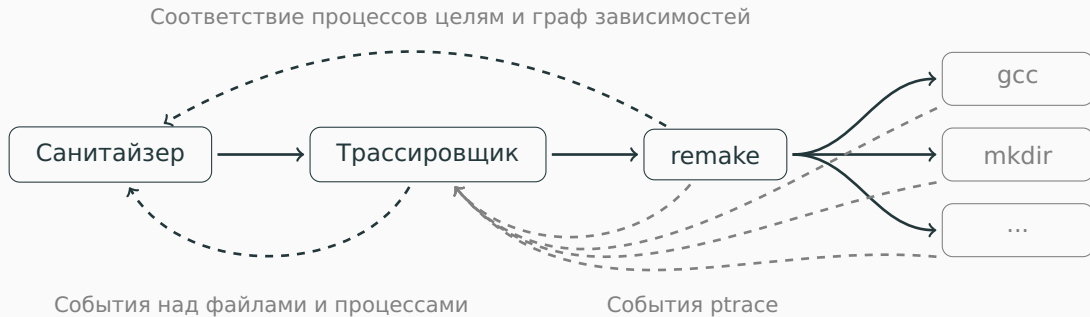
Реализация

Реализация: Архитектура

Сбор данных:

- **Граф зависимостей, соответствие процессов и целей** — патч для Make.
- **Журнал событий** — ptrace-трассировщик на Си вместо strace.

Архитектура:



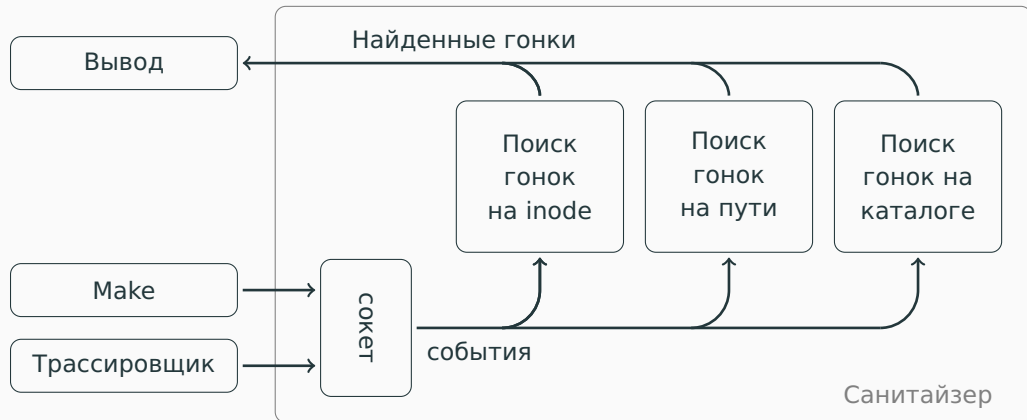
Реализация: Перехват системных вызовов

Системный вызов	Событие для санитайзера
<code>open(at)(at2)</code>	read или write
<code>mkdir(at)</code>	write
<code>creat</code>	write
<code>rmdir</code>	unlink
<code>unlink(at)</code>	unlink
<code>rename(at)(at2)</code>	unlink целевого пути, если он существует.

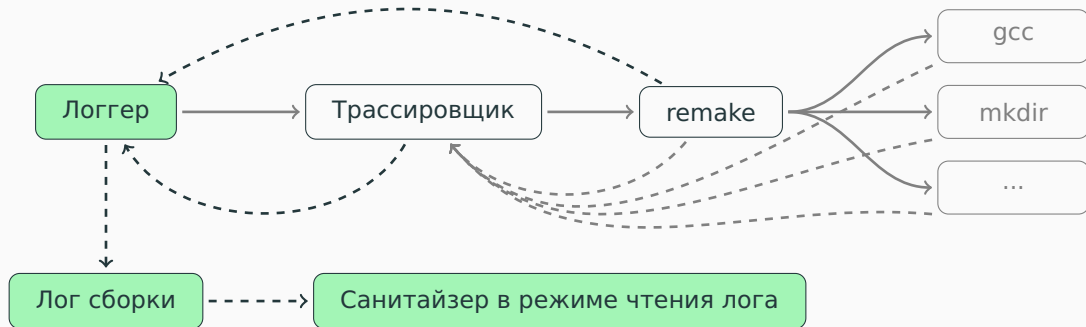
- Каждый доступ сообщается с **pid**, номером **inode** и **путём**.
- Для родительского каталога сообщается **dir_lookup**.
- Остальные системные вызовы фильтруются через `seccomp BPF`.

Реализация: Санитайзер

Санитайзер обрабатывает полученные события с помощью трех алгоритмов:



Реализация: Воспроизведение сборки



- Архитектура инструмента позволяет сохранять журнал сборки в файл и воспроизводить его после.
- Это позволяет быстро запускать санитайзер несколько раз с разными опциями или точками останова.

Тестирование

Сергей Трофимович с помощью `make --shuffle` обнаружил условия гонок в 29 проектах с открытым исходным кодом, включая:

1. Vim
2. GCC
3. strace
4. Ispell

<https://trofi.github.io/posts/249-an-update-on-make-shuffle.html>

- Сообщаемая ошибка сборки Vim:

```
1 cp: cannot create regular file '../bin/vimtutor': No such file or directory
2 make[1]: *** [Makefile:2546: installtutorbin] Error 1
3 make[1]: Leaving directory '/build/source/src'
```

- Сообщаемая ошибка сборки Vim:

```
1 cp: cannot create regular file '../bin/vimtutor': No such file or directory
2 make[1]: *** [Makefile:2546: installtutorbin] Error 1
3 make[1]: Leaving directory '/build/source/src'
```

- `bin/vimtutor` кажется создается слишком поздно для цели **installtutorbin**.
- Журнал событий:

```
1 target inst_dir/bin has performed write access on 'inst_dir/bin'...
2 target installtutorbin has performed dir_lookup access 'inst_dir/bin'...
```

- Сообщаемая ошибка сборки Vim:

```
1 cp: cannot create regular file '../bin/vimtutor': No such file or directory
2 make[1]: *** [Makefile:2546: installtutorbin] Error 1
3 make[1]: Leaving directory '/build/source/src'
```

- bin/vimtutor кажется создается слишком поздно для цели **installtutorbin**.
- Журнал событий:

```
1 target inst_dir/bin has performed write access on 'inst_dir/bin'...
2 target installtutorbin has performed dir_lookup access 'inst_dir/bin'...
```

- Цели **inst_dir/bin** и **installtutorbin** являются **неупорядоченными**
- Санитайзер сообщил об гонке:

```
race found on file 'inst_dir/binwrite at target inst_dir/bin
- dir_lookup at target installtutorbin
```

- Санитайзер также сообщил о ранее неизвестных гонках:

race found at file `'src/po/LINGUAS'`:

- **write** at target `gvim.desktop`
- **write** at target `vim.desktop`

Тестирование: Другие гонки в Vim

- Санитайзер также сообщил о ранее неизвестных гонках:

race found at file `'src/po/LINGUAS'`:

- **write** at target **gvim.desktop**
- **write** at target **vim.desktop**

- Оказалось, что LINGUAS является временным файлом, используемым в двух независимых целях:

```
216 vim.desktop: ...  
217     echo ... > LINGUAS  
218     $(MSGFMT) ...  
219     rm -f LINGUAS  
220  
221 gvim.desktop: ...  
222     echo ... > LINGUAS  
223     $(MSGFMT) ...  
224     rm -f LINGUAS
```

Тестирование: Другие гонки в Vim

- Санитайзер также сообщил о ранее неизвестных гонках:

race found at file `'src/po/LINGUAS'`:

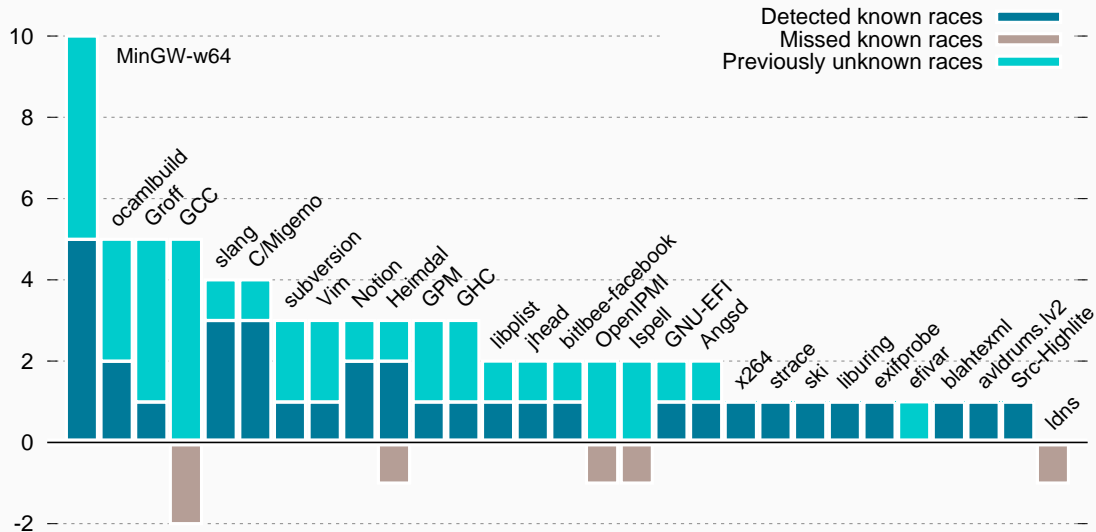
- **write** at target **gvim.desktop**
- **write** at target **vim.desktop**

- Оказалось, что LINGUAS является временным файлом, используемым в двух независимых целях:

```
216 vim.desktop: ...  
217     echo ... > LINGUAS  
218     $(MSGFMT) ...  
219     rm -f LINGUAS  
220  
221 gvim.desktop: ...  
222     echo ... > LINGUAS  
223     $(MSGFMT) ...  
224     rm -f LINGUAS
```

- Эта гонка не может быть обнаружена с помощью `make --shuffle`

Тестирование: Результаты



Новый инструмент продемонстрировал свою надежность и помог достичь цели исследования. Он был назван **parmasan** — **Parallel make sanitizer**.

Дальнейшие улучшения:

- Улучшение учета символических ссылок в алгоритме поиска гонок;
- Интеграция инструмента в системы непрерывной интеграции;
- Добавление поддержки системы сборки **Ninja**;
- Поддержка внешних отладчиков.

Репозитории:

- <https://github.com/ispras/parmasan>
- <https://github.com/ispras/parmasan-remake>