

ФИЗИКА / PHYSICS

УДК 630*181.21

DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.148-163



Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге

**В. В. Побединский^{1*}, А. М. Газизов², С. П. Санников¹,
А. А. Побединский³**

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (г. Екатеринбург, Россия)

²ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Россия)

³ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» (г. Тюмень, Россия)

*pobed@el.ru

Введение. Рассмотрена проблема мониторинга лесного фонда. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования системы лесопользования и лесопользования на базе современных информационных технологий. Самым эффективным решением является использование радиочастотного мониторинга лесного фонда с помощью сети радиочастотных (RFID) устройств. Такая система позволяет оперативно отслеживать перемещения лесосырьевых потоков с точностью до одного бревна, выявлять лесные пожары в самом начале задымления и выполнять многие другие функции. Одним из необходимых параметров функционирования и проектирования системы является комплексная диэлектрическая проницаемость, получить которую традиционными статистическими методами не представляется возможным. Таким образом, цель исследования – получение функциональной зависимости диэлектрической проницаемости от параметров лесной среды на основе нечеткого вывода.

Материалы и методы. Методологическую основу теоретических исследований составили положения математического и нечеткого моделирования, а в части выполнения экспериментальных исследований по апробации системы радиочастотного мониторинга и проверки адекватности предложенной нечеткой модели использовались методы лесной таксации, процессов лесозаготовок, теории информации и передачи сигналов, математической статистики, теории эксперимента. Синтез нечеткой модели был выполнен средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB.

Результаты исследования. Была получена зависимость диэлектрической проницаемости от параметров лесной среды на основе нечеткого вывода. Формально суммарная комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ_k участка лесной среды (полога) и значения входных величин определяются следующим образом: $\epsilon_k = f(V_i, \alpha)$, где V_i – объемная доля i -го компонента лесной среды (в реальных условиях, по данным эксперимента, – от 0 до 0,5); α – константа, учитывающая вид лесного массива (от 0 до 0,5 – открытый участок; от 0,5 до 1,5 – сосновый бор стандартной высоты 25 м; от 1,5 до 2,5 – смешанный лес; от 3,5 до 4,5 – березовая роща; от 4,5 до 5,0 – ельник). Главное отличие предложенного подхода заключается в дискретном представлении лесной среды как суммы элементов леса. Только такой подход обеспечивает точное измерение диэлектрической проницаемости лесной среды.



Обсуждение и заключения. В статье впервые предложен теоретический подход к оценке параметров лесной среды, представленной дискретно, а диэлектрическая проницаемость определена на основе нечеткого моделирования. Практическая применимость результатов заключается в возможности создания структуры информационного обеспечения автоматизированной системы лесопользования и лесопользования на базе мониторинга лесного фонда. Предложенная функция диэлектрической проницаемости участка леса учитывает основные параметры лесной среды и является достаточно корректной. Она необходима для проектирования систем радиочастотного мониторинга лесного фонда и позволяет реализовать принципиально новый подход к решению задач мониторинга лесного фонда.

Ключевые слова: радиочастотный мониторинг, лесной фонд, диэлектрическая проницаемость, комплексная диэлектрическая проницаемость, нечеткое моделирование, нечеткий вывод

Для цитирования: Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге / В. В. Побединский [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 148–163. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163>

Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring

**V. V. Pobedinsky^{1*}, A. M. Gazizov², S. P. Sannikov¹,
A. A. Pobedinskiy³**

¹*Ural State Forestry University (Ekaterinburg, Russia)*

²*Ufa State Oil Technical University (Ufa, Russia)*

³*State Agrarian University of the Northern Trans-Urals (Tyumen, Russia)*

*pobed@el.ru

Introduction. New approach to forestry monitoring is presented. The relevance of the study is caused by the need to improve the forest management system based of modern information technologies. The paper demonstrates radio frequency monitoring as a most effective solution using a network of radio-frequency devices. This system quickly tracks the movement of forest resources, detect forest fires at the beginning of smoke and perform other functions. Complex dielectric permittivity is one of the main parameters for the design and operation of the system. The usual statistical methods do not allow obtaining such permeability. Thus, the aim of the study is to find a functional dependence of the permittivity on the parameters of the forest environment based on fuzzy inference.

Materials and Methods. Mathematical and fuzzy modeling are methods of theoretical research in this paper. In addition, methods of forest inventory and logging processes, information theory and signaling, mathematical statistics, and experimental theory were used to perform experimental studies on approbation of a radio frequency monitoring system and to verify the adequacy of the proposed fuzzy model. We used Fuzzy Logic Toolbox software with MatLab technical computing software as a tool for synthesis.

Results. The dependence of the permittivity on the parameters of the forest environment based on fuzzy inference was obtained. Formally, the total complex dielectric constant ϵ_k of the forest area (canopy) and the values of the input quantities are determined as follows: $\epsilon_k = f(V_i, \alpha)$, where V_i – volume fraction of i component of the forest environment (in real conditions, according to experimental data, is from 0 to 0,5); α – constant, taking into account the type of forest (from 0 to 0,5 – open area; from 0,5 to 1,5 – pine forest of standard height 25 m; from 1,5 to 2,5 – mixed forest; from 3,5 to 4,5 – birch grove; from 4,5 to 5,0 – spruce forest). A feature of the proposed approach is a discrete representation

of the forest environment as a sum of forest elements. This approach provides an accurate measure of the permittivity of the forest environment.

Conclusions. The practical significance of the results lies in the possibility of creating an information support structure for an automated forest management system based on forestry monitoring. The proposed function of the permittivity of the forest area takes into account the main parameters of the forest environment, so it is sufficiently correct. This function is necessary for the design of radio frequency monitoring systems of forestry and allows us to implement a fundamentally new approach to solving the tasks of forest fund monitoring.

Keywords: radio frequency monitoring, forestry, forest, permittivity, complex dielectric permittivity, fuzzy modeling, fuzzy output

For citation: Pobedinsky V. V., Gazizov A. M., Sannikov S. P., Pobedinskiy A. A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio Frequency Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(2):148–163. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163>

Введение

Проблемы сохранения и использования лесов в настоящее время приобретают для лесной отрасли промышленности первостепенное значение. Во многом они определяются недостаточной эффективностью и комплексностью использования заготавливаемой древесины вследствие недостатков организационно-технологических и технических мероприятий, низкого уровня использования лиственной древесины (из-за ограниченного спроса) и ряда других факторов. В целом перечисленное относится к области лесопользования, в частности, контролю состояния лесного фонда, в т. ч. движения сырьевых потоков.

Данные мониторинга являются основой для принятия решений в процессах лесопользования и лесопользования. Но отсутствие должного контроля перемещения лесоматериалов с мест рубок приводит к невозможности учета объемов заготавливаемой древесины, фондов, соблюдения правил рубок, ухода за лесом и практически к стихийному лесопользованию и хищениям.

В управлении лесами Россия имеет большой исторический опыт, но в но-

вых социально-экономических условиях, а также при распространении природных и техногенных катастроф существующие подходы к лесопользованию требуют совершенствования. Эта тенденция нашла законодательную поддержку на правительственном уровне¹, где в числе мероприятий по совершенствованию системы федерального государственного лесного надзора (лесной охраны) и федерального государственного пожарного надзора в лесах указаны меры по созданию новых дистанционных систем наземного, авиационного и космического мониторинга пожарной опасности, защите от незаконных рубок и использованию инновационных информационных технологий.

Так, в ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» была разработана подобная система, не имеющая аналогов в мировой практике [1–2], что подтверждено патентом Российской Федерации². Данная система непрерывного радиочастотного мониторинга лесного фонда использует в качестве одного из основных входных параметров значение комплексной диэлектрической проницаемости

¹ Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года / Правительство Российской Федерации. Распоряжение № 1724-р от 26 сентября 2013 г.

² Патент 2492891 Российская Федерация, МПК A62C 37/00 (2006/01). Система обнаружения лесного пожара / В. Г. Лисенко, С. П. Санников; заявл. 26.04.2012, опубл. 20.09.13, бюл. № 26. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2492891.html>



участка леса на пути распространения радиоволны. В первую очередь такая величина зависит от параметров среды, но в реальных условиях лесная среда характеризуется не статистическими параметрами, как это общепринято в научных исследованиях, а свойствами неопределенности. Следовательно, получить функцию диэлектрической проницаемости в зависимости от множества параметров статистическими методами, требующих огромного объема статистических и экспериментальных данных, не представляется возможным и математически корректным. Для таких условий предназначен аппарат теории нечетких множеств (ТНМ) и его приложение нечеткое моделирование, которые показали свою эффективность в решении широчайшего класса задач во многих отраслях науки и производства. В настоящих исследованиях предварительно были получены определенные экспериментальные результаты³, но для вывода статистических функций этого недостаточно.

Цель исследований – получить функциональную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости участка леса при радиочастотном мониторинге от параметров лесной среды на основе нечеткого моделирования.

Разработка модели предусматривала решение следующих задач.

1. Выполнение содержательной постановки задачи нечеткого моделирования комплексной диэлектрической проницаемости.

2. Определение нечетких функций принадлежности для входных и выход-

ных переменных задачи (приведение к нечеткости).

3. Разработка базы правил нечеткой продукции.

4. Синтез нечеткой модели зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от входных параметров средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB.

Обзор литературы

Множество публикаций российских авторов посвящено использованию ТНМ в задачах моделирования различных процессов, но особенно большой опыт по этой теме накоплен в зарубежных изданиях.

Так, в российских исследованиях наиболее значимой в практическом плане является работа А. В. Леоненкова⁴, где изложены теоретические основы ТНМ, подробно рассмотрены примеры нечеткого моделирования, даны базовые знания работы в системе FuzzyTECH.

В работе В. И. Васильева, Б. Г. Ильясова⁵ рассмотрены вопросы создания интеллектуальных систем для управления летательными аппаратами. Изложены методики разработки интеллектуальных систем на основе нечеткой логики.

Ученые С. Штовба, А. Ротштейн, О. Панкевич [3] применили нечеткую логику для оценки технического состояния строительных бетонных конструкций.

Профессор Варшавского университета А. Пегат⁶ изложил фундаментальные обобщающие исследования по рассматриваемой теме. Несмотря на обширный теоретический материал, работа имеет практическую значимость и освещает методики выполнения не-

³ Санников С. П., Серебrenников М. Ю. Влияние леса на распространение радиочастотного сигнала RFID метки // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. Екб. : Изд-во УГЛУ, 2013. Ч. 2. С. 87–90.

⁴ Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leolenkov-av&book=2005>

⁵ Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления: теория и практика : учеб. пособие. М. : Радиотехника, 2009. 392 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/931617>

⁶ Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. 798 с. URL: http://window.edu.ru/resource/324/65324/files/Pegat_978-5-94774-353-1/1-2-3_cb353-1.pdf

четкого вывода, нечеткого моделирования и нечеткого управления. Особенно ценной и даже уникальной можно считать предложенную методику проверки на устойчивость нечетких регуляторов.

Среди зарубежных исследований следует отметить Л. А. Заде, который является основоположником теории ТНМ и разработчиком других ее положений [4–5]. Также известны как создатели ряда прикладных методов использования ТНМ Е. Х. Мамдани [6], Т. Такаги, М. Сугено [7].

До настоящего времени за рубежом наблюдается творческий бум в развитии ТНМ, который охватывает не только прикладные исследования, но и математический аппарат учета нечеткости, неопределенности и других аспектов этого понятия [8–10].

Известно большое количество работ по нечеткому моделированию технических объектов, например [11–13]. Однако следует отметить, что одним из отличий зарубежных исследований от российских является значительно большее количество публикаций по различным гуманитарным направлениям использования ТНМ [14–16], в юриспруденции [17], экономике [18] и, что может быть особенно ценно и перспективно, медицинских науках [19–21].

Вопросы исследования свойств лесной среды на основе нечеткого моделирования ранее не рассматривались.

Материалы и методы

Методологическую основу теоретических исследований составили положения математического и нечеткого моделирования, а в части выполнения экспериментальных исследований по апробации системы радиочастотного мониторинга и проверки адекватности

предложенной нечеткой модели использовались методы лесной таксации, процессов лесозаготовок, теории информации и передачи сигналов, математической статистики, теории эксперимента.

Для практической реализации нечетких моделей в основном используется система компьютерной математики MATLAB⁷, которая располагает средствами для этой цели: приложениями Fuzzy Logic Toolbox, FIS Editor, системами имитационного моделирования Simulink.

Разработка нечеткого вывода функции выполнялась по известной методике^{8–10} [3] в последовательности, приведенной ниже. Данная методика нечеткого вывода использовалась авторами ранее для решения другой задачи [22].

Результаты исследования

1. Содержательная постановка задачи моделирования диэлектрической проницаемости участка леса

В известной методике содержательная постановка задачи используется для того, чтобы представить данные об основных параметрах лесного фонда в форме определенных эвристических правил, моделирующих диэлектрическую проницаемость участка леса. Выполняется описание поведения или состояния объекта и его диэлектрической проницаемости в зависимости от сочетания основных влияющих на него параметров. В данном случае эта процедура осуществляется одновременно с формированием базы основных правил системы нечеткого вывода, а в содержательном описании задачи определяются наиболее специфические особенности моделирования диэлектрической проницаемости.

⁷ MATLAB® & Simulink® release notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>

⁸ Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leonenkovav&book=2005>

⁹ Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления: теория и практика : учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/931617>

¹⁰ MATLAB® & Simulink® release notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>



В первую очередь рассмотрим свойства лесной среды (породный состав, плотность насаждений, полноту деревьев), которые влияют на величину диэлектрической проницаемости. Предположим, что другие влияющие параметры (влажность, температура воздуха, конструктивные параметры сети радиочастотных устройств, рабочая частота) постоянны.

Итак, полнота лесонасаждений может быть выражена нормированной величиной 0 до 1. Следует учесть, что сеть мониторинга должна реагировать на рубки и перемещение древесины любого объема от одного дерева. Поэтому для удобства в данном случае обозначим ее величиной объемной доли компонента лесной среды, также в нормированном виде.

Диэлектрическая проницаемость находится в прямо пропорциональной зависимости от объемной доли компонента, поскольку с увеличением полноты регистрируемого ствола диэлектрическая проницаемость среды увеличивается. Другими словами, при минимальной объемной доле компонента диэлектрическая проницаемость при прочих равных условиях будет минимальной и наоборот. Выражается это комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_k , обусловленной неоднородностью среды и определяемой как сумма значений параметров отдельных компонентов леса:

$$\epsilon_k = \sum V_i \epsilon_i$$

где V_i – объемная доля i -го компонента лесной среды; α – константа, учитывающая вид лесного массива (полога); ϵ_i – комплексная диэлектрическая проницаемость отдельного компонента лесной среды.

Оценку породного состава и одновременно плотности насаждений воз-

можно выполнить также с использованием нормированной величины в виде коэффициентов (констант), а для учета многообразия этих сочетаний можно выделить соответствующие диапазоны коэффициентов. Влияние данного параметра обратно пропорциональное, т. е. при увеличении константы, учитывающей вид лесного массива (породный состав, плотность насаждений и др.) диэлектрическая проницаемость среды уменьшается, при этом увеличивается коэффициент затухания (мнимая часть в формуле комплексной диэлектрической проницаемости лесной среды).

Для дальнейшей постановки задачи необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

2. Определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости)

Запишем формулу суммарной комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_k участка лесной среды (полога) и значения входных величин в следующем виде:

$$\epsilon_k = f(V_i, \alpha),$$

где V_i – объемная доля i -го компонента лесной среды, изменяется от 0 до 1 (в реальных условиях, по данным эксперимента – от 0 до 0,5); α – константа, учитывающая вид лесного массива (от 0 до 0,5 – открытый участок; от 0,5 до 1,5 – сосновый бор стандартной высоты 25 м; от 1,5 до 2,5 – смешанный лес; от 3,5 до 4,5 – березовая роща; от 4,5 до 5,0 – ельник).

Предварительные экспериментальные исследования¹¹ показали, что величина комплексной диэлектрической проницаемости для частоты 865 МГц имеет следующие значения: $\epsilon_{\text{ель}} =$ от 14 до 56 Ф/м, $\epsilon_{\text{сосна}} =$ от 11 до 50 Ф/м; для

¹¹ Санников С. П., Серебренников М. Ю. Влияние леса на распространение радиочастотного сигнала RFID метки // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. Екб. : Изд-во УГЛУ, 2013. Ч. 2. С. 87–90.

частоты 2,4 ГГц: $\varepsilon_{\text{кель}} =$ от 11 до 55 Ф/м, $\varepsilon_{\text{ксоша}} =$ от 10 до 48 Ф/м.

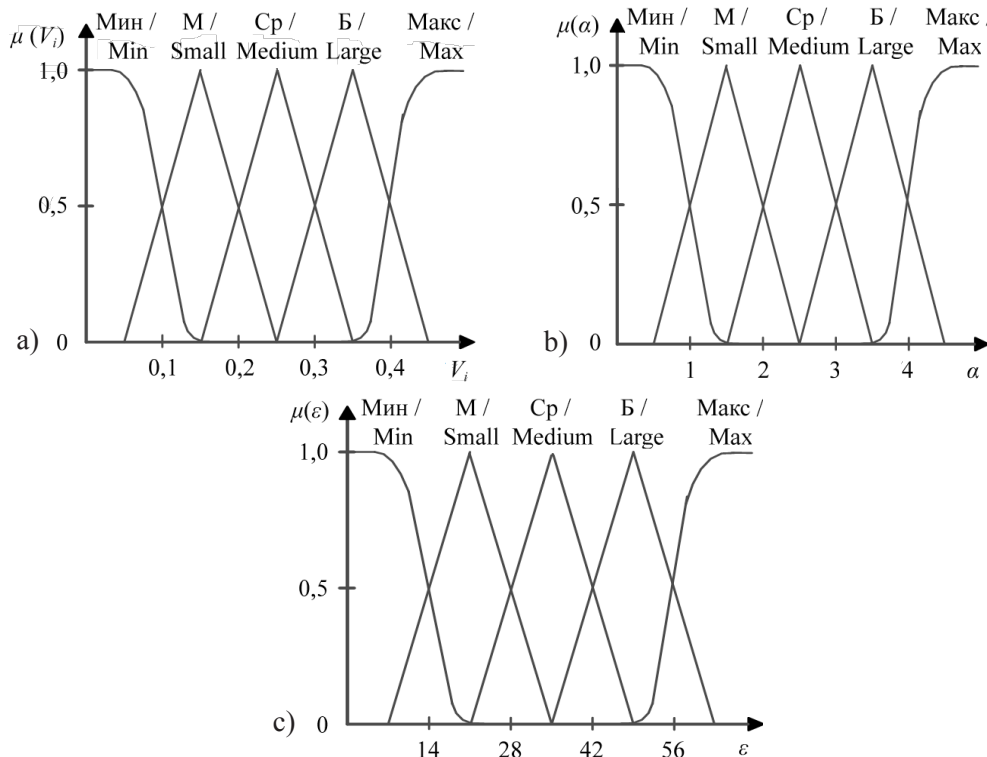
В отдельных случаях диэлектрическая проницаемость может составлять величины ~ 4 Ф/м и достигать 70 Ф/м.

Таким образом, в задаче следует принять диапазон изменений входной величины $\varepsilon_{\text{к}}$ от 0 до 70, выходных величин V_i – от 0 до 0,5 и α – от 0 до 5.

Будем полагать, что термножества значений лингвистических переменных представлены треугольными нечеткими числами, а на границах области определения сигмоидальными нечеткими интервалами (рис. 1). Выбор сигмоидальных функций, а не традиционно используемых трапецидальных позволяет

получить более сглаженную результирующую функцию. На рис. 1, а–б показаны функции принадлежности входных переменных «Объемная доля компонента V_i » и «Константа вида лесного массива α »; на рис. 1, с приведена нечеткая функция лингвистической выходной переменной «Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{к}}$ ».

Во многих случаях при решении подобных задач¹² [3] на универсуме нечеткого множества принимают минимальное значение функции принадлежности, равное 3, что позволяет ограничиться небольшим объемом базы правил. Но вместе с тем в зависимости от размерности параметров выходная величина аппроксимируется менее гладкой, сту-



Р и с. 1. Нечеткие функции принадлежности лингвистических переменных для вывода функции $\varepsilon_{\text{к}} = f(V_i, \alpha)$: а) «Объемная доля компонента V_i »; б) «Константа вида лесного массива α »; в) «Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{к}}$ »

F i g. 1. Fuzzy membership functions of linguistic variables for derivation of the function $\varepsilon_{\text{к}} = f(V_i, \alpha)$: а) "Volume fraction of the V_i component"; б) "The constant of the type of forest massif α "; в) "Dielectric constant $\varepsilon_{\text{к}}$ "

¹² **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. 798 с. URL: http://window.edu.ru/resource/324/65324/files/Pegat_978-5-94774-353-1/1-2-3_cB353-1.pdf



пенчатой функцией. В данном случае целесообразно принять 5 значений лингвистических переменных. (4 входных и 1 выходной).

В качестве обозначений лингвистических переменных для предложенных функций приняты следующие значения: «Минимальная» – Мин; «Малая» – М; «Средняя» – Ср; «Большая» – Б; «Максимальная» – Макс.

В терминах ТНМ лингвистические переменные определены термножествами со следующие значениями:

– «Объемная доля компонента V_i » {Мин, М, Ср, Б, Макс};

– «Константа вида лесного массива α » {Мин, М, Ср, Б, Макс};

– «Диэлектрическая проницаемость ε_k » {Мин, М, Ср, Б, Макс}.

Принятые нечеткие функции принадлежности для вывода функции $\varepsilon_k = f(V_i, \alpha)$ показаны на рис. 1.

3. Формирование базы правил системы нечеткого вывода

Для нечеткого вывода функции принадлежности используем метод Мамда-

ни¹³ [6], что предполагает разработку базы правил нечеткой продукции.

Опишем влияние некоторых сочетаний входных воздействий на выходной параметр.

Если V_i = «Минимальная» и α = «Минимальная», То ε_k = «Минимальная»;

Если V_i = «Минимальная» и α = «Малая», То ε_k = «Малая»;

Если V_i = «Максимальная» и α = «Максимальная», То ε_k = «Максимальная»;

Если V_i = «Малая» и α = «Минимальная», То ε_k = «Минимальная»;

Если V_i = «Средняя» и α = «Минимальная», То ε_k = «Малая»;

Если V_i = «Максимальная» и α = «Большая», То ε_k = «Максимальная».

Используя описание вариантов сочетаний входных параметров (V_i и α), а также большее количество значений лингвистических переменных (например, «Средняя», «Большая», «Малая») и специфических особенностей явления, можно формализовать базу правил нечеткого вывода функции диэлектрической проницаемости (таблица).

Таблица

Table

База правил нечеткой продукции для моделирования величины диэлектрической проницаемости $\varepsilon_k = f(V_i, \alpha)$

The base of fuzzy production rules for modeling the dielectric permittivity $\varepsilon_k = f(V_i, \alpha)$

Значения лингвистической переменной «Объемная доля компонента V_i » / Values of the linguistic variable "Volume fraction of the V_i component"	Значения выходных нечетких подмножеств «Диэлектрическая проницаемость ε_k » при изменении нечеткой функции «Константа особенностей лесного массива α » / The values of output fuzzy subsets "Dielectric Permeability ε_k " with a change in the fuzzy function "The singularity constant of the forest array α "				
	Мин / Minimum	М / Small	Ср / Medium	Б / Large	Макс / Maximum
Мин / Minimum	Мин	Мин	М	М	Ср
М / Small	Мин	М	М	Ср	Б
Ср / Medium	М	М	Ср	Б	Макс
Б / Large	Ср	Б	Б	Макс	Макс
Макс / Maximum	Ср	Б	Б	Макс	Макс

¹³ Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leolenkov-av&book=2005>

Нечеткий вывод результирующей функции выполнен по методу Мамдани^{14–15} [6]. Схема вывода в MATLAB-формате приведена на рис. 2.

4. *Синтез нечеткой модели зависимости диэлектрической проницаемости от параметров лесной среды*

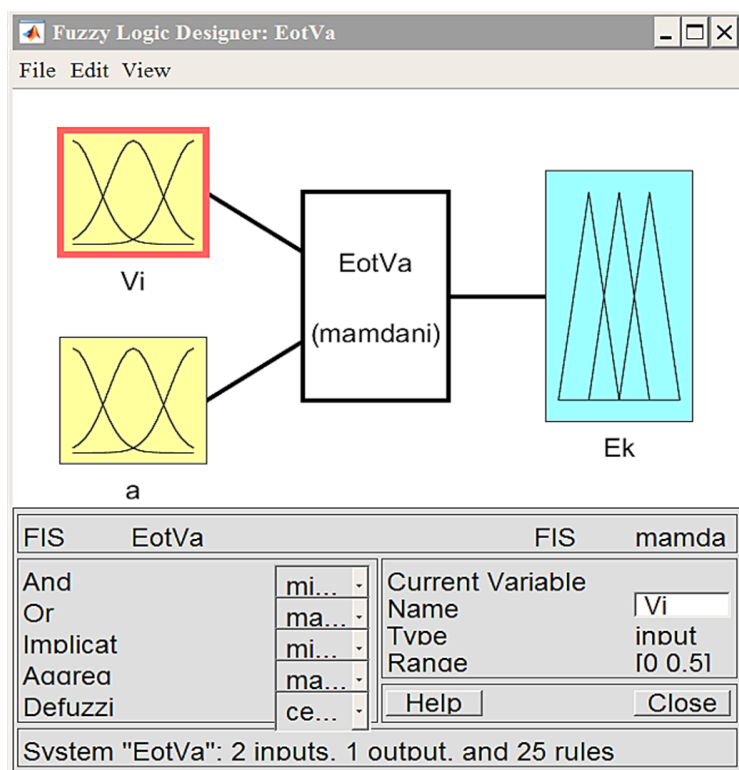
Изложенная формальная постановка задачи нечеткого вывода позволяет реализовать ее в специализированных компьютерных программах.

Реализация задачи нечеткого вывода выполнена в среде Fuzzy Logic

Toolbox приложения MATLAB¹⁷. Процедура вывода показана на рис. 3.

В данном случае использовался алгоритм по известной методике¹⁸ [Там же]:

- 1) фаззификация (введение нечеткости) (рис. 3, а–с);
- 2) формирование базы правил нечеткой продукции (рис. 3, d);
- 3) нечеткий вывод (рис. 3, e);
- 4) дефаззификация (приведение к четкости) (рис. 3, e);
- 5) получение конечной функции нечеткого вывода (рис. 3, f).



Р и с. 2. Схема нечеткого вывода в среде MATLAB¹⁶

F i g. 2. The scheme of fuzzy output in the MATLAB environment

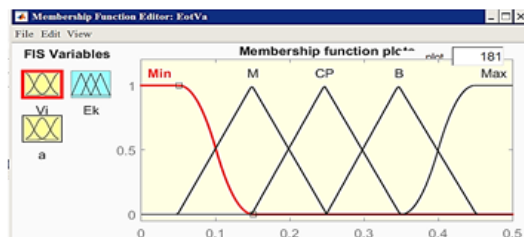
¹⁴ Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с. URL: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leolenkov-av&book=2005>

¹⁵ MATLAB® & Simulink® release notes for R2008a. URL: <http://www.mathworks.com>

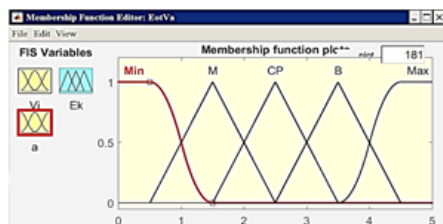
¹⁶ Там же.

¹⁷ Там же.

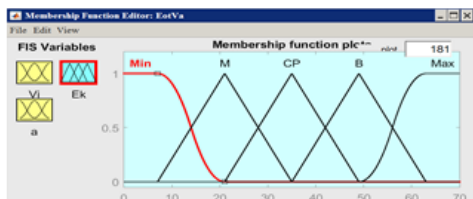
¹⁸ Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH.



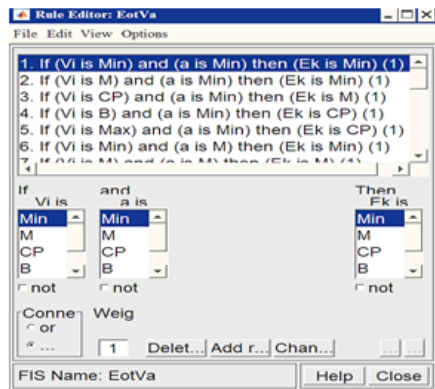
a)



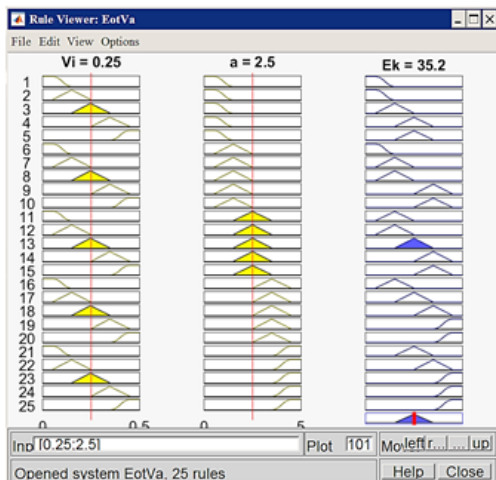
b)



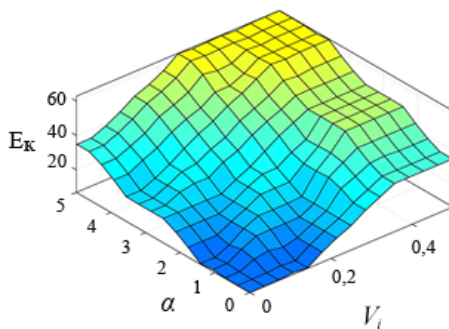
c)



d)



e)



f)

Р и с. 3. Нечеткий вывод функции $\varepsilon_k = f(V_i, a)$ в среде Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB:

а) нечеткая функция принадлежности переменной «Объемная доля компонента V_i »; б) нечеткая функция принадлежности переменной «Диэлектрическая проницаемость ε_k »; в) нечеткая функция принадлежности лингвистической переменной «Константа вида лесного массива a »;

д) база правил нечеткого вывода; е) процедура нечеткого вывода и приведения к четкости;

ф) функция нечеткого вывода диэлектрической проницаемости

Fig. 3. Fuzzy output of the function $\varepsilon_k = f(V_i, a)$ in the Fuzzy Logic Toolbox environment of the MATLAB application: а) fuzzy membership function of the variable “Volume fraction of the component V_i ”; б) fuzzy membership function of the variable “Dielectric constant ε_k ”; в) fuzzy function of belonging to the linguistic variable “Constant type of forest a ”;

е) procedure of fuzzy inference and reduction to clarity; ф) fuzzy inference function of the dielectric permeability

Полученная в результате нечеткого вывода функция является достаточно корректной математически и может использоваться для прогнозирования величины комплексной диэлектрической проницаемости участка леса между датчиками при радиочастотном мониторинге с учетом характеристик лесной среды.

Обсуждение и заключения

Как было отмечено, достаточно обстоятельных исследований, направленных на создание систем радиочастотного мониторинга леса, ни в России, ни за рубежом не проводилось.

Следует упомянуть только одну работу – В. И. Попова¹⁹ (Латвия), суть которой заключалась в следующем. Автором рассматривалась лесная среда как многослойная структура. Такие элементы как кроны деревьев, образующие полог леса, воздушная среда под пологом, почва представлялись как слои квазиоднородной анизотропной линейной среды, но фактически вследствие допущений в модели, в итоге они сводились к однородной среде. Параметры, основанные на таких физических принципах, не могут оценивать лесную среду как строго дискретную, состоящую из элементов леса. Следовательно, системы мониторинга будут нечувствительны к перемещению лесосырьевых потоков, а тем более одного бревна.

Главное отличие предложенного в статье подхода заключается в дискретном представлении лесной среды как суммы элементов леса. Только такой подход обеспечивает измерения диэлектрической проницаемости лесной среды с точностью до одного бревна и, следовательно, позволяет проконтролировать путь его перемещения. Этот факт был подтвержден в результате экспериментов [1; 23–24]. Другое отличие заключается в выявлении и формализации связи комплексной ди-

электрической проницаемости лесной среды с объемной долей компонента леса и видом лесного массива.

Научная новизна работы следует из отличительных особенностей результатов, т. е. впервые предложен теоретический подход к оценке параметров лесной среды, представленной дискретно, как сумма элементов леса, и к определению диэлектрической проницаемости на основе нечеткого моделирования.

Кроме того, в ходе исследований была установлена функциональная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости леса от основных параметров лесной среды: объемных долей компонентов и вида лесного массива (открытый участок, сосновый бор стандартной высоты 25 м, смешанный лес, березовая роща, ельник).

Практическая применимость результатов заключается в возможности создания структуры информационного обеспечения автоматизированной системы лесопользования и лесопользования на базе мониторинга лесного фонда. Результаты в виде функциональной зависимости, полученной на основе нечеткого вывода, необходимы для проектирования систем радиочастотного мониторинга лесного фонда.

Результаты исследований составили содержание НИОКР Уральского государственного лесотехнического университета «Экологический и экспериментальный мониторинг лесов и управление ими на основе технологии RFID» (рег. № 01 ЛИФ-2009) и раздел «Разработка методики и регламента на проведение мониторинга движения сырьевых потоков в лесопромышленном производстве на основе технологий RFID» в отчете НИОКР «Разработка новых технологий заготовки и переработки древесного сырья в рамках научно-исследовательских программ Уральского лесного технопарка» (рег. № 11-01).

¹⁹ **Попов В. И.** Распространение радиоволн в лесах. М. : Горячая линия-Телеком, 2017. 392 с.



Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. В настоящее время совершенствование методов изучения параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге невозможно без применения интеллектуальных программных систем и компьютерных средств. Предложенная постановка задачи нечеткого моделирования диэлектрической проницаемости участка леса и реализация соответствующего программного обеспечения в среде MATLAB позволяет эффективно использовать информационные технологии в исследованиях, моделировании и совершенствовании систем радиочастотного мониторинга лесного фонда.

2. Разработка модели оценки диэлектрической проницаемости участка леса с привлечением статистических методов является чрезвычайно трудоемкой и недостаточно корректной. Для условий такого класса задач в наибольшей мере подходит аппарат нечетких множеств.

3. Предлагаемая функция диэлектрической проницаемости участка леса, построенная на основе нечеткого вывода, учитывает основные параметры лесной среды, а сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными демонстрирует адекватность разработанной модели, что позволяет реализовать принципиально новый подход к решению задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метод мониторинга незаконных рубок деревьев с использованием радиочастотных устройств и беспроводной сенсорной сети / С. П. Санников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2017. Т. 33, № 1. С. 118–123. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-118-123>
2. Модель информационного обеспечения системы лесоуправления на базе радиочастотного мониторинга лесного фонда / С. П. Санников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2017. Т. 34, № 2. С. 109–115. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-2-109-115>
3. **Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O.** Fuzzy rule based system for diagnosis of stone construction cracks of buildings // *Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 401–411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7_28
4. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8, no. 3. P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
5. **Zadeh L. A.** Fuzzy logic // *IEEE Transactions on Computers*. 1988. Vol. 21, no. 4. P. 83–93.
6. **Mamdani E. H.** Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers*. 1977. Vol. 26, no. 12. P. 1182–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779>
7. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985. Vol. 15, no. 1. P. 116–132. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
8. **Garg H.** A linear programming method based on an improved score function for interval-valued Pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500046>
9. Adaptive fuzzy tracking control for stochastic nonlinear systems with time-varying input delays using the quadratic functions / H. Yue [et al.] // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 109–142. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500071>
10. **Schneider J., Urban R.** Proof of Donsker's invariance principle based on support functions of fuzzy random vectors // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500022>

11. **Carneiro A. L. G., Porto Jr. A. C. S.** An integrated approach for process control valves diagnosis using fuzzy logic // World Journal of Nuclear Science and Technology. 2014. Vol. 4. P. 148–157. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43019>
12. **Lin J.-J., Chuang C.-J., Ko C.-F.** Applying GA and fuzzy logic to breakdown diagnosis for spinning process // Intelligent Information Management. 2017. Vol. 9. P. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2017.91002>
13. Frequency features based fuzzy system for rotating machinery vibration analysis using smart-phones low-cost MEMS sensors / A. Ali [et al.] // Journal of Sensor Technology. 2016. Vol. 6. P. 56–74. DOI: <https://doi.org/10.4236/jst.2016.63005>
14. **Uraon K. K., Kumar S.** Analysis of defuzzification method for rainfall event // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 341–354.
15. **Alguliyev R., Abdullayeva F.** Development of fuzzy risk calculation method for a dynamic federation of clouds // Intelligent Information Management. 2015. Vol. 7. P. 230–241. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2015.74018>
16. **Moises S. A., Pereira S. do L.** Dealing with empty and overabundant answers to flexible queries // Journal of Data Analysis and Information Processing. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003>
17. **Perez O.** Fuzzy law: a theory of quasi-legality // Canadian Journal of Law & Jurisprudence. 2015. Vol. 28, no. 2. P. 343–370. URL: https://www.researchgate.net/publication/303389581_Fuzzy_Law_A_Theory_of_Quasi-Legality_in_Patrick_Glenn_and_Lionel_Smith_Eds_'Law_and_the_New_Logics'_Cambridge_University_Press_Forthcoming_2016
18. **Xu W., Liu G., Yu X.** A binomial tree approach to pricing vulnerable option in a vague world // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. 2018. Vol. 26, no. 01. P. 143–162. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500083>
19. **Ntaganda J. M., Haggard M. S. D., Mampassi B.** Fuzzy logic strategy for solving an optimal control problem of therapeutic hepatitis C virus dynamics // Open Journal of Applied Sciences. 2015. Vol. 5, no. 9. P. 527–541. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.59051>
20. **Gour A., Pardasani K. R.** Statistical and soft fuzzy set based analysis of amino acid association patterns in peptide sequence of swine influenza virus // Advanced Science, Engineering and Medicine. 2018. Vol. 10, no 2. P. 137–144. DOI: <https://doi.org/10.1166/ase.2018.2118>
21. **Miranda G. H. B., Felipe J. C.** Computer-aided diagnosis system based on fuzzy logic for breast cancer categorization // Computers in Biology and Medicine. 2015. Vol. 64, Issue C. P. 334–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.10.006>
22. Зависимость падения мощности сигнала от параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге лесного фонда / С. П. Санников [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2016. Т. 32, № 4. С. 181–187. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-4-181-187>
23. **Санников С. П., Побединский В. В., Побединский А. А.** Модель рассеивания радиоволн в лесной среде // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. Т. 21, № 3. С. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2017-3-6>
24. **Санников С. П., Побединский В. В., Побединский А. А.** Экспериментальное исследование характеристик сигнала при радиочастотном мониторинге лесной среды // Вестник Поволжского государственного технологического университета (Сер. «Лес. Экология. Природопользование»). 2017. Т. 36, № 4. С. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.4.48>

Поступила 09.03.2018; принята к публикации 12.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018

Об авторах:

Побединский Владимир Викторович, профессор кафедры сервиса и технической эксплуатации, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37), доктор технических наук, ResearcherID: G-3245-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, pobed@el.ru



Газизов Асгат Мазхатович, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (450064, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 5/1), доктор технических наук, ResearcherID: G-4307-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7940-8444>, ashatgaz@mail.ru

Санников Сергей Петрович, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (620100, Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37), кандидат технических наук, ResearcherID: G-4047-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6135-6954>, ssp-54@mail.ru

Побединский Андрей Анатольевич, старший преподаватель кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики, ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья» (625621, Россия, г. Тюмень, Рошинское ш., д. 18), Researcher ID: G-3777-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>, vm993711@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Побединский – научное руководство, математическая постановка задачи и разработка нечеткой модели; А. М. Газизов – подготовка черного варианта статьи; С. П. Санников – выполнение экспериментальных исследований по теме, проверка модели на адекватность; А. А. Побединский – разработка прикладного программного обеспечения для реализации моделей, обработка и интерпретация данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Borodulin I. V., Pobedinsky A. A. Method of monitoring of illegal tree felling with the use of radio-frequency devices and wireless sensor network. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2017; 1(33):118–123. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-118-123> (In Russ.)
2. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Borodulin I. V., Pobedinsky A. A. Model of information support of the forest management system on the basis of radio frequency monitoring of the forest fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2017; 2(34):109–115. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-2-109-115> (In Russ.)
3. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy rule based system for diagnosis of stone construction cracks of buildings // *Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 401–411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7_28
4. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965; 8(3):338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
5. Zadeh L. A. Fuzzy logic. *IEEE Transactions on Computers*. 1988; 21(4):83–93.
6. Mamdani E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers*. 1977; 26(12):1182–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779>
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985; 15(1):116–132. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
8. Garg H. A linear programming method based on an improved score function for interval-valued Pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):67–80. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500046>
9. Yue H, Li J., Shi J., Yang W. Adaptive fuzzy tracking control for stochastic nonlinear systems with time-varying input delays using the quadratic functions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):109–142. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500071>

10. Schneider J., Urban R. Proof of Donsker's invariance principle based on support functions of fuzzy random vectors. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):27–42. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500022>
11. Carneiro A. L. G., Porto Jr. A. C. S. An integrated approach for process control valves diagnosis using fuzzy logic. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2014; 4:148–157. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43019>
12. Lin J.-J., Chuang C.-J., Ko C.-F. Applying GA and fuzzy logic to breakdown diagnosis for spinning process. *Intelligent Information Management*. 2017; 9:21–38. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2017.91002>
13. Ali A., El-Serafi K., Mostafa S. A. K., El-Sheimy N. Frequency features based fuzzy system for rotating machinery vibration analysis using smartphones low-cost MEMS sensors. *Journal of Sensor Technology*. 2016; 6:56–74. DOI: <https://doi.org/10.4236/jst.2016.63005>
14. Uraon K. K., Kumar S. Analysis of defuzzification method for rainfall event. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2016; 1(1):341–354.
15. Algiyev R., Abdullayeva F. Development of fuzzy risk calculation method for a dynamic federation of clouds. *Intelligent Information Management*. 2015; 7:230–241. DOI: <https://doi.org/10.4236/iim.2015.74018>
16. Moises S. A., Pereira S. do L. Dealing with empty and overabundant answers to flexible queries. *Journal of Data Analysis and Information Processing*. 2014; 2(1):12–18. DOI: <https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003>
17. Perez O. Fuzzy law: A theory of quasi-legality. *Canadian Journal of Law & Jurisprudence*. 2015; 28(2):343–370. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303389581_Fuzzy_Law_A_Theory_of_Quasi-Legality_in_Patrick_Glenn_and_Lionel_Smith_Eds_'Law_and_the_New_Logics'_Cambridge_University_Press_Forthcoming_2016
18. Xu W., Liu G., Yu X. A binomial tree approach to pricing vulnerable option in a vague world. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):143–162. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218488518500083>
19. Ntaganda J. M., Haggag M. S. D., Mampassi B. Fuzzy logic strategy for solving an optimal control problem of therapeutic hepatitis C virus dynamics. *Open Journal of Applied Sciences*. 2015; 5(9):527–541. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.59051>
20. Gour A., Pardasani K. R. Statistical and soft fuzzy set based analysis of amino acid association patterns in peptide sequence of swine influenza virus. *Advanced Science, Engineering and Medicine*. 2018; 10(2):137–144. DOI: <https://doi.org/10.1166/ase.2018.2118>
21. Miranda G. H. B., Felipe J. C. Computer-aided diagnosis system based on fuzzy logic for breast cancer categorization. *Computers in Biology and Medicine*. 2015; 64:334–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2014.10.006>
22. Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Gazizov A. M., Borodulin I. V., Chernitsyn M. A., Kuzminov N. S. Dependence of the signal power loss on the forest ambience parameters under radio-frequency monitoring of forest fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2016; 32(4):181–187. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-4-181-187> (In Russ.)
23. Sannikov S. P., Pobedinskiy V. V., Pobedinskiy A. A. Model scattering of radio waves in a forest. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol* = Measurement. Monitoring. Control. 2017; 21(3):39–48. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2017-3-6> (In Russ.)
24. Sannikov S. P., Pobedinskiy V. V., Pobedinskiy A. A. Experimental study of characteristics of a signal at the radio-frequency monitoring of forest environment. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovaniye* = Volga State Technological University Bulletin. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2017; 36(4):48–58. DOI: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.4.48>

Received 09.03.2018; revised 12.04.2018; published online 29.06.2018

*About authors:*

Vladimir V. Pobedinsky, Professor, Chair of Service and Technical Operation, Ural State Forestry University (37 Sibirskiy Trakt St., 620100 Ekaterinburg, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-3245-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, pobed@el.ru

Asgat M. Gazizov, Professor, Chair of Fire Protection and Industrial Safety, Ufa State Oil Technical University (5/14 Kosmonavtov St., Ufa 500064, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-4307-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7940-8444>, ashatgaz@mail.ru

Sergey P. Sannikov, Associate Professor, Chair of Automation of Production Process, Ural State Forestry University (37 Sibirskiy Trakt St., 620100 Ekaterinburg, Russia), ResearcherID: G-4047-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6135-6954>, ssp-54@mail.ru

Andrey A. Pobedinskiy, Senior Lecturer, Chair of Forestry and Applied Mechanics, State Agrarian University of the Northern Trans-Urals (18, Roshinskoye Shosse, Tyumen 625621, Russia), ResearcherID: G-3777-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>, vm993711@mail.ru

Authors' contribution:

V. V. Pobedinsky – scientific management, mathematical formulation of the problem and development of a fuzzy model; A. M. Gazizov – writing the draft; S. P. Sannikov – development of experimental studies, testing of the model; A. A. Pobedinskiy – software development for implementing the model, data processing and interpretation.

All authors have read and approved the final version of the paper.