

Analysis of Electrical Safety Conditions Taking into Account Soil Conductivity Determined on the Basis of Fuzzy Logic

Manusov V.Z. ¹, Zaytseva N.M. ²

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation,

²Innovative Eurasian University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

Abstract. The goal of this work is to prove a possibility of determining soil parameters that influence its conductivity being the basis of grounding, step voltage and touch voltage calculation. This in its turn increases the safety level of electric equipment operation. The article is devoted to development of new, no conventional models of soil conductivity using the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. The description of the solution includes the following sections: fuzzy models of specific electrical resistance of different soil types depending on their salinity and moisture content at positive temperatures; dependences between ρ and negative temperature values for different types of soil and different moisture contents; fuzzy climatic soil models for a specific location in order to determine soil ρ deep into the earth throughout the year. Uncertainty of soil properties is a reason why calculations of grounding devices are very liberal with plenty to spare, and calculations of touch voltages and step voltages in the period of active snow melting or abundant rains give erroneous results. Since soil parameters are described by linguistic variables: humidity, salinity, and temperature etc., soil layers should be considered as overlapping fuzzy sets. Membership functions of the main components of the "soil conductivity" concept were formed on this basis. The new scientific result we obtained makes it possible to formalize natural language of the experts in the field of climatic factors influence on soil resistivity in order to represent this information with the help of computer algorithms for optimum design of energy supply security and step voltage and touch voltage calculation.

Keywords: electrical safety specific, soil resistivity, modeling, fuzzy logic, membership functions, multi-parameter dependence, touch voltage, step-by-step pressure.

Analiza condițiilor de securitate electrică folosind logica fuzzy pentru a dezvolta modele de conductivitate a solului

Manusov V.Z. ¹, Zaytseva N.M. ²

¹Universitatea Tehnică de Stat Novosibirsky, Novosibirsk, Federația Rusă

²Universitatea Inovatoare din Eurasia, Pavlodar, Kazahstan

Rezumat: Scopul lucrării constă în demonstrarea posibilității de precizare a parametrilor de sol care afectează conductivitatea electrică, care este baza de calcul a alegării la pământ, a tensiunii de pas și tensiunile de atingere. Aceasta, la rândul său, conduce la creșterea nivelului de siguranță în funcționarea echipamentelor electrice. Articolul este dedicat dezvoltării de noi modele inovatoare de conductivitate electrică a solului, folosind teoria mulțimilor fuzzy și a logicii fuzzy. Soluția problemei rezolvate include următoarele componente: modele fuzzy a rezistenței electrice specifice a solului ρ de diferite tipuri în funcție de salinitatea solului și de umiditate la temperaturi pozitive; dependența de mărimea ρ pentru valori negative ale temperaturii pentru diferite tipuri de sol cu umiditate variabilă; modele climatice fuzzy pentru zone concrete utilizate pentru determinarea mărimii ρ în funcție de adâncimea pe parcursul anului. În condiții reale de valori de temperatură și umiditate ale straturilor de sol variază în funcție de adâncimea apariției acestora, nivelul apei subterane, temperatura la suprafață, precipitații și alți factori climatici. Acești factori determină o schimbare în sol a mărimii ρ într-o gamă foarte largă, de la unități până la câteva zeci de mii de Ohm*m. Pe această bază, am format funcțiile de atribuire a principalelor componente pentru noțiunea „conductanța electrică a solului“. Rezultatul științific nou obținut permite formalizarea limbajului natural a experților privind domeniile de influență a factorilor climatici asupra conductanței specifice a solului pentru prezentarea acestei informații cu ajutorul algoritmilor de calculator în cazul proiectării optime a obiectelor de siguranță electrică, tensiunii de pas a tensiunilor de atingere.

Cuvinte-cheie: siguranța electrică, rezistența specifică a solului, modelare, funcții logice fuzzy, funcții de membru, dependență multiparametrică, tensiune de pas de tensiune atingere.

Анализ условий электробезопасности с учетом удельной электропроводности грунта на основе нечеткой логики

Манусов В.З.¹, Зайцева Н.М.²

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

²Инновационный Евразийский университет, Павлодар, Казахстан

Аннотация. Цель работы – доказательство возможности уточнения параметров грунта, влияющих на его удельную электропроводность, которая является основой расчета заземлений, шагового напряжения и напряжения прикосновения. Это в свою очередь повышает уровень безопасности при эксплуатации электрооборудования. Статья посвящена разработке новых, нетрадиционных моделей электропроводности грунта с использованием теории нечетких множеств и нечеткой логики. Решение задачи представлено следующими разделами: нечеткие модели удельного электрического сопротивления ρ различного вида грунта в зависимости от засоленности и влажности при положительной температуре; зависимости ρ от отрицательных значений температуры для различных видов грунта и разной увлажненности; нечеткие климатические модели грунта конкретной местности для определения ρ грунта вглубь земли в течение года. В реальных условиях значения температуры и влажности слоев грунта меняются в зависимости от глубины их залегания, уровня грунтовых вод, температуры на поверхности земли, количества осадков и других климатических факторов. Эти факторы вызывают изменение ρ грунта в очень больших пределах: от единиц до десятков тысяч Ом·м. Такая неопределенность приводит к тому, что расчет устройств заземления выполняется с большим запасом, а расчет напряжения прикосновения и шагового напряжения в период активного снеготаянья или обильных дождей и вовсе приводит к ошибочным результатам. Поскольку параметры грунта описываются лингвистическими переменными: влажность, соленость, температура и т.д., то слои грунта следует рассматривать как нечеткие пересекающиеся множества. На этой основе сформированы функции принадлежности основных компонентов понятия «электропроводность грунта». Полученный новый научный результат позволяет формализовать естественный язык экспертов в области влияния климатических факторов на удельное сопротивление грунта для представления этой информации с помощью компьютерных алгоритмов при оптимальном конструировании объектов энергобезопасности и расчете шагового напряжения и напряжения прикосновения.

Ключевые слова: электробезопасность, удельное электрическое сопротивление грунта, моделирование, нечеткая логика, функции принадлежности, многопараметрическая зависимость, напряжение прикосновения, шаговое напряжение.

Введение

Электротравматизм по сравнению с другими видами производственного травматизма составляет небольшой процент, однако по числу травм с тяжелым и смертельным исходом занимает одно из первых мест. Наибольшее число электротравм (60-70%) происходит при работе с электрооборудованием и электроустановками напряжением до 1000В.

К факторам, увеличивающим безопасность при работе с электрооборудованием, безусловно, относятся средства, предупреждающие поражение электрическим током. Так, например, устройства заземления, предназначенные для обеспечения принятых режимов работы энергоустановок, имеют функцию защиты от поражения электрическим током путем отвода в землю потенциала, появившегося на корпусе электрооборудования в случае его аварийной работы. Еще одним средством, увеличивающим уровень

безопасности, являются различные системы предупреждения о наличии опасности поражения электрическим током. Современные интеллектуальные комплексы автоматизированных систем управления могут иметь такую функцию и при возникновении аварии оповещать персонал, работающий в непосредственной близости к опасным зонам.

Однако при решении такой задачи возникает ряд сложностей, который обусловлен неопределенностью значения удельного электрического сопротивления земли в конкретный момент времени, влияющего на величину отводимого потенциала.

Так все формулы расчета заземлений и определения потенциала при стекании тока в землю содержат ρ — удельное электрическое сопротивление грунта, которое зависит от ряда параметров и меняется в очень широких пределах[1-10].

Существующие методы и рекомендации не позволяют учесть сезонное изменение удельного электрического сопротивления, например, в сезон снеготаянья или в период обильных дождей, а также в период засухи или сильных морозов, что ведет к ошибочному

расчету напряжений прикосновения и шага и может способствовать травмированию обслуживающего персонала.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последнее время для решения задач, содержащих различного вида неопределенности, стали применять методы нечеткой логики [11-22]. Данная работа выполнена на этой же основе. В работе предпринята попытка получения моделей, способных решить описанную выше проблему.

Удельное электрическое сопротивление грунта колеблется в широких пределах – от единиц и десятков до тысяч Ом на метр, так как зависит от множества факторов, основные из которых: вид грунта, его влажность, температура и плотность. Грунты в природе залегают слоями и не являются исключительно «чистыми», то есть они содержат примеси различных видов.

Все это вносит элемент неопределенности при расчете параметров любого вида грунта. Поэтому в качестве основного математического аппарата моделирования удельного сопротивления грунта был использован аппарат нечеткой логики [1] и регрессионного моделирования.

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Разработка модели велась следующими этапами:

- 1) поиск зависимостей удельного электрического сопротивления различного вида грунта от влажности при температуре 20°C;
- 2) поиск зависимостей ρ от отрицательных значений температуры для различного вида грунта и разной увлажненности;
- 3) построение климатической модели грунта конкретной местности для определения ρ вглубь земли в течение года;
- 4) разработка методики расчета шагового напряжения на основе моделей грунта.

Результаты экспериментов по трем видам грунта показали, что на интервале влажности от 0 до 2% для песка, супеси от 0 до 5% и глины от 0 и 6% характер изменения

$\rho(v)$ резко отличается от характера изменения ρ на интервале от 2, 5, 6% для песка, супеси и глины соответственно и до насыщения грунтов влагой. Поэтому построение эмпирических зависимостей $\rho(v)$ было решено выполнять на основе регрессионного моделирования для каждого такого интервала в отдельности, объединяя в одно математическое выражение с помощью инструмента нечеткой логики: системы размытых правил.

В данном случае нечетко определяется влажность, которая характеризуется такими понятиями, как: - "сухо" - примерно от 0 % до 3-4%, "умеренно влажно" - примерно от 4 % до 12%, "влажно" - примерно от 12 % до насыщения грунта влагой.

Для определения функций принадлежности использовался прямой метод, в котором для каждого $x \in E$ (x – влажность грунта) задается значение $\mu_A(x)$ (функция принадлежности). Это правомерно, поскольку метод применяется для измеримых понятий, таких как давление, температура и т.д., а влажность, несомненно, относится к этим понятиям.

Суть модели заключается в следующем. Для каждого вида грунта разрабатывается система размытых правил. При этом она может быть записана следующим образом [11,12]

$$\begin{aligned} &IF (x_1 \in A_{1i}) \text{ И } (x_2 \in A_{2i}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_k \in A_{ki}) \\ &THEN \quad y = \eta_i(x), \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

где A_{ji} - нечеткое подмножество, то есть нечеткий интервал, для переменной x_j с функцией принадлежности $\mu_{A_{ji}}(x)$, N - число правил (число интервалов); $y = \eta_i(x)$ - функция, определяющая локальное решение модели от набора: $x = (x_1, \dots, x_k)$.

Для одномерной зависимости (речь идет о параметре влажность грунта) система размытых правил (1) приобретает вид

$$IF \quad x \in A_i \quad THEN \quad y = \eta_i(x), \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

где A_i имеют функцию принадлежности $\mu_{A_i}(x)$. Для описания нечеткой принадлежности к интервалам приняты экспоненциальные функции:

$$\mu_{A_i}(x) = e^{(-c(x-d)^2)} \quad \text{и}$$

$$\mu_{A_2}(x) = 1 - e^{(-c(x-d)^2)}, \quad (3)$$

где коэффициенты c и d определяют степень нечеткости и положение на числовой оси параметра влажность.
 $\mu_{i+1} = 1 - \mu_i$.

Регрессионную кривую строили с использованием показательной функции:

$$\eta_i(x) = b_0 \cdot b_1^x, \quad (4)$$

Для данной модели функции принадлежности имеют вид, показанный на рисунке 1, где v - влажность.

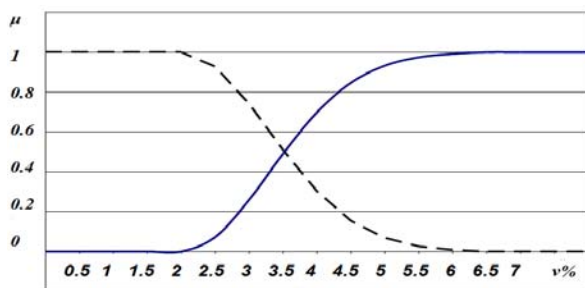


Рис.1 Семейство функций принадлежности для нечетких интервалов влажности.

Значения интервала влажности v_1 ("сухо") и v_2 ("влажно") определены приблизительно, первый интервал - $0 \leq v < 2\%$, второй - $v \geq 6\%$, область переключения $2 \leq v < 6\%$, функции принадлежности, причем в области, где соседние μ_1 и μ_2 имеют ненулевые значения, и всегда выполняется равенство: $\sum_{i=1}^2 \mu_i = 1$. Ниже представлены выражения (5), определяющие их значения. На рис.1 сплошной линией изображена функция принадлежности к нечеткому интервалу «сухо», а штриховой линией - функция принадлежности - «влажно».

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, 0 \leq v < 2 \\ e^{-0.8 \cdot (v-2)^2}, 2 \leq v \leq 6 \\ 0, v > 6 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0, 0 \leq v < 2 \\ 1 - e^{-0.8 \cdot (v-2)^2}, 2 \leq v \leq 6 \\ 1, v > 6 \end{cases}$$

В результате получены уравнения удельного сопротивления для песка $\rho_{п}$, супеси $\rho_{с}$ и глины $\rho_{г}$, [23]:

$$\begin{aligned} \rho_{п} &= 6 \cdot 0.3^v \cdot \mu_1(v) + 1 \cdot 0.7^v \cdot \mu_2(v) \\ \rho_{с} &= 90 \cdot 0.1^v \cdot \mu_1(v) + 0.3 \cdot 0.8^v \cdot \mu_2(v) \\ \rho_{г} &= 100 \cdot 0.25^v \cdot \mu_1(v) + 3 \cdot 0.8^v \cdot \mu_2(v) \end{aligned}, \quad (6)$$

где v - влажность грунта в процентах.

Сравнение значений, полученных с помощью модели, и справочных данных показало, что модель хорошо описывает зависимость удельного электрического сопротивления от влажности.

Например, для песка сильно увлажненного грунтовыми водами, разброс значений удельного сопротивления составляет 10-60 Ом·м [24]. По расчетам с помощью (6) для такой же увлажненности получается 10 Ом·м. Для умерено увлажненного песка - 60-130 Ом·м, в то же время по модели - 70 Ом·м, для слегка влажного песка - 400-1500 Ом·м, по модели - 350 Ом·м при влажности 2%, т.е. на интервале от 5% до насыщения совпадают с экспериментальными точками, а при уменьшении влаги от 5% до нуля отклоняются от них незначительно.

Известны градации засоленности грунтов: незасоленные (0,25 - 0,30% содержания солей), слабозасоленные (0,30 - 0,50%), средnezасоленные (0,50 - 1,0%), сильнозасоленные (1,0 - 2,0%), солончаки (2,0 - 4,0%). Для учета степени засоленности введен коэффициент, величина которого определяется с помощью нечеткой логики.

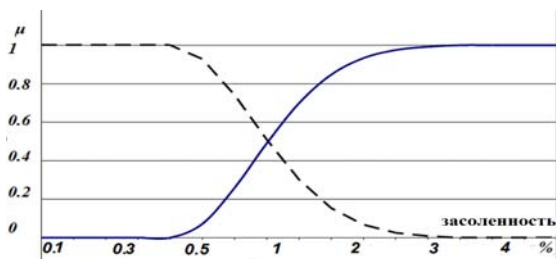


Рис. 2 Семейство функций принадлежности для нечетких интервалов засоленности.

Для определения величины этого коэффициента введено два нечетких интервала «слабозасоленные» и «засоленные» и определены функции принадлежности

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq sol < 0.4 \\ e^{-0.8 \cdot (sol-2)^2}, & 0.4 \leq sol \leq 2 \\ 0, & sol > 2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \leq sol < 0.4 \\ 1 - e^{-0.8 \cdot (sol-2)^2}, & 0.4 \leq sol \leq 2 \\ 1, & sol > 3 \end{cases}$$

На рис.2 сплошной линией изображена функция принадлежности к нечеткому интервалу «слабозасоленные», а штриховой линией - функция принадлежности - «засоленные».

Значения коэффициентов засоленности вычисляются с помощью следующих функций:

$$K_{sol} = \sum_{i=1}^2 \eta_i(sol) \cdot \mu_i(sol),$$

где $\eta_1(sol) = 1$, $\eta_2(sol) = 0.001$.

Для получения удельного электрического сопротивления грунта при конкретной влажности и засоленности необходимо значения, полученные с помощью выражения 6 умножить на K_{sol} .

Известна экспериментальная зависимость расчета удельного электрического сопротивления влагосодержащих грунтов [24] от температуры

$$\rho = \rho_{20} \cdot e^{-0.022 \cdot (t-20)},$$

где ρ_{20} - удельное сопротивление при температуре 20°C, t - температура грунта.

Для выявления закономерности изменения удельного электрического сопротивления при замерзании влаги в грунте был произведен ряд экспериментов.

Эксперименты показали, что при сухом грунте с уменьшением температуры ρ уменьшается по экспоненте, а при влажном - в районе от 0°C до -1°C происходит скачкообразное увеличение ρ , что объясняется кристаллическим строением исследуемых грунтов (пески, супеси).

Для расчета величины этого скачка для песка и супеси были выведены следующие формулы[23]:

$$\begin{aligned} \rho_{п}^1 &= \rho_{п}^0 (-0.03 \cdot v^2 + 0.86 \cdot v - 1.9) \\ \rho_{с}^1 &= \rho_{с}^0 (0.024 \cdot v^2 - 0.022 \cdot v + 0.2) \end{aligned}, \quad (8)$$

где v - влажность, выраженная в долях, $\rho_{п}^0$ и $\rho_{с}^0$ - удельные сопротивления песка и супеси при 0°C, а $\rho_{п}^1$ и $\rho_{с}^1$ при -1°C.

Расчет удельного электрического сопротивления песка и супеси при температуре ниже -1°C может быть выполнен с помощью зависимостей:

$$\rho_{п} = \rho_{п}^1 \cdot 0.87^{(t+1)}, \rho_{с} = \rho_{с}^1 \cdot 0.88^{(t+1)} \quad (9)$$

Для глин и суглинков скачкообразного увеличения ρ в районе 0°C не происходит ввиду аморфного строения данного вида грунта.

Поэтому для расчета удельного электрического сопротивления глин в области отрицательных температур предлагается следующая зависимость:

$$\rho_{гл} = \rho_{гл}^0 \cdot 0.88^{(t+1)}, \quad (10)$$

где $\rho_{гл}^0$ - удельное сопротивление глины при 0°C.

Анализ значений ρ , полученных с помощью разработанных зависимостей, показывает, что они входят в диапазоны, указанные в [24].

Таким образом, полученная модель может быть применена для определения удельного электрического сопротивления любого типа

грунта от влажности и температуры с достаточной для практики точностью.

Климатическая модель параметров грунта. Для построения климатической модели грунта был выполнен анализ годового хода температуры на поверхности земли и для различных глубин по разным районам СНГ.

Данные были получены от метеостанций г.Павлодара и г.Новосибирска и взяты из литературы.

Для моделирования колебания t на заданной глубине, на основе вышесказанного и анализа данных метеостанций, была найдена следующая зависимость [25]:

$$t = t_{\pi} - A_h \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} (g - 20 \cdot h) \right], \quad (11)$$

где A_h – амплитуда годового колебания t ($^{\circ}\text{C}$) на h (м) от поверхности, вычисляемая как: $A_h = A_{\pi} \cdot q^h$, q – величина, характеризующая убывание температуры вглубь грунта: $q = \exp \left(\frac{\ln(A_{\pi T} / A_{\pi})}{h_{\pi T}} \right)$,

A_{π} – амплитуда годового колебания t ($^{\circ}\text{C}$) температуры поверхности грунта; $h_{\pi T}$ – глубина постоянной годовой температуры для средних широт $h=15$ метров; коэффициент «20» – учитывает запаздывание (в сутках) максимума (или минимума) годового колебания t на 1м глубины относительно t поверхности грунта (например, если максимум t поверхности наблюдается в июле, то на глубине в 5 м он будет через 100 суток); g – дни, t_{π} (температура слоя постоянной годовой температуры) для средних широт приблизительно равна 8°C , h – глубина от поверхности земли в метрах; $A_{\pi T}$ – амплитуда колебания t на глубинах с постоянной годовой температурой (приблизительно $0,1^{\circ}\text{C}$),

$A_{\pi} = \frac{(T_{\pi \max} - T_{\pi \min})}{2}$, здесь $T_{\pi \max}$ – максимальная среднемесячная температура, $T_{\pi \min}$ – минимальная среднемесячная температура за данный год.

Основной электрический проводник в грунте – влага. Именно она оказывает самое существенное влияние на сопротивление грунта. Поэтому при построении модели удельного сопротивления грунта в

реальных условиях[26] необходимо включить определение влажности его слоев в данном конкретном месте в определенный период времени.

Моделирование зависимости v по глубине до 1м было выполнено с помощью нечеткой логики. Нечетко определялся интервал значения «глубина».

Для получения общего выражения моделирования для любого вида грунта использовалось два терма: первый – «верхний» с ФП $\mu_1(h)$, второй – «нижний» с $\mu_2(h)$. Соответственно этому, введено два интервала: первый - $0 \leq h < 20$ см (выбрано 20см и 100см, т.к. метеостанции измеряют влажность грунта на этих глубинах), второй - $h \geq 100$ см, область переключения между интервалами: $20 \leq h < 100$ см, где h – глубина грунта. Вид функций принадлежности $\mu_1(h)$ и $\mu_2(h)$ представлен на рис.3. Для терма «верхний» на первом интервале $\mu_1(h) = 1$, на втором $\mu_1(h) = 0$, на переходном интервале

$$\mu_1(h) = 1 - \frac{h - 20}{80}.$$

Если $\mu_1(h)$ убывающая функция, то $\mu_2(h) = 1 - \mu_1(h)$, при этом

$$\mu_2(h) = \frac{h - 20}{100 - 20} = \frac{x - a}{b - a}.$$

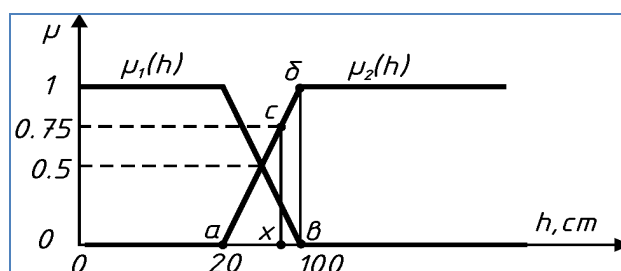


Рис. 3. Семейство ФП для определения влажности по глубинам.

ФП $\mu_1(h)$ и $\mu_2(h)$ имеют вид (12).

Определение функций $\eta_1(h)$ и $\eta_2(h)$ выполнено на основе анализа данных метеостанций за период в 4 года, в результате которого были построены многофакторные модели влажности грунта на глубинах 0.2м и 1м.

$$\mu_1(h) = \begin{cases} 1, & 0 \leq h < 20 \\ 1 - \frac{h-20}{80}, & 20 \leq h < 100 \\ 0, & h \geq 100 \end{cases}$$

$$\mu_2(h) = \begin{cases} 0, & 0 \leq h < 20 \\ \frac{h-20}{80}, & 20 \leq h < 100 \\ 1, & h \geq 100 \end{cases} \quad (12)$$

В соответствии с теорией нечетких множеств выражение для определения влажности представляется так

$$v = \sum_{i=1}^2 \eta_i(h) \cdot \mu_i(h) \quad (13)$$

Определение функций $\eta_1(h)$ и $\eta_2(h)$ выполнено на основе анализа данных метеостанций за период в 4 года, в результате которого были построены многофакторные модели влажности грунта на глубинах 0.2м и 1м. С помощью метода наименьших квадратов была получена трехфакторная модель:

$$v_{20} = 8.06 + 0.03 \cdot o_c - 0.20 \cdot t_{ng} - 0.81 \cdot v_g; \quad (14)$$

$$v_{100} = -4.10 + 0.03 \cdot o_c - 0.007 \cdot t_{ng} + 1.3 \cdot v_g,$$

где O_c - количество осадков, мм; t_{ng} - температура на поверхности грунта, $^{\circ}C$, v_g - средняя скорость ветра, м/с.

Для оценки модели и определения процента разброса функции v относительно ее среднего значения в зависимости от количества выпавших осадков, температуры на поверхности грунта и скорости ветра был вычислен коэффициент детерминированности B_{yx} . Для глубины 20см $B_{yx}=09$, для глубины 100см $B_{yx}=0.96$, что говорит об адекватности модели реальным данным.

Функции $\eta_1(h) = v_{20}$ и $\eta_2(h) = v_{100}$ из выражения (14). Исходя из (14) зависимость определения влажности v для глубины до 1м имеет вид:

$$v_h = v_{20} \cdot \mu_1(h) + v_{100} \cdot \mu_2(h) \quad (15)$$

Для построения модели определения влажности в любое время года на глубине до 1м была введена лингвистическая переменная «месяц» с двумя термами «холодный» и «теплый». В первый временной интервал моделирования входят месяцы, в которых температура воздуха устойчиво держится ниже нуля градусов Цельсия (для рассматриваемой климатической зоны с ноября по февраль), во второй – с апреля по октябрь. Таким образом, можно считать, что функция принадлежности $\mu_1(m) = 1$ и $\mu_2(m) = 0$ с ноября по февраль для первого термина «холодный», а с апреля по октябрь – $\mu_1(m)=0$ и $\mu_2(m)=1$ для второго термина «теплый», где m - номер месяца. Интервал переключения – март (месяц активного снеготаяния) и ноябрь (месяц, когда температура грунта приближается к отрицательным значениям). Причем, в месяц активного снеготаяния к количеству выпавших за данный месяц осадков необходимо добавить осадки, накопленные в виде снежного покрова за зимние месяцы. Функции принадлежности имеют вид (см. рис.4):

$$\mu_1(m) = \begin{cases} 0, & m \leq 3, m \geq 11 \\ e^{(-3 \cdot (m-4)^2)}, & 3 < m \leq 4 \\ 1, & 4 \leq m \leq 10 \\ e^{(-3 \cdot (m-10)^2)}, & 10 \leq m \leq 11 \end{cases} \quad \text{и}$$

$$\mu_2(m) = 1 - \mu_1(m) \quad (16)$$

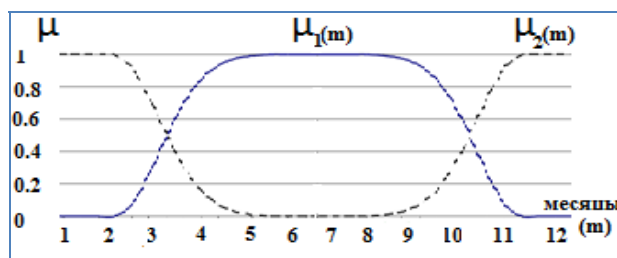


Рис.4. Семейство функций принадлежности для определения влажности по месяцам.

В результате для глубины 1м влажность в зависимости от o_c , t_{ng} , v_g и времени года (по месяцам) вычисляется по формуле:

$$v = \sum_{i=1}^2 \eta_i(m) \cdot \mu_i(m) = \eta_1(m) \cdot \mu_1(m) + \eta_2(m) \cdot \mu_2(m), \quad (17)$$

где $\eta_1(m) = v_h^{(m=10)}$ — влажность за октябрь,

рассчитанная по (14), так как для рассматриваемого региона (средние широты) в зимние месяцы ($m=11,12,1,2$) v не изменяется; $\eta_2(m) = v_h$ – влажность за теплые месяцы ($m=4 \div 10$).

Влажность грунтов, расположенных ниже 1м от поверхности, практически не зависит от климатических условий, а определяется уровнем грунтовых вод. Для разработки модели определения влажности грунта была использована высота $h_{КП}$ капиллярного поднятия (водоподъемная способность): для песка эта величина составляет 0,5м, для супеси – 1м, для суглинка – 1,5м, для глины – 2,5м, причем высота и скорость подъема зависят от структуры грунта. В песчаных грунтах вода поднимается невысоко, но достаточно быстро: за 1-5 дней, а в глинистых – медленно: в течение 5-14 дней. Для моделирования влажности введена нечеткая переменная, «близость грунтовых вод», и определено два терма: первый - «рядом» с функцией принадлежности $\mu_1(h_{ГВ})$ и второй «далеко» с $\mu_2(h_{ГВ})$. Следовательно, будет два интервала: первый на промежутке $0 \leq h_{ГВ} \leq 0.8h_{КП}$ м; второй $-h_{ГВ} \geq h_{КП}$ м, а интервал переключения — $0.8h_{КП} \leq h_{ГВ} < h_{КП}$, м. Значение $0.8h_{КП}$ выбрано по той причине, что с этого расстояния от уровня воды грунт начинает «высыхать». Для терма «рядом» на первом интервале функция принадлежности $\mu_1(h_{ГВ}) = 1$, на втором $\mu_1(h_{ГВ}) = 0$, на интервале переключения

$$\mu_1(h_{ГВ}) = 1 - \frac{h_{ГВ} - 0.8 \cdot h_{КП}}{0.2 \cdot h_{КП}}$$

Для терма «далеко» $\mu_2(h_{ГВ}) = 1 - \mu_1(h_{ГВ})$ на этих же интервалах. Функции принадлежности $\mu_1(h_{ГВ})$ и $\mu_2(h_{ГВ})$ имеют вид

$$\mu_1(h_{ГВ}) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq h_{ГВ} \leq 0.8h_{КП} \\ 1 - \frac{h_{ГВ} - 0.8 \cdot h_{КП}}{0.2 \cdot h_{КП}}, & 0.8h_{КП} \leq h_{ГВ} \leq h_{КП} \\ 0, & \text{при } h_{ГВ} \geq h_{КП} \end{cases}$$

$$\mu_2(h_{ГВ}) = 1 - \mu_1(h_{ГВ}) \quad (18)$$

Формула для определения v запишется следующим образом

$$v = \sum_{i=1}^2 \eta_i(h_{ГВ}) \cdot \mu_i(h_{ГВ})$$

Зависимость $\eta_1(h_{ГВ})$ построена по данным геологоразведочного центра в виде кривой, полученной при использовании метода наименьших квадратов, например для песка $\eta_1(h_{ГВ}) = 18 - 27 \cdot h_{ГВ}$, а $\eta_2(h_{ГВ}) = 4.5$ (4.5 – влажность естественного залегания песка в процентах). В результате модель определения v грунтов выглядит следующим образом [26]

$$\begin{aligned} v_{песок} &= (18 - 27 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 4.5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \\ v_{супесь} &= (23 - 19 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 3.8 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \\ v_{глина} &= (50 - 12.8 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 18 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \\ v_{суглинок} &= (45 - 25 \cdot h_{ГВ}) \cdot \mu_1(h_{ГВ}) + 7.5 \cdot \mu_2(h_{ГВ}) \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь коэффициенты 18, 23, 50, 45 – это максимальная влагоёмкость песка, супеси, глины и суглинка соответственно. Адекватность модели подтверждается с помощью критерия Фишера, который равен 3.34 для сухого грунта и 3.59 для влажного, что выше табличного 3.26 (при уровне значимости $\alpha=0.05$).

Таким образом, зная количество слоев, их вид и глубину залегания грунтовых вод, с помощью модели (19) можно определить влажность грунта в любое время года на глубинах ниже 1м с достаточной для практики точностью. Погрешность моделирования влажности не превышает 20% для сухих грунтов и 10% для влажных.

Анализ электробезопасности с учетом нечетких моделей ρ грунта в зависимости от метеофакторов. На основании разработанных климатических моделей удельного электрического сопротивления грунта была создана программа, с помощью которой определяется удельное электрическое сопротивление слоев грунта при указании их мощности (толщины) и вида. Такие данные определяют в обязательном порядке при изыскательских работах во время проектирования объектов энергобезопасности. Для учета климатического влияния на удельное

электрическое сопротивление грунта требуется ввести усредненные помесячные климатические данные за последние 12 месяцев (температуру, количество осадков и силу ветра), а также уровень грунтовых

вод и мощность водоносного слоя, если грунтовые воды находятся в зоне установки устройств заземления.

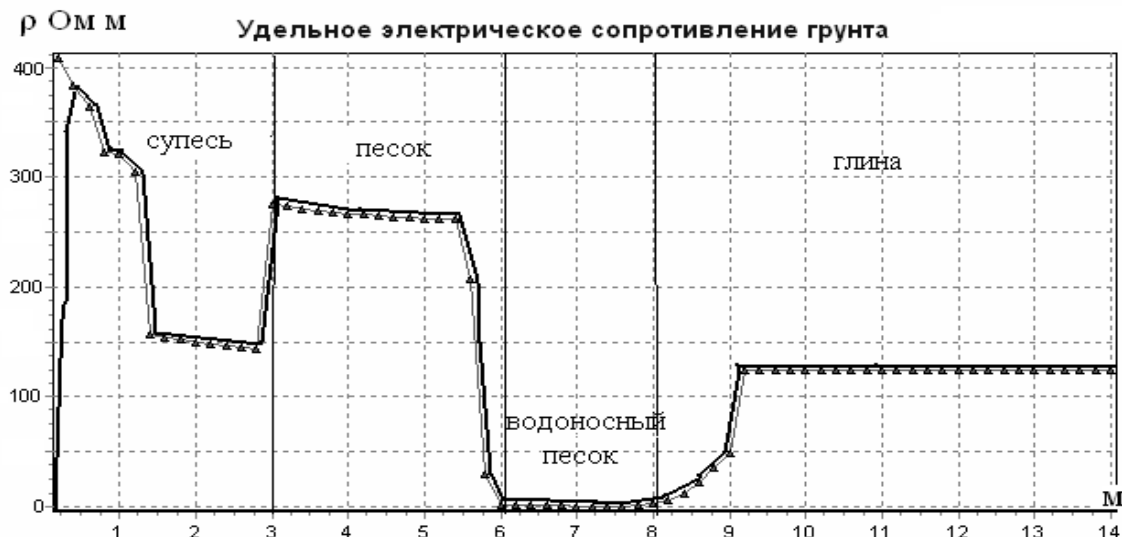


Рис.5. Изменение удельного электрического сопротивления грунта по глубине залегания.

На рис. 5 представлен расчет удельного электрического сопротивления ρ четырех слоев грунта на глубинах от 0м до 14м. Верхний слой мощностью 3м – супесь, следующий слой мощностью 3м – песок, следующий слой – водоносный песок (толщина водоносного слоя 2м), ниже идет слой глины (толщина слоя-6м). На глубине 5.5м значение удельного электрического сопротивления песка начинает резко падать, так как далее идет водоносный слой, ρ которого близко к нулю, точнее 0.5Ом·м.

На рис.5 приведены кривые, характеризующие удельное электрическое сопротивление слоев грунта в начале декабря (линия с маркерами) и в марте, в период активного снеготаянья (сплошная линия). Рисунок хорошо иллюстрирует падение ρ верхнего слоя земли практически до нуля в начале весны (сплошная линия) и возрастание ρ верхнего слоя земли в декабре, когда температура устойчиво держится ниже нуля (линия с маркерами).

Глубина промерзания грунта в данной климатической зоне на уровне 1.4м. Поэтому ρ ниже этого уровня резко падает до величины, соответствующей

Во время активного снеготаянья или обильного дождя удельное электрическое сопротивление верхнего слоя земли резко падает,

и потенциал, появившийся в случае аварии, может распространиться на значительное расстояние от места входа его в землю и привести к электротравматизму работающего персонала. Современные континентальные осадки имеют удельное сопротивление 1-3 Ом·м[24]. положительным температурам.

В промышленных зонах удельное сопротивление талых вод и осадков меньше 1 Ом·м. Исходя из этих величин, был выполнен расчет распространения потенциала по поверхности земли от места его входа (см. рис.6).

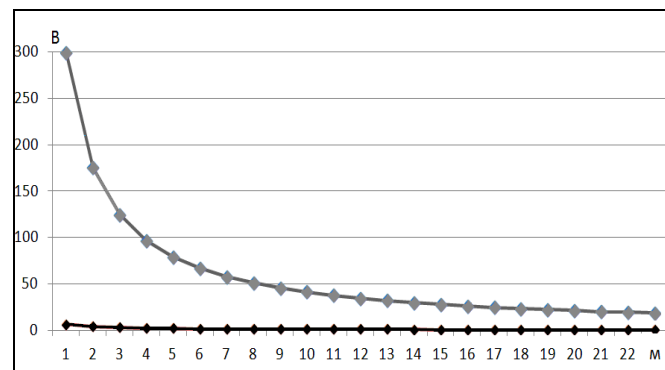


Рис. 6. Изменение потенциала на поверхности земли в случае замыкания фазы на землю в период активного снеготаянья (кривая с крупными маркерами) и в период без обильной влаги.

Для расчета потенциала поверхности земли, для удаленной на расстояние x метров точки от заземлителя используется известная формула:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2 \pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}, \quad (20)$$

где ρ - удельное сопротивление земли (1 Ом·м при обильных дождях и активном снеготаянье), x - расстояние от места входа потенциала, l - величина слоя, имеющего сопротивление ρ .

Опасным напряжением считается 36в, которое может быть снижено при ряде условий. Таким образом, с использованием предлагаемых моделей и выражений 20 определяется опасное расстояние для работающего персонала.

Из учета, что длина шага 0.8м опасным расстоянием от заземления будет 2.5 м, о чем должно быть сообщено по средствам общей связи.

Опасным для прикосновения напряжением в данном случае будут обладать все проводящие электричество предметы на расстоянии в 9м от точки входа тока в землю. При обычном увлажнении опасного потенциала не возникает (рис.6, кривая с мелкими маркерами).

Выводы

1. Показано, что моделирование удельного электрического сопротивления ρ и других оказывающих влияние на ρ показателей грунта с использованием нечеткой логики позволяет определять значение этих величин в зависимости от вида грунта и климатических условий с погрешностью не более 20%.

2. На основе экспериментов получены функции принадлежности и нечеткие интервалы для таких показателей как: вид грунта, влажность, засоленность, а также изменение температуры и влажности слоев грунта под воздействием климатических факторов конкретной местности, что позволило построить модели ρ грунта.

3. Предложенные нечеткие модели позволяют определить параметры грунта в любое время года и на любой глубине с достаточной для практики точностью.

Литература (References)

[1] Gillies D. A. et al. Current North American assessment and refurbishment practices of substation grounding systems //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – V. 20. – №. 3. – pp. 1886-1889.
[2] Averbukh M. A., Zabusov V. V. Calculating the Parameters of Grounding Devices Using Fuzzy-Sets and

Fuzzy Logic Theory.// Electrical Technology Russia. 2009. №7– pp. 2-4.

[3] Guemes J. A., Hernando F. E. Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – №. 2. – P. 595-600.

[4] Nahman J., Paunovic I. Resistance to earth of earthing grids buried in multi-layer soil //Electrical Engineering. – 2006. – V. 88. – №. 4. – pp. 281-287.

[5] Khan Y. et al. Efficient use of low resistivity material for grounding resistance reduction in high soil resistivity areas //TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference. – IEEE, 2010. – pp. 620-624.

[6] Guemes-Alonso J. A. et al. A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids //IEEE transactions on Power Delivery. – 2006. – V. 21. – №. 3. – pp. 1261-1266.

[7] He J. et al. Decreasing grounding resistance of substation by deep-ground-well method //IEEE transactions on power delivery. – 2005. –V. 20. – №. 2. – pp. 738-744.

[8] Nahman J., Paunovic I. Effects of the local soil nonuniformity upon performances of ground grids //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – V. 22. – №. 4. – pp. 2180-2184.

[9] Trifunovic J., Kostic M. Analysis of influence of imperfect contact between grounding electrodes and surrounding soil on electrical properties of grounding loops //Electrical Engineering. – 2014. – V. 96. – №. 3. – pp. 255-265.

[10] Salam M. A. Grounding resistance measurement by grid electrode in Brunei Darussalam //International Journal of Energy Technology and Policy. – 2012. – V. 8. – №. 2. – pp. 196-208

[11] Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – № 8. – pp. 338-353.

[12] Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility //Fuzzy sets and systems. – 1999. – V. 100. – pp. 9-34.

[13] Mendel J. M. Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions. – Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 2001. – pp. 131-184.

[14] Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications. – John Wiley & Sons, 2009. 628 P

[15] Coupland S., John R. Geometric type-1 and type-2 fuzzy logic systems //IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2007. – V. 15. – №. 1. – pp. 3-15.

[16] Greenfield S. et al. The collapsing method of defuzzification for discretised interval type-2 fuzzy sets //Information Sciences. – 2009. – V. 179. – №. 13. – pp. 2055-2069.

[17] Nie M., Tan W. W. Towards an efficient type-reduction method for interval type-2 fuzzy logic systems //Fuzzy Systems.IEEE World Congress on Computational Intelligence. IEEE International Conference on. – IEEE, 2008. – pp. 1425-1432.

- [18] Naz M., Shabir M. Fuzzy Soft Sets and their Algebraic Structures //World Applied Sciences Journal. – 2013. – V. 22. – pp. 45-61.
- [19] Rutkovskaya D., Piliński M., Rutkovskii L. Neyronnye sety, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy.[Neural networks, genetic algorithms and indistinct systems.] Moscow. – Goryachaya liniya-Telekom, 2008. P 383.
- [20] Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. Nechetkaya logika i iskusstvennye neyronnye sety. [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow, Izdatelstvo Fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 2001, 224 P.
- [21] Manusov V.Z., Ahyoev D.S. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models//Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering.- pp.324-329.
- [22] Andrzej Piegat. Fuzzy Modelling and Control. Phisica-Verlag. Heidelberg. 2001. 798 P.
- [23] Zaytseva, N.M., D.S. Zaytsev and M. Ya. Kletsel. Dependences of Soil Electrical Resistivity on Moisture Content and Temperature. // Electrical Technology Russia, 2008, Issue 9, pp 30-34.
- [24] Karyakin R.N. Zazemlyayuchshie ustroystva elektroustanovok. Spravochnik.[Grounding Devices of Electroinstallations. Directory] Moscow, Energoservis Publ., 2002, 218 P.
- [25] Mark Yakovlevich Kletsel, Natalia Mikhaelovna Zaytseva and Bibigul Beysembayevna Issabekova. Automation of Calculation of Resistances of Grounds// World Applied Sciences Journal, 2013, Vol. 25, Issue 6, pp.921-926.
- [26] N.M.Zaytseva, B.B.Isabekova & M.Ya.Kletsel'. Determiation of soil parameters to calculate soil resistivity.//Russian Electrical Engineering, 2015, Vol. 86, Issue 5, pp 275–281.

Сведения об авторах.



Манусов Вадим Зиновьевич. Новосибирский государственный технический университет, кафедра системы электроснабжения предприятий, д-р техн. наук, профессор. Основное направление исследований: применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем.

E-mail: Manusov36@mail.ru



Зайцева Наталья Михайловна, Инновационный Евразийский университет, кафедра энергетики, металлургии и информационных технологий, кандидат техн. наук, доцент. Основное направление исследований: применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации функционирования электротехнических комплексов.

E-mail: zaitzevns@mail.ru