

Лисовенко А.С., Лимановская О.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФЕКТНОСТИ ПРОВОДОВ И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аннотация. В статье представлены результаты разработки расширяемой мультиагентной модели технического состояния состояния воздушной линии электропередачи. С помощью программно реализованной модели проведено моделирование реально существующей линии электропередачи на основе информации, полученной в ходе ее диагностики.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, техническое состояние воздушной линии электропередачи, моделирование процессов, агентное моделирование.

Abstract. The article presents the results of the development of an expandable multi-agent model of the technical state of the overhead power transmission line. The software implemented multi-agent model was used to modelling real overhead power line based on information obtained as a result of its diagnostics.

Keywords: overhead power line, technical condition of overhead power line, process modeling, agent modeling.

Введение

Воздушные линии электропередач (ВЛ) составляют основу современных электрических сетей в РФ и являются важным звеном в передаче электроэнергии конечному потребителю. Старение воздушных линий электропередачи представляет одну из серьезнейших проблем для энергетической системы России. Общая степень изношенности электрических сетей в России составляет около 70% [1]. Как следствие, происходит ухудшение технического состояния электрических сетей, что является одним из основных факторов нарастания случаев нарушения их работы. Выходом из сложившейся ситуации является цифровая трансформация сетей, которая приводит к снижению потерь мощности, повышению надежности и доступности электроснабжения и создает ряд дополнительных услуг для потребителей [14-16].

Для решения текущих проблем в электроэнергетике ПАО Россети была разработана Концепция «Цифровая трансформация 2030» [2]. Одной из задач в рамках концепции является построение цифровой информационной системы и цифровых двойников линий электропередач. Под цифровым двойником системы подразумевается ее программный аналог, который в виртуальной среде имитирует технические характеристики и поведение своего реального прототипа [20].

Создание цифровых двойников ВЛ подразумевает под собой создание математической модели отслеживания и прогнозирования состояния ВЛ, ее составных частей и ее процессов. Такое отслеживание и прогнозирование с помощью модели дает сильный экономический эффект, который проявляется в более низких затратах на устранение отказов линий электропередачи, компенсацию потерь мощности и эксплуатационных расходов [3-7].

Для решения задачи построения математической модели отслеживания и прогнозирования состояния ВЛ, которая является сложной системой со множеством объектов, взаимодействующих между собой, в рамках данной работы был выбран метод агентного моделирования, который является перспективным методом для моделирования таких сложных систем [19].

Агентный подход для моделирования электрических сетей применялся, например, в работе [8] авторов Mikael M. Nordman и Matti Lehtonen, где агентная модель оценки состояния ВЛ строится для подстанций линий электропередач, каждой из которых ставится в соответствие агент, который с помощью различных датчиков отслеживает процессы, происходящие на отслеживаемой подстанции. Также в работе [9] авторов Ioannis S. Vaxevanos и Dimitris P. Labridis было показано применение агентного моделирования для поиска дефектов в подземных ЛЭП, которые оснащаются собирающими информацию датчиками. В работе [10] авторов Jose Gonzalez de Durana, Oscar Barambones, Enrique Kremers и Liz Varga предлагается агентно-ориентированный подход к моделированию энергетических сетей с возможными несколькими поставщиками энергии. Предлагаемый расширяемый подход отличается высоким уровнем абстракции и основан только на математических уравнениях энергетических сетей, что позволяет моделировать энергосистему разных размеров.

Основной целью агентного моделирования в описанных выше работах является отслеживание и прогнозирования неисправностей генераторов и подстанций электрической сети, а также информирование об этих неисправностях. В описанных выше работах обобщается механическая составляющая одной из важнейшей части ЭЭС – линии электропередачи, а именно подробно не рассматривается ее техническое состояние, отслеживание и прогнозирование которого является не менее важной задачей, чем отслеживание электроэнергетической составляющей ЭЭС, т.к. механическая и электроэнергетическая составляющие тесно связаны друг с другом. Поэтому целесообразным является построение модели для отслеживания и прогнозирования технического состояния ВЛ с использованием перспективного для этого агентного подхода. Такая модель при последующем расширении до отслеживания электроэнергетической составляющей ВЛ (а впоследствии и ЭЭС)

даст мощный инструмент информирования о состоянии электроэнергетической системы.

Для решения задачи построения цифровых двойников ВЛ в рамках данной работы представлено агентное моделирование состояния воздушной линии электропередачи, которое основано на официальной методике оценки технического состояния [11] и которое позволяет автоматически отслеживать и прогнозировать изменение состояния составных частей линии электропередачи при занесении в модель данных об обследованиях ВЛ.

Метод оценки технического состояния ВЛ

Согласно официальной методике [11] оценка технического состояния ВЛ основывается на вычислении индексов технического состояния составных частей ВЛ и осуществляется путем сопоставления фактических значений оцениваемых параметров функциональных узлов с предельно-допустимыми значениями. Для ВЛ функциональными узлами являются Опора и Пролет. Индекс технического состояния принимает значения в диапазоне от 0 (наихудшее значение) до 100 (наилучшее значение).

В приведенной ниже таблице 1 приводятся диапазоны индекса технического состояния функциональных узлов (опоры и пролета) и самой линии электропередачи в целом.

Таблица 1 – Соответствие диапазонов индекса технического состояния с его описанием и цветов визуализации

Диапазон индекса технического состояния	Вид технического состояния	Визуализация(цвет)
[0; 25]	Критическое	Красный
(25; 50]	Неудовлетворительное	Оранжевый
(50; 70]	Удовлетворительное	Желтый
(70; 85]	Хорошее	Зеленый
(85; 100]	Очень хорошее	Зеленый

Каждый параметр технического состояния функционального узла оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений таких параметров от нормативных. Диапазон балльной шкалы – отрезок от 0 до 4.

В оценке индекса технического состояния опоры учитываются следующие элементы: изоляторы и арматура, сама опора и ее фундамент. В данной работе этот функциональный узел не учитывается.

Для оценки индекса технического состояния узла Пролет в рамках данной работы вводятся следующие группы параметров (1):

1) Состояние фазного провода и 2) Состояние грозотроса:

- Обрыв проволок в зажимах;
- Обрыв проволок вне зажимов;
- Стрела провеса;
- Коррозия провода;
- Опасность обрыва провода.

3) Состояние гасителя вибрации:

- Смещение гасителя вибрации;
- Наличие гасителя вибрации согласно проекту;
- Отсутствие грузов на гасителе вибрации.

4) Состояние трассы пролета:

- ДКР;
- Ширина просеки.

5) Габариты пролета:

- Габариты проводов.

Идея оценки технического состояния ВЛ заключается в вычислении снизу вверх индексов технического состояния групп параметров функциональных узлов, которые участвуют в вычислении индексов технического состояния самих функциональных узлов, которые, в свою очередь, участвуют в вычислении целевого индекса технического состояния ВЛ. Ниже приводится методика расчета индексов технического состояния.

Формулы расчета индексов технического состояния

1) Для оценки группы параметров функционального узла в рамках данной работы вводится показатель ИТС_г, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ИТС}_g = 100 * (b + \sum_i (w_i * Status_i/4)), \quad (1)$$

где $Status_i$ – балльная оценка i -го параметра группы, w_i – вес i -го параметра группы, b – поправочный коэффициент.

Расчет весов параметров группы и поправочного коэффициента в рамках данной работы основывается на машинном обучении регрессии на обучающей выборке, которая представляет собой пары (s_i, y_i) , где s_i – элементы декартового произведения множеств возможных значений, деленных на 4, параметров рассматриваемой группы параметров функционального узла Пролет, а y_i – значение ИТС_г/100 для рассматриваемой группы.

2) Расчет индекса технического состояния функциональных узлов (ИТСУ) осуществляется по следующей формуле:

$$\text{ИТСУ} = \sum_i (w_i * \text{ИТС}_{г\ i}), \quad (2)$$

где w_i – вес группы параметров с номером i , $\text{ИТС}_{г\ i}$ – индекс технического состояния группы параметров с номером i .

В силу того, что в разрабатываемой модели групп параметров каждого типа может быть больше 1 и что веса групп одинакового типа равнозначны, вес группы параметров типа group обратно пропорционален общему количеству групп типа group рассматриваемого функционального узла.

3) Расчет индекса технического состояния единицы основного технологического оборудования (ИТС) осуществляется по следующей формуле [11]:

$$\text{ИТС} = \min(\text{ИТСУ}_i), i = 1 \dots n, \quad (3)$$

где n – количество функциональных узлов-пролетов.

Агентная модель состояния ВЛ с учетом дефектности проводов и условий окружающей среды

В разрабатываемой в рамках данной работы агентной модели на текущем этапе разработки в качестве агентов представлены единица основного технологического оборудования – ВЛ, функциональный узел «Пролет» и группы параметров функционального узла «Пролет», а также окружающая среда. Для каждого из агентов сформированы списки параметров и состояний, заданы переходы между состояниями и влияние на связанные агенты.

Ниже, на рисунке 1, приведена диаграмма взаимосвязей агентов в нотации UML.

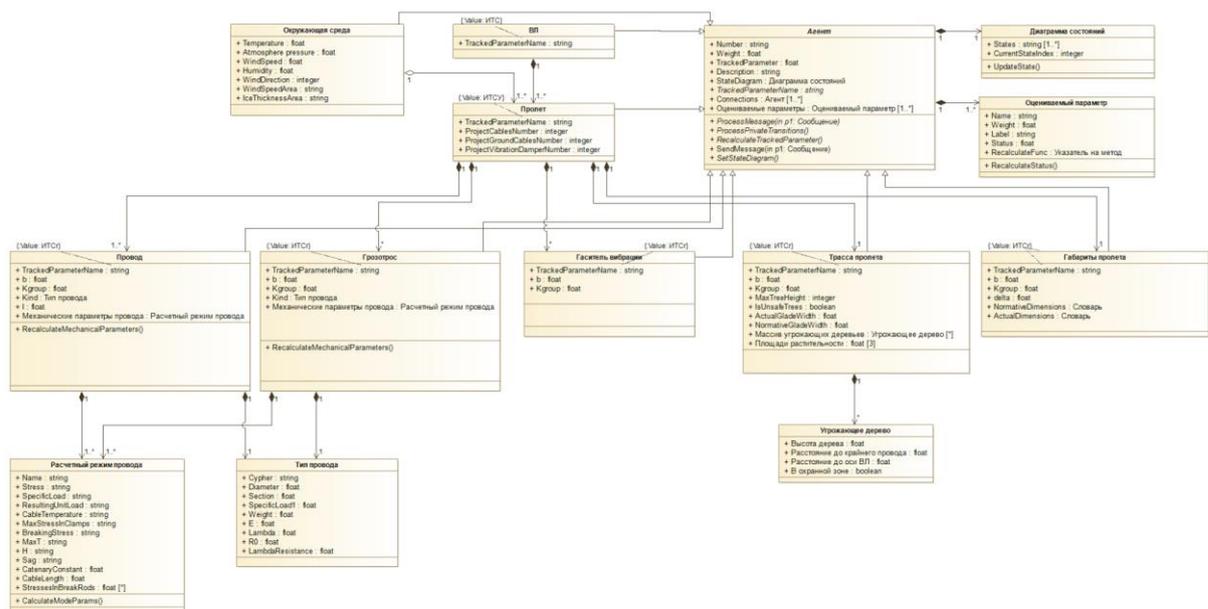


Рисунок 1 – UML-диаграмма взаимосвязей агентов разрабатываемой агентной модели

В качестве примера приводится описание одного из центральных агентов системы, агента «Провод».

Агент с помощью своих состояний и численного значения ИТС_г характеризует отслеживаемый провод ВЛ. Он отвечает за вычисление, отслеживание и значений механических параметров провода, а также включает в себя оцениваемую группу параметров «Состояние фазного провода».

Состояния: Критическое, Неудовлетворительное, Удовлетворительное, Хорошее, Очень хорошее.

Параметры агента:

- 1) ИТС_г;
- 2) Вес группы $k_{group} = 0.364$;
- 3) Оцениваемые параметры группы: «Стрела провеса», «Коррозия провода», «Обрыв проволок в зажимах», «Обрыв проволок вне зажимов» и «Опасность обрыва провода»:

Каждый оцениваемый параметр группы характеризуется своим весом, балльной оценкой, текстовым описанием этой оценки и правилом оценивания.

4) Механические параметры провода:

Перерасчет механических свойств провода основывается на расчете удельных нагрузок на провод [12, Глава 2], численным решениям уравнения теплового баланса провода [13] и уравнения состояния провода [12, Глава 4].

5) Численное значение фазного тока [А];

6) Список оборванных проволок.

На рисунке 2 приведена диаграмма состояний агента «Провод».

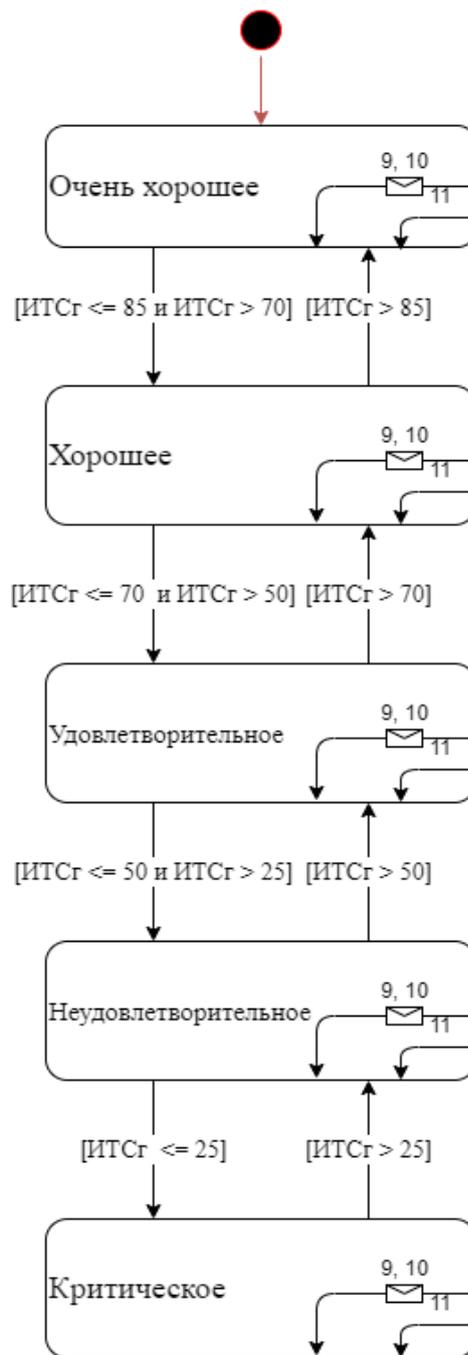


Рисунок 2 – Диаграмма состояний агента «Провод»

Условия переходов агента в соответствии с диаграммой состояний:

1) Переходы 1-8 основываются на соответствии индекса ИТС_г диапазону значений из Таблицы 1.

2) Переход №9 – «Обработка сообщений от окружающей среды» и Переход №10 – «Обработка входящих сообщений от информационной системы ИС»:

Внутренние переходы, не изменяют состояние агента «Провод». Приводит к перерасчету механических параметров провода и переоценке параметров группы.

Это, в свою очередь, может повлиять на значение параметра ИТС_г, что может привести к смене состояния агента.

Условие перехода: основывается на получении пересылаемого агентом «Пролет» сообщения от агента «Окружающая среда» или сообщения от информационной системы ИС.

Действия при переходе:

- Обработка сообщения,
- Инициализация перерасчета механических свойств провода,
- Перерасчет ИТС_г.

3) Переход №11 – «Переоценка параметров группы после перерасчета провода»:

Внутренний переход, не изменяет состояние агента «Провод».

Условие перехода: перерасчет механических свойств отслеживаемого провода.

Действие при переходе: Переоценка параметров группы «Стрела провеса» и «Опасность обрыва провода» на основе рассчитанных механических параметров провода.

Реализация агентной модели

Разработка агентной модели ведется на языке программирования C# [17] с использованием для визуализации межплатформенной среды разработки Unity [18].

Каждый агент модели описывается соответствующим C#-классом. Далее под агентом подразумевается соответствующий ему C#-класс.

Согласно диаграмме взаимосвязей агентов (рисунок 1) был введен абстрактный C#-класс Agent, от которого наследуются все агенты модели. В абстрактном классе Agent приведены общие для всех агентов методы, а также модификатором abstract помечены те методы, реализация которых уникальна для каждого агента. При наследовании от класса Agent агент должен реализовать такие методы на основе своего описания.

Каждому агенту в соответствие ставится диаграмма состояний, которая описывается C#-классом StateDiagram. В классе StateDiagram в качестве поля представлен указатель на метод (делегат) типа Func<State>, который должен определить текущее состояние State диаграммы. Реализация метода, на который указывает делегат, предоставляется агентам при наследовании от абстрактного класса Agent.

Каждый оцениваемый параметр описывается объектом C#-класса Parameter. При инициализации агента заполняется массив оцениваемых параметров агента

путем инициализации объектов класса Parameter. При инициализации в конструктор необходимо передать имя параметра, его вес и указатель на метод (делегат) типа `Func<(string,float)>`, который является программной реализацией правила оценки параметра.

За счет введения абстрактного класса Agent и описанием каждого параметра объектом класса Parameter обуславливается расширяемость разрабатываемой агентной модели.

При запуске программы по требованию пользователя происходит загрузка информации об обнаруженных в ходе съема данных дефектах ВЛ, а также загружается трехмерная модель линии электропередачи, которая представляет собой соединенные облака точек попутного лазерного сканирования.

На рисунке 3 представлен итоговый пользовательский интерфейс программы и загруженная трехмерная модель линии электропередачи.

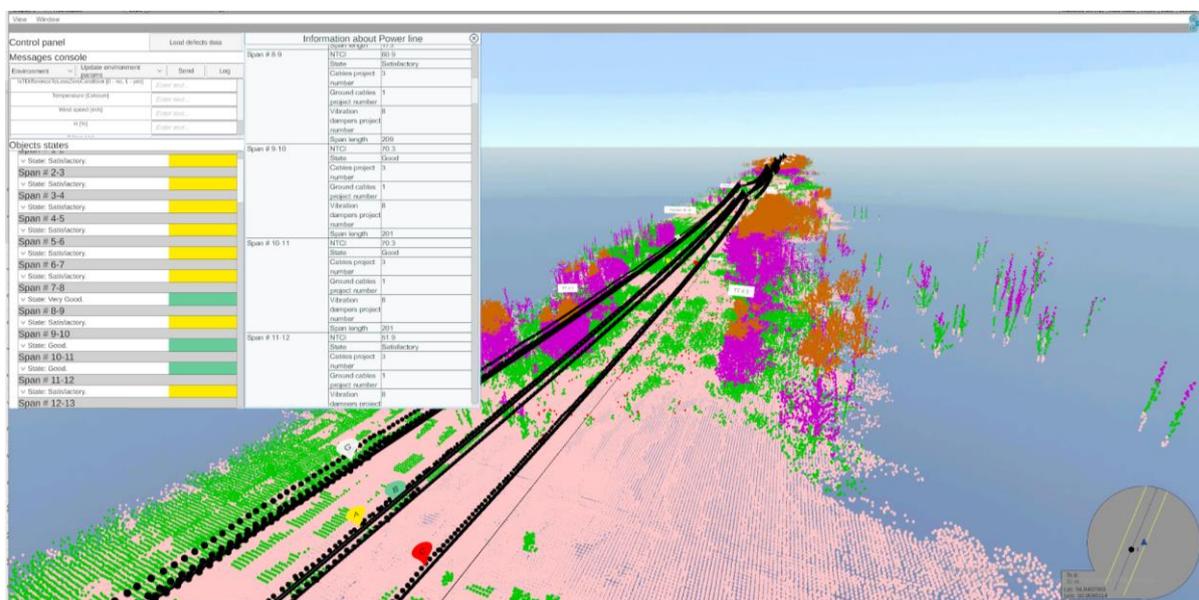


Рисунок 3 – Пользовательский интерфейс программы и визуализация в программе линии электропередачи в трехмерном виде

Пользовательский интерфейс состоит из:

1. Панель отображения состояний ВЛ и ее составных частей с возможностью вывода подробной информации о каждом объекте. Состояния помечаются цветовой отметкой и текстовым описанием. При нажатии на объект выводится подробная информация о нем, где содержатся значения индексов технического состояния, оцениваемых и прочих параметров.

2. Панель управления внешними сообщениями агентной модели, которая предназначена для возможности загрузки результатов диагностик ВЛ на разные периоды времени и для прогнозирования состояния ВЛ и ее составных частей

посредством программного моделирования различных ситуаций, как, например, смена условий окружающей среды.

Результаты и обсуждение

Для проведения моделирования была взята реально существующая линия электропередачи 110 кВ, которая располагается в Свердловской области, Россия. В результате осмотра данной ВЛ было проведено лазерное сканирование 50-ти пролетов ВЛ, была получена информация о дефектах, и подготовлены соответствующие информационные таблицы. Вся полученная информация и облака точек были занесены в агентную модель.

В результате программного моделирования после загрузки данных об диагностике ВЛ было выявлено, что у 18 пролетов индекс технического состояния находится в диапазоне от 50 до 70, что характеризуется удовлетворительным состоянием, у 15 пролетов индекс находится в диапазоне от 70 до 85 (Хорошее состояние). Остальные пролеты находились в очень хорошем состоянии. Основным источником снижения индексов технического состояния стало обилие растительности в пролетах, нарушающей соответствующие нормативные значения.

По результатам программного прогнозирования были выявлены опасности обрывов проводов в ряде проблемных пролетов при сильных минусовых температурах, которые характерны для местоположения линии электропередачи, а также выявлены нарушения нормативных значений расстояний от проводов до объектов при прогнозировании высоких температур окружающей среды.

Заключение

Представленная в данной работе расширяемая агентная модель состояния воздушной линии электропередачи позволяет на основе автоматического расчета индексов технического состояния отслеживать техническое состояние ВЛ и ее составных частей при занесении в модель данных о диагностиках линии электропередачи. Также агентная модель позволяет прогнозировать изменение технического состояния ВЛ и ее составных частей при различных задаваемых условиях.

При последующем расширении агентная модель будет включать в себя оценку технического состояния второго функционального узла линии электропередачи «Опора», также перспективной задачей является расширение агентной модели до отслеживания электроэнергетической системы в целом.

Библиографический список

1. Степень изношенности электрических сетей в России // ELEC.RU : электротехн. интернет-портал. – 2017. – URL: <https://www.elec.ru/news/2017/12/27/gk-moskabelmet-stepen-iznoshennostielektricheskikh.html> (дата обращения: 18.07.2021).
2. Концепция «Цифровая трансформация 2030» // ПАО «Россети» : офиц. сайт. – Москва, 2021. – URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_trans-formatsiya_2030.pdf (дата обращения: 18.07.2021).
3. Kishore T. S. Optimal economic planning of power transmission lines: A review / T. S. Kishore, S. K. Singal // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 39. – P. 949–974. – URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_trans-formatsiya_2030.pdf (date of access: 18.07.2021).
4. A new methodology of fault location for predictive maintenance of transmission lines / P. Silva, M. M. Negro, P. V. Junior. – DOI 10.1016/j.ijepes.2012.04.057 // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 42, Iss. 1. – P. 568–574.
5. Ferreira E. F. Faults monitoring system in the electric power grid of medium voltage / E. F. Ferreira, J. D. Barros. – DOI 10.1016/j.procs.2018.04.123 // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 130. – P. 696–703.
6. Samadi M. Midterm system level maintenance scheduling of transmission equipment using inspection based model / M. Samadi, H. Seifi, M. R. Haghifam. – DOI 10.1016/j.ijepes.2019.03.050 // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Vol. 110. – P. 467–476.
7. A routing algorithm for inspecting grid transmission system using suspended robot: Enhancing cost-effective and energy efficient infrastructure maintenance / B. Nagarajan, Yu Li, Z. Sun, R. Qin. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.02.088 // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 219, Iss. 1. – P. 622–638.
8. Nordman M. M. Distributed Agent-Based State Estimation for Electrical Distribution Networks / M. M. Nordman, M. Lehtonen // IEEE Transactions. – 2005. – Vol. 20, Iss. 2. – P. 652–658.
9. Baxevanos I. S. Implementing Multiagent Systems Technology for Power Distribution Network Control and Protection Management / I. S. Baxevanos, D. P. Labridis // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, Iss. 1. – P. 433–443.
10. Agent based modeling of energy networks / J. M. Gonzalez de Durana, O. Barambones, E. Kremers, L. Varga. – DOI 10.1016/j.enconman.2014.03.018 // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 82. – P. 308–319.
11. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей // DOCS.CNTD.RU : электрон. фонд нормат.-техн. и нормат.-правовой информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/> (дата обращения: 06.08.2021).
12. Бошнякович А. Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи / А. Д. Бошнякович. – 2-е изд. – Ленинград : Энергия, 1971. – 254 с.

13. Попова Е. В. Усовершенствование алгоритмов расчета потокораспределения в электроэнергетических системах с учетом текущего температурного режима воздушных линий электропередачи : спец. 05.14.02 «Электр. станции и электроэнергет. системы» : дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Попова ; Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сиб. отд. Рос. акад. наук. – Иркутск, 2017. – 172 с.
14. Which digital energy services improve energy efficiency? A multi-criteria investigation with European experts / K. Goldbach, A. M. Rotaru, S. Reichert [et al.]. – DOI 10.1016/j.enpol.2017.12.036 // Energy Policy. – 2018. – Vol. 115. – P. 239–248.
15. Morley J. Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption / J. Morley, K. Widdicks, M. Hazas. – DOI 10.1016/j.erss.2018.01.018 // Energy Research & Social Science. – 2018. – Vol. 38. – P. 128–137.
16. Improving the efficiency of using small-distributed generation systems through mechanisms of demand management for electricity and gas / I. Baev, A. Dzyuba, I. Solovyeva, N. Kuzmina. – DOI 10.2495/eq-v3-n4-277-291 // International Journal of Energy Production and Management. – 2018. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 277–291.
17. C# documentation // Библиотека технической документации. – URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/> (дата обращения: 06.07.2021).
18. Unity User Manual // Библиотека технической документации : платформы разработки Unity. – URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (дата обращения: 06.07.2021).
19. Borshchev A. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools / A. Borshchev, A. Filippov // ECON : Iowa State University, Department of Economics. – URL: <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/systemdyndiscreteeventabmcompared.borshchevfilippov04.pdf> (date of access: 06.07.2021).
20. Подход IBM к реализации концепции цифровых двойников // CONTROLENG : науч.-техн. изд. – URL: <https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojniki/podhod-ibm/> (дата обращения: 06.07.2021).