

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.8:631.674.6

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-123-144

Формализация параметров модуля фертигации в системах капельного орошения

Анастасия Витальевна Тащилина¹, Максим Васильевич Тащилин²

^{1, 2}Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

имени М. И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

¹Tashchilina.av@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7132-8140>

²Tashilin.maxim@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6629-7669>

Аннотация. Цель: формализовать параметры, от которых зависит выбор оптимальных норм внесения удобрений, нечеткими множествами для построения нечеткой модели и системы управления модулем фертигации. **Материалы и методы.** Применение методов Soft Computing обусловлено необходимостью представления значений входных переменных в виде нечетких множеств с последующей структурной и параметрической идентификацией нечеткой модели контроля концентрации питательных веществ раствора. Это позволит составить нечеткие базы знаний в виде правил «ЕСЛИ – ТО» и, используя методы нечеткой логики, определить четкие значения выходных переменных: необходимые дозы внесения азота, фосфора и калия с поливной водой. **Результаты.** В качестве входных переменных определены параметры, от которых зависит выбор оптимальных норм удобрений. На выходе модели используются три переменные, определяющие нормы азота, фосфора и калия питательного раствора. Для каждой из выбранных входных и выходных переменных выбраны диапазоны измерений, значения лингвистических термов и построены функции принадлежности. **Выводы.** Проведенная формализация входных и выходных величин даст возможность построить структуру модели управления модулем фертигации, сформировать нечеткие базы правил и осуществить нечеткий логический вывод по алгоритму Мамдани. Это позволит провести дефазификацию выходных переменных по методу центра тяжести с целью получения на выходе четкого числового значения. Также возможно проведение параметрической идентификации полученной модели по обучающей выборке путем настройки параметров функций принадлежности. Благодаря использованию IoT-технологий можно будет осуществлять внешний контроль и при необходимости ручное управление системой фертигации.

Ключевые слова: капельное орошение, фертигация, интернет вещей, функция принадлежности, нечеткая логика

Для цитирования: Тащилина А. В., Тащилин М. В. Формализация параметров модуля фертигации в системах капельного орошения // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 123–144. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-123-144>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Formalization of fertigation module parameters in drip irrigation systems

Anastasia V. Tashchilina¹, Maxim V. Tashchilin²

^{1, 2}M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk,
Russian Federation

¹Tashchilina.av@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7132-8140>

²Tashilin.maxim@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6629-7669>

Abstract. Purpose: to formalize the parameters on which the choice of optimal fertilizer application rates depends with fuzzy sets for constructing a fuzzy model and a control system for the fertigation module. **Materials and methods.** The use of Soft Computing methods is required by the need to represent the input variables values in the form of fuzzy sets, with further structural and parametric identification of a fuzzy model for controlling the concentration of nutrients in the solution. This will enable to compile fuzzy knowledge bases in the form of “IF – THEN” rules and, using fuzzy logic methods, to determine the well-defined values of output variables: the necessary application rates of nitrogen, phosphorus and potassium with irrigation water. **Results.** As input variables, the parameters on which the choice of optimal fertilizer rates depends are determined. At the output of the model, three variables determining the norms of nitrogen, phosphorus and potassium of the nutrient solution are used. For each of the selected input and output variables, the measurement ranges and the linguistic term values are selected and membership functions are constructed. **Conclusions.** The conducted formalization of input and output values will make it possible to build the structure of the fertigation module control model, to form fuzzy rule bases and to implement fuzzy logical inference according to the Mamdani algorithm. This will allow defuzzification of the output variables using the center of gravity method in order to obtain a clear numerical value at the output. It is also possible to carry out parametric identification of the obtained model from the training sample by adjusting the membership functions parameters of the. Thanks to the use of IoT technologies, it will be possible to carry out external control and, if necessary, manual control of the fertigation system.

Keywords: drip irrigation, fertigation, Internet of Things, membership function, fuzzy logic

For citation: Tashchilina A. V., Tashchilin M. V. Formalization of fertigation module parameters in drip irrigation systems. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):123–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-123-144>.

Введение. В предыдущих работах [1, 2] проводилось моделирование процессов планирования режимов капельного орошения с помощью методов Soft Computing. На основании полученных нечетких моделей были предложены системы управления, позволяющие контролировать сроки и нормы поливов в зависимости от 19 входных переменных, определяющих характеристики почвенного массива, климатических условий и физиологического состояния растений. Непрерывный контроль количественных значений системой нечеткого логического вывода позволил определять научно обоснованные нормы полива при капельном орошении культур.

В современных системах капельного орошения использование различных по типу модулей фертигации позволяет повышать урожайность сельскохозяйственных культур за счет локального внесения требуемого количества удобрений с уменьшением при этом их расхода, обеспечением экономичности и решением проблемы экологичности.

Эффективное управление фертигацией осуществляется за счет использования двух основных подходов. Использование запланированных схем внесения удобрения основывается на оценке доз питательных веществ перед выращиванием культуры с учетом всех факторов, влияющих на концентрацию питательных веществ в корневой зоне, и данных, собранных в системе культивирования [3]. При этом необходимая концентрация питательных веществ рассчитывается балансовым методом. С развитием информационных технологий и интернета вещей наиболее целесообразным становится управление фертигацией с помощью «корректирующего» подхода, когда непрерывно контролируется состав питательного раствора в зависимости от состояния обеспеченности питательными веществами как самого растения, так и почвы [3]. С целью осуществления такого контроля необходимо выбрать наиболее значимые параметры, участвующие в процессе управления модулем фертигации.

Методы и материалы. Применение методов Soft Computing обусловлено необходимостью представления значений входных переменных в виде нечетких множеств с последующей структурной и параметрической идентификацией нечеткой модели контроля концентрации питательных веществ раствора. Это позволит составить нечеткие базы знаний в виде правил «ЕСЛИ – ТО» и, используя методы нечеткой логики, определить четкие значения выходных переменных: необходимые дозы внесения азота, фосфора и калия с поливной водой.

Задача сводится к построению модели, где входом будет вектор пе-

ременных $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, определяющих необходимость внесения доз y_i , $i = \overline{1, 3}$, питательных элементов: азота, фосфора и калия.

Процесс фертигации должен всегда сопровождаться непрерывным мониторингом концентрации почвенного раствора, его pH и ЕС с учетом реальной потребности растений в зависимости от типа и механического состава почв в разных фазах вегетации, так как доступность элементов питания на разных почвах и в разные фазы вегетации различна [3].

Результаты. Сложности в построении системы управления возникают в связи с неопределенностью многих определяемых параметров, а также с невозможностью их задания на числовых множествах. Наиболее подходящими в такой ситуации являются подходы, основанные на мягких вычислениях с использованием методов нечеткой логики и нейронных сетей.

Лингвистический характер количественных $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$, $i = \overline{1, n}$, и качественных $x_i \in \{v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^{q_i}\}$, $i = \overline{1, n}$, определяемых параметров оценивается с помощью множества качественных лингвистических термов (терм-множеств). При этом качественные параметры не имеют количественной шкалы измерения и определяются только лингвистическим образом.

Формализация лингвистических термов осуществляется с помощью колоколообразной функции принадлежности:

$$\mu^T(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - b}{c}\right)^2},$$

где b – координата максимума функции;

c – коэффициент концентрации-растяжения функции: $c_3 < c_2 < c_1$ (рисунок 1).

На этапе структурной идентификации модели параметры функций принадлежности определяются на основе экспертных данных и далее настраиваются с помощью нейронных сетей по обучающей выборке.

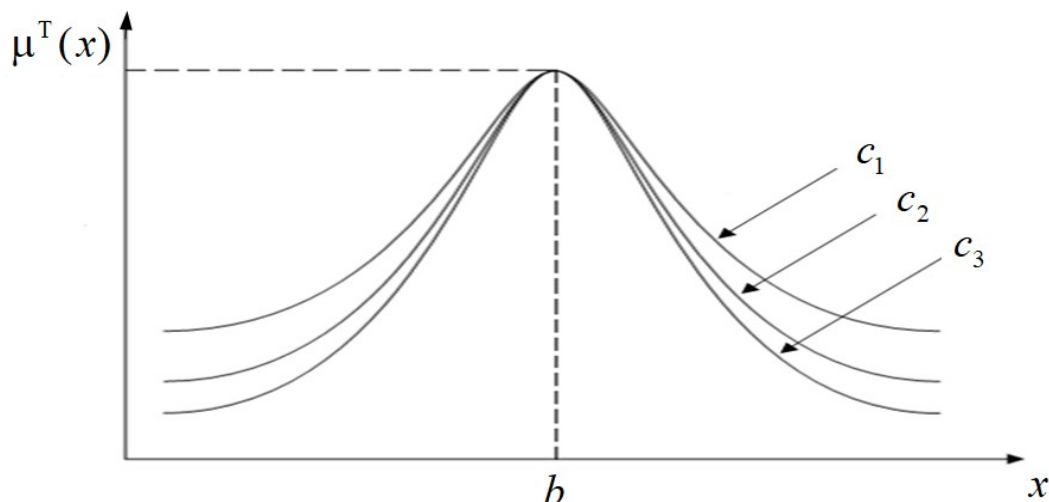


Рисунок 1 – Колоколообразная функция принадлежности
Figure 1 – Bell-shaped membership function

При фаззификации входных переменных каждому значению переменной ставится в соответствие значение функции принадлежности каждому из нечетких термов. На графике функции принадлежности (рисунок 2) переменной «уровень pH» к ее лингвистическим термам «сильнокислые (strongly acid)», «слабокислые (slightly acid)», «от слабокислых до слабощелочных (from slightly acid to medium alkaline)», «сильнощелочные (strongly alkaline)» представлены степени принадлежности значения pH $x = 5,3$ к соответствующим лингвистическим термам: $\mu^{\text{stronglyacid}}(x = 5,3) = 0,4$, $\mu^{\text{slightlyacid}}(x = 5,3) = 0,75$, $\mu^{\text{slightlyacid to}}(x = 5,3) = 0$, $\mu^{\text{stronglyalkaline}}(x = 5,3) = 0$. Это означает, что значение $x = 5,3$ имеет большую степень принадлежности к нечеткому множеству «слабокислые» и абсолютно не принадлежит нечетким множествам «от слабокислых до слабощелочных (from slightly acid to medium alkaline)», «сильнощелочные (strongly alkaline)».

Свойства почвы: переменные определяют содержание органического вещества в почве (ОМ), механический состав почвы, ее pH и электропроводность.

В разрабатываемой модели качественными являются параметры

«механический состав почвы» и «фаза вегетации», задаваемые следующими терм-множествами:

- механический состав почвы (песчаные, супесчаные, средние суглинки, тяжелые суглинки, глины), $[0; 1]$, у. е.;
- фаза вегетации (высадка – цветение, начало плодообразования – плодоношение, созревание – сбор), $[0; 1]$, у. е.

Каждое терм-множество определяется нечетким множеством с помощью следующих функций принадлежности (рисунки 3, 4).

Уровень pH почвы является количественной характеристикой кислотности или щелочности почвы, определяется как отрицательный логарифм концентрации ионов водорода (H^+) и ионов гидроксида (OH^-) и измеряется в единицах pH, $[0; 14]$, у. е. Шкала pH охватывает значения от 0 до 14, от чрезвычайно кислых (0), проходя через нейтральную (7), до очень щелочных (14).

Разделение среды на типы с определенными диапазонами pH:

- сильнокислые: $< 4,5$;
- кислые: $4,5-5,5$;
- слабокислые: $5,5-6,5$;
- нейтральные: $6,5-7,5$;
- слабощелочные: $7,5-7,8$;
- умеренно щелочные: $7,8-8,5$;
- сильнощелочные: $8,5-9,0$;
- очень сильнощелочные: $> 9,0$.

Очевидно, что точную границу между принадлежностью значений pH к каждому из множеств выделить довольно сложно, поэтому целесообразно использование нечетких множеств, отражающих степень принадлежности значений к какому-либо множеству.

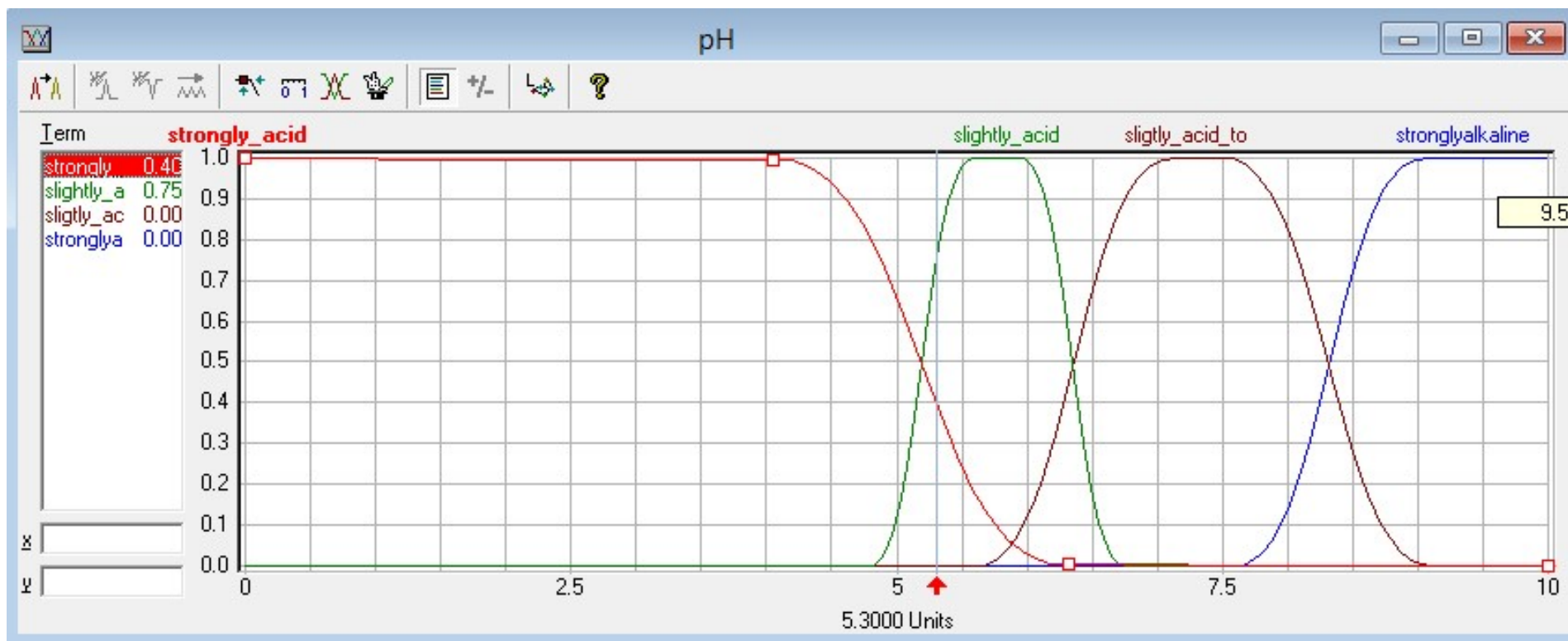


Рисунок 2 – Значения функции принадлежности переменной «уровень pH»

Figure 2 – Membership function values of the variable “pH level”

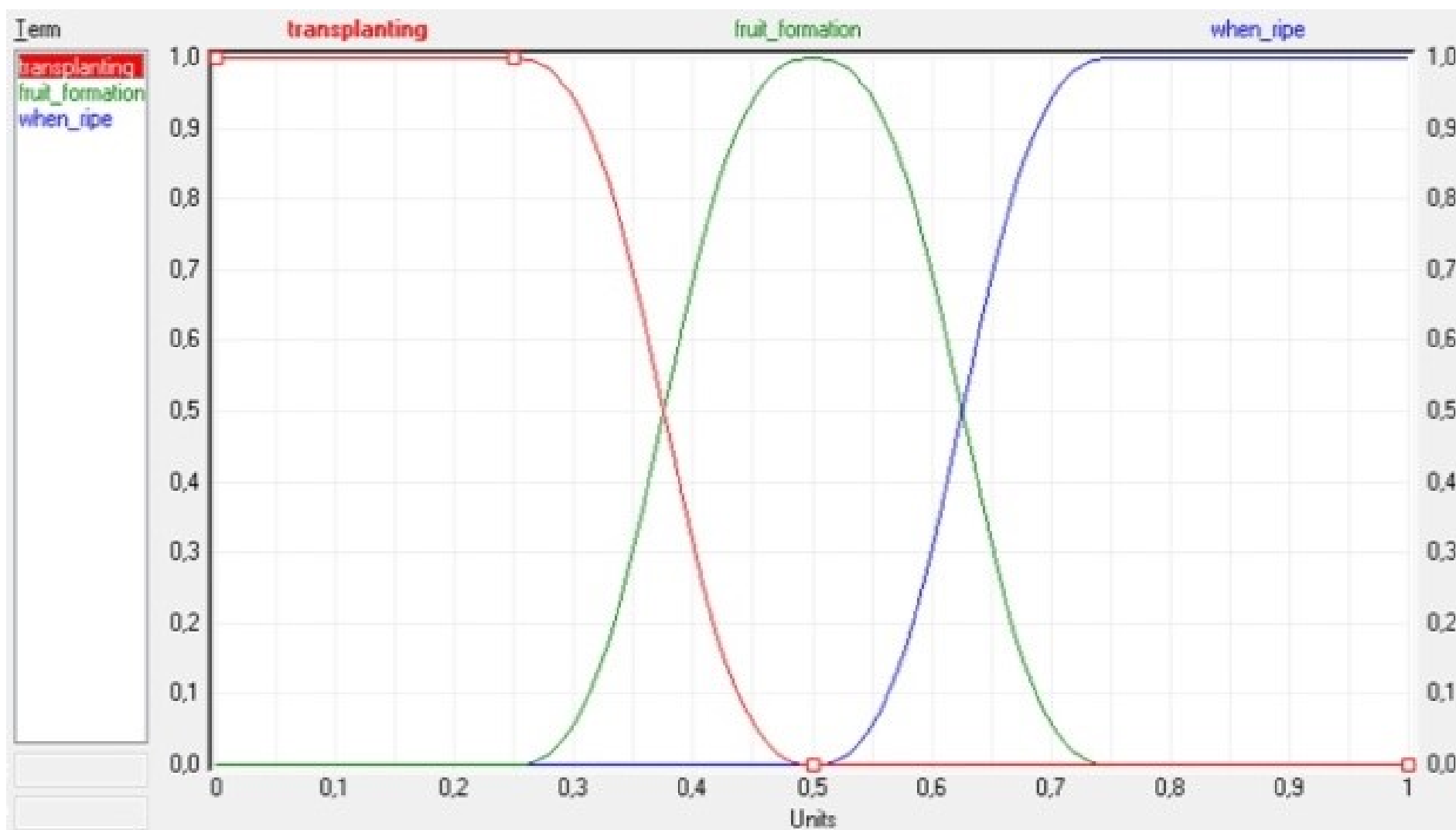


Рисунок 3 – Функция принадлежности переменной «фаза вегетации»
Figure 3 – Membership function of the variable “vegetation phase”

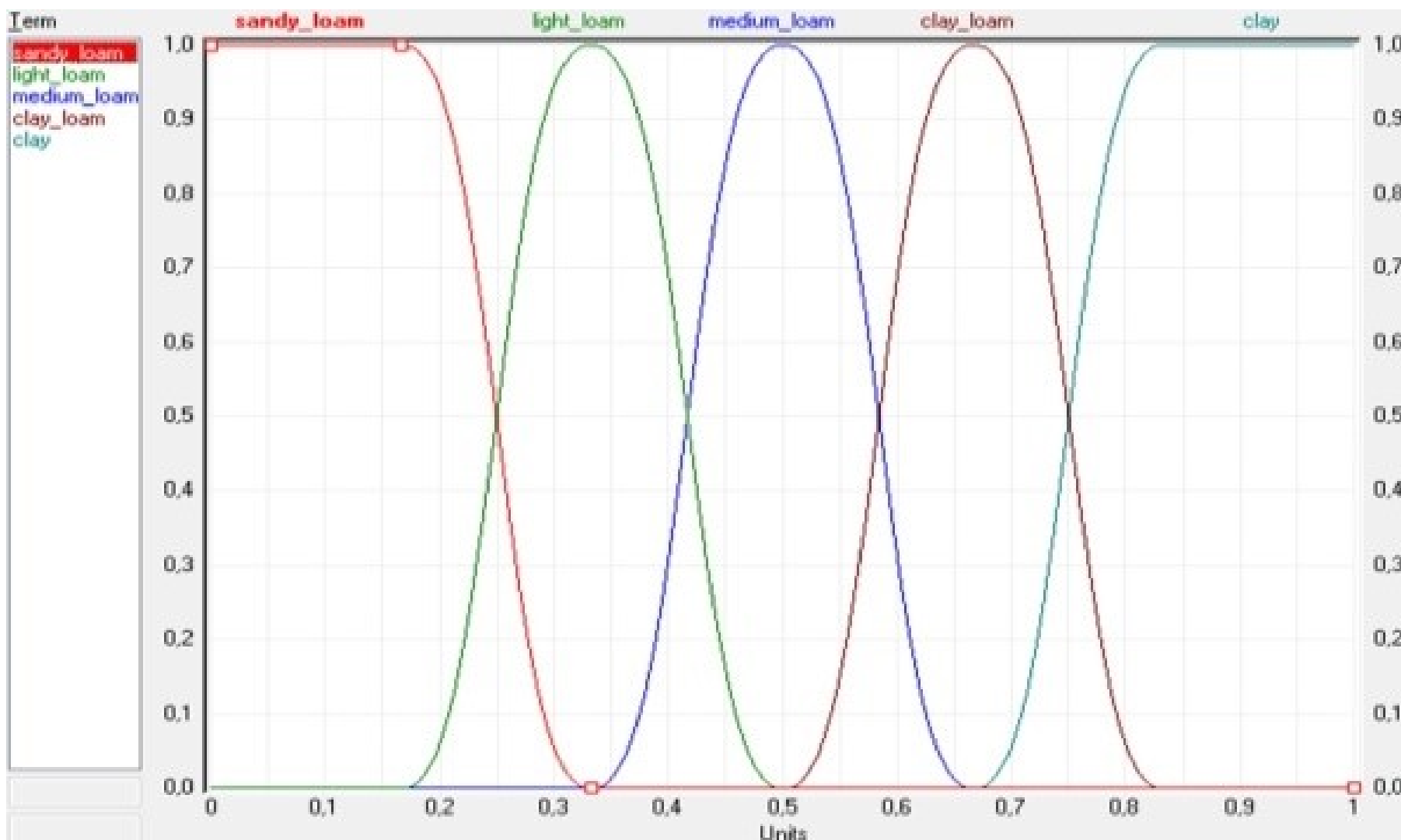


Рисунок 4 – Функция принадлежности переменной «механический состав почвы»

Figure 4 – Membership function of a variable “soil texture”

Для поддержания нормального роста установлены оптимальные значения рН некоторых видов растений: слива 6,0–7,5; томаты 5,5–7,5. Поэтому непрерывный контроль и регулирование уровня рН почвы оказывают влияние на способность растений усваивать питательные вещества из почвы. В критических ситуациях уровень рН почвы может находиться за рамками оптимальных значений и быть от 3 до 9,5. Значения рН выше 8,5 и ниже 5 представляют собой жесткие условия для выживания растений. Уровень рН, обеспечивающий лучшее усвоение азота, фосфора и калия для большинства растений, находится в промежутке от 6,5 до 7,5, при этом поглощение фосфора уменьшается при значениях рН ниже 6, так как алюминий и железо блокируют его, а при рН выше 7,5 – блокируется кальцием. При значениях рН, меньших 5, алюминий и марганец становятся токсичными, при уровне рН выше 7,5 марганец, железо, цинк и медь оказываются нерастворимыми и становятся слабо доступными для растений, что в свою очередь вызывает дефицит микроэлементов.

С целью сокращения числа правил нечеткой базы знаний и соответственно нечетких уравнений было выбрано следующее терм-множество переменной «уровень рН» (рисунок 5): сильнокислые, слабокислые, от слабокислых до слабощелочных, сильнощелочные, $[0; 10]$, у. е.

Известно, что растения и их сорта разнятся по чувствительности к содержанию солей, и значения электропроводности (ЕС), при которых растения значительно снижают ростовые процессы, также могут колебаться в достаточно широких пределах. Например, сахарная свекла после стадии прорастания может перенести значения ЕС до 7 дСм/м, тогда как томаты снижают урожайность уже при ЕС 2,5 дСм/м [4].

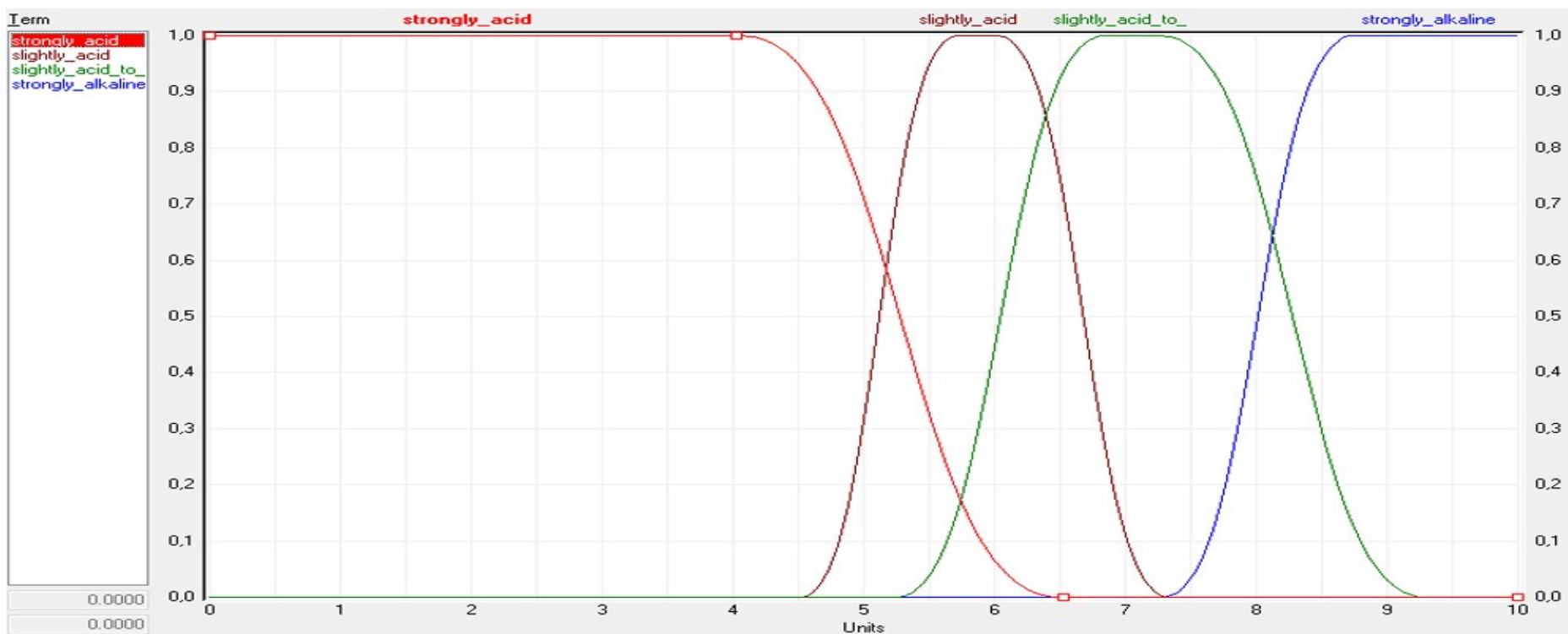


Рисунок 5 – Функция принадлежности переменной «уровень pH»

Figure 5 – Membership function of the variable “pH level”

$EC < 1$: почва свободна от солей и нет никаких ограничений для любых культур.

EC от 1 до 2: почва с очень низким содержанием солей (у некоторых очень чувствительных культур может быть ограничена урожайность).

EC от 2 до 4: умеренно засоленная почва (может оказывать влияние на урожайность чувствительных культур).

EC от 4 до 8: засоленная почва (влияет на урожайность почти всех культур).

EC от 8 до 16: очень засоленная почва (только культуры, очень устойчивые к засоленности, могут расти на этих почвах).

$EC > 16$: чрезвычайно засоленная почва (практически никакая культура не может выращиваться на этих почвах).

Выберем следующее терм-множество переменной «уровень EC » почвы [4]: низкая, средняя, высокая, $[0; 16]$, дСм/м, с функциями принадлежности (рисунок 6).

Для оросительной воды классификация по уровню электропроводности следующая: $EC < 0,65$ (низкий); $0,65–1,3$ (средний); $1,3–2,9$ (высокий); $2,9–5,2$ (очень высокий); $EC > 5,2$ (экстремально высокий), дСм/м [4].

Органическое вещество почвы (ОМ) определяется как органическая фракция почвы, исключая неразложившиеся растительные и животные остатки и включающая в себя широкий спектр соединений, содержащих углерод, водород и кислород. Органическое вещество почвы играет первостепенную роль в продуктивности почв, являясь основным резервуаром и источником азота, фосфора и других питательных веществ, необходимых для выращивания растений. Уровень ОМ обычно оценивается по содержанию органического углерода, присутствующего в почве, общего углерода почвы или потере массы при воспламенении.

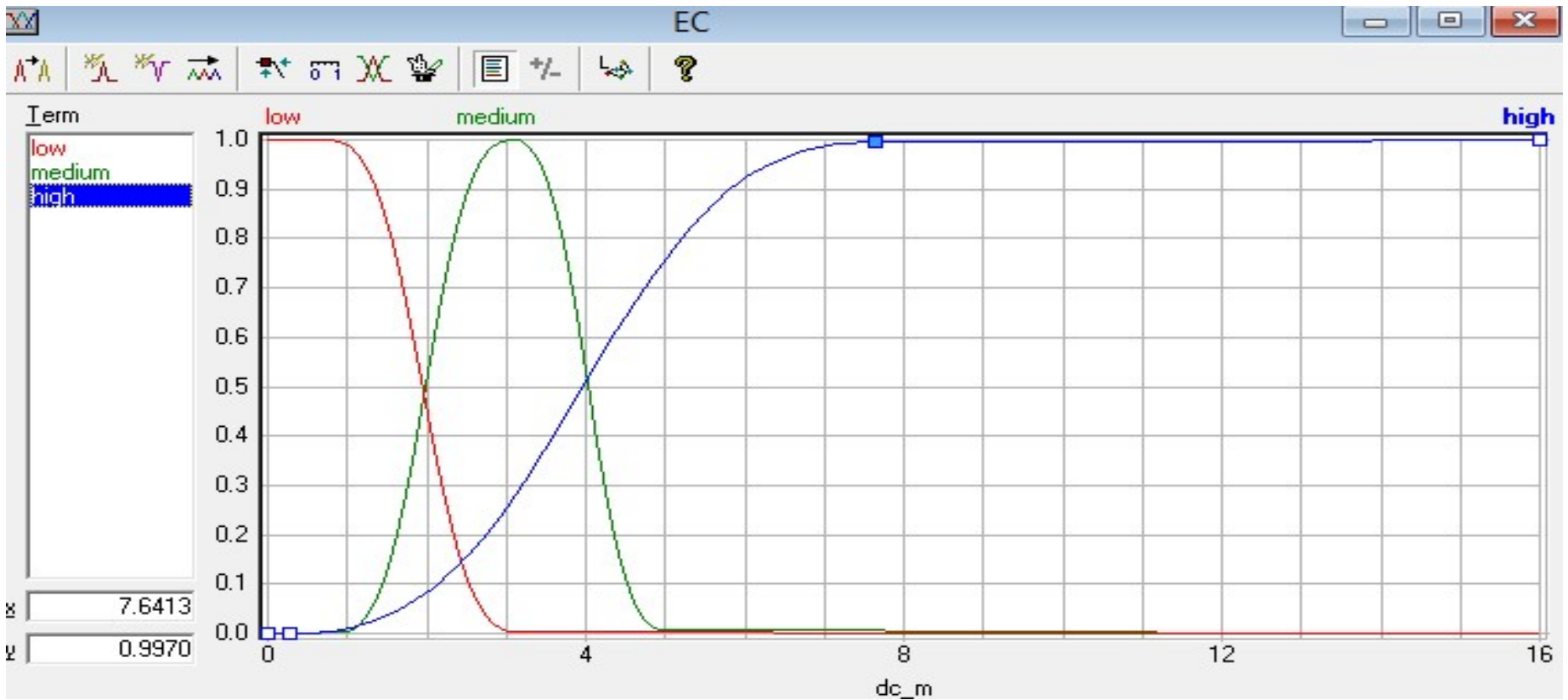


Рисунок 6 – Функция принадлежности переменной «уровень ЕС»

Figure 6 – Membership function of the variable “EC level”

Содержание органического вещества в пахотном слое разных типов почв сильно варьируется от очень низкого (менее 1,0 %) до высокого (более 10 %). Обогащение почвы органическим веществом снижает потери элементов питания удобрений за счет миграционных процессов, тем самым также снижается негативное воздействие на окружающую среду.

Для переменной «уровень ОМ» используется следующее термножество [5]: очень низкий, низкий, средний, высокий, [0; 10], %, с функциями принадлежности (рисунок 7).

В последнее время разработано и внедрено много технологий и систем поддержки принятия решений [6] для выбора оптимальных норм полива и внесения питательных веществ при управлении системами орошения и фертигации [7].

Однако на практике определение уровня обеспеченности почвы и растений питательными веществами и водой основывается на личном опыте сельскохозяйственных производителей и сводится, как правило, к готовым планам внесения удобрений [3]. При этом практически не учитывается оперативная информация об изменениях уровня содержания в почве и растении основных питательных веществ.

Например, выращивание томатов на песчаной почве без ежедневного внесения фосфора с фертигацией приводит к тому, что в радиусе 10 см от корней весь запас фосфора быстро используется и в определенный момент времени, когда потребность растений в фосфоре возрастает, для развития плодов его может быть недостаточно. Только непрерывный контроль питательных веществ поможет избежать проблемы их острого дефицита [6].

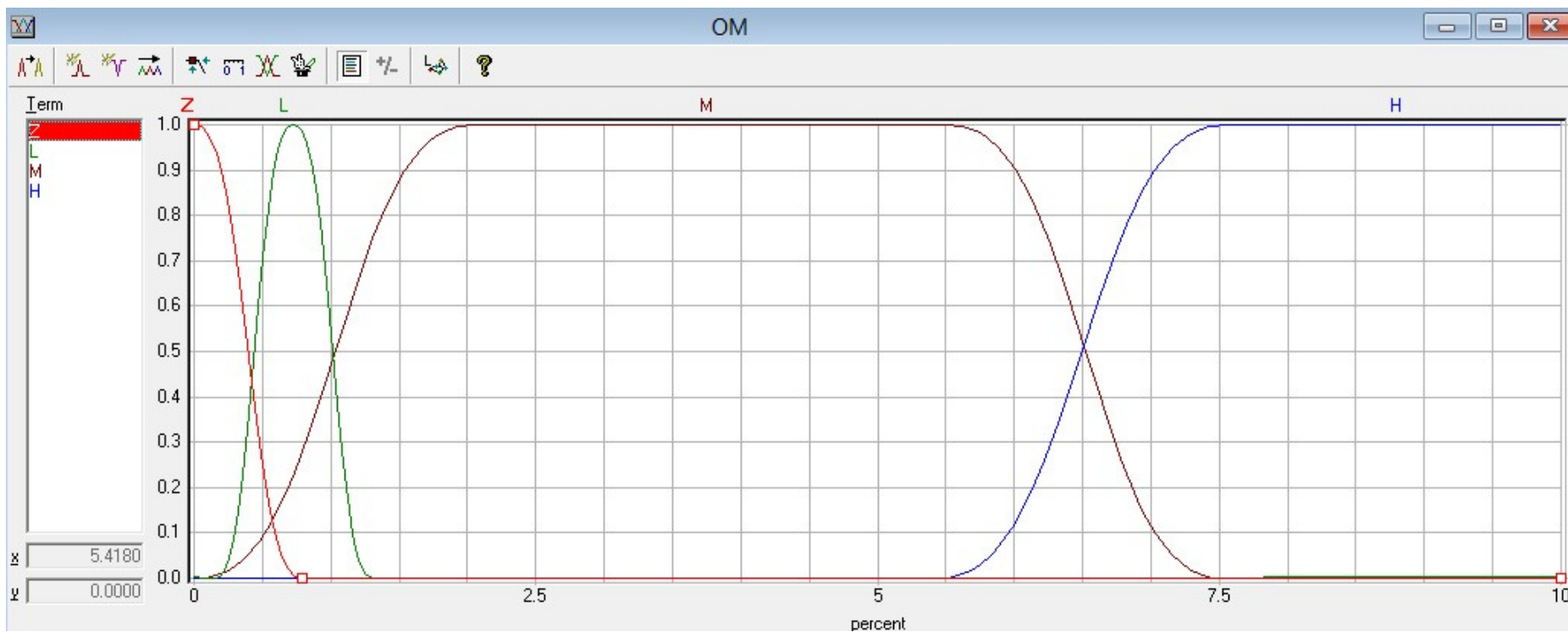


Рисунок 7 – Функция принадлежности переменной «уровень OM»

Figure 7 – Membership function of the variable “OM level”

Основными переменными питательных веществ при выращивании сельскохозяйственных культур в модели управления фертигацией будут выступать измеренные значения содержания азота (N), фосфора (P) и калия (K) в почве. На данный момент для анализа почвы разработано большое число электрохимических датчиков [8]. Непрерывный контроль питательных веществ в почве будет осуществляться с помощью датчика (рисунок 8) Soil NPK (JXCT, Weihai, China)¹.



Рисунок 8 – Датчик Soil NPK
Figure 8 – Soil NPK sensor

Датчик работает от 9-24В с минимальным потреблением энергии. Точность датчика и разрешение измерений азота, фосфора и калия¹ указаны на рисунке 9. Для эффективного использования на больших расстояниях датчик оснащен интерфейсом связи RS-485, он поддерживает стандартный протокол связи Modbus-RTU, и его можно использовать с любым микроконтроллером. Для подключения датчика к микроконтроллеру на базе Arduino понадобится любой модуль Modbus (RS485/MAX485), который преобразует последовательный поток UART в RS-485. Использование датчика Soil NPK позволяет не только осуществлять непрерывный контроль содержания питательных веществ в почве, но и построить облачную систему мониторинга на основе интернета вещей (IoT) [9].

¹Soil NPK Meter RS485 Precision Soil Fertility Nutrient Sensor for Agriculture [Electronic resource]. URL: <https://www.jxct-iot.com/product/showproduct.php?id=190> (date of access: 15.03.2023).

POWER	DC 9V
MEASURING RANGE	0-1999mg/kg(ml/l)
OPERATING TEMPERATURE	5-45°C (41-133°F) ATC
RESOLUTION	1mg/kg (ml/l)
PRECISION	±2%F.S.
OUTPUT SIGNAL	RS485

Рисунок 9 – Характеристики Soil NPK sensor
Figure 9 – Characteristics of the Soil NPK sensor

Заявленный производителем диапазон измерения NPK: 0–1999 мг/кг (мг/л)¹. Программный код для ArduinoIDE предназначен для измерения значений NPK в почве до 255 мг/кг в связи со считыванием только 8-битных значений. Согласно техническому описанию датчика можно измерить значения и до 1999 мг/кг, для этого должны быть прочитаны 16-битные данные.

Рассмотрим условные нормы концентрации питательных веществ в почве: концентрация азота 15–20 мг/л (по Г. П. Гамзикову), обменный (подвижный) калий 80–120 мг/кг почвы (по Кирсанову), подвижный фосфор 50–100 мг/кг почвы (по Кирсанову) [10].

Формализация значений NPK осуществляется с помощью следующих нечетких терм-множеств (рисунки 10–12): низкий, средний, высокий, [0–255], мг/кг.

Выводы. Проведенная формализация параметров, от которых зависит выбор оптимальных доз внесения удобрений при капельном поливе, позволяет построить нечеткую модель управления модулем фертигации системы капельного орошения методами Soft Computing. Выбор контролируемых параметров и устройств, обеспечивающих непрерывный мониторинг состояния почвы, позволит с использованием IoT-технологий построить беспроводную сенсорную сеть, а результатом объединения интеллектуальных нечетких технологий и интернета вещей станет полноценная современная система управления модулем фертигации как неотъемлемая часть системы капельного орошения.

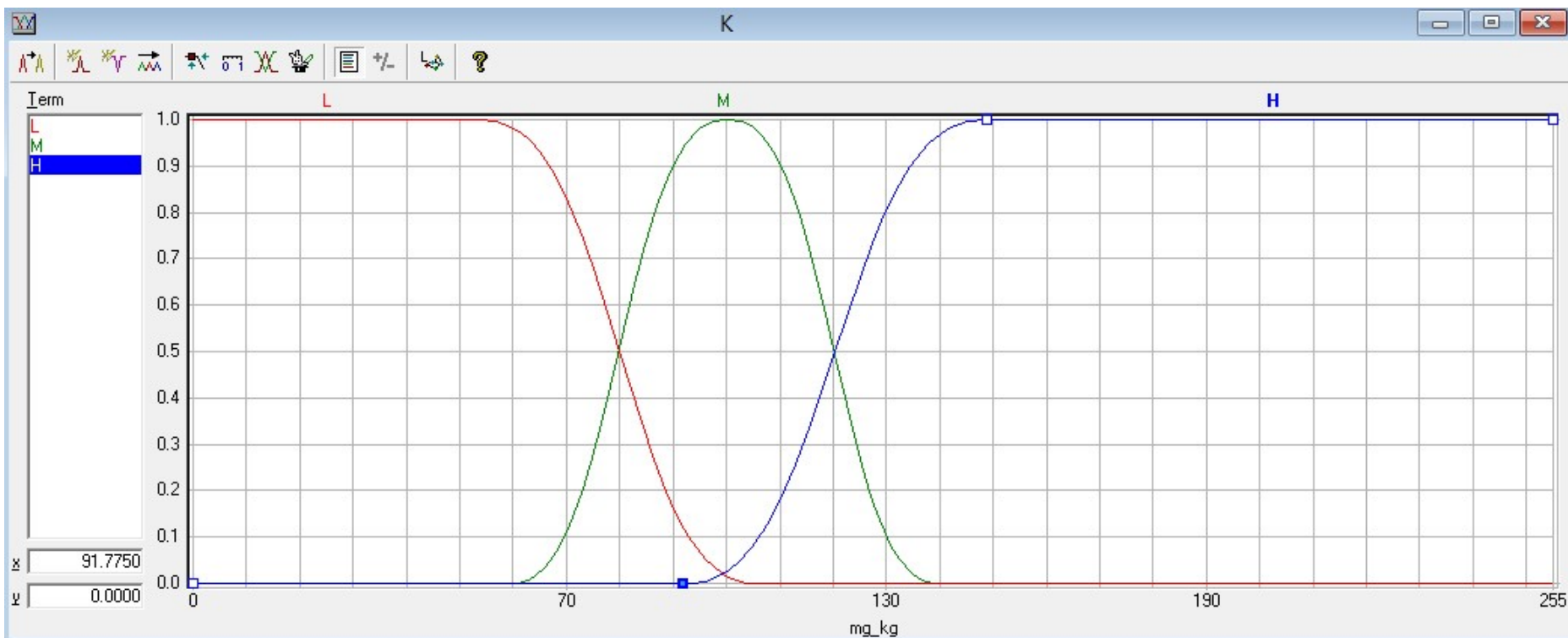


Рисунок 10 – Функция принадлежности переменной «содержание калия»
Figure 10 – Membership function of the variable “potassium content”

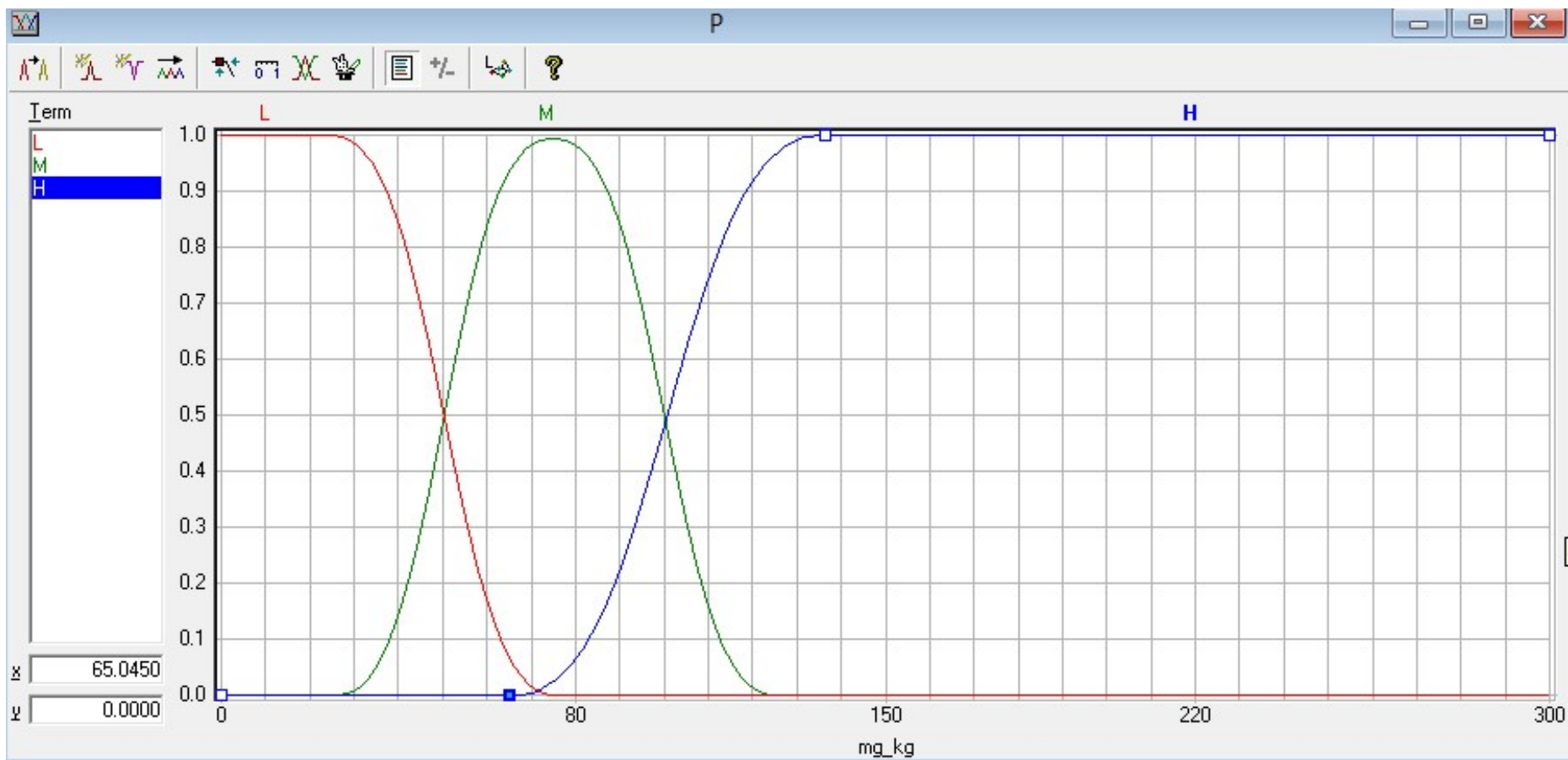


Рисунок 11 – Функция принадлежности переменной «содержание фосфора»

Figure 11 – Membership function of the variable “phosphorus content”

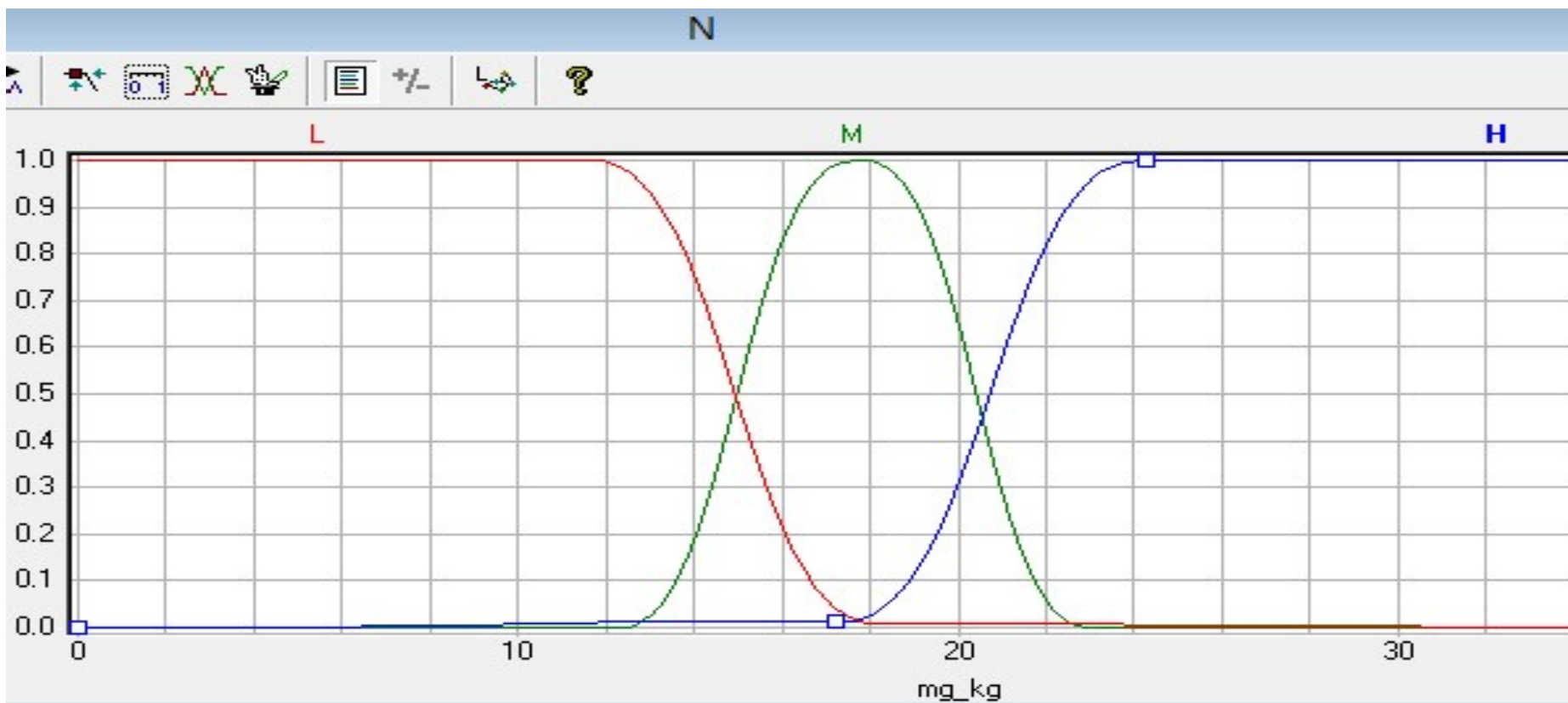


Рисунок 12 – Функция принадлежности переменной «содержание азота»
 Figure 12 – Membership function of the variable “nitrogen content”

Список источников

1. Тащилина А. В. Нечеткая модель оперативного планирования поливов для автоматизированных систем капельного орошения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2015. № 1. С. 38–41.
2. Тащилин М. В., Тащилина А. В. Система управления капельным орошением на базе нечеткой логики с использованием IoT-технологий // Развитие аграрной науки и практики: состояние, проблемы и перспективы: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 26 мая 2022 г. (посвящ. 115-летию агроном. фак. Донского ГАУ). Персиановский: Донской ГАУ, 2022. С. 91–97.
3. Инновационные технологии орошения овощных культур / А. Ю. Федосов, А. М. Меньших, М. И. Иванова, А. А. Рубцов. М.: Изд-во Ким Л. А., 2021. 306 с.
4. Воеводина Л. А. Использование показателя электропроводности для оценки продуктивности сельскохозяйственных культур // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2012. № 1(05). 10 с. URL: <http://www.rosnii-ppm-sm.ru/archive?n=82&id=88> (дата обращения: 15.03.2023).
5. Evaluation of soil fertility and fertilization practices for irrigated maize (*Zea mays* L.) under Mediterranean conditions in Central Chile / F. Nájera, Y. Tapia, C. Baginsky, V. Figueroa, R. Cabeza, O. Salazar // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2015. Vol. 15, № 1. P. 84–97. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000008>.
6. Prabakaran G., Vaithyanathan D., Ganesan M. Fuzzy decision support system for improving the crop productivity and efficient use of fertilizers // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 150. P. 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>.
7. Papadopoulos A., Kalivas D., Hatzichristos T. Decision support system for nitrogen fertilization using fuzzy theory // Computers and Electronics in Agriculture. 2011. Vol. 78, iss. 2. P. 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.06.007>.
8. Perspective-electrochemical sensors for soil quality assessment / M. A. Ali, L. Dong, J. Dhau, A. Khosla, A. Kaushik // Journal of the Electrochemical Society. 2020. 167. 037550. DOI: 10.1149/1945-7111/ab69fe.
9. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application / J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, J. Hoebeke // Sensors. 2018. Vol. 18. P. 3995–4033. <https://doi.org/10.3390/s18113995>.
10. Мотузова Г. В., Безуглова О. С. Экологический мониторинг почв: учебник. М.: Акад. Проект; Гаудеамус, 2007. 237 с.

References

1. Tashchilina A.V., 2015. *Nechetskaya model' operativnogo planirovaniya polivov dlya avtomatizirovannykh sistem kapel'nogo orosheniya* [A fuzzy model of operational planning irrigation for automated drip irrigation systems]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], no. 1, pp. 38-41. (In Russian).
2. Tashchilin M.V., Tashchilina A.V., 2022. *Sistema upravleniya kapelnym orosheniem na baze nechetkoy logiki s ispolzovaniem IoT-tekhnologiy* [Drip irrigation control system based on fuzzy logic using IoT technologies]. *Razvitie agrarnoy nauki i praktiki: sostoyanie, problemy i perspektivy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (posvyashchennoy 115-letiyu agronom. fakulteta Donskogo GAU)* [Development of Agrarian Science and Practice: State, Problems and Prospects: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference (Dedicated to the 115th Anniversary of the Agronomic Faculty of Don State Agrarian University)]. Persianovsky, Donskoy GAU, pp. 91-97. (In Russian).
3. Fedosov A.Yu., Men'shikh A.M., Ivanova M.I., Rubtsov A.A., 2021. *Innovatsionnye*

tekhnologii orosheniya ovoshchnykh kul'tur [Innovative Technologies for Irrigation of Vegetable Crops]. Moscow, Kim L.A. Publ., 306 p. (In Russian).

4. Voevodina L.A., 2012. [Use of electrical conductivity indicator for evaluating agricultural crops productivity]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(05), 10 p., available: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=82&id=88> [accessed 15.03.2023]. (In Russian).

5. Nájera F., Tapia Y., Baginsky C., Figueroa V., Cabeza R., Salazar O., 2015. Evaluation of soil fertility and fertilization practices for irrigated maize (*Zea mays* L.) under Mediterranean conditions in Central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, vol. 15, no. 1, pp. 84-97, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000008>.

6. Prabakaran G., Vaithiyanathan D., Ganesan M., 2018. Fuzzy decision support system for improving the crop productivity and efficient use of fertilizers. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 150, pp. 88-97, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030>.

7. Papadopoulos A., Kalivas D., Hatzichristos T., 2011. Decision support system for nitrogen fertilization using fuzzy theory. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 78, iss. 2, pp. 130-139, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.06.007>.

8. Ali M.A., Dong L., Dhau J., Khosla A., Kaushik A., 2020. Perspective-electrochemical sensors for soil quality assessment. *Journal of the Electrochemical Society*, 167, 037550, DOI: 10.1149/1945-7111/ab69fe.

9. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J., 2018. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensors*, vol. 18, pp. 3995-4033, <https://doi.org/10.3390/s18113995>.

10. Motuzova G.V., Bezuglova O.S., 2007. *Ekologicheskiiy monitoring pochv: ucheb-nik* [Ecological Monitoring of Soils: textbook]. Moscow, Acad. Project Publ., Gaudeamus Publ., 237 p. (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Тащилина – старший преподаватель кафедры математики и математического моделирования;

М. В. Тащилин – доцент кафедры математики и математического моделирования, кандидат технических наук.

Information about the authors

A. V. Tashchilina – Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Mathematical Modeling;

M. V. Tashchilin – Associate Professor of the Department of Mathematics and Mathematical Modeling, Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023; одобрена после рецензирования 10.05.2023; принята к публикации 16.05.2023.

The article was submitted 20.03.2023; approved after reviewing 10.05.2023; accepted for publication 16.05.2023.