

УДК 620.92:004.9

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЗАПОЛНЕННОСТИ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



С.Н. Резаи Вахид

*Докторант кафедры компьютерных технологий
Азербайджанского технического университета
sonay.rv@gmail.com*

С.Н. Резаи Вахид

С отличием окончила бакалавриат и магистратуру Азербайджанского государственного экономического университета (UNEC) по направлениям информационных технологий и телекоммуникационных систем. В настоящее время – докторант Азербайджанского технического университета (AzTU) по направлению «Системный анализ, управление и обработка информации». Область научных интересов связана с исследованием IoT, Cloud-технологий, Big Data, разработкой Smart-систем и алгоритмов интеллектуального управления. Свой научно-практический опыт успешно реализует в педагогической деятельности, участвуя в подготовке специалистов в области информационных технологий в UNEC, AzTU и Азербайджанском государственном университете нефти и промышленности.

Аннотация. В данной статье дается обзор того, каким образом прогнозная аналитика занятости помещений (predictive occupancy analytics, POA), основанная на больших данных, позволяет решать проблемы, связанные с применением энергоэффективного климат-контроля в учреждениях высшего образования. Используя иерархическую модель слияния данных из нескольких источников, автор предлагает интеграцию детерминированных данных из официальных расписаний занятий, статистических коэффициентов посещаемости и оперативных данных в реальном времени, поступающих от сенсорных сетей, для достижения оптимального компромисса между точностью прогнозирования и затратами на внедрение системы.

Ключевые слова: Big Data, прогнозная аналитика, энергоэффективность, HVAC, датчики CO₂, академическое расписание

Введение. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) потребляют наибольшее количество энергии в университетских зданиях. Традиционные стратегии управления обычно основывались либо на фиксированных расписаниях, либо на проектной вместимости аудиторий.

Однако такие схемы управления не учитывают фактический уровень посещаемости, вследствие чего значительные объемы ресурсов расходуются впустую.

Исследования показали, что точное прогнозирование занятости помещений потенциально может сократить энергопотребление систем HVAC до 42% [1].

Традиционные методы управления, использующие статические расписания или номинальную вместимость помещений, приводят к значительным потерям ресурсов. С появлением новых методов глубокого обучения, применяемых к управлению микроклиматом в реальном времени, появилась возможность оптимизировать потребление энергии, одновременно сохраняя комфорт пользователей [2].

Характерной особенностью университетской среды являются сильно изменяющиеся профили загрузки (например, лекции, перерывы, экзаменационные периоды). Поэтому использование управления на основе фиксированных расписаний, как правило, оказывается неэффективным.

С другой стороны, установка большого количества плотных сенсорных сетей (датчиков присутствия) во всех аудиториях может быть экономически нецелесообразной.

Вследствие этого эффективное использование аналитики больших данных (Big Data), создаваемой существующей университетской инфраструктурой, представляет собой жизнеспособную альтернативу.

Методы и источники данных для точной прогностической модели в условиях университета. Для построения точной прогностической модели в университете потребуется изучить три различных типа данных:

1) Детерминированные данные (расписание). Это «идеальное» количество студентов, посещающих лекции согласно расписанию. Как известно, обычно занятия посещают от 25 до 40 % зарегистрированных студентов [3].

2) Статистические данные. Исторические данные могут быть использованы для определения коэффициентов посещаемости (Attendance Ratio) путем выявления зависимости количества студентов, присутствующих на занятиях, от времени недели, характера занятия (лекция или лабораторная работа) и периода в семестре [4].

3) Данные в реальном времени. Датчики для измерения концентрации углекислого газа позволяют быстро обнаружить расхождения между фактическим использованием помещений и планом. Например, современные адаптивные методы (DA-HOC), использующие данные датчиков CO₂ в реальном времени, могут обеспечить высокоточные оценки количества людей, находящихся в пространстве, используя лишь минимальный объем обучающих данных (один день). Это крайне важно для быстрого развертывания таких систем в различных помещениях университетов [5].

Предлагаемая гибридная модель (Multi-source Fusion). Для снижения погрешностей в прогнозах была предложена иерархическая модель слияния данных из нескольких источников (multi-source fusion).

Концепция автора предполагает гибридный подход, заключающийся в последовательном уточнении плановых переменных данными из различных областей: жестких академических расписаний и гибких данных с датчиков в реальном времени.

Основная идея этой модели заключается в присвоении приоритетов источникам данных в зависимости от периода планирования и задержки в получении информации. Логическую основу модели составляет итерационный процесс послойной коррекции.

Пример иерархической структуры показан на рисунке 1.

Описанная система состоит из трех уровней, которые взаимодействуют между собой для обеспечения максимальной точности при принятии управленческих решений:

Уровень 1 – Детерминированный (плановый): На первом уровне в качестве входных данных используется расписание курсов для формирования базового прогноза.

Этот уровень генерирует данные о тепловых нагрузках на периоды от нескольких дней до недель. По сравнению с традиционными подходами, Эрикссон и соавторы (2014) показали, что этот метод позволяет экономить 42% энергии и более [1].

Как отмечалось выше, главным недостатком первого уровня является допущение о 100-процентной посещаемости занятий, из-за чего оценочные нагрузки оказываются завышенными на 20–40%.

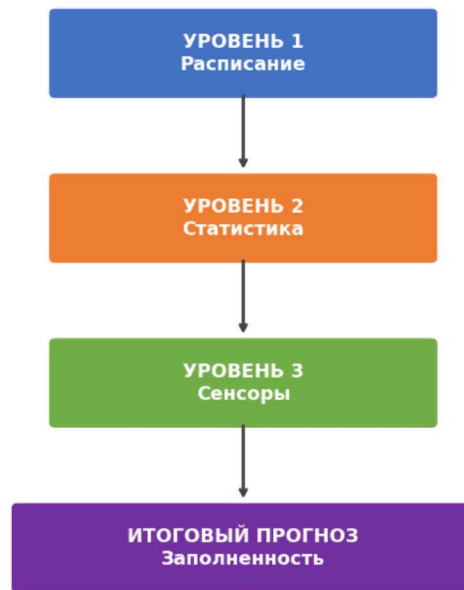


Рисунок 1. Иерархическая модель прогнозирования заполненности (Multi-source Fusion)

Уровень 2 – Вероятностный (корректирующий): На втором уровне к плановым значениям применяются статистические коэффициенты посещаемости.

Модель также учитывает дополнительные контекстуальные факторы, такие как общая тенденция к снижению посещаемости лекций [3] и влияние временных интервалов на присутствие студентов [4], Келли (2012). Например, использование моделей искусственного интеллекта на втором уровне позволило достичь точности прогнозов 96% и выше, что значительно снизило эксплуатационные расходы [6].

Уровень 3 – Оперативный (реальное время): Окончательные корректировки вносятся с помощью сенсорных систем. Было доказано, что современные адаптивные алгоритмы, использующие всего один датчик, способны выдавать точные данные о количестве присутствующих людей даже при обучении на очень ограниченном объеме данных [5]. Таким образом, этот уровень компенсирует незапланированные изменения. Оптимальные результаты достигаются при слиянии данных с датчиков и данных об окружающей среде (например, Wi-Fi) для обеспечения стабильности долгосрочного прогнозирования [7]. Иерархическая логика присваивает измерения в реальном времени наивысший приоритет. Чжан и Конг (2025) доказали успех такого подхода, продемонстрировав точность обнаружения 99,8% при использовании глубоких нейронных сетей [2].

Преимущество такой структуры заключается в ее отказоустойчивости (способности к «плавной деградации»). Использование архитектур на базе трансформеров на оперативном уровне дополнительно позволяет выявлять сложные поведенческие паттерны пользователей университета, что повышает точность краткосрочного прогнозирования [8].

Результаты и обсуждение. В данном исследовании была проведена оценка того, способна ли гибридная методика оценки уровней занятости помещений устранить некоторые наиболее значимые ограничения, существующие в этой области. Стоимость и ценность. Основным преимуществом предложенной модели является её экономическая целесообразность. Система использует уже имеющуюся в университете информацию о расписании, поэтому сбор и обработка этих данных не сопряжены с дополнительными расходами. Кроме того, датчики CO₂ относительно недороги по сравнению с другими технологиями. Таким образом, отпадает необходимость в системах видеонаблюдения и/или

продвинутых счетчиках посетителей, что делает финансовый барьер для внедрения такой технологии очень низким – это особенно важно, учитывая бюджетные ограничения многих университетов на модернизацию инженерных систем.

Защита персональных данных. Защита личных данных является одной из главных проблем современных образовательных учреждений. Методология на основе датчиков CO₂, использованная в данном проекте, не фиксирует идентификацию личности или траектории перемещения, а также не собирает никакие формы персонально идентифицируемой информации. Следовательно, для внедрения системы не требуется получение информированного согласия преподавателей и студентов, а сама методика соответствует всем применимым законам о защите персональных данных. Кроме того, отсутствие проблем с соблюдением нормативных требований значительно упростит регуляторные и административные барьеры, связанные с развертыванием такой системы.

Отказоустойчивая конструкция. Еще одним преимуществом предложенной иерархической структуры является её способность к «плавной деградации» (graceful degradation) в случае отказа датчика или временного отсутствия данных в реальном времени.

При сбое оборудования или недоступности оперативной информации система переходит на 1-й и 2-й уровни иерархии, которые используют статистические поправки для уточнения фактического расписания. Хотя качество прогнозов в такие периоды может быть незначительно снижено, базовый уровень экономии энергии всё равно будет достигнут.

Заключение. Исследование показало, что использование гибридного метода анализа больших данных в университете является логичным и научно обоснованным решением. Использование трех различных уровней данных – детерминированного расписания, статистических показателей посещаемости и данных с датчиков в реальном времени – позволяет с высокой точностью прогнозировать занятость помещений, обеспечивая тем самым оптимальное управление системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC).

Кроме того, предложенная модель не только обеспечивает существенное снижение затрат на электроэнергию, но и отвечает требованиям социальной приемлемости в отношении конфиденциальности данных участников образовательного процесса.

Разработка подобных интеллектуальных систем управления является необходимым шагом на пути к созданию «умного и зеленого» университета – учебного заведения, которое рационально использует ресурсы, сводя к минимуму воздействие на окружающую среду и создавая для студентов образовательную среду, способствующую устойчивому развитию будущих поколений.

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на расширении предложенной модели путем включения других потенциальных источников данных (например, прогнозов погоды, мероприятий в кампусе и т. д.), а также на пилотном тестировании модели в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

- [1] Erickson, V.L. Occupancy Modeling and Prediction for Building Energy Management / V.L. Erickson, M.Á. Carreira-Perpiñán, A.E. Cerpa // ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN). – 2014. – № 10. – PP. 1–28.
- [2] Zhang, S. Deep learning and multi-objective optimization for real-time occupancy-based energy control in smart buildings / S. Zhang, C. Kong // Scientific Reports. – 2025. – № 15.
- [3] Doggrel, S.A. Quantitative study of lecture attendance and the association between this attendance and academic outcomes for nursing and nonnursing students in an introductory pathophysiology course / S.A. Doggrel // Advances in physiology education. – 2021. – № 45(4). – PP. 651–660.
- [4] Kelly, G.E. Lecture attendance rates at university and related factors / G.E. Kelly // Journal of Further and Higher Education. – 2012. – № 36. – PP. 17–40.
- [5] Arief-Ang, I.B. DA-HOC: semi-supervised domain adaptation for room occupancy prediction using CO₂ sensor data / I.B. Arief-Ang, F.D. Salim, M. Hamilton // Proceedings of the 4th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments. – 2017.

[6] Yang, Z. A systematic approach to occupancy modeling in ambient sensor-rich buildings / Z. Yang, N. Li, B. Becerik-Gerber, M.D. Orosz // SIMULATION. – 2014. – № 90. – PP. 960–977.

[7] Wang, W. Occupancy prediction through machine learning and data fusion of environmental sensing and Wi-Fi sensing in buildings / W. Wang, J. Chen, T. Hong // Automation in Construction. – 2018.

[8] Yu, Y. Prediction of campus office occupancy and AC behavior based on Transformer and the collective impact on energy consumption / Y. Yu, L. Liu, X. Wang, [et al.] // Building Simulation. – 2025. – № 18. – PP. 3275–3294.

Авторский вклад

Резаи Вахид Сонай Надер кзы – постановка задачи исследования и разработка методологии, сбор и анализ данных о посещаемости и показаниях сенсоров, разработка гибридной модели прогнозирования на основе Big Data, подготовка текста статьи и формулировка выводов.

A HYBRID APPROACH TO OCCUPANCY PREDICTION FOR ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION IN HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

S.N. Rezai Vahid

*Ph.D. Student at the Department of Computer Technologies,
Azerbaijan Technical University*

Abstract. This article provides an overview of how big data-driven Predictive Occupancy Analytics (POA) can address the challenges associated with implementing energy-efficient climate control in higher education institutions. Utilizing a hierarchical multi-source data fusion model, the author proposes the integration of deterministic data from official academic schedules, statistical attendance ratios, and real-time operational data from sensor networks to achieve an optimal trade-off between forecasting accuracy and system implementation costs.

Keywords: Big Data, predictive analytics, energy efficiency, HVAC, CO₂ sensors, academic scheduling.