

ЦИФРОВАЯ УРБАНИСТИКА

УДК 621.311:504.062:004.94

Научная статья

Артем Геннадьевич Щербаков ✉

магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: artem.shcherbakov01@gmail.com

Данила Сергеевич Парыгин

канд. техн. наук, доцент, зав. каф. цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: dparygin@gmail.com

Артем Дмитриевич Чикин

магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: artyom.chikin@gmail.com

Ярослав Анатольевич Трудов

магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400005, Волгоград, пр. Ленина, 28;
e-mail: TrudovYaroslav@yandex.ru

Ренат Рустемович Бикмухамедов

магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400005, Волгоград, пр. Ленина, 28;
e-mail: bikmukhamedov.renat@gmail.com

МЕТОДИКА ГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ¹

В статье рассмотрена методика генеративного проектирования объектов городской инфраструктуры на примере общеобразовательных учреждений с использованием онтологического инжиниринга. Генеративное проектирование объектов городской инфраструктуры является инновационным подходом к созданию эффективных и оптимальных решений в области городского плани-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта 45/558-23.

рования. Предлагаемая методика первоначально определяет требования и цели создания объектов. Далее вводятся этапы разработки онтологической модели, которая описывает основные понятия, такие как типы объектов, классы, территорию и инфраструктуру, а также связи между ними. Нормативная документация по проектированию определенных объектов позволяет создать строго формализованную модель, отражающую действующие условия и правила создания городской инфраструктуры. На заключительном этапе методики вводятся генеративные алгоритмы, которые позволяют автоматизировать проектирование новых объектов инфраструктуры на основе заданных параметров и правил из онтологической модели. Такие алгоритмы, например, позволяют генерировать планы школьных зданий и расположение учебных помещений, учитывая тип школы и численность учеников. Процесс генеративного проектирования объектов городской инфраструктуры с применением онтологического инжиниринга включает оптимизацию и оценку созданных решений. Предложенная методика является итеративным процессом, позволяющим вносить изменения и улучшать модели и алгоритмы на основе полученных результатов и обратной связи. Рассмотренный в статье пример общеобразовательных учреждений свидетельствует об эффективности такого подхода, учитывающего различные факторы и ограничения, а также оптимизирующего использование ресурсов и пространства.

Ключевые слова: онтологии, общеобразовательные учреждения, онтологический инжиниринг, градостроительство, генеративное проектирование.

Для цитирования: Методика генеративного проектирования объектов городской инфраструктуры на основе онтологических моделей / А. Г. Щербаков, Д. С. Парыгин, А. Д. Чикин, Я. А. Трудов, Р. Р. Бикмухамедов // Социология города. 2023. № 4. С. 53—64. DOI: 10.35211/19943520_2023_4_53

Введение

В современном мире городская инфраструктура играет ключевую роль в обеспечении комфортной и безопасной жизни горожан. Однако, с увеличением населения и развитием технологий, возникает необходимость в более эффективных методах проектирования и управления объектами городской инфраструктуры. В этом контексте, методика генеративного проектирования на основе онтологических моделей представляет собой перспективный подход, позволяющий создавать инновационные и оптимальные решения.

Онтологические модели² – это формальные описания знаний о предметной области, которые позволяют структурировать информацию и устанавливать связи между различными элементами системы. Генеративное проектирование (также называемый генеративным дизайном)³, в свою очередь, основывается на использовании алгоритмов и компьютерных программ для автоматического создания различных вариантов проектных решений.

² Основы онтологических моделей: понятное объяснение и примеры для лучшего понимания // Научные Статьи.Ру URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/ontologicheskie-modeli-predstavleniya-znaniy/> (дата обращения: 12.11.2023).

³ Генеративное проектирование // autodesk URL: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/RUS/?guid=GUID-A2EC3302-CB0E-4648-A3A5-6EE0119119CD> (дата обращения: 12.11.2023).

Применение методик генеративного проектирования на основе онтологических моделей в области городской инфраструктуры позволяет достичь нескольких преимуществ. Во-первых, такой подход позволяет учесть множество факторов, влияющих на проектирование объектов, таких как географическое положение, климатические условия, транспортная доступность и другие. Во-вторых, генеративный дизайн позволяет автоматизировать процесс создания проектных решений, что значительно сокращает временные и финансовые затраты. Кроме того, методика генеративного проектирования на основе онтологических моделей способствует интеграции различных видов инфраструктуры и оптимизации их взаимодействия. Это позволяет создавать более устойчивые и эффективные элементы градостроительной системы, способные адаптироваться к изменяющимся потребностям и вызовам современного города.

Синергия между генеративным проектированием и онтологическими моделями предлагает новый способ не только концептуализации и разработки городской инфраструктуры, но и оптимизации ее производительности и функциональности. Используя знания, заложенные в онтологических моделях, генеративный дизайн может предоставить проектировщикам и градостроителям мощный инструмент для систематического изучения, оценки и доработки проектных решений, учитывающих контекстуальные особенности городской среды.

Анализ современных подходов к генеративному дизайну

Впервые термин «генеративный дизайн» был введен в 1960-х годах с появлением первых компьютеров, тогда эта технология применялась для решения разнообразных творческих задач, таких как создание графики, анимации и эстетических объектов. Современные подходы к генеративному проектированию получили значительный скачок благодаря развитию вычислительных возможностей компьютеров, аналитики данных и искусственного интеллекта (ИИ). Это развитие произвело революцию в области концептуального проектирования, разработки и оптимизации различных продуктов и систем, архитектуры, дизайна продуктов, городского планирования и других областях. Ниже представлены подходы к генеративному дизайну:

1. Одним из основных подходов к генеративному дизайну является использование эволюционных алгоритмов. Эти алгоритмы основываются на принципах естественного отбора и мутации, позволяя создавать новые варианты проектных решений на основе определенных критериев и ограничений. Эволюционные алгоритмы позволяют достичь высокой степени вариативности и оптимальности проектных решений (Hoda, 2020).

2. Другим распространенным подходом является использование генетических алгоритмов. Эти алгоритмы также основаны на принципах естественного отбора, но включают в себя дополнительные операции, такие как скрещивание и мутация, для создания новых комбинаций генетического материала. Генетические алгоритмы позволяют исследовать большие пространства проектных решений и находить оптимальные варианты (Gradišar et al., 2022).

3. Еще одним подходом к генеративному дизайну является использование нейронных сетей. Нейронные сети могут обучаться на больших объемах данных и выявлять сложные зависимости между входными и выходными па-

раметрами проектных решений. Это позволяет создавать новые и инновационные варианты дизайна, основываясь на предшествующем опыте и знаниях (Chao et al., 2022).

Кроме того, современные подходы к генеративному дизайну включают использование алгоритмов машинного обучения, эволюционных стратегий, случайных процессов и других методов. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и ограничения, и выбор конкретного подхода зависит от целей и задач проектирования.

Генеративное проектирование является мощным инструментом, который находит применение во множестве областей. Его гибкость и способность создавать вариативные и оптимальные решения делают его ценным инструментом для различных профессиональных сфер. Так генеративный дизайн находит широкое применение в следующих областях:

1. Генеративное проектирование используется в дизайне продуктов, он позволяет создавать уникальные и инновационные предметы, оптимизированные для определенных потребностей и требований. Он может использоваться для создания сложных форм, оптимизации структуры и функциональности изделий, а также для генерации новых идей и концепций, например, генеративный дизайн использовался для разработки держателя для гитары (Shrestha et al., 2021).

2. Генеративный дизайн стал важным инструментом для художников и дизайнеров, позволяющим создавать уникальные и интерактивные произведения искусства. Он открывает новые возможности для экспериментов с формой, цветом и текстурой, а также позволяет взаимодействовать со зрителем или пользователями (McCormack et al., 2004).

3. Генеративные модели ИИ могут помочь медицинским работникам в диагностике и прогнозировании заболеваний, что приведет к их более раннему выявлению и персонализированным стратегиям лечения и также может помочь при проектировании имплантов и искусственных частей тела⁴. Эта технология также может кардинально изменить процесс поиска лекарств, предсказывая потенциальных кандидатов в лекарственные препараты с более высокой вероятностью эффективности и безопасности. Это может ускорить разработку новых методов терапии и лечения⁵.

4. В области космонавтики генеративный дизайн используется для разработки легких и прочных материалов для конструкций космических аппаратов, двигателей и других компонентов, требующих высокой производительности и долговечности. Генеративный дизайн также позволяет создавать индивидуальные детали, что способствует снижению массы и веса, а также повышению общей эффективности (Watson et al., 2023).

5. Генеративный дизайн в архитектуре используется для создания инновационных и эффективных архитектурных решений, учитывая различные

⁴ Generative Design technique harnessed for medical devices // Med-Tech Innovation URL: <https://www.med-technews.com/news/medtech-materials-and-assembly-news/generative-design-technique-harnessed-for-medical-devices/> (дата обращения: 12.11.2023).

⁵ The impact of generative AI on medical devices // Medical Device Network URL: <https://www.medicaldevice-network.com/comment/impact-generative-ai-medical-devices/> (дата обращения: 12.11.2023).

факторы, такие как функциональные требования, эстетические предпочтения, аспекты экологичности и устойчивости, а также технические ограничения (Пахтаева, Родионова, 2021). Этот подход позволяет архитекторам делегировать часть процессов проектирования компьютерным технологиям и платформам. Вместо того, чтобы искать решение поставленной задачи напрямую, архитекторы описывают параметры и ограничения проекта программе, после чего программа может создать различные варианты решений, формируя видение продукта (Mukkavaara, Sandberg, 2020).

6. В градостроительстве генеративный дизайн применяется для размещения инфраструктуры, объектов городской среды, образовательных и медицинских учреждений и оптимизации городского пространства⁶. За счет учета входных параметров и ограничений, характерных для городской среды, алгоритмы генеративного проектирования позволяют генерировать и итерационно перебирать многочисленные варианты дизайна с учетом таких факторов, как экологичность, пространственная эффективность, транспортные потоки и использование общественных пространств (Feifeng et al., 2023; Лаушкина, Басов, 2021). Также исторически сложившиеся городские пространства можно построить с использованием генеративного дизайна, задав паттерн проектирования этих районов (Yang, 2023).

Рассмотрим далее применение генеративного дизайна и онтологического подхода в синергии. Анализ этих технологий в совокупности способствует улучшению разрабатываемого подхода и оценке уже существующих:

1. Разделение знаний в предметной области и их возможного практического использования является важным достижением семантических технологий, поскольку оно предоставляет доступ к большому объему знаний, охватывающему различные аспекты и процессы в отдельных объектах инфраструктуры и городах в целом, которые кодифицируются в формальные онтологии, а генеративные вычисления могут повысить точность, эффективность и креативность пространственной планировки при проектировании и планировании (Сапераго, 2022).

2. Существует подход к представлению компонентов встроеного программного обеспечения с помощью расширенных диаграмм функций (EFD). EFD – это расширение традиционных диаграмм признаков (FD) для явного представления изменчивости предметной области, обогащенное контекстуализацией и онтологией предметной области, что позволяет преобразовать модели функций, описанные с помощью EFD, в спецификации генеративных компонентов, закодированные с использованием методов метапрограммирования для встраиваемого программного обеспечения (Stuikys, Damaševičius, 2008).

3. Проектирование города является сложным процессом, поскольку в нем принимают участие множество стейкхолдеров: от жителей до архитекторов и урбанистов. Наличие значительного числа заинтересованных сторон, имеющих собственное видение конечного результата, требует предложения и перебора значительного количества возможных вариантов. Однако для взвешенной оценки такие варианты должны проходить формальные проверки на

⁶ Генеративный дизайн для городского планирования // isicad URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20197 (дата обращения: 13.11.2023).

Генеративное проектирование городской инфраструктуры на основе онтологических моделей

соответствие нормативам, или изначально формироваться с их учетом, что и может быть достигнуто с применением онтологического инжиниринга (Métral et al., 2007).

В следующей главе будет подробнее рассмотрено применение генеративного проектирования объектов с применением онтологического инжиниринга на примере общеобразовательных учреждений.

Представление методики генеративного проектирования объектов городской инфраструктуры на примере общеобразовательных учреждений

Методика генеративного проектирования объектов городской инфраструктуры, особенно в применении к сфере общеобразовательных учреждений с использованием онтологического инжиниринга, представляет собой сложный процесс, использующий возможности вычислений, искусственного интеллекта и знаний в конкретной области.

1. Если рассматривать этапы построения онтологической модели, то первым шагом необходимо четко выделить предметную область и рассмотреть существующую в ней нормативную документацию. Так при создании используемой в качестве примера онтологической модели применялись своды правил (СП) СП 251.1325800.2016 «Здания общеобразовательных организаций. Правила проектирования» и СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

2. Следующим шагом является структуризация знаний из нормативной документации в машиночитаемый вид и создание онтологической модели. Основной принцип создания онтологии заключается в разбиении информации на логические классы и связи между ними. Онтология состоит из следующих элементов (Горлов, 2022):

1) экземпляры — это основные компоненты онтологии. Экземпляры представляют собой физические и абстрактные объекты предметной области. К таковым относятся люди, дома, улицы, числа, слова и т. д.;

2) понятия — представляют собой абстрактные группы, включающие в себя экземпляры, другие классы, либо сочетания этих объектов;

3) атрибуты — объекты в онтологии могут иметь атрибуты. Каждый атрибут имеет свое имя и значение. Например, объект «Школа» имеет такие атрибуты, как номер, помещение, кабинеты, территорию и т. д.;

4) отношения — атрибут, значением которого является другой объект. В онтологии общеобразовательных учреждений присутствует два объекта — «Кабинет информатики» и «Кабинет». Кабинет информатики наследует атрибуты объекта кабинет (номер кабинета, тип, расположение на этаже и т. д.).

Было выделено 4 сущности: «Школа», «Парковки», «Инфраструктура», «Инсоляция». В каждой сущности расписаны связи и правила между ними, отражающие требования общеобразовательных учреждений. К ним можно отнести такие элементы, как оптимальные размеры классных комнат, наличие зеленых насаждений, транспортная доступность, расстояние до парковок, оптимальное время инсоляции и т.д. Все связи между сущностями и экземплярами класса представлены на онтографе (рис. 1). В качестве среды реализации проекта и составления онтологии была выбрана программа «Protégé», имеющая свободную лицензию.

Генеративное проектирование городской инфраструктуры на основе онтологических моделей

сложные логические связи между данными и утверждениями. Например, возможно составить правило, задающее предельно допустимое значение согласно СП: если школа имеет расстояние до открытой парковки на 11—50 мест меньше, чем 25, то принять уровень этого расстояния недостаточным.

Пример SWRL-правила представлен в формуле ниже:

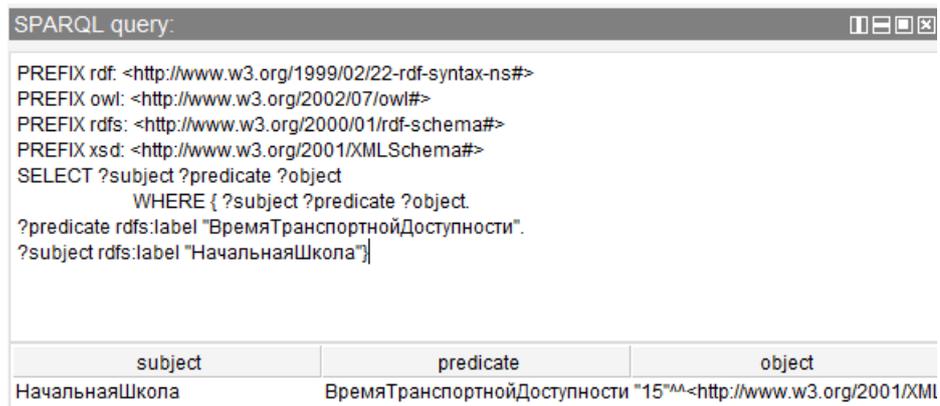
$$\text{school}(?x)^{\text{hasNumberOfParkingSpaces}}(?y, "11 - 50")^{\text{hasDistance}}(?x, ?y)^{\text{swrlb:lessThan}}(?y, 25) \rightarrow \text{hasDistanceLevel}(?x, "inadequate")$$


Рис. 3. Пример SPARQL запроса на время транспортной доступности для начальной школы

5. Следующим шагом является генеративное проектирование объектов городской инфраструктуры на примере общеобразовательных учреждений с применением онтологической модели. Перед самой генерацией необходимо выделить входные параметра:

- 1) тип учебного заведения — это может быть начальная школа или средняя школа;
- 2) размер — количество учеников, что влияет на количество классов и комнат, а также на площадь здания;
- 3) спецификация здания — количество и распределение классов, лабораторий, библиотек, спортивных залов, столовых, туалетов, актовых залов, подсобных помещений;
- 4) доступность и безопасность — параметры, связанные с доступностью для людей с ограниченными возможностями и безопасностью здания;
- 5) ситуационные характеристики — местоположение, климатические условия, зонирование и доступность инфраструктуры транспорта.

На основе этих входных параметров, алгоритм обращается к онтологической модели для выявления знаний, правил и количественных характеристик. На основе этих знаний и правил проектируется множество моделей, оптимально удовлетворяющих заданным условиям.

Таким образом, методология генеративного проектирования объектов городской инфраструктуры, в частности общеобразовательных учреждений, с использованием онтологического инжиниринга позволяет создавать уникальные, эффективные и инновационные проектные решения.

Заключение

Представленная в исследовании методика является перспективным подходом к созданию эффективных и оптимальных решений в области городского планирования, в частности, для общеобразовательных учреждений. С использованием онтологической модели и правил проектирования были разработаны генеративные алгоритмы, позволяющие генерировать новые объекты городской инфраструктуры на основе заданных параметров. Это позволяет создавать планы школьных зданий и располагать учебные помещения с учетом типа школы и численности учеников, учитывая различные факторы и ограничения, а также оптимизирует использование ресурсов и пространства и автоматизирует процесс проектирования.

В дальнейших исследованиях предполагается автоматизация выгрузки ГИС-данных, а также создания онтологической модели по нормативной документации с применением машинного обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Горлов Д. А., Раиевский Н.М., Дятлов К. А., Залинян А. К., Щербаков А. Г. Применение онтологической модели представления знаний в проектировании архитектурных объектов // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 6(61). С. 22—25.

Лаушкина А. А., Басов О. О. Применение методов генеративного дизайна с использованием мультимодальных данных в сфере архитектуры и градостроительства // Научный результат. Информационные технологии. 2021. Т. 6. № 3. С. 3—10.

Матохина А. В., Садовникова Н. П., Парыгин Д. С., Гнедкова Е. П. Разработка онтологии для интеллектуальной системы поддержки принятия решений в задачах управления развитием города // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». 2015. № 14(178). С. 69—74.

Пахтаева А. Я., Родионова Ю. В. Методы генеративного дизайна // Ноэма. 2021. №2. С. 213—221.

Раиевский Н. М., Щербаков А. Г., Чикин А. Д. О применении онтологического инжиниринга при реализации технологий информационного моделирования в строительстве // Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», Тамбов, 17—21 мая 2023 г. 2023. С. 99—101.

Caneparo L. Semantic knowledge in generation of 3D layouts for decision-making // Automation in Construction. 2022. Vol. 134. P. 104012. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104012.

Chao Q., Ren K. T., Wenjing Y. An adaptive artificial neural network-based generative design method for layout designs // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 184. P. 122313.

Feifeng J., Jun M., Christopher J. W., Alain J.F. Chiaradia, Yulun Z., Zhan Z., Xiaohu Z. Generative urban design: A systematic review on problem formulation, design generation, and decision-making // Progress in Planning. 2023. P. 100795. DOI: 10.1016/j.progress.2023.100795.

Gradišar L., Klinc R., Turk Ž., Dolenc M. Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies // Buildings. 2022. Vol. 12. P. 2194.

Hoda E. T. The application of evolutionary, generative, and hybrid approaches in architecture design optimization // Journal of Faculty of Architecture. 2020. Vol. 2. № 2. Pp. 1—20.

McCormack J., Dorin A., Innocent T. Generative Design: A Paradigm for Design Research // Futureground — DRS International Conference. 2004, 17-21 November, Melbourne, Australia. URL: <https://dl.designresearchsociety.org/drs-conference-papers/drs2004/researchpapers/171/> Accessed: 13.11.2023.

Métral C., Falquet G., Vonlanthen M. An Ontology-based Model for Urban Planning Communication // Ontologies for Urban Development. 2007. Studies in Computational Intelligence, Vol 61. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-71976-2_6.

Mukkavaara J., Sandberg M. Architectural Design Exploration Using Generative Design: Framework Development and Case Study of a Residential Block // Buildings. 2020. Vol. 10. 201.

Rashevskiy N., Parygin D., Shcherbakov A., Shlyannikov N., Shlyannikov V. Using Generative Design Technologies to Create Park Area Layouts for Urban Improvement // Communications in Computer and Information Science. 2023. Vol. 1909. P. 549—567.

Shrestha P., Timalina D., Bista S., Shrestha B., Shakya T. Generative design approach for product development // AIP Conference Proceedings. 2021. 2397. 020008.

Stuikys V., Damaševičius R. Design of ontology-based generative components using enriched feature diagrams and meta-programming // Information technology and control. 2008. Vol. 37.

Watson, M., Leary, M., Downing, D., Brandt M. Generative design of space frames for additive manufacturing technology // Int J Adv Manuf Technol. 2023. Vol. 127. Pp. 4619—4639.

Yang L., Li J., Chang H.-T., Zhao Z., Ma H., Zhou L. A Generative Urban Space Design Method Based on Shape Grammar and Urban Induction Patterns // Land. 2023. Vol. 12. No. 6. P. 1167.

Research Article

Artem G. Shcherbakov✉

Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: artem.shcherbakov01@gmail.com

Danila S. Parygin

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: dparygin@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8834-5748

Artyom D. Chikin

Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: artyom.chikin@gmail.com

Yaroslav A. Trudov

Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenina Ave., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: TrudovYaroslav@yandex.ru

Renat R. Bikmukhamedov

Master's Degree student, Volgograd State Technical University. 28, Lenina Ave., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: bikmukhamedov.renat@gmail.com

METHODOLOGY OF GENERATIVE DESIGN OF URBAN INFRASTRUCTURE OBJECTS ON THE BASIS OF ONTOLOGICAL MODELS⁷

Abstract. The article considers the methodology of generative design of urban infrastructure objects on the example of general educational institutions using ontology engineering. Generative design of urban infrastructure objects is an innovative approach to the creation of effective and optimal solutions in the field of urban planning. The proposed methodology initially defines the requirements and goals of facilities creation. Then the steps of developing an ontology model that describes the basic concepts such as object types, classes, territory and infrastructure, as well as the relationships between them are introduced. The normative documentation for the design of certain objects allows the creation of a strictly formalized model that reflects the current conditions and rules for the creation of urban infrastructure. At the final stage of the methodology, generative algorithms are introduced that allow to automate the design of new infrastructure objects based on the specified parameters and rules from the ontological model. Such algorithms, for example, allow generating school building plans and the location of classrooms, taking into account the type of school and the number of students. The process of generative design of urban infrastructure objects using ontology engineering includes optimization and evaluation of the created solutions. The proposed methodology is an iterative process that allows to modify and improve models and algorithms based on the results and feedback. The case study of general education institutions considered in the article demonstrates the effectiveness of such an approach, which takes into account various factors and constraints, and optimizes the use of resources and space.

Key words: ontologies, general education institutions, ontology engineering, urban planning, generative design.

For citation: Shcherbakov A. G., Parygin D. S., Chikin A. D., Trudov Ya. A., Bikmukhamedov R. R. (2023) Methodology of generative design of urban infrastructure objects on the basis of ontological models. *Sotsiologiya Goroda* [Urban Sociology], no. 4, pp. 53—64 (in Russian). DOI: 10.35211/19943520_2023_4_53

REFERENCES

- Caneparo L. (2022) Semantic knowledge in generation of 3D layouts for decision-making. *Automation in Construction*, vol. 134, p. 104012. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104012.
- Chao Q., Ren K. T., Wenjing Y. (2022) An adaptive artificial neural network-based generative design method for layout designs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 184, p. 122313.
- Feifeng J., Jun M., Christopher J. W., Alain J.F. Chiaradia, Yulun Z., Zhan Z., Xiaohu Z. (2023) Generative urban design: A systematic review on problem formulation, design generation, and decision-making. *Progress in Planning*, p. 100795. DOI: 10.1016/j.progress.2023.100795.
- Gorlov D. A., Rashevskij N. M., Djatlov K. A., Zalinjan A. K., Shcherbakov A. G. (2022) Application of an ontological model of knowledge representation in the design of architectural objects. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij* [Prirodnye i tehnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij], no. 6, pp. 22—25 (in Russian).

⁷ The reported study was funded by VSTU, project number 45/558-23.

Gradišar L., Klinc R., Turk Ž., Dolenc M. (2022) Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies. *Buildings*, vol. 12, pp. 2194. DOI: 10.3390/buildings12122194.

Hoda E. T. (2020) The application of evolutionary, generative, and hybrid approaches in architecture design optimization. *Journal of Faculty of Architecture*, vol. 2, no. 2, pp. 1—20.

Laushkina A. A., Basov O. O. (2021) Application of generative design methods using multimodal data in the field of architecture and urban planning. *Nauchnyi rezul'tat. Informatsionnye tekhnologii* [Nauchnyj rezul'tat. Informacionnye tehnologii], no 3., pp. 3—10 (in Russian).

Matokhina A. V., Sadovnikova N. P., Parygin D. S., Gnedkova E. P. (2015) Development of an ontology for an intelligent decision support system in urban development management problems. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noi tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh»* [Bulletin VSTU. Series «Actual problems of management, computer hardware and informatics in engineering»], no. 14 (178), pp. 69—74 (in Russian).

McCormack J., Dorin A., Innocent T. (2004) Generative Design: A Paradigm for Design Research. *Futureground — DRS International Conference*, 17—21 November, Melbourne, Australia. URL: <https://dl.designresearchsociety.org/drs-conference-papers/drs2004/researchpapers/171/> Accessed: 15.11.2023.

Métral C., Falquet G., Vonlanthen M. (2007) An Ontology-based Model for Urban Planning Communication. *Ontologies for Urban Development. Studies in Computational Intelligence*, vol. 61. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-71976-2_6.

Mukkavaara J., Sandberg M. (2020) Architectural Design Exploration Using Generative Design: Framework Development and Case Study of a Residential Block. *Buildings*, vol. 10, p. 201.

Pahtaeva A. Ja., Rodionova Ju. V. (2021) Metody generativnogo dizajna [Generative design methods]. *Nojema*, no. 2 (7), pp. 213—221. (in Russian).

Rashevskiy N., Parygin D., Shcherbakov A., Shlyannikov N., Shlyannikov V. (2023) Using Generative Design Technologies to Create Park Area Layouts for Urban Improvement. *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1909, pp. 549—567.

Rashevskiy N. M., Shcherbakov A. G., Chikin A. D. (2023) On the use of ontological engineering in the implementation of information modeling technologies in construction. *Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma «Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzheniy»*, Tambov, 17—21 maya 2023 g. 2023 [Abstracts of reports of the VIII international symposium «Current problems of computer modeling of structures and structures»]. Tambov, pp. 99—101 (in Russian).

Shrestha P., Timalina D., Bista S., Shrestha B., Shakya T. (2021) Generative design approach for product development. *AIP Conference Proceedings*, vol. 2397, p. 020008.

Stuikys V., Damaševičius R. (2008) Design of ontology-based generative components using enriched feature diagrams and meta-programming. *Information technology and control*, vol. 37.

Watson M., Leary M., Downing D., Brandt M. (2023) Generative design of space frames for additive manufacturing technology. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 127, pp. 4619—4639.

Yang L., Li J., Chang H.-T., Zhao Z., Ma H., Zhou L. (2023) A Generative Urban Space Design Method Based on Shape Grammar and Urban Induction Patterns. *Land*, vol. 12, no. 6, p. 1167.

Поступила в редакцию 15.11.2023

Принята в печать 30.11.2023

Received 15.11.2023

Accepted for publication 30.11.2023