Сравнительный анализ стратегий диспетчеризации аварийных служб водоотведения: от FCFS к приоритезации по риску и ожидаемому ущербу

Камнев Е.М.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);
ООО «Арго-Сервис»

kamnev.egor@yandex.ru

***Аннотация*. В статье сравниваются стратегии диспетчеризации аварийных служб водоотведения, обслуживающих ливневые насосные станции (ЛНС) при ограниченных ресурсах. Обзор публикаций по восстановлению электросетей, работе экстренных медицинских служб и распределению аварийных ресурсов охватывает базовое правило FCFS и шесть дополнительных подходов: выбор ближайшей свободной бригады, выбор с учётом времени простоя, зонирование, приоритетная диспетчеризация, экспертный выбор и алгоритмическая поддержка решений. Подходы сопоставлены по принципу выбора, преимуществам и ограничениям; отдельно разграничены оценка срочности заявки и оценка готовности бригады. При распределении заявок в водоотведении предлагается учитывать время их поступления, расстояние до объекта, возможные последствия задержки, характеристики ЛНС, прогноз осадков, оснащение и квалификацию бригады, дорожную обстановку и стоимость выезда. Предложены показатели эффективности и план сценарного сравнения стратегий. Работа носит обзорный характер; сравнительная эффективность подходов для ЛНС требует дальнейшей проверки.**

Ключевые слова: водоотведение; ливневая насосная станция; аварийное реагирование; диспетчеризация; FCFS; риск; критическая инфраструктура

I. Введение

Ливневые насосные станции отводят дождевые и талые воды с городских территорий. По мере увеличения площади городской многоэтажной застройки растёт и число ЛНС, необходимых городу. В соответствии с нормативными требованиями при проектировании ЛНС в Санкт-Петербурге расчётный показатель обеспеченности водоотведения дождевых и талых вод составляет 50–95 % [1]. На практике показатель обеспеченности 95 % означает, что заданный для расчётов объём осадков будет превышен в 5 % случаев наблюдений. Иными словами, в таких условиях системы могут не справиться с объёмом осадков, и потребуется выезд аварийной службы для включения байпасной системы или установки аварийного насоса, чтобы обеспечить водоотведение с подтопляемых территорий городской застройки. Поскольку осадки такой интенсивности охватывают не небольшую территорию, а значительную часть города, во время подобных ливней может возникать большое число отказов. Кроме того, в отличие от канализационных насосных станций (КНС), ЛНС работают не каждый день, поэтому неисправности могут оставаться незамеченными до начала дождя. Это может привести к аварийной ситуации и подтоплению территорий. В таких случаях необходима аварийная служба водоотведения.

Эффективность работы аварийной службы можно оценивать по скорости устранения аварии и экономической эффективности выезда. На экономическую составляющую влияют численность бригады, стоимость проезда до объекта (с учётом расхода топлива, который зависит от выбранного автомобиля), стоимость оборудования, необходимого для устранения аварии, а также ущерб от аварии – экономический и репутационный, если устранение затягивается и подтопляется большая территория. При этом следует учитывать и доход от выезда согласно отдельному договору на объект.

Правило FCFS (First Come, First Served) задаёт обслуживание заявок в порядке их поступления. Это правило понятно участникам, легко организуется и не требует сложных расчётов или оценки последствий. FCFS не учитывает тяжесть аварии и последствия задержки. Например, в медицине требуется учитывать тяжесть состояния пациента и допустимое время ожидания помощи; в сфере услуг приоритет клиента может зависеть от доплаты за срочность; в водоотведении необходимо учитывать экономические последствия и репутационные потери. При высокой загрузке FCFS может привести к тому, что менее опасная заявка займёт ресурсы, необходимые для устранения более срочной аварии [2].

В статье сравниваются стратегии диспетчеризации аварийных служб водоотведения и предлагается принцип перехода от FCFS к распределению работ с учётом риска. Для сравнения систематизированы методы, выбраны критерии и определены требования к дальнейшей проверке. Эмпирическое исследование не проводилось. Внедрение и практическое тестирование методов остаются следующим этапом работы.

II. Обзор литературы

В статье [3] о восстановлении работоспособности электрических сетей представлен комплексный обзор

оптимизационных моделей и алгоритмов планирования действий после аварий в распределительных электросетях. Для исследуемой области особенно важны методы маршрутизации ремонтных автомобилей с учётом многокритериальной целевой функции, основанной на иерархии критичности аварии, временных окнах, ресурсных ограничениях и оснащении конкретной аварийной бригады. Авторы отмечают, что аварии разделяются на классы по степени опасности и срочности, а для каждой аварии задаётся временное окно – интервал, в течение которого она должна быть устранена. Дополнительно необходимо учитывать вероятность выхода из строя других объектов, чтобы при появлении новой аварии бригада была готова к реагированию. В статье также рассматривается многокритериальная задача оптимизации последовательности переключений для поэтапного восстановления электроснабжения. Для ЛНС можно адаптировать функцию удовлетворённости потребителей, связав её со временем восстановления работоспособности станции, прогнозом осадков и площадью обслуживаемой территории. Дополнительно можно ввести рейтинг критичности объекта, задаваемый вручную при создании базы данных обслуживаемых станций. Значение рейтинга можно выбирать с учётом места расположения ЛНС, плотности транспортного и пешеходного потоков. Как отмечают авторы, задача восстановления электроснабжения – наиболее исследованная среди рассмотренных задач аварийного реагирования. Несмотря на это, одним из эффективных вариантов остаётся профессиональная экспертная оценка, то есть выбор на основе опыта диспетчера. Однако в нашем случае последовательность устранения аварий выбирать проще, поскольку работоспособность отдельных ЛНС не зависит друг от друга; поэтому идеи многокритериальной оптимизации можно применить и к нашей задаче.

В статье [4] авторы рассматривают моделирование догоспитальной скорой медицинской помощи и анализируют стратегии диспетчеризации на 150 методологических примерах. Среди них: Closest idle – направление ближайшей свободной машины; First in, first out (FIFO) – в системе авторов порядок выбора машин определяется временем их простоя, а не временем поступления заявок; Zone dispatching – назначение по заранее заданному плану географических зон; Priority dispatching – выбор с учётом срочности вызова и подходящего типа машины. Ближайшая свободная машина остаётся ориентиром, однако алгоритм может выбрать следующую по расстоянию, если она лучше соответствует срочности вызова и требуемой квалификации. При Expert-based dispatch стратегию выбирает диспетчер на основе профессиональной оценки. Algorithm-aided dispatch – более широкая категория, объединяющая алгоритмы очередей, марковские процессы принятия решений, машинное обучение, оценку риска, вероятности выживания и загрузки бригады. По результатам обзора авторы отмечают, что наиболее распространённым показателем эффективности остаётся время реагирования. При этом набор метрик расширяется и включает выживаемость, справедливость обслуживания, удовлетворённость, рабочую нагрузку, доступность и эффективность использования ресурсов. При адаптации этих стратегий к водоотведению медицинские показатели потребуется заменить показателями работы ЛНС и аварийных бригад.

В статье [5] аварийные бригады рассматриваются как система H-T-L (Human–Tools–Logistics, «Человек – Техника – Логистика»), в которой бригада, технологическая среда и логистика образуют единый контур управления. Для этого создаётся динамическая эргатическая модель «Человек – Техника – Логистика», в которой с помощью формул определяется показатель готовности бригады в диапазоне от 0 до 1. Для человека учитываются квалификационные допуски, навыки и компетенции, состояние усталости (на основе данных о сменах из ERP-системы), сработанность бригады и экономические показатели. Для техники учитываются исправность и техническое состояние, укомплектованность, эксплуатационные ограничения и экономические показатели. Для логистики – дорожная и транспортная обстановка, погодные условия и экономические показатели. Для модели аварийной службы водоотведения можно использовать те же группы характеристик: человек, техника и логистика. К ним следует добавить характеристики объекта – ЛНС, с которой поступила заявка об аварии.

III. Сравнение стратегий диспетчеризации

Одни методы определяют очередность заявок, другие – подходящую бригаду. На практике эти решения связаны: сначала оценивается срочность заявок, затем для выбранной заявки определяется свободная бригада с нужными навыками и оснащением. В таблице сопоставлены базовое правило FCFS и стратегии выбора заявки или бригады, рассмотренные в обзоре [4].

Для наглядного сравнения используем одинаковые критерии: принцип выбора, преимущества и ограничения каждого подхода.

ТАБЛИЦА I. Сравнение стратегий диспетчеризации

Стратегия	Принцип выбора	Преимущества	Ограничения
FCFS	Заявки рассматриваются в порядке поступления.	Простое и понятное правило; не требует дополнительных данных.	Не учитывает тяжесть аварии, последствия задержки и пригодность бригады.
Closest idle	Назначается ближайшая свободная бригада.	Может сократить путь до объекта, если у бригады есть нужные навыки и оборудование.	Ближайшая бригада может не подходить для конкретного ремонта.
FIFO по времени простоя	Выбирается машина, которая дольше остальных не выезжала.	Помогает равномернее распределять загрузку бригад.	Может увеличить расстояние до объекта и не учитывает оснащение или квалификацию.
Zone dispatching	Бригада назначается с учётом закреплённой за ней зоны.	Позволяет учитывать территориальное распределение ресурсов и особенности маршрутов.	Загрузка зон может различаться; в соседней зоне может не хватать свободной бригады.

Стратегия	Принцип выбора	Преимущества	Ограничения
Priority dispatching	Заявки упорядочиваются по срочности, а бригада выбирается с учётом оснащения и расстояния.	Связывает последствия задержки с пригодностью бригады; может применяться при ограниченном наборе данных.	Нужно определить понятные критерии срочности и поддерживать сведения о бригадах в актуальном состоянии.
Expert-based dispatch	Диспетчер оценивает заявку и возможные варианты назначения.	Можно учесть обстоятельства, которые сложно заранее описать в алгоритме.	Оценка зависит от опыта специалиста и может различаться у разных диспетчеров.
Algorithm-aided dispatch	Алгоритм или модель сопоставляет заявки и ресурсы по нескольким критериям.	Можно одновременно учитывать срочность, оснащение, время в пути и ограничения ресурсов.	Требует данных, разработки и последующей проверки модели.

Для водоотведения приоритетная диспетчеризация может стать практическим начальным вариантом: она позволяет учитывать срочность заявки, расстояние и соответствие бригады задаче. Алгоритмическую поддержку можно развивать по мере накопления данных и проверять в сравнении с более простыми правилами.

IV. Составление модели для диспетчеризации

Модель должна определять, какую заявку обслуживать первой и какую бригаду назначать на неё. Срочность относится к аварии и объекту, а готовность – к конкретной бригаде, технике и маршруту. Эти оценки нельзя смешивать: свободная и подготовленная бригада сама по себе не делает аварию более срочной, а высокий приоритет заявки ещё не означает, что ближайшая команда сможет выполнить ремонт.

Для оценки срочности заявки можно учитывать вид неисправности, интенсивность притока воды, объём осадков, свободную ёмкость резервуара и расчётное время до перелива. Дополнительно учитываются рейтинг критичности ЛНС и возможные последствия задержки. На основе этих характеристик определяется порядок рассмотрения заявок.

После этого проверяется, может ли конкретная бригада выполнить работу: есть ли у сотрудников нужные допуски и компетенции, исправны ли автомобиль и оборудование, свободна ли бригада и сколько времени займёт путь до объекта. В начальной модели оценка усталости не предусмотрена из-за ограниченности ресурсов для сбора данных; при этом готовность бригады оценивается отдельно от срочности заявки. Такой подход согласуется с разделением характеристик человека, техники, логистики и контекста инцидента в модели H-T-L [5].

Предлагаемая модель включает четыре группы характеристик: человек, ЛНС, техника и логистика. Характеристики человека определяются на основе данных ERP-системы и предыдущего опыта: квалификационные допуски (например, для работы на высоте или с электрооборудованием), навыки и компетенции (техник или инженер), сработанность бригады и экономические показатели (стоимость почасовой оплаты). ЛНС: объём осадков (по прогнозу погоды и площади, с которой вода поступает в систему), пропускная способность (м³/ч) для оценки срочности заявки, объём резервуара (м³) для оценки срочности и времени до перелива, вид поломки (отказ одного или обоих насосов, щита управления, отключение электропитания или перелив из-за большого количества осадков), экономические показатели (рейтинг критичности объекта и выплата за аварийный выезд по договору). Техника (транспорт): техническое оснащение (наличие специального оборудования), класс транспортного средства (для управления грузовым автомобилем необходимы права соответствующей категории) и экономические показатели. Логистика: время прибытия (по данным навигационной системы) и экономические показатели (затраты на топливо и амортизационные расходы) [6].

V. Критерии оценки и план моделирования

A. *Критерии оценки эффективности*

Сравнивать стратегии только по среднему времени реагирования недостаточно. В обзоре моделей догоспитальной скорой помощи время ответа названо наиболее распространённой метрикой, однако для оценки системы также рассматриваются доступность ресурсов, загрузка бригад и эффективность их использования [4]. Для ЛНС время целесообразно разделить на три интервала: от регистрации заявки до назначения бригады, от назначения до прибытия и от прибытия до окончания ремонта. Такое разделение позволит определить, на каком этапе возникают основные задержки.

Для каждой стратегии следует фиксировать среднее и медианное значения, а также 90-й процентиль времени назначения, прибытия и восстановления работоспособности. Дополнительно можно оценивать долю срочных аварий, устранённых в установленный срок, время простоя ЛНС, ожидаемый или предотвращённый ущерб, загрузку бригад, пробег и затраты на выезд. Эти показатели лучше приводить раздельно: объединять их в один итоговый коэффициент имеет смысл только после обоснования весов. При ограниченных ресурсах следует также учитывать долю необслуженных и повторных заявок. В моделях приоритетных систем массового обслуживания исследуются потери и повторные обращения, но они основаны на допущениях одноканальной системы с ограниченной очередью, поэтому напрямую переносить их результаты на аварийные бригады нельзя [2].

B. *План сравнительного моделирования*

Для количественной проверки предлагается сравнить FCFS, Closest idle, выбор по времени простоя, зональную, приоритетную, экспертную и алгоритмическую стратегии на одном наборе сценариев. Модель должна включать карту города, расположение и параметры ЛНС, поступление заявок, осадки и отказы оборудования, состав и доступность бригад, оснащение автомобилей, время ремонта и изменяющиеся условия движения. Для каждой стратегии необходимо использовать одинаковые исходные события и ограничения, в том числе квалификационные требования, наличие специального оборудования, время

в пути и доступность ресурсов. В обзоре аварийной логистики для электросетей такие ограничения рассматриваются при маршрутизации ремонтных автомобилей, планировании бригад и выборе последовательности работ [3].

Сценарии целесообразно разделить на обычную нагрузку, интенсивные осадки с несколькими одновременными авариями, дефицит бригад или специальной техники и ухудшение дорожной обстановки. Каждый вариант следует моделировать многократно, чтобы сравнение не зависело от одного случайного набора отказов. В исследовании методов планирования восстановления критической инфраструктуры подходы сравнивались на множестве сценариев повреждений по разрыву до оптимального решения и вычислительным затратам [7]. Для водоотведения можно использовать сам принцип сценарного сравнения, но набор сценариев, критерии и входные данные необходимо определять для конкретной службы. Поскольку в настоящей статье реальные данные не анализировались, численные результаты такой модели следует представлять только после отдельной проверки, а допущения сценариев описывать явно.

VI. Заключение

Приоритетная диспетчеризация позволяет связать срочность заявки с пригодностью бригады, но её эффективность для ЛНС ещё предстоит проверить. Следующий этап — сравнение стратегий в цифровой модели с учётом ограничений аварийной службы. Для моделирования потребуются карта города, расположение ЛНС с их параметрами, вероятностные модели изменения погоды и отказов различных компонентов оборудования, а также база данных о персонале, технике и договорах для экономических расчётов. Экономическая оценка должна учитывать затраты на внедрение и окупаемость выбранной стратегии для конкретной компании.

Список литературы

[1] СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения: актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85.

[2] Заяц О.И., Кореневская М.М., Ильяшенко А.С., Мулюха В.А. Система массового обслуживания с абсолютным приоритетом, вероятностным выталкивающим механизмом и повторными заявками // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23, № 2. С. 325–351. DOI: 10.15622/ia.23.2.1.

[3] Perrier N., Agard B., Baptiste P., Frayret J.-M., Langevin A., Pellerin R., Riopel D., Trépanier M. A survey of models and algorithms for emergency response logistics in electric distribution systems. Part II: Contingency planning level // Computers & Operations Research. 2013. Vol. 40. P. 1907–1922. DOI: 10.1016/j.cor.2012.09.009.

[4] Zahorka F., Strauss C., Schmid M., Wallentin G., Dahlmann P. Modeling IN out-of-hospital emergency medical services—a scoping review of approaches and applications // Frontiers in Public Health. 2026. Vol. 14. Art. 1825916. DOI: 10.3389/fpubh.2026.1825916.

[5] Комарова Л.А., Судаков В.А., Тимошенко А.В., Мацеевич С.В. Оценка готовности оперативно-выездных бригад к ликвидации аварии в энергосетевых компаниях // Труды ИСА РАН. 2026. Т. 76, № 1. С. 3–14. DOI: 10.14357/20790279260101.

[6] Шарипов Г.А., Гарелина С.А., Скрынников А.Ю. Методика динамического распределения сил ликвидации чрезвычайных ситуаций между объектами проведения аварийно-спасательных и неотложных работ // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2026. № 5–6. С. 78–86. DOI: 10.53816/23061456_2026_5-6_78.

[7] Xu M., Ouyang M., Mao Z., Xu X. Improving repair sequence scheduling methods for postdisaster critical infrastructure systems // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2019. Vol. 34. P. 506–522. DOI: 10.1111/mice.12435.