

# Применение методов формальной верификации для анализа правил фильтрации сетевого трафика

Дурнов Алексей Николаевич

Московский физико-технический институт  
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий  
Кафедра инфокоммуникационных систем и сетей

**Научный руководитель:** к.ф.-м.н., доцент, Ефанов Николай Николаевич

**Консультант:** Ларин Дмитрий Викторович

Москва, 2026 г.

### Рост киберугроз

- Ежегодный рост числа кибератак на 20–30%
- Усложнение атак: APT, многовекторные атаки, атаки на уровне приложений

### Средства защиты класса NGFW

- Next-Generation Firewall становится одним из ключевых элементов сетевой безопасности
- В России активно развивается рынок отечественных решений: Kaspersky, Positive Technologies, UserGate, Континент, Ideco и др.
- Оставшиеся зарубежные решения: Check Point, Fortinet, Palo Alto Networks и др.

### Цена ошибки

- Ошибки конфигурации политики безопасности — одна из главных причин инцидентов ИБ
- Средний ущерб от утечки данных в России - 11.5 млн рублей

## Цель:

Разработка системы автоматического анализа и верификации правил фильтрации сетевого трафика для выявления ошибок конфигурации

## Задачи:

- 1 Провести исследование существующих методов анализа правил фильтрации
- 2 Разработать унифицированную вендору-независимую модель представления правил различных форматов. Модель должна поддерживать отечественные решения
- 3 Выбрать и адаптировать методы формальной верификации для анализа правил
- 4 Реализовать алгоритмы обнаружения ошибок конфигурации в наборах правил
- 5 Разработать прототип системы анализа правил фильтрации
- 6 Провести тестирование на реальных конфигурациях

Политика сетевой безопасности в первую очередь определяется набором **правил фильтрации** сетевого трафика.

## Основные классы правил фильтрации:

- ❶ **ACL** (Access Control List) – Cisco, Juniper, Huawei и др.
  - Анализ на уровне **L3–L4** (protocol, src/dst IP, src/dst port)
  - Небольшое количество дополнительных опций, простые сетевые объекты, наборы портов
  - **Линейный поиск** правил (first-match)
- ❷ **iptables** – Linux-системы, MikroTik
  - Анализ на уровне **L3–L4**
  - Дополнительные опции и простые объекты
  - Линейный поиск, но с **механизмом цепочек** (chains)
- ❸ **Политики безопасности NGFW** – Kaspersky, Positive Technologies, Fortinet и др.
  - Анализ на уровне **L7** (приложения, сервисы, пользователи)
  - Богатый набор объектов: зоны, приложения и др.
  - Часто используется нелинейный поиск правил

- Приоритет правила
- Действие - allow/deny/chain/return
- Условие совпадения:
  - Сетевые объекты (wildcard-маски, диапазоны IP, Geo-IP, FQDN)
  - Пользователи (группы, профили, идентификаторы)
  - Зоны безопасности и тип правила для работы с зонами
  - Сервисы (наборы портов и протоколов)
  - Приложения (прикладной протокол, сервис или группа приложений)
- Расписания
- Групповой профиль безопасности - объединяющий профиль движков безопасности (IDPS, AV, DNS Security)
- Дополнительные данные (число срабатываний, время последнего срабатывания, время первого срабатывания и тд)

### Правил:

- ! **Shadowing** — правило затенено, т.е. никогда не срабатывает
- ! **Redundancy** — избыточное правило
- ! **Generalization** — правило перекрывает более специфичное
- ! **Correlation** — частичное пересечение правил
- **Expired** — правило с истекшим сроком действия
- **Disabled** — правило отключено
- **Unused** — правило не используется

### Объектов:

- **Unattached** — объект не привязан к правилу
- **Duplicate** — дублирующий объект
- **Unused within rule** — объект не используется с правилом

Критерий	Семантический анализ	Тестирование на трафике	Формальная верификация
Точность	Все типы ошибок	Не все логические ошибки	Все типы ошибок
Интерпретируемость	Легко	Может быть сложно	Легко
Требуется реального трафика/исполнения	Нет	Да	Нет
Сложность	$O(n^2)$	Высокая (много тестов)	Обычно $O(n)$ , в худшем случае $O(n^2)$
Проверка реального поведения	Нет	Да	Нет

## Header Space Analysis - метод моделирования сети

- Каждый пакет представлен как точка в многомерном пространстве заголовков сетевого пакета:  $\{0, 1\}^n$ , где  $n$  - число битов в заголовке
- Для удобства вводят специальный символ wildcard  $x$  для обозначения любого бита
- На этом пространстве определены теоретико-множественные операции: пересечение, объединение, разность, дополнение и т.д.
- Правило фильтрации - это функция отображения в этом пространстве.

Множество пакетов  $P$  - это множество точек в пространстве заголовков, или объединение выражений с символами '0', '1' и 'x'. Это множество также можно задать с помощью булевой формулы.

$$P = 0xx10 \cup 10100 \iff F(X) = (\neg x_1 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5)$$

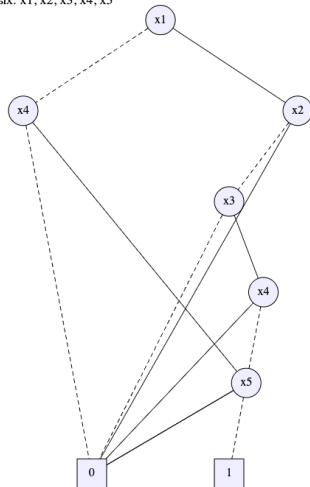


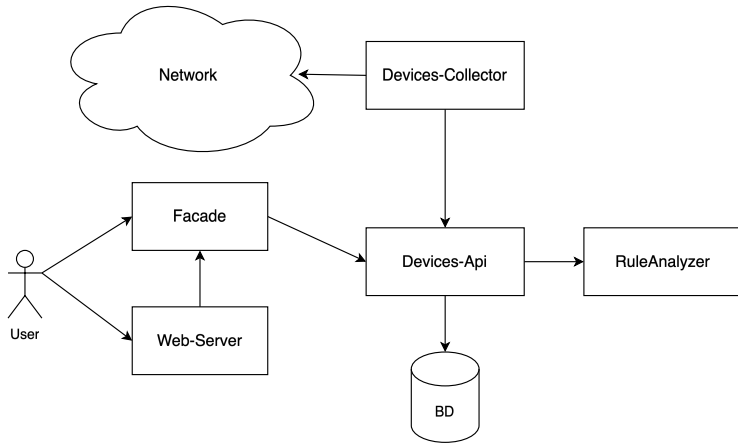
## Binary Decision Diagrams (BDD)

- Компактное представление булевых функций
- Эффективные операции: пересечение, объединение, проверка эквивалентности

Формула:  $(\neg x_1 \wedge x_4 \wedge \neg x_5) \vee (x_1 \wedge \neg x_2 \wedge x_3 \wedge \neg x_4 \wedge \neg x_5)$

Порядок переменных:  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$





Hadal

Dashboard

Network Discovery

Inventory

Diagrams

Diffs

Validation

Intent

Policy Analysis

Settings

1,068

Total Rules

All rules across devices

84

Rules for Audit

7.9% of total

245

Total Objects

All objects across devices

34

Objects for Audit

13.9% of total

Filters

Rule Types

Normal

Shadowed

Redundant

Generalizing

Correlating

Expired

Disabled

Unused

Apply Filter

Clear Filters

17/07/2025, 11:43:19

17/07/2025 11:43:19

10/12/2025 13:24:14

Policy Analysis

Rules Distribution

Objects Distribution

Filters

Rule Types

Normal

Shadowed

Redundant

Generalizing

Correlating

Expired

Disabled

Unused

Apply Filter

Clear Filters

Devices for Audit. List of all devices with selected rules and objects

HOSTNAME	MANAGEMENT IP	VENDOR	FAMILY	MODEL	VERSION	RULES FOR AUDIT	OBJECTS
cisco-router-01	192.168.1.1	Cisco	IOS XE	ISR 4331	16.09.05	<div>Shadowed: 1</div> <div>Redundant: 1</div> <div>Disabled: 1</div> <div>Unused: 1</div>	-
cisco-asa-02	192.168.2.1	Cisco	ASA OS	ASA 5516-X	9.14(1)	<div>Shadowed: 1</div> <div>Redundant: 1</div> <div>Disabled: 1</div> <div>Unused: 1</div>	-
checkpoint-quantum-01	172.16.2.1	Check Point	Gaia	Quantum 6200	R81.10	<div>Shadowed: 1</div> <div>Redundant: 1</div> <div>Expired: 1</div> <div>Unused: 1</div>	-
fortigate-100f	172.16.1.1	Fortinet	FortiOS	FortiGate 100F	7.2.2	<div>Shadowed: 1</div> <div>Redundant: 1</div> <div>Expired: 1</div> <div>Unused: 1</div>	-

Rows per page: 20

1-10 of 10

Дурнов Алексей Николаевич

11/15

Hostname: cisco-router-01 IP: 192.168.1.1 Vendor: Cisco IOS XE Model: ISR 4331 Version: 16.09.05

## Rules &amp; Objects

🔍 Search...

Only with recommendations

4 of 13

 Custom



▼ Objects

Network Objects (17)

Transport Ports Groups (5)

ACL-CORP-1

↓ INGRESS INTERFACES:

## GigabitEthernet0/0

↑ EGRESS INTERFACES:

> ACL-INSIDE-IN

>  ACL-DMZ-IN 

## ACL-OUTSIDE-IN

## ACI-EXTENDED-101

> ACL-STANDARD-10

> **ACL-OUTBOUND-OUT**

	BASIC				SOURCE		
	PRIORITY	ACTIVE	ACTION	RULE TYPE	SRC ENTRY	SRC NETWORKS	SRC USER
	10		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.0-25	-
	20		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.128-25	-
	30		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.0-26	-
	40		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.64-26	-
	50		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.128-26	-
	60		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.192-26	-
<span>King redundant</span>			<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	-	-
	80		<span>Allow</span>	<span>Universal</span>	-	NET-10.1.1.0-24	-
	90		<span>Allow</span>	<span>Universal</span>	-	NET-192.168.99.0-24	-
	100		<span>Allow</span>	<span>Universal</span>	-	HOST-192.168.99.56	-
	110		<span>Allow</span>	<span>Universal</span>	-	HOST-192.168.99.57	-
	120		<span>Allow</span>	<span>Universal</span>	-	NET-192.168.99.0-24	-
	130		<span>Deny</span>	<span>Universal</span>	-	-	-

## Выполнено:

- Проведён анализ существующих методов верификации правил фильтрации
- Разработана унифицированная модель представления правил
- Выбран и адаптирован метод на основе BDD для анализа конфликтов
- Реализованы алгоритмы обнаружения основных типов аномалий
- Разработан прототип системы анализа

## Практическая значимость:

- Снижение рисков мiskonфигурации сетевых устройств
- Автоматизация аудита политик безопасности
- Поддержка мультивендорной инфраструктуры, в том числе и отечественных решений

- Оптимизация работы алгоритма для больших наборов правил (>100'000 правил)
- Автоматическая оптимизация наборов с помощью анализа достижимости на модели сети
- Интеграция с системами управления политиками (policy orchestration)

Спасибо за внимание!

