

Построение базы знаний САПР системы управления нейтрализацией выбросов предприятий-источников энергии и производственных предприятий

Р. И. Сольницев, Лэй Ван[✉], С. А. Кузьмин, В. Л. Кленин, М. С. Михайлов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] 18361206765@163.com

Аннотация. Разработка системы автоматизированного проектирования (САПР) для нейтрализации выбросов предприятий-источников энергии (ПИЭ) и производственных предприятий (ПП) требует создания соответствующей базы знаний. Рассматривается построение такой базы знаний и ее применение в САПР системы управления нейтрализацией выбросов ПИЭ и ПП (СУНВ ПИЭ и ПП). С помощью средств разработки Protégé (Java), PyCharm (Python) и Navicat (MySQL) были созданы база знаний и клиентская платформа САПР СУНВ ПИЭ и ПП. Разработана ключевая техническая основа для создания базы знаний САПР СУНВ ПИЭ и ПП, охватывающая основные аспекты приобретения знаний, их представления и динамического обновления. Точность и эффективность получения знаний значительно повысилась благодаря анализу ассоциаций между множеством данных с помощью онтологического моделирования. В процессе разработки базы знаний создаются логические правила вывода, которые преобразуются в модель графа знаний, что в сочетании с динамическими характеристиками модели графа знаний позволяет реализовать непрерывное обновление такой базы. Ценность применения базы знаний в сложных сценариях подтверждается ее применением в СУНВ ПИЭ и ПП. Разработанная база знаний является неотъемлемой составляющей САПР СУНВ ПИЭ и ПП и направлена на решение проблемы выбросов. База знаний САПР СУНВ ПИЭ и ПП решает ключевые проблемы слияния множества знаний, миграции данных и достоверности логических рассуждений, а также обеспечивает теоретическую поддержку и технический путь для создания интеллектуальной и масштабируемой системы обслуживания знаний САПР СУНВ ПИЭ и ПП.

Ключевые слова: САПР, СУНВ ПИЭ и ПП, базы знаний, онтология, логическое правило, граф знаний

Для цитирования: Построение базы знаний САПР системы управления нейтрализацией выбросов предприятий-источников энергии и производственных предприятий / Р. И. Сольницев, Лэй Ван, С. А. Кузьмин, В. Л. Кленин, М. С. Михайлов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 8. С. 75–87. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-75-87.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Construction a Knowledge Base of a CAD System for Neutralizing Emissions from Energy Source Enterprises and Production Enterprises

R. I. Solnitsev, Lei Wang[✉], S. A. Kuzmin, V. L. Klenin, M. S. Mikhailov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] 18361206765@163.com

Abstract. The development of a computer-aided design (CAD) system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises requires the creation of an appropriate knowledge base. This article discusses the construction of such a knowledge base and its application in CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises. Using development tools such as Protégé

gé (Java), PyCharm (Python) and Navicat (MySQL), a knowledge base and a client platform for the CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises were developed. A key technical framework for building the CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises knowledge base is developed, covering the main aspects of knowledge acquisition, representation and dynamic updating. The accuracy and efficiency of knowledge retrieval were significantly enhanced through ontological modeling, which enabled the analysis of associations within diverse datasets. During the development of the knowledge base, logical inference rules were created and transformed into a knowledge graph model. This approach, combined with the dynamic characteristics of the knowledge graph, facilitates continuous updating of the knowledge base. The practical value of applying the knowledge base in complex scenarios was validated through its implementation in the system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises. The developed knowledge base is an integral component of the CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises, aimed at addressing emission-related challenges. The CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises knowledge base solves the key problems of knowledge fusion, data migration and reasoning validity, and provides theoretical support and technical path for building an intelligent and scalable CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises knowledge service system.

Keywords: CAD, system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises, knowledge base, ontology, logical rule, knowledge graph

For citation: Construction a Knowledge Base of a CAD System for Neutralizing Emissions from Energy Source Enterprises and Production Enterprises / R. I. Solnitsev, Lei Wang, S. A. Kuzmin, V. L. Klenin, M. S. Mikhailov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 8. P. 75–87. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-75-87.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Ранее проведенные исследования [1], [2] представляют собой значительный вклад в развитие теоретических и прикладных основ управления выбросами производственно-энергетических предприятий (ПИЭ и ПП). Авторы предложили концепцию кибернетической системы управления «Природа–техногеника», а также методы синтеза управления взаимодействием между производственными и энергетическими объектами на базе критерия минимизации выбросов. Эти разработки служат основой для создания специализированных САПР – таких систем автоматизированного проектирования, как САПР СУНВ ПИЭ и ПП. Данная система ориентирована на проектировщиков АСУТП (автоматизированная система управления технологическим процессом) нейтрализации выбросов и требует комплексного подхода к реализации математического, информационного и других видов обеспечений. В частности, в информационном обеспечении ключевую роль играет база знаний (БЗ), выступающая в качестве основной информационной платформы. Эффективность ее построения и внедрения определяет как научную ценность проекта, так и практическую применимость САПР.

В контексте построения и использования баз знаний целесообразно рассмотреть достижения в смежных направлениях. Так, Wang Deqiang Wu

Jun и Guan Liwen [3] предложили подход к формированию отраслевой базы знаний на основе графов знаний и методов машинного обучения. Их система обеспечивала релевантный поиск данных в гетерогенных источниках, включая образовательные учреждения и отраслевые предприятия. Это исследование показало потенциал интеграции знаний из различных источников, однако оно ориентировано в основном на образовательную среду и не охватывает промышленные сценарии.

Yang Weikai и др. [4] сосредоточились на разработке методов рассуждения о процессных знаниях в интеллектуальных производственных системах, опираясь на графы знаний. Их метод позволил повысить связность и семантическую насыщенность моделей, устранив избыточность и обеспечив более точное сопоставление знаний и данных. Однако практическая реализация на производственных предприятиях остается открытым вопросом.

Chen Ziyang, Liao Jinzhi, Zhao Xiang и Chen Yingguo [5] исследовали задачу вопросно-ответного взаимодействия с базами знаний. Они предложили архитектуру нейросетевого вывода, использующую как семантическую, так и структурную информацию подграфов, что позволило достичь большей интерпретируемости и точности рассуждений. Тем не менее, вопросы безопасности,

адаптивности и возможности динамического обновления базы знаний также остаются недостаточно проработанными.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области построения и применения баз знаний, сохраняются актуальные вызовы, связанные с их функциональной реализацией, удобством использования, обеспечением безопасности и адаптивности к изменениям. Особенно остро ощущается недостаток исследований, фокусирующихся на применении подобных технологий непосредственно на промышленных предприятиях, что подчеркивает необходимость дальнейших работ в этом направлении и актуальность разработок в рамках САПР СУНВ ПИЭ и ПП.

В данной статье сделана попытка создания полнофункциональной и простой в эксплуатации базы знаний, которая позволяет минимизировать ошибки, обеспечить информационную безопасность и помочь исследователям-проектировщикам СУНВ ПИЭ и ПП точно воспринимать информацию в САПР. Разработанная БЗ комплексного управления в САПР СУНВ ПИЭ и ПП не только обеспечивает систематический характер комплексного управления проектной информацией, но и будет полезной для перспективных исследований и разработок в рассматриваемой области.

Разработка базы знаний (на основе онтологии) для САПР СУНВ ПИЭ и ПП в среде Protégé. Разработка темы данной статьи на основе онтологии в среде Protégé осуществляется следующим образом [6]:

1. Создание иерархии классов онтологии, например, класса «EnergySolutionEnterprise», а также дополнительных ограничений для каждого класса.

2. Установка всех атрибутов отдельных классов в онтологии, например, а также присвоение Domain и Range для свойства «classify» [7].

3. Обработка экземпляров отдельных классов в онтологии, например значений класса, атрибутов и отношений для экземпляра предприятия «А».

4. Разработка семантической сети классов и экземпляров визуализированной онтологии [8].

5. Описание правил логического вывода:

1) если запрашиваемый тип энергии – уголь, то во всплывающем информационном окне указывается: «Загрязняющая энергия. Основные выбросы: CO₂, SO₂, NO_x. Очень рискованно и рекомендуется сократить потребление этой энергии»;

2) если запрашиваемый тип энергии – газ, то во всплывающем информационном окне указывается: «Чистая энергия. Основные выбросы: CO₂»;

3) если запрашиваемый тип энергии – нефть, то указывается: «Загрязняющая энергия. Основные выбросы: CO₂, NO_x, SO₂. Очень рискованно и рекомендуется сократить потребление этой энергии»;

4) если доля природного газа в сырьевом топливе, используемом запрашиваемым промышленным предприятием, больше, чем сумма сырой нефти и угля, то во всплывающем информационном окне будет следующее сообщение: «Чистое предприятие. Возможность загрязнения воздуха низкая, а безопасность высокая!»;

5) если доля природного газа в сырьевом топливе, используемом запрашиваемым промышленным предприятием, меньше, чем сумма сырой нефти и угля, то во всплывающем информационном окне появится сообщение: «Загрязняющие предприятия. Вероятность загрязнения воздуха высока. Пожалуйста, примите меры предосторожности!».

6. Создание и выполнение запросов к онтологии на языке SPARQL [9].

Далее представлены основные виды запросов на извлечение явных и неявных знаний из разработанной онтологии:

1. Каковы коэффициенты преобразования выбросов загрязняющих веществ для каждого типа энергии?

```

PREFIX ep:
<http://www.semanticweb.org/ontologies/EnterprisePollution#>
SELECT ?id ?type ?CO2 ?SO2 ?NOx
WHERE
{
  ?e ep:id ?id.
  ?e ep:type ?type.
  ?e ep:co2 ?CO2.
  ?e ep:so2 ?SO2.
  ?e ep:nox ?NOx.
}

```

2. Каково процентное соотношение каждого типа энергии в сырьевом топливе предприятия?

```

PREFIX ep:
<http://www.semanticweb.org/ontologies/EnterprisePollution#>
SELECT ?no ?name ?classify ?coal ?petroleum ?gas
WHERE
{
  ?e ep:no ?no.
  ?e ep:name ?name.
}

```

```
?e ep:classify ?classify.
?e ep:coal ?coal.
?e ep:petroleum ?petroleum.
?e ep:gas ?gas.
}
```

3. Каковы рекомендации для каждого типа энергии?

```
PREFIX ep:
<http://www.semanticweb.org/ontologies/Enterprise
Pollution#>
SELECT ?type ?info
WHERE
{
  ?e ep:type ?type.
  ?e ep:energyInfo ?info.
}
```

4. Каковы рекомендации для каждого предприятия?

```
PREFIX ep:
<http://www.semanticweb.org/ontologies/Enterprise
Pollution#>
SELECT ?name ?info
WHERE
```

```
{
  ?e ep:name ?name.
  ?e ep:enterpriseInfo ?info.
}
```

Разработка клиентских систем для САПР СУНВ ПИЭ и ПП. На основе ранее созданной в Protégé базы знаний, осуществляется разработка более эффективной и удобной информационной системы для проектировщиков САПР СУНВ ПИЭ и ПП. Проектировщики подразделяются на исполнителей и администраторов.

В качестве инструмента разработки системы выбран PyCharm. PyCharm – это IDE для Python, которая включает инструменты, облегчающие и ускоряющие написание кода [10]. В то же время, PyCharm обладает множеством преимуществ и возможностей – поддержка фреймворка Django, движка приложений Google и т. д. В качестве среды проектирования базы данных MySQL была выбрана Navicat [11]. Она обладает такими свойствами, как поддержка интеллектуального дизайна, упрощенное редактирование данных, ком-

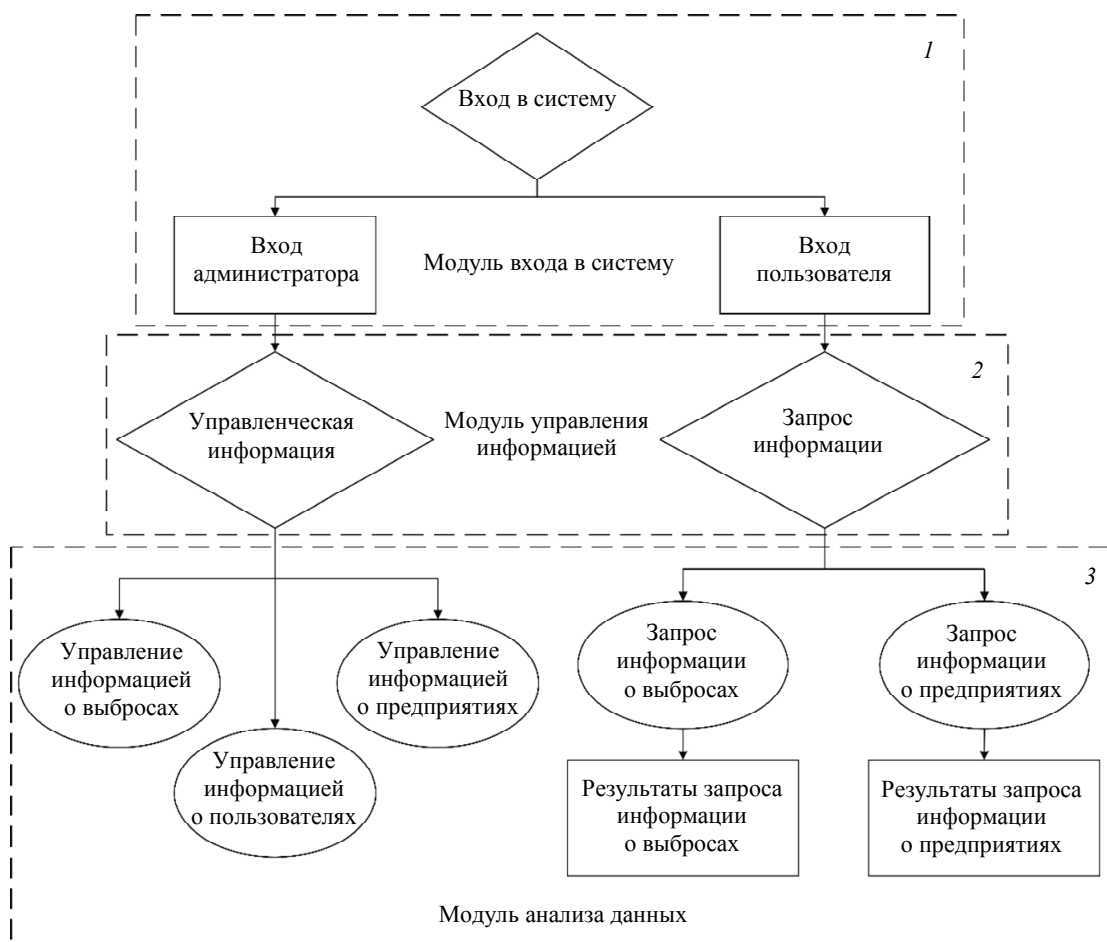


Рис. 1. Функциональная схема блока интегрированной системы управления о предприятии и выбросах
Fig. 1. Functional diagram of the integrated management system unit about the enterprise and pollutant

плексные инструменты управления данными, создание запросов методом перетаскивания, автоматизация рабочих процессов, совместимость с различными системами баз данных, простота использования, стабильность и т. д.

В системе имеется три функциональных модуля: модуль входа в систему, модуль управления информацией, а также модуль анализа данных [12].

Функциональные модули системы показаны на рис. 1.

Каждая модель данных содержит следующую информацию:

- 1) администратор (имя пользователя, пароль, категория);
- 2) пользователь (имя пользователя, пароль, категория);
- 3) информация о выбросах (серийный номер выброса, название источника выброса, название выброса);
- 4) информация о предприятии (серийный номер предприятия, название предприятия, категория предприятия, источник энергии предприятия).

В табл. 1–3 приведены данные, используемые в каждом типе модели [13].

Приложение разделено на два функциональных модуля: для администратора и для пользователя. В модуле для пользователя можно запрашивать информацию об эмиссии и о предприятии. В модуле для администратора также имеются вышеуказанные функции. Однако в нем можно просматривать и управлять информацией о пользователях, выбросах и о предприятии, включая данные об изменении этой информации – что позволяет эффективно обеспечивать ее защиту. Для упрощения разработки системы были нарисованы две различные диаграммы вариантов использования [14]: диаграмма вариантов использования приложения со стороны администратора показана на рис. 2, со стороны пользователя – на рис. 3.

Логическое отображение знаний после преобразования правил логического вывода из базы знаний САПР СУНВ ПИЭ и ПП показано на рис. 4 [15].

Табл. 1. Информация об администраторе и пользователях
Tab. 1. Information of administrator and users

Описание	Имя поля	Тип данных	Длина	Первичный ключ	Внешний ключ	Допускается Null
Имя пользователя	username	char	20	Y	N	N
Пароль	password	char	20	N	N	N
Категория пользователей	type	int	32	N	N	N

Y (да) и N (нет) – булевы значения.

Табл. 2. Информация о выбросах
Tab. 2. Information of emissions

Имя поля	Тип данных	Длина	Первичный ключ	Внешний ключ	Допускается Null	Описание
id	char	20	Y	N	N	Номер
type	char	20	Y	N	N	Источник выбросов
CO ₂	char	5	N	N	N	Категория выбросов
SO ₂	char	5	N	N	N	Категория выбросов
NO _x	char	5	N	N	N	Категория выбросов

Табл. 3. Информация о предприятиях
Tab. 3. Information of enterprises

Имя поля	Тип данных	Длина	Первичный ключ	Внешний ключ	Допускается Null	Описание
no	char	20	Y	N	N	Номер
name	char	20	Y	N	N	Название предприятия
classify	char	20	N	N	N	Категория предприятия
coal	char	20	N	N	N	Источник энергии
petroleum	char	20	N	N	N	Источник энергии
gas	char	20	N	N	N	Источник энергии

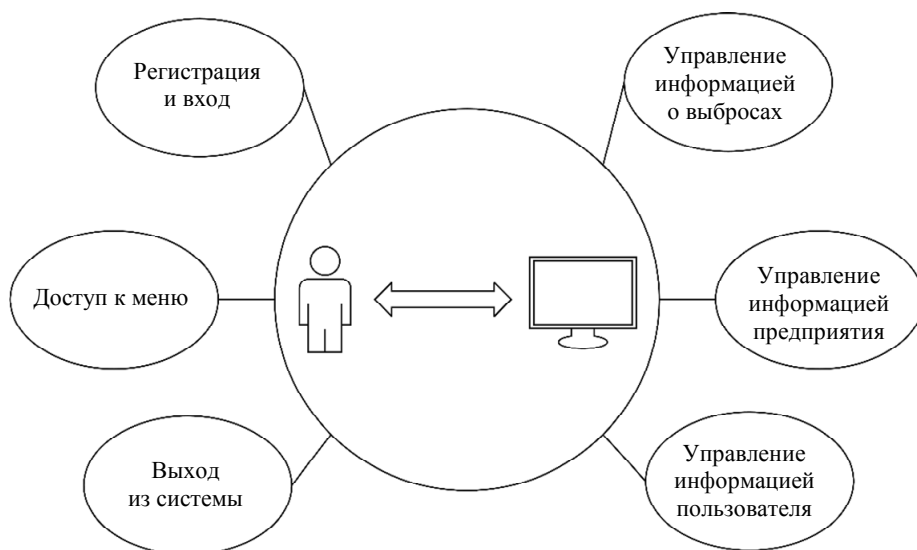


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования приложения со стороны администратора
 Fig. 2. Diagram of application use cases from the administrator's side

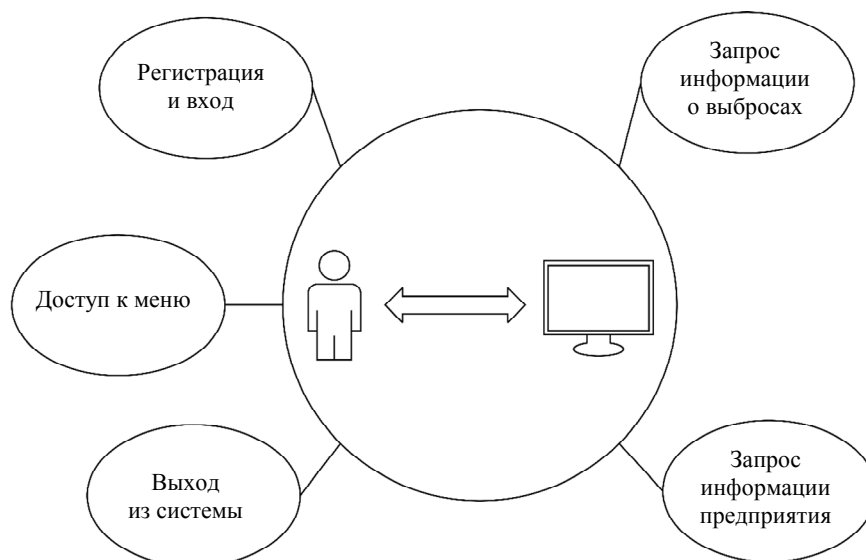


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования приложения со стороны пользователя
 Fig. 3. Diagram of application use cases from the user's side

Табл. 4. Список классов и пояснения к ним
 Tab. 4. List of classes and explanations

Название класса	Функциональное описание
Начать страница	Интерфейс запуска системы
Админ страница	Вход администратора
Пользовательская страница	Вход пользователя
Управление выбросами	Управление информацией о выбросах
Управление пользователями	Управление информацией о пользователе
Управление предприятием	Управление информацией о предприятии
Страница запроса выбросов	Запрос информации о выбросах
Вид выбросов	Отображение информации о выбросах
Страница запросов предприятия	Запрос информации о предприятии
Вид предприятия	Отображение информации о предприятии
Управление информацией	Выбор типа управления информацией
Управление информацией о пользователе	Выбор типа запроса информации
Описание страницы	Информация о разработчиках

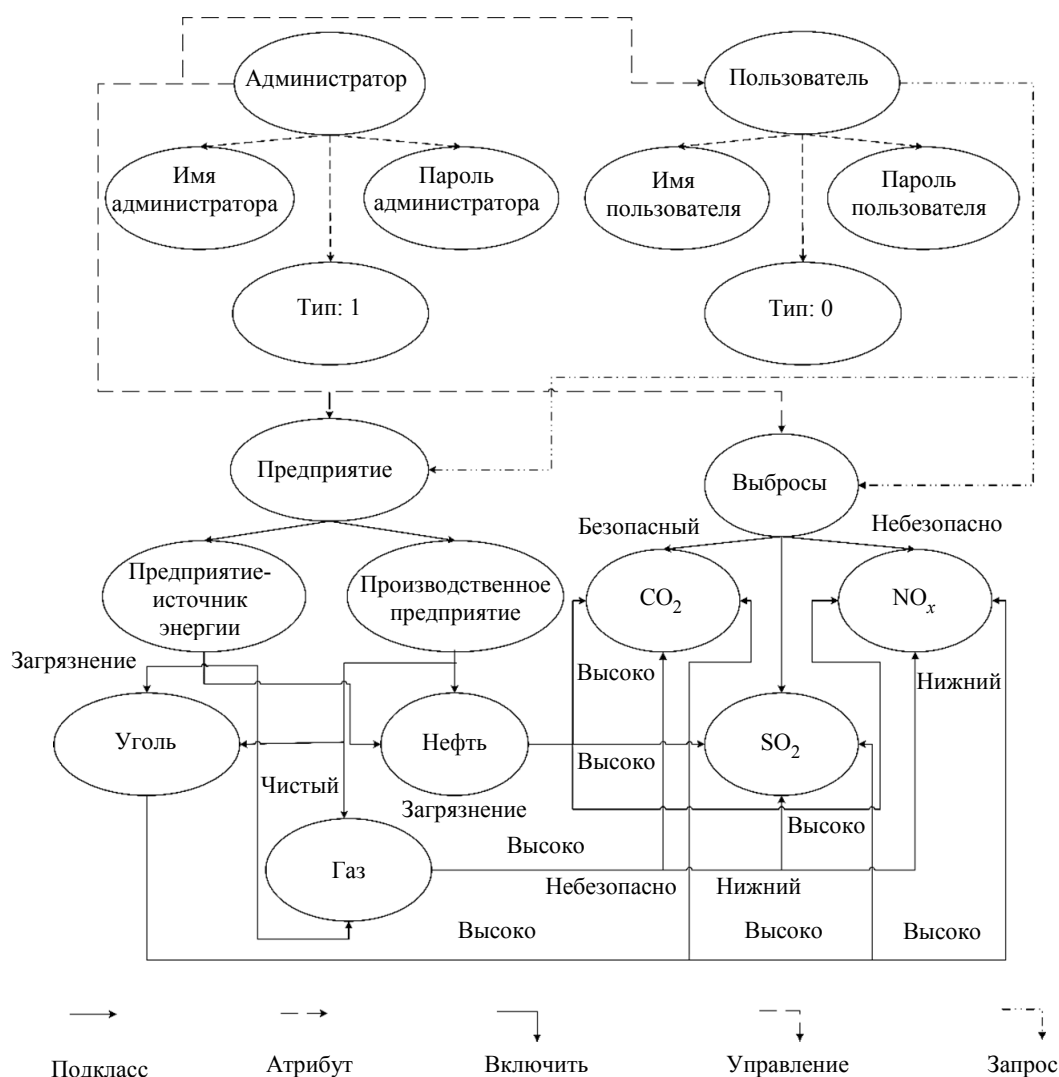


Рис. 4. Логическое отображение знаний по САПР СУНВ ПИЭ и ПП
 Fig. 4. Logical representation of knowledge of a CAD system for neutralizing emissions from energy source enterprises and production enterprises

В табл. 4 приводится список классов, входящих в каждый модуль системы, а также короткие пояснения к ним.

Рис. 5 демонстрирует взаимосвязь между всеми модулями и классами программы.

Далее представлены некоторые функциональные интерфейсы, реализованные в системе [16].

1. Интерфейс входа администратора. Администратор имеет больше привилегий и может использовать больше функций, недоступных для обычного пользователя. В интерфейсе есть два элемента ввода, соответствующие учетной записи администратора и паролю администратора, а также две кнопки внизу: одна для входа администратора, другая для возврата в основной интерфейс. Окно программы для САПР СУНВ ПИЭ и ПП с интерфейсом авторизации администратора показано на рис. 6.

2. Интерфейс администратора. Интерфейс администратора состоит из меню, в котором имеются три опции управления информацией: о выбросах, о предприятии и о пользователе.

3. Интерфейс управления информацией в САПР СУНВ ПИЭ и ПП. Интерфейс разделен на три части, а именно: модуль заполнения информации о предприятии, модуль работы с информацией о предприятии и модуль отображения информации о предприятии. В модуле заполнения информации о выбросах имеется шесть полей для ввода информации, аналогичных модулю управления информацией о выбросах, а в модуле управления информацией о предприятии можно нажать соответствующие кнопки для выполнения нужной операции, а именно: добавления, обновления, удаления или очистки. Окно программы

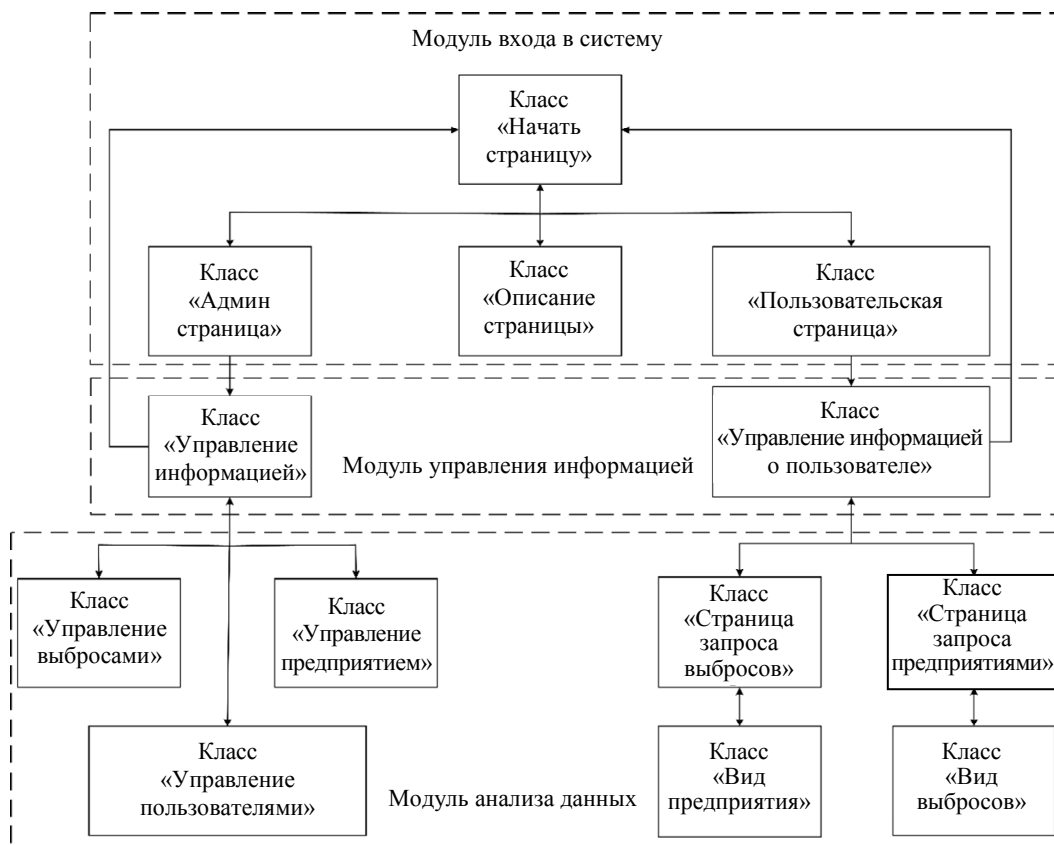


Рис. 5. Логика взаимодействия между различными классами программы
Fig. 5. Logic of interaction between different classes of the program

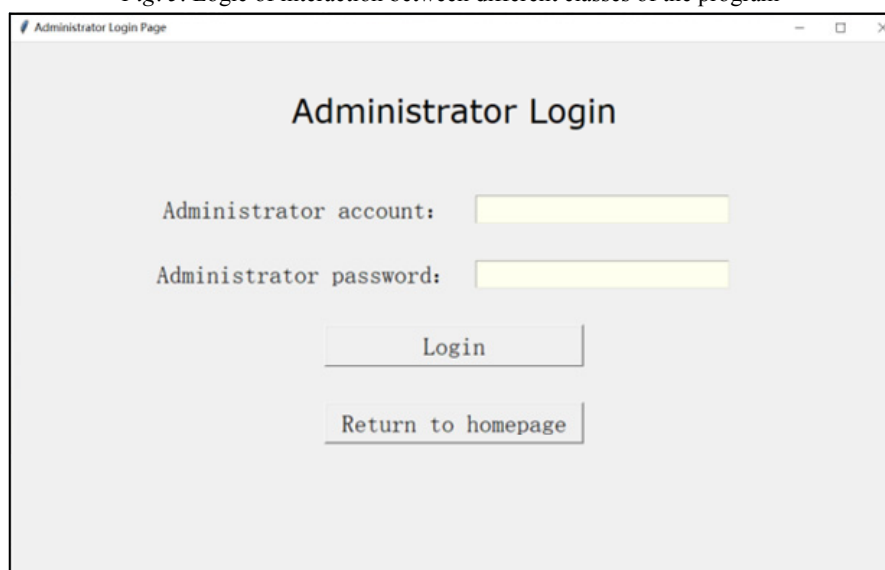


Рис. 6. Интерфейс авторизации администратора
Fig. 6. Interface of administrator authorization

для САПР СУНВ ПИЭ и ПП с интерфейсом управления информацией о предприятии показано на рис. 7.

4. *Интерфейс запроса информации и результатов логического вывода базы знаний.* Интерфейс запроса информации делится на модуль запроса информации об эмиссии и модуль запроса инфор-

мации о предприятии. На рис. 8 показана программа для САПР СУНВ ПИЭ и ПП с интерфейсом запроса информации о выбросах энергии.

На рис. 9 показаны результаты запроса информации о предприятии из базы знаний.

Применение базы знаний в САПР СУНВ ПИЭ и ПП позволяет более эффективно и удобно по-

Enterprise information management interface

Enterprise information:

no:

name:

classify:

coal:

petroleum:

gas:

Operation:

New

Update

Delete

Clear

no	name	classify	coal	petroleum	gas
4	D	Production enterprise	0.1	0.35	0.55
3	C	Production enterprise	0.45	0.25	0.3
2	B	Energy source enterprise	0.6	0.25	0.15
1	A	Energy source enterprise	0.35	0.5	0.15

Рис. 7. Интерфейс управления информацией предприятия
 Fig. 7. Interface of enterprise information management

Pollutant Query

Energy Type:

Query

Return to previous page

Рис. 8. Интерфейс запроса информации о выбросах энергии
 Fig. 8. Interface for requesting information on energy emissions

Tips!

Polluting energy; Main emissions: CO2, SO2, NOx; Highly risky and recommended to reduce the consumption of this energy.

確定

Pollutant information interface

id	Type	CO2	SO2	NOx
1	Coal	0.1	0.35	0.00145

Рис. 9. Информационное сообщение от базы знаний
 Fig. 9. Information message from the knowledge base

лучать результаты моделирования, анализа и синтеза решений в САПР СУНВ ПИЭ и ПП как на мета-, так и на макроуровне [1], [2].

В качестве результатов моделирования взаимодействия между ПИЭ и ПП на метауровне

представлена связь между выбросами и природной средой:

$$\frac{dZ_1^i}{dt} = K_i^{(1)} X_i - K_i^{(2)} Y_i,$$

$$\frac{dZ_2^j}{dt} = K_j^{(1)} Z_1^i - K_j^{(2)} Y_j + K_j^{(3)} X_j.$$

В табл. 5 приведено описание параметров, которые могут быть вычислены при помощи базы знаний и информационной системы САПР СУНВ ПИЭ и ПП.

Табл. 5. Информация о САПР
«СУНВ ПИЭ и ПП» на метауровне
Tab. 5. Information on CAD emission neutralization
management systems of energy enterprises
and production enterprises at the meta level

Параметр	Описание
Z_1^i	Количество энергии от i -го ПИЭ
X_i	Количество топлива (уголь) на входе ПИЭ
Y_i	Количество CO_2 , выбрасываемого в атмосферу ПИЭ
Z_2^j	Количество продукции ПП (сталь, цемент)
X_j	Количество сырья (железная руда, известняк) на входе ПП
Y_j	Количество CO_2 , выбрасываемого в атмосферу ПП
$K_i^{(1)}$	Коэффициент преобразования топлива в энергию
$K_i^{(2)}$	Коэффициент преобразования сгорания угля в выбросы CO_2
$K_j^{(1)}$	Коэффициент преобразования энергии в продукцию
$K_j^{(2)}$	Коэффициент преобразования (потерь) продукции в выбросы CO_2
$K_j^{(3)}$	Коэффициент преобразования сырья в продукцию

Тестирование проекта. В проекте применяется функциональное тестирование, которое проверяет функциональность каждого модуля системы, имитируя работу пользователя. Разработка набора тестов, условий выполнения и ожидаемых результатов (на основе анализа требований к системе) позволяет эффективно выявить уязвимости и несовершенства системы. В процессе тестирования основное внимание уделяется основным аспектам ввода, вывода и динамического обновления данных и информации. Это позволяет избежать слепого тестирования и повысить его эффективность, а также выделить ключевые моменты и прояснить цель тестирования [17].

1. Тест функции входа в систему. Основная цель теста – проверить, может ли система корректно выполнять процедуры входа и регистра-

ции несколько раз. В частности, необходимо убедиться, что система позволяет войти с правильным паролем учетной записи, а также правильно обрабатывает ошибку при попытке входа с неправильным паролем, чтобы гарантировать корректную работу системы.

Этот тест был проведен пятьдесят раз. Из них двадцать восемь раз был выполнен успешный вход в систему со стороны администратора, два раза намеренно был введен неправильный пароль при попытке входа администратора, восемнадцать раз был выполнен успешный вход со стороны пользователя, и два раза намеренно был введен неправильный пароль при попытке входа пользователя.

Результат тестирования: функция входа нормально работает во всех случаях.

2. Проверка функции изменения информации. Управление информацией осуществляется вручную, что неизбежно приводит к ошибкам, поэтому функция изменения информации крайне необходима. Тест был проведен пятьдесят раз – по десять раз для каждой из следующих операций: добавление информации, удаление существующей информации, удаление несуществующей информации, изменение существующей информации и изменение несуществующей информации.

Результат тестирования: функция смены сообщений работает нормально.

Заключение. Разработанная база знаний представляет собой одну из основных составляющих САПР СУНВ ПИЭ и ПП. Она тесно связана с решением задач анализа, синтеза и других направлений, ориентированных на применение САПР к проблеме выбросов. На основе базы знаний САПР СУНВ ПИЭ и ПП, разработанной, в данной статье построена информационная система САПР СУНВ ПИЭ и ПП, в которую включены некоторые новые функции наряду с сохранением функций традиционной системы управления информацией, что обеспечивает всестороннюю и удобную поддержку данных для исследований и проектирования. Основные функциональные модули разработанной базы знаний охватывают управление базовой информацией проекта, исследовательскими проектами, системой, что позволяет улучшить интерфейс проектировщика.

Список литературы

1. Сольников Р. И., Коршунов Г. И., Лэй Ван. Построение декарбонирующей замкнутой системы управления «Природа-Техногеника» // Программные

продукты и системы. 2022. Т. 35, № 4. С. 707–714. doi: 10.15827/0236-235X.140.707-714.

2. Сольников Р. И., Ван Лэй. Синтез управлений взаимодействием производственных и энергетических предприятий по критерию минимизации выбросов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 9. С. 22–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-22-34.

3. Wang D., Wu J., Guan L. Industry knowledge base construction based on knowledge graph // *Manufacturing Technol. & Machine Tool*. 2022. Vol. 0, no. 8. P. 74–80. doi: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.08.011.

4. Yang W., Wang Yan, Ji Zh. Knowledge graph-based process knowledge reasoning method for intelligent production system // *J. of Syst. Simulation*. 2023. Vol. 35, no. 4. P. 773–785. doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1305.

5. Incorporating subgraph structure knowledge base question answering via neural reasoning / Ch. Ziyang, L. Jinzhi, Zh. Xiang, Ch. Yingguo // *J. of Frontiers of Comp. Sci. and Technol*. 2021. Vol. 15, no. 10. P. 1870–1879. doi: 10.3778/j.issn.1673-9418.2106094.

6. Formalization of gene regulation knowledge using ontologies and gene ontology causal activity models / B. J. Cortés, J. A. Vera-Ramos, R. C. Lovering, P. Gaudet, A. Laegreid, C. Logie, S. Schulz, M. D. M. Roldán-García, M. Kuiper, J. T. Fernández-Breis // *Biochim. et Biophys. Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms*. 2021. Vol. 1864, no. 11–12. Art. 194766. doi: 10.1016/j.bbagr. 2021.194766.

7. Мусацков В. Ю. О построении онтологической базы знаний промышленной экологии // *Экология урбанизированных территорий*. 2022. № 4. С. 36–39. doi: 10.24412/1816-1863-2022-4-36-39.

8. Design for the environment: An ontology-based knowledge management model for green product development / A. C. Benabdellah, K. Zekhnini, A. Cherrafi, J. A. Garza-Reyes, A. Kumar // *Business Strategy and the Environment*. 2021. Vol. 30, no. 8. P. 4037–4053. doi: 10.1002/bse.2855.

9. Semantic Web technologies for indoor environmental quality: A review and ontology design / A. Donkers, D. Yang, B. de Vries, N. Baken // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 10. Art. 1522. doi: 10.3390/buildings12101522.

10. Python and MySQL based smart digital retail management system / S. Shah, Y. Patel, K. Panchal,

P. Gandhi, P. Patel, A. Desai // 2021 6th Intern. Conf. for Convergence in Technol. (I2CT). Maharashtra, India: IEEE, 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9417913.

11. Fathulloh A. H., Adauwiyah H. I. Perbandingan tingkat efisiensi waktu query select pada database interface navicat dan SQLYog di MySQL DBMS // *Appl. Inf. Syst. Manag. (AISM)*. 2021. Vol. 4, no. 2. P. 101–105. doi: 10.15408/aism.v4i2.18369.

12. From knowledge-based to big data analytic model: A novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0 / R. Rosati, L. Romeo, G. Cecchini, F. Tonetto, P. Viti, A. Mancini, E. Frontoni // *J. of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34, no. 1. P. 107–121. doi: 10.1007/s10845-022-01960-x.

13. Pengembangan database management system menggunakan MySQL / U. K. Siregar, T. A. Sitakar, S. Hara-main, Z. N. S. Lubis, U. Nadhirah, Y. Yahfizham // *J. Sains, Teknol. & Komp. (SAINTEK)*. 2024. Vol. 1, no. 1. P. 8–12. doi: 10.56495/sainstek.v1i1.450.

14. Syifauzzuhrah N., Zulaikha S., Rahmawati D. Design of library management information system (sim-pustaka) based on laravel framework // *Improvement: J. Ilmiah Untuk Peningkatan Mutu Manajemen Pendidikan*. 2023. Vol. 10, no. 1. P. 19–31. doi: 10.21009/improvement.v10i1.34320.

15. Research on knowledge graph construction for python programming language / Q. Chen, J. Xia, J. Feng, M. Tong // *Intern. Conf. on Smart Learning Environments (ICSLE)*. Hangzhou, China: Springer, 2022. P. 119–126. doi: 10.1007/978-981-19-5967-7_14.

16. Huang Y., Yi J., Yin Y. Design and implementation of a multimodal data collection and distribution system based on python-taking school management system as an example // *Appl. and Computational Engin.* 2024. Vol. 120, no. 1. P. 1–10. doi: 10.54254/2755-2721/2025.18759.

17. Li Q., Wu G. ERP system in the logistics information management system of supply chain enterprises // *Mobile Inform. Syst.* 2021. Vol. 2021, no. 1. Art. 7423717. P. 1–11. doi: 10.1155/2021/7423717.

Информация об авторах

Сольников Ремир Иосифович – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: remira70@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0415-6382>

Ван Лэй – аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: 18361206765@163.com

Кузьмин Сергей Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: KSA84@yandex.ru

Кленин Владислав Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: slavaklenin@mail.ru

Михайлов Михаил Сергеевич – аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: MishaMixailoffff@gmail.com

Вклад авторов:

Сольников Р. И. – предложена общая схема основных вопросов исследования и рамки для создания базы знаний, спланирована программа исследований, логика и структура.

Ван Лэй – разработка системы управления базы знаний, правил сопоставления онтологий и связей в форме графа знаний, тестирование производительности, интерфейса с пользователем-проектировщиком.

Кузьмин С. А. – предоставление рекомендаций по техническим условиям и стандартам построения графов знаний в рассматриваемой области, завершение проектирования взаимодействия модуля интерпретируемости базы знаний, дополнение обзора литературы.

Кленин В. Л. – построение гетерогенной базы данных, реализация механизма динамического обновления данных в базе знаний, а также помощь в статистике данных и проверке результатов.

Михайлов М. С. – создание онтологий в базе знаний, разработка модулей семантического наполнения, а также участие в редактировании текста статьи и проверке академических норм.

References

1. Sol'nicev R. I., Korshunov G. I., Ljej Van. Postroenie dekarbonizirujushhej zamknutoj sistemy upravlenija «Priroda-Tehnogenika» // Programmnye produkty i sistemy. 2022. T. 35. № 4. S. 707–714. doi: 10.15827/0236-235X.140.707-714. (In Russ.).
2. Sol'nicev R. I., Van Ljej. Sintez upravlenij vzaimodejstviem proizvodstvennyh i jenergeticheskikh predpriyatij po kriteriju minimizacii vybrosov // Izv. SPbGjeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 9. S. 22–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-22-34. (In Russ.).
3. Wang D., Wu J., Guan L. Industry knowledge base construction based on knowledge graph // Manufacturing Technol. & Machine Tool. 2022. Vol. 0, no. 8. P. 74–80. doi: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.08.011.
4. Yang W., Wang Yan, Ji Zh. Knowledge graph-based process knowledge reasoning method for intelligent production system // J. of Syst. Simulation. 2023. Vol. 35, no. 4. P. 773–785. doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1305.
5. Incorporating subgraph structure knowledge base question answering via neural reasoning / Ch. Ziyang, L. Jinzhi, Zh. Xiang, Ch. Yingguo // J. of Frontiers of Comp. Sci. and Technol. 2021. Vol. 15, no. 10. P. 1870–1879. doi: 10.3778/j.issn.1673-9418.2106094.
6. Formalization of gene regulation knowledge using ontologies and gene ontology causal activity models / B. J. Cortés, J. A. Vera-Ramos, R. C. Lovering, P. Gaudet, A. Laegreid, C. Logie, S. Schulz, M. D. M. Roldán-García, M. Kuiper, J. T. Fernández-Breis // Biochim. et Biophys. Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms. 2021. Vol. 1864, no. 11–12. Art. 194766. doi: 10.1016/j.bbagr. 2021.194766.
7. Musatskov V. Y. On the construction of an ontological knowledge base of industrial ecology // Ecology of urban areas. 2022. Vol. 4. P. 36–39. doi: 10.24412/1816-1863-2022-4-36-39. (in Russ.).
8. Design for the environment: An ontology-based knowledge management model for green product development / A. C. Benabdellah, K. Zekhnini, A. Cherrafi, J. A. Garza-Reyes, A. Kumar // Business Strategy and the Environment. 2021. Vol. 30, no. 8. P. 4037–4053. doi: 10.1002/bse.2855.
9. Semantic Web technologies for indoor environmental quality: A review and ontology design / A. Donkers, D. Yang, B. de Vries, N. Baken // Buildings. 2022. Vol. 12, no. 10. Art. 1522. doi: 10.3390/buildings12101522.
10. Python and MySQL based smart digital retail management system / S. Shah, Y. Patel, K. Panchal, P. Gandhi, P. Patel, A. Desai // 2021 6th Intern. Conf. for Convergence in Technol. (I2CT). Maharashtra, India: IEEE, 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9417913.
11. Fathulloh A. H., Adauwiyah H. I. Perbandingan tingkat efisiensi waktu query select pada database interface navicat dan SQLYog di MySQL DBMS // Appl. Inf. Syst. Manag. (AISM). 2021. Vol. 4, no. 2. P. 101–105. doi: 10.15408/aism.v4i2.18369.
12. From knowledge-based to big data analytic model: A novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0 / R. Rosati, L. Romeo, G. Cecchini, F. Tonetto, P. Viti, A. Mancini, E. Frontoni // J. of Intelligent Manufacturing. 2023. Vol. 34, no. 1. P. 107–121. doi: 10.1007/s10845-022-01960-x.
13. Pengembangan database management system menggunakan MySQL / U. K. Siregar, T. A. Sitakar, S. Hara-main, Z. N. S. Lubis, U. Nadhirah, Y. Yahfizham // J. Sains, Teknol. & Komp. (SAINTEK). 2024. Vol. 1, no. 1. P. 8–12. doi: 10.56495/saintek.v1i1.450.
14. Syifauzzuhrah N, Zulaikha S, Rahmawati D. Design of library management information system (simpustaka) based on laravel framework // Improvement: J. Ilmiah Untuk Peningkatan Mutu Manajemen Pendidikan. 2023. Vol. 10, no. 1. P. 19–31. doi: 10.21009/improvement.v10i1.34320.
15. Research on knowledge graph construction for python programming language / Q. Chen, J. Xia, J. Feng, M. Tong // Intern. Conf. on Smart Learning Environments (ICSLE). Hangzhou, China: Springer, 2022. P. 119–126. doi: 10.1007/978-981-19-5967-7_14.

16. Huang Y., Yi J., Yin Y. Design and implementation of a multimodal data collection and distribution system based on python-taking school management system as an example // Appl. and Computational Engin. 2024. Vol. 120, no. 1. P. 1–10. doi: 10.54254/2755-2721/2025.18759.

17. Li Q., Wu G. ERP system in the logistics information management system of supply chain enterprises // Mobile Inform. Syst. 2021. Vol. 2021, no.1. Art. 7423717. P. 1–11. doi: 10.1155/2021/7423717.

Information about the authors

Remir I. Solnitsev – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Computer-Aided Design Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: remira70@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0415-6382>

Lei Wang – postgraduate student, Department of Computer-Aided Design Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: 18361206765@163.com

Sergey A. Kuzmin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer-Aided Design Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: KSA84@yandex.ru

Vladislav L. Klenin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer-Aided Design Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: slavaklenin@mail.ru

Mikhail S. Mikhailov – postgraduate student, Department of Computer-Aided Design Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: MishaMixailoffff@gmail.com

Author contribution statement:

Solnitsev R. I. – the general scheme of the main research questions and framework for knowledge base development is proposed, research program, logic and structure are planned.

Wang Lei – development of knowledge base management system, ontology mapping rules and links in the form of knowledge graph, performance testing, interface with user-designer.

Kuzmin S. A. – providing recommendations on specifications and standards of knowledge graph construction in the considered area, finalizing the design of the interaction module of interpretability of the knowledge base, completing the literature review.

Klenin V. L. – construction of a heterogeneous database, realization of the mechanism of dynamic updating of data in the knowledge base, as well as assistance in data statistics and verification of results.

Mikhailov M. S. – creation of ontologies in the knowledge base, development of semantic content modules, as well as participation in statistical text editing and verification of academic norms.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; принята к публикации после рецензирования 25.06.2025; опубликована онлайн 30.10.2025.

Submitted 29.04.2025; accepted 25.06.2025; published online 30.10.2025.