

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***Сапего Юлия Сергеевна*

аспирант

*Николаев Андрей Борисович*

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет (МАДИ)»

г. Москва

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
ОБНАРУЖЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ИНЦИДЕНТОВ**

*Аннотация: на данный момент существует множество различных алгоритмов для автоматического обнаружения дорожных инцидентов. В данной статье рассмотрены основные типы алгоритмов, определены меры эффективности. Проведен анализ данных алгоритмов и выявлены основные преимущества и недостатки.*

*Ключевые слова:* система управления, дорожные инциденты, обнаружение дорожных инцидентов, алгоритмы обнаружения инцидентов.

Разработка эффективного процесса управления дорожными инцидентами является важной частью транспортной системы. Целью любой стратегии управления инцидентами является устранение возникшего происшествия за возможно короткое время. Такое управление должно включать в себя обнаружение инцидента, реагирование на случившееся событие, восстановление нормальных условий дорожного движения. Этап обнаружения инцидентов должен включать в себя инструменты для сбора и обработка данных. Эффективность этапа обнаружения инцидентов определяется способностью отслеживать и выявлять инциденты с помощью алгоритмов и в максимально короткие сроки оповещать о необходимости принятия соответствующих мер.

Системы автоматического обнаружения инцидентов возникли благодаря американской разработке схемы управления шоссе в 1970-х годах. В дальнейшем было разработано множество различных типов алгоритмов, позволяющие на основе полученных данных и без участия человека, обнаруживать возникновения дорожного инцидента. Первые разработанные алгоритмы автоматического обнаружения дорожных инцидентов, как правило, использовали метод распознавания шаблонов, которые заключались в сравнении текущего состояния дороги с предопределенными пороговыми значениями дорожного движения.

В 1980-х годах были предложены десятки алгоритмов обнаружения инцидентов на основе прогнозирования. Суть таких алгоритмов заключалась в следующем: на основе исторических данных делался прогноз будущего состояния дорожного движения или прогнозировалась вероятность возникновения инцидента путем сравнения параметров текущего состояния движения и прогнозируемыми значениями. В последние годы благодаря развитию технологий искусственного интеллекта разработаны новые алгоритмы на основе нейронных сетей или генетического алгоритма.

Разработанные алгоритмы можно разделить на следующие виды: Алгоритмы на основе шаблонов, Статические методы, Теория катастроф, Искусственный интеллект.

#### *Алгоритмы на основе шаблонов (сравнительные)*

Данный алгоритм является наиболее распространенным. Вывод результата осуществляется на основе информации о размещении ТС, объеме дорожного движения и информации о движении потока (например, средняя скорость). Принцип обнаружения: такие алгоритмы сравнивают текущие условия движения, такие как плотность движения, размещение ТС и другое с установленными порогами для дальнейшего определения имеет ли место инцидент на дороге.

#### *Статические методы обнаружения инцидентов*

Такие алгоритмы используют стандартные статические методы для определения разницы между данными о дорожном движении в реальном времени, по-

лученные от датчиков, и прогнозируемыми (оценочными) значениями. Алгоритмы используют временные ряды данных и создают прогнозируемый диапазон значений. Любое отклонение от прогнозируемого потока трафика считается инцидентом. Преимущество такого метода состоит в том, что для реализации алгоритма не требуется использование больших объемов данных.

### *Теория катастроф*

Теория катастроф берет свое название от внезапных дискретных изменений, которые происходят в одной переменной, в то время как другие связанные переменные непрерывно изменяются (Persaud и Hall, 1989). Такими переменными являются скорость, плотность потока и размещение. Считается, что произошел инцидент, если скорость потока падает без соответствующего увеличения плотности потока и размещения. Возникновение пробок приводит к плавному изменению скорости потока, в то время как инцидент приводит к резкому изменению. Следовательно, такие алгоритмы могут различать регулярные пробки и возникающие инциденты. Главное отличие теории катастроф от алгоритмов сравнения заключается в том, что в первом случае полученные данные сравниваются с предыдущими ситуациями на дороге, где возникают пробки, во втором – с предустановленными пороговыми значениями.

### *Определение мер эффективности алгоритмов*

Выделены следующие параметры, характеризующие эффективность алгоритмов обнаружения инцидентов:

1. *Количество обнаружения инцидентов (DR)* – отношение числа обнаружения инцидентов к общему количеству инцидентов, измеряется в %.

*Примечание: DR – Detection Rate.*

Данный параметр зависит от определения инцидента, то есть зависит от того, что в системе будет считаться инцидентом, а что нет. Данные параметр вычисляется следующим образом:

$$DR = \left( \frac{N_{DI}}{N_{TI}} \right) * 100 \quad (5)$$

где  $N_{DI}$  – количество обнаруженных инцидентов,  $N_{TI}$  – общее количество инцидентов.

2. Количество ложных тревог (*FAR*) - определяется как процент ошибочных сигналов обнаружения по отношению к общему количеству инцидентов

$$FAR = \left( \frac{N_{FA}}{N_{TA}} \right) * 100 \quad (6)$$

где  $N_{FA}$  – количество ложных тревог,  $N_{TA}$  – общее количество тревог.

*Примечание: FAR – False Alarm Rate.*

3. Время обнаружения инцидента (MTTD) – определяется как время с момента, как произошло событие, до момента его обнаружения. Важно заметить, что в данный параметр не включается время, требуемое для проверки инцидента (действительно ли произошел инцидент).

$$MTTD = \sum_{i=1}^N (t_a - t_{inc})/n \quad (7)$$

где  $N$  – количество выявленных инцидентов,  $t_a$  – время, когда инцидент был обнаружен,  $t_{inc}$  – время, когда инцидент произошел.

4. Оценка сложности реализации и степень интеграции – основана на оценках, связанных со сложностью конструкции и структуры алгоритма, объема обработки, требуемого для каждого алгоритма.

В рамках проводимого исследования для анализа эффективности будет предложена следующая формула:

$$F(x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n) = x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n \quad (8)$$

где  $x$  – вес каждого критерия, который будет определяться по результатам проведённых исследований;  $y$  – важность критерия.

*Примечание: MTTD – Mean Time to Detection.*

За основу будет взят метод аналитической иерархии из теории принятий решений, который состоит из нескольких этапов:

1 этап: составление структуры.

2 этап: попарного сравнения критериев.

3 этап: вычисления весов критериев.

4 этап: подсчитывания индикатора качества для каждой из альтернатив.

Теперь подробно рассмотрим применимость каждого этапа к проводимому исследованию:

1. Составления структуры «Цель – критерии – альтернативы». Для данного исследования структура будет следующей:

Таблица 1

#### Структура «Цель – критерии – альтернативы» для данного исследования

<i>Цель:</i> Выбор оптимального алгоритма обнаружения инцидентов	
<i>Критерии:</i>	<i>Альтернативы:</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– количество обнаружения инцидентов;</li> <li>– количество ложных тревог;</li> <li>– время обнаружения инцидента;</li> <li>– оценка сложности реализации;</li> <li>– степень интеграции алгоритма.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– алгоритм Калифорния TSC#7;</li> <li>– алгоритм APID;</li> <li>– алгоритм PATREG;</li> <li>– алгоритм SND;</li> <li>– алгоритм Байеса;</li> <li>– алгоритм МакМастер.</li> </ul>

2. Попарное сравнение критериев и вычисление их весов: после каждого исследования каждому критерию соответственно будет присваиваться вес, который будет определяться следующим образом:

При анализе оценки сложности реализации и степени интеграции вес будет выставляться субъективный, так как математически вычислить вес не представляет возможности. Будут выделены следующие критерии и соответствующие весы: низкая/легкая (3), средняя (2), высокая/сложная (1).

При анализе остальных критериев вес будет выставляться следующим образом: алгоритму с лучшим результатом будет присвоен максимальный вес критерия (ниже представлена шкала весов критериев и их значения). Вес остальных будет вычисляться относительно максимального результата и результата каждого алгоритма.

Таблица 2

#### Шкала весов критериев и их значения

<i>Вес</i>	5	4	3	2	1
<i>Значение результата</i>	Лучший	Хороший	Средний	Удовлетворительный	Худший

3. Для подсчёта индикатора качества будет использоваться следующая формула:

$$S_j = \sum_{i=1}^N w_i V_{ji} \quad (9)$$

где  $S_j$  – показатель качества j-ой альтернативы, т.е. рассматриваемого алгоритма; N – общее количество критерий, в данном исследовании  $N = ;$ ;  $w_i$  – вес i-ого критерия, который рассчитывается в экспериментах;  $V_{ji}$  – важность i-ого критерия. В данном исследовании важность каждого критерия будет максимальной, т.е.  $V_{ji} = 5$ , кроме оценки сложности реализации и степени интеграции, так как самое важное в алгоритмах, это как максимально качество и быстро алгоритмы могут определить, что произошел инцидент ( $V_{ji} = 1$ ). Максимальное значение  $S_j$  покажет лучший (оптимальный) алгоритм для обнаружения дорожных инцидентов.

#### *Сравнение и анализ алгоритмов обнаружения инцидентов*

Для реализации любого алгоритма обнаружения инцидентов необходимы входные данные, в зависимости от типа используемого алгоритма необходимы те или иные данные. В таблице приведены некоторые алгоритмы и соответствующие данные:

Таблица 3

Типы данных, используемые в алгоритмах

<i>Алгоритмы</i>		<i>Типы данных</i>		
		<i>Размещение</i>	<i>Объем трафика</i>	<i>Скорость движения</i>
Алгоритмы на основе шаблонов	Алгоритм Калифорния TSC#7	+	-	-
	Алгоритм APID	+	+	-
	Алгоритм PATREG	+	-	-
Статические методы	Алгоритм SND	+	-	-
	Алгоритм Байеса	+	-	-
Теория катастроф	Алгоритм МакМастер	+	-	-

В таблице приведены необходимые данные. Обязательные данные обозначены «+», необязательные «-».

Была проведена оценка сложности, с которой алгоритм может быть реализован. Оценка основана на оценках, связанных со сложностью конструкции и

структуры алгоритма, объема обработки, требуемого для каждого алгоритма. Результаты показаны в таблице:

Таблица 4

## Оценка сложности и интеграции алгоритмов

<i>Алгоритм</i>		<i>Оценка сложности</i>	<i>Степень интеграции</i>
Алгоритмы на основе шаблонов	Алгоритм Калифорния TSC#7	Средняя	Легкая
	Алгоритм APID	Средняя	Легкая
	Алгоритм PATREG	Низкая	Сложная
Статические методы	Алгоритм SND	Низкая	Легкая
	Алгоритм Байеса	Высокая	Высокая
Теория катастроф	Алгоритм МакМастер	Средняя	Средняя

Следует отметить, что структура и конструкция каждого алгоритма определяет свою собственную среду приложений, поэтому производительность может также отличаться в различных средах. Также на производительность влияет тип используемых датчиков, их конфигурация, период агрегации данных и т. д. При реализации алгоритмов были использованы индуктивные петли.

Было проведено исследование на анализ производительности алгоритмов обнаружения инцидентов (Balke). Все рассмотренные алгоритмы тестировались в разных условиях, с разными наборами данных. Данные собирались в разных городах, таких как, Торонто, Бостон, Калифорния, Чикаго, Техас, Миннесота, либо в лаборатории путем моделирования дорожных ситуаций. Ниже приведены результаты такого исследования:

Таблица 5

## Анализ эффективности алгоритмов по трем основным мерам

<i>Алгоритм</i>		<i>DR, %</i>	<i>FAR, %</i>	<i>MTTD</i>
Алгоритмы на основе шаблонов	Калифорния TSC#7	82	1,73	0,85
	Алгоритм APID	86	0,05	2,5
	Алгоритм PATREG	80	0,3	1,9
Статические методы	Алгоритм SND	92	1,3	1,1
	Алгоритм Байеса	100	0	3,9
Теория катастроф	Алгоритм МакМастер	68	0,0018	2,2

При следующих условиях тестировались данные алгоритмы: загрузка трассы: плотный, средний и свободный потоки движения, дороги со светофорами и без; климатические условия: снег, гололедица, туман, дождь, солнечная погода; тяжести инцидентов; расстояние между датчиками; место инцидента в зависимости от расположения датчиков.

#### *Вывод по главе*

Из таблицы 3 видно, что общей для всех используемой мерой контроля для обнаружения инцидента является такой параметр как «размещение», только алгоритм APID требуется для анализа информация об объеме трафика. Самым простым по сложности и легким по реализации (см. результаты таблицы 2) является алгоритм SND. Также данный алгоритм показал один из лучших результатов по отношению обнаруженных инцидентов относительно к общему количеству выявленных происшествий, но в то же время у данного алгоритма один из худших результатов по ложным тревогам.

Стоит отметить, что независимо от того насколько сложно или просто реализовать алгоритм, они никогда не смогут полностью оценить динамический характер транспортного потока. Существует две проблемы реализации автоматизированной процедуры обнаружения дорожных инцидентов: соотношение ложных тревог возникновения инцидентов и время, которое требуется для обнаружения возникшего инцидента.

Самый сложный по реализации и интеграции является алгоритм Байеса, но у него самый лучший результат по количеству обнаруженный инцидентов (100%) и количеству ложный тревог (0%). Но при этом данному алгоритму требуется наибольшее время для анализа поступающих данных.

Теперь рассчитаем для каждого алгоритма индикатор качества  $S_j$ :

$$S_{TSC\#7} = 2 * 1 + 3 * 1 + 2,46 * 5 + 1 * 5 + 3 * 5 = 37,3$$

$$S_{APID} = 2 * 1 + 3 * 1 + 2,58 * 5 + 2,9 * 5 + 1,7 * 5 = 40,9$$

$$S_{PATREG} = 3 * 1 + 1 * 1 + 2,4 * 5 + 2,5 * 5 + 1,8 * 5 = 37,5$$

$$S_{SND} = 3 * 1 + 3 * 1 + 2.76 * 5 + 1.5 * 5 + 2.4 * 5 = 39,3$$

$$S_{BAYES} = 1 * 1 + 1 * 1 + 3 * 5 + 3 * 5 + 1 * 5 = 37$$

$$S_{McMaster} = 2 * 1 + 2 * 1 + 2,04 * 5 + 2,9 * 5 + 1,9 * 5 = 28,2$$

По итогам самый лучший результат вышел у алгоритма APID. Данный алгоритм показывает один из лучших результатов показателя ложных тревог, но процент обнаруженных инцидентов меньше 90%, что не являются хорошим показателем.

Цель алгоритма APID состояла в том, чтобы обеспечить превосходную работу при любых условиях. Но как показало тестирование, алгоритм хорошо работает при интенсивном и плотном потоке движения, но показывает плохие результаты в условиях низкой интенсивности.

Это было успешно подтверждено на нескольких проектах, включая центральную улицу Бостона, тоннеля Ted Williams, тоннеля Hawaii's H-3 Trans-Koolau и тоннеля Colorado's I-70 Hanging Lake. В настоящее время алгоритм развернут в интеллектуальной транспортной системе George Washington Bridge и в системе управления Columbus Metro Freeway.

Алгоритм PATREG показывает хорошие результаты при низком и среднем движении. Связано это с тем, что при более высоком движении становится нерегулярным, чтобы адекватно собирать данные. Данный алгоритм требует расстояние между датчиками минимум 1/3 мили (около 536 метров) и является достаточно устаревшим, так как никаких новых исследований не проводилось с начала 1980-х годов.

Самый худший результат – у алгоритма МакМастера, процент определения инцидентов ниже 70%, но показатель ложных тревог почти сведен к 0%. Одним из существенных недостатков является сложность реализации и стоимость внедрения.

### *Заключение*

Проведенный анализ показал, что на данный момент не разработан алгоритм, который бы показывал наилучший результат по всем указанным выше параметрам. Проблема, главным образом, состоит в следующем: состояние дорожного движения можно разделить на два состояния: нормальное состояние и ста-

тус «произошел инцидент». Два этих состояния не имеют четкой границы, поэтому возникает множество проблем в определении пороговых границ для традиционных методов обнаружения инцидентов. Поэтому в дальнейших исследованиях для решения недетерминированных задач будет предложен метод обнаружения инцидентов на основе нечеткой логики.

### ***Список литературы***

1. Dr. Emily Parkany A Complete Review of Incident Detection Algorithms & Their Deployment: What Works and What Doesn't. The New England Transportation Consortium. – 2005. – 112 с.
2. Dr. Peter T. Martin Incident Detection Algorithm Evalution. Utah Department of Transportation. – 2001. – 46 с.
3. Hyung Jin KIM, Ph.D., Hoi-Kyun CHOI, Ph.D. IATSS RESEARCH/A comparative analysis of incident service time on urban freeways. Australasian Transport Research Forum. – 2011. – 15 с.
4. Kaan Ozbay, Pushkin Kachroo. Incident Management in Intelligent Transportation Systems / Incident Detection. – 267 с.
5. ITS Decision [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://fresno.ts.odu.edu/newitsd/ITS\\_Serv\\_Tech/incident\\_manag/detection\\_algorithms\\_report.html](http://fresno.ts.odu.edu/newitsd/ITS_Serv_Tech/incident_manag/detection_algorithms_report.html)
6. Onur Deniza, Hilmi Berk Celikoglu Procedia – Social and Behavioral Sciences / Overview to some existing incident detection algorithms: a comparative evaluation. – 2011. – 13 с.