

УДК 004.021

Н.М. Зайцева, кандидат технических наук

Инновационный Евразийский университет (г. Павлодар, Республика Казахстан)

E-mail: zaitzevns@mail.ru

Автоматизация определения уровня электробезопасности электротехнических комплексов с использованием нечеткой логики

Аннотация. Статья посвящена задаче автоматизации оценки уровня электробезопасности электроустановок на основе определения удельного электрического сопротивления слоев грунта ρ в конкретных климатических условиях. Значение ρ грунта зависит от множества факторов, которые могут значительно изменяться в течение года. Поэтому решение выполнено с помощью моделирования на основе одного из направлений искусственного интеллекта: нечеткой логики.

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

По сравнению с другими видами производственного травматизма электротравматизм составляет небольшой процент, но по числу травм с тяжелым и смертельным исходом он занимает первое место. Заземляющие устройства, предназначенные обеспечить принятый режим функционирования энергоустановок, имеют еще и функцию защиты работающего здесь персонала от электротравм в случае появившегося на корпусе электрооборудования потенциала во время аварийной работы.

Формулы расчета заземлений, а так же расчета потенциала при стекание тока в землю содержат ρ -удельное электрическое сопротивление грунта. Эта величина представляет собой многопараметрическую зависимость, а ее значение меняется в реальных условиях в широких пределах. Имеющиеся ранее методы не позволяли учесть изменение удельного электрического сопротивления в конкретной местности и в конкретный сезонный период. Например, в период активного снеготаяния или обильных дождей, засухи или сильнейших морозов, а это может привести к ошибочному расчету напряжения прикосновения и шагового напряжения. Этот факт может способствовать несвоевременному оповещению персонала в случае аварии и привести к травмированию работников.

Для решения поставленной задачи был выбран аппарат моделирования, позволяющий предсказать поведение объекта моделирования в различных условиях. Ввиду сложности задачи основным математическим аппаратом моделирования удельного сопротивления ρ грунта был выбран метод искусственного интеллекта, нечеткая логика [1], который применяется при неточных данных. Модель содержит следующие блоки, составляющие собственно алгоритм расчета ρ , проектирования заземляющих устройств и оценки электробезопасности электроустановок.

Построение алгоритма, рассчитывающего $\rho(v)$ от влажности выполнялось на основе метода, называемого нечеткой логикой, и регрессионного моделирования. С помощью данных, полученных в ходе многочисленных экспериментов с образцами различного вида грунта для двух интервалов влажности «сухо» и «влажно» были построены зависимости для каждого интервала в отдельности. Эти зависимости объединялись в единое математическое выражение с помощью инструмента нечеткой логики: системы размытых правил [1].

Для решения данной задачи нечетко определялась влажность. Характеристики влажности выбраны следующие: "сухо" – примерно от 0 % до 3-4 %, "умеренно влажно" – примерно от 4 % до 12 %, "влажно" – примерно от 12 % до насыщения грунта влагой.

Одномерная зависимость ρ грунта от влажности может быть представлена следующей системой размытых правил [1, 2]:

$$\text{IF } x \in A_i \text{ THEN } y = \eta_i(x), i = 1, \dots, N$$

где A_i – собственно сами интервалы влажности, x – влажность грунта в процентах, x имеют функцию принадлежности $\mu_{A_i}(x)$. Для описания нечеткой принадлежности к интервалам приняты экспоненциальные функции:

$$\mu_{A_1}(x) = e^{(-c(x-d)^2)} \text{ и } \mu_{A_2} = 1 - \mu_{A_1}, \quad (1)$$

где коэффициенты c и d определяют степень нечеткости и положение на числовой оси параметра влажность.

Регрессионные зависимости ρ грунта от влажности $y = \eta_i(x), i = 1, 2$ были построены с использованием показательной функции: В результате получены уравнения удельного сопротивления для песка $\rho_{п}$, супеси $\rho_{с}$ и глины $\rho_{г}$ [3], где v – влажность грунта в процентах:

$$\begin{aligned}\rho_{\Pi} &= 6 \cdot 0,3^v \cdot \mu_1(v) + 1 \cdot 0,7^v \cdot \mu_2(v) \\ \rho_c &= 90 \cdot 0,1^v \cdot \mu_1(v) + 0,3 \cdot 0,8^v \cdot \mu_2(v) \\ \rho_{\text{гл}} &= 100 \cdot 0,25^v \cdot \mu_1(v) + 3 \cdot 0,8^v \cdot \mu_2(v)\end{aligned}\quad (2)$$

Известен факт, что засоленность грунтов оказывает значительное влияние на их электропроводность. Поэтому для влияния засоленности на электропроводность грунта был проведен ряд экспериментов, и построены нечеткие зависимости. Влияние засоленности определили в виде нечеткого коэффициента K_{sol} .

Для его определения введено два нечетких интервала «слабозасоленные» и «засоленные» и определены функции принадлежности

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq \text{sol} < 0,4 \\ e^{-0,8(\text{sol}-2)^2}, & 0,4 \leq \text{sol} \leq 2 \\ 0, & \text{sol} > 2 \end{cases} \quad \mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \leq \text{sol} < 0,4 \\ 1 - e^{-0,8(\text{sol}-2)^2}, & 0,4 \leq \text{sol} \leq 2 \\ 1, & \text{sol} > 2 \end{cases}$$

Само значения коэффициента засоленности может быть определено следующим образом:

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

где $\eta_1(\text{sol}) = 1$, $\eta_2(\text{sol}) = 0,001$.

Для учета влияния засоленности грунта на его электропроводность при конкретной влажности и температуры 20°C необходимо значения, полученные с помощью выражения (1) умножить на K_{sol} .

Для построения модели удельного электрического сопротивления при замерзании влаги в грунте был произведен многочисленных экспериментов. В ходе этих экспериментов было выяснено, что при отсутствии влаги в грунте, что может наблюдаться в особо засушливый период, с уменьшением температуры ρ уменьшается по экспоненте. Если же грунт увлажнен, то для песчаных грунтов в районе от 0°C до -1°C происходит скачкообразное увеличение ρ . Это объясняется их кристаллическим строением (пески, супеси).

Величину этого скачка для песка и супеси можно определить с помощью зависимостей [3]:

$$\begin{aligned}\rho_{\Pi}^1 &= \rho_{\Pi}^0(-0,03 \cdot v^2 + 0,86 \cdot v - 1,9) \\ \rho_c^1 &= \rho_c^0(0,024 \cdot v^2 - 0,022 \cdot v + 0,2)\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь v – влажность, выраженная в долях, ρ_{Π}^0 и ρ_c^0 – удельные сопротивления песка и супеси при 0°C , а ρ_{Π}^1 и ρ_c^1 при -1°C . Для определения удельного электрического сопротивления песка и супеси при температуре ниже -1°C может быть использована полученная формула:

$$\rho_{\Pi} = \rho_{\Pi}^1 \cdot 0,87^{(t+1)}, \quad \rho_c = \rho_c^1 \cdot 0,88^{(t+1)}\quad (4)$$

Адекватность полученных моделей доказана двумя способами

1) выполнено сравнение значений ρ , полученных с помощью разработанных зависимостей(1-3) с данными, приведенными в литературе[4],

2) с помощью критерия Фишера.

По первому способу анализ показал, что полученные значения ρ входят в диапазоны, указанные в [4]. По второму, вычисленные значения $F_{\text{эк}}$ песка = 3,28, $F_{\text{эк}}$ супеси = 3,31 и $F_{\text{эк}}$ глины = 3,18, что выше табличных значений: 3,11, 3,10 и 3,14 соответственно для уровня значимости $\alpha = 0,05$. На этом основании можно считать, что полученная модель может быть применена для определения удельного электрического сопротивления грунта от влажности и температуры с достаточной для практики точностью.

Построение климатической модели грунта велось на основе анализа годового хода температуры на поверхности земли и для различных глубин для ряда районов СНГ, исключая районы вечной мерзлоты. Анализируемые данные были получены от метеостанций г. Павлодара и г. Новосибирска, а

так же взяты из литературы. В результате была получена зависимость, на основании которой и выполнялось моделирование колебания t на заданной глубине в конкретный сезонный период для средних широт [5]:

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

Здесь величина A_h – представляет собой амплитуду годового колебания температуры t ($^{\circ}\text{C}$) на глубине h (м) от поверхности земли.

$$A_h = A_{\Pi} \cdot q^h,$$

где q – величина, характеризующая убывание температуры вглубь грунта, вычисляемая как:

$$q = \exp \left(\frac{\ln \left(\frac{A_{\Pi\Pi}}{A_{\Pi}} \right)}{h_{\Pi\Pi}} \right).$$

Величина A_{Π} – это амплитуда годового колебания температуры t ($^{\circ}\text{C}$) поверхности земли, а $h_{\Pi\Pi}$ – глубина постоянной годовой температуры (для средних широт эта величина равна $h=15$ метров). Коэффициент «20» – учитывает в формуле «запаздывание» (в сутках) максимума годового колебания t на 1м глубины относительно температуры поверхности земли (грунта). Величина g – количество дней от начала года для определения конкретной даты расчета ρ . Величина t_{Π} для средних широт приблизительно равняется 8°C . Параметр h – глубина от поверхности земли в метрах а параметр $A_{\Pi\Pi}$ – амплитуда колебания температуры t на глубинах с постоянной годовой температурой, которая приблизительно равна $0,1^{\circ}\text{C}$.

$$A_{\Pi} = \frac{T_{\Pi\max} - T_{\Pi\min}}{2}, \quad (5)$$

где $T_{\Pi\max}$ – максимальная, $T_{\Pi\min}$ – минимальная среднемесячные температуры за год, предшествующий определению удельного электрического сопротивления грунта в конкретной местности.

При моделировании изменения влажности v грунта от климатических факторов было определено, что изменения таких факторов как осадки, температура, сила ветра, влажность воздуха оказывают влияние на увлажненность грунта только на глубинах от поверхности земли до 1м. На глубинах ниже 1м увлажненность слоев грунта зависит только от уровня грунтовых вод.

Поэтому для определения влажности на глубине до 1м строилась нечеткая модель, имеющая два интервала. Нечетко определялся интервал значения «глубина». Первый интервал – $0 \leq h < 20$ см, второй – $h \geq 100$ см. Значения 20 см и 100 см определялись методикой измерения влажности грунта метеостанциями именно на этих глубинах. Область переключения между интервалами: $20 \leq h < 100$ см. Функции принадлежности $\mu_1(h)$ и $\mu_2(h)$ имеют следующие значения: для терма «верхний» на первом интервале $\mu_1(h) = 1$, на втором $\mu_1(h) = 0$, на интервале переключения:

$$\mu_1(h) = 1 - \frac{h - 20}{80}, \quad \mu_2(h) = 1 - \mu_1(h) \quad (7)$$

Построение функций $\eta_1(h)$ и $\eta_2(h)$ выполнено с помощью регрессионного моделирования на основе данных, полученных от метеостанций за период в 4 года. В результате были построены многофакторные (факторы: количество осадков, температура поверхности грунта, сила ветра) модели влажности грунта на глубинах 0.2м и 1м:

$$\begin{aligned} v_{20} &= 8,06 + 0,03 \cdot o_c - 0,20 \cdot t_{\text{гр}} - 0,81 \cdot v_b; \\ v_{100} &= -4,10 + 0,03 \cdot o_c - 0,007 \cdot t_{\text{гр}} + 1,3 \cdot v_b, \end{aligned}$$

где O_c – количество осадков, мм; $t_{\text{гр}}$ – температура на поверхности грунта, $^{\circ}\text{C}$, v_b – средняя скорость ветра, м/с.

На основании представленных выше климатических моделей удельного электрического сопротивления грунта была создана программа (см. рисунок 1), рассчитывающая сопротивления

выбранного пользователем вида заземления, а также шаговые напряжения и напряжения прикосновения в случае возникновения аварий, которые выполнялись по известным формулам [6].

Рисунок 1 – Интерфейс окна программы для ввода климатических данных

Для расчета в программе требуется задать количество слоев грунта, которые имеются в месте расчета заземлений, их вид и толщину, а также усредненные климатические данные за последние 12 месяцев (температуру, количество осадков и силу ветра).

По этим данным идет расчет удельного электрического сопротивления слоев грунта. На рисунке 2 представлен расчет удельного электрического сопротивления ρ слоев грунта на глубинах от 0 м до 14 м. Верхний слой мощностью 2,5 м – супесь, следующий слой – песок (3,5 м), следующий – глина (толщина слоя – 1,5 м), следующий – суглинок (мощность слоя 2 м), нижний слой – супесь. На глубине 5 м начинается водоносный слой песка, поэтому значение удельного электрического сопротивления этого слоя близко к нулю, точнее 0,5 Ом·м.

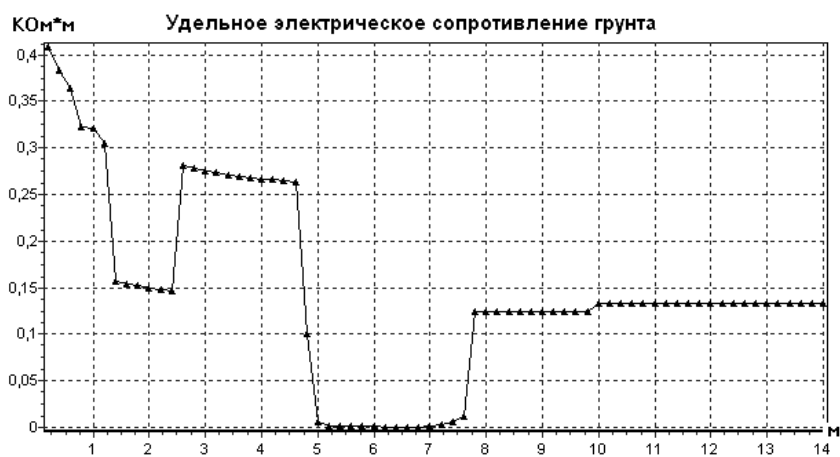


Рисунок 2 – Изменение удельного электрического сопротивления грунта по глубине залегания

На рисунке 2 приведены кривые, характеризующие удельное электрическое сопротивление слоев грунта в начале декабря, когда удельное электрическое сопротивление верхних слоев максимально. В программе предусмотрен расчет сопротивлений простых и сложных заземлений. Программа позволяет производить проектирование заземляющих устройств. В ней предусмотрен выбор вида заземления, его параметров: геометрической формы, размеров, количества элементов, глубины закладки. Если сопротивление выбранного вида заземления оказывается выше нормы, то можно, изменяя параметры, добиться требуемого нормой значения сопротивления.

Рисунок 3 иллюстрирует интерфейс программы расчета заземляющего устройства в виде сетки, устанавливаемой на глубине 1 м от поверхности земли. При выбранных параметрах это устройство будет иметь сопротивление 0,5 Ом.

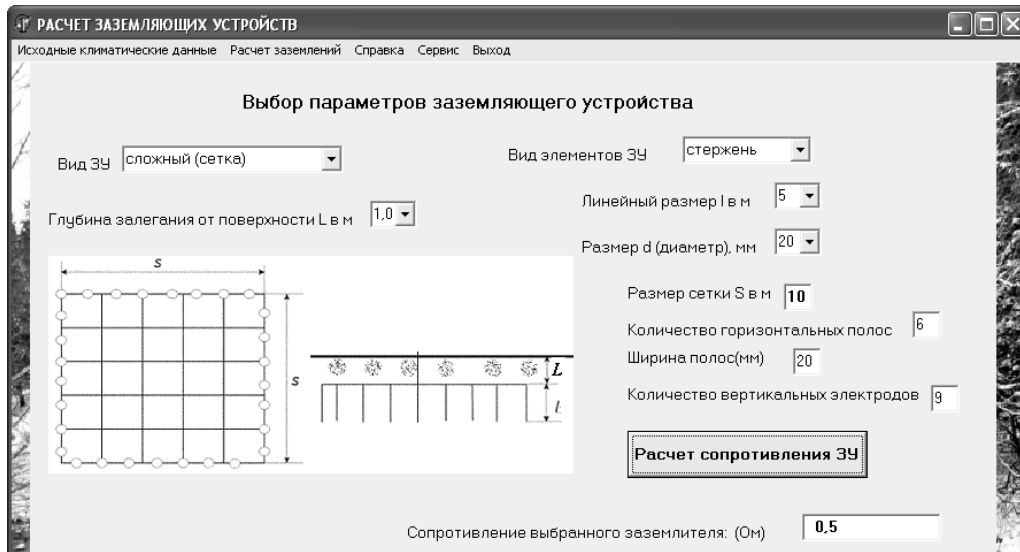


Рисунок 3 – Интерфейс программы расчета выбранного вида заземляющего устройства и глубины его залегания

Расчет проводится для наихудшего с точки зрения удельного электрического сопротивления периода года. По желанию пользователя, возможно формирование графиков изменения сопротивления рассчитываемого вида заземления в течение года.

Так на рисунке 4 проиллюстрировано изменение сопротивления горизонтального заземления, установленного на глубинах 0,6 м (верхний график), 1 м (средний график), 2 м (нижний график) в климатической зоне, где глубина промерзания грунта менее двух метров.



Рисунок 4 – Графики изменение сопротивления горизонтального заземления в течение года

Напряжения прикосновения и шага рассчитываются в программе на основе нечетких моделей ρ и с учетом неоднородности земли. Анализ электробезопасности в данной программе ведется на следующих положениях:

- современные континентальные осадки имеют удельное сопротивление 1-3 Ом·м [6];
- в промышленных зонах удельное сопротивление талых вод и осадков меньше 1 Ом·м.

Исходя из этих величин, выполняется расчет распространения потенциала по поверхности земли от места его входа (см. рисунок 5). Расчет для точки, удаленной на расстояние x метров от заземления, выполнялся по известной формуле:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}, \quad (8)$$

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 .

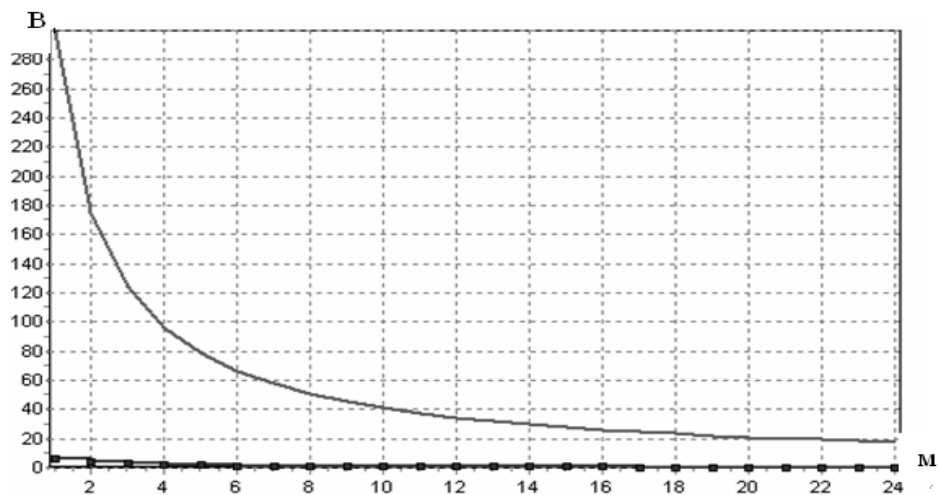


Рисунок 5 – Графики изменения потенциала на поверхности земли при удалении от точки входа тока в землю при активном снеготаянье (сплошная линия) и при обычных условиях (линия с круглыми маркерами)

Так как опасным для человека напряжением считается 36 В, то программа с использованием предлагаемых моделей 1-5 и выражения 4 определяет опасное расстояние для работающего персонала. На рисунке 5 проиллюстрировано изменение потенциала по поверхности земли от 300 В от места входа тока в землю и далее, распространяясь радиально. График без маркеров соответствует ситуации обильного снеготаянья, когда еще грунт находится в замерзшем состоянии, следовательно, его удельное электрическое сопротивление очень высокое (от сотен Ом·м до единиц КОм·м), что препятствует стеканию потенциала в землю. Нижний график без маркеров соответствует обычному увлажнению поверхности земли, при котором появившийся при аварии потенциал стекает в землю по электродам устройств заземления.

Предлагаемая программа на основе разработанных нечетких моделей позволяет определить удельное электрическое сопротивление грунта в любое время года и на любой глубине с достаточной для практики точностью и на его основе рассчитать устройство заземления конструкции любой сложности, а также и напряжения прикосновения и шаговых напряжений.

1) В программе предусмотрена возможность вывода графиков изменения удельного электрического сопротивления слоев грунта по глубине залегания, а также изменения сопротивления устройства заземления выбранного вида в течение года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – № 8. – P. 338-353.
- 2 Andrzej Piegat. Fuzzy Modelling and Control. Phisica-Verlag. Heidelberg. 2001.
- 3 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.
- 4 Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2002.
- 5 N.M. Zaytseva, B.B. Isabekova & M.Ya. Kletsel?. Determination of soil parameters to calculate soil resistivity.//Russian Electrical Engineering, 2015, Vol. 86, Issue 5, pp 275–281.
- 6 Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. - 448 с., ил.

REFERENCES

- 1 Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – № 8. – P. 338-353.
- 2 Andrzej Piegat. Fuzzy Modelling and Control. Phisica-Verlag. Heidelberg. 2001.

3 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.

4 Karyakin, R.N. Zazemlyayushchiye ustroystva elektroustanovok. Spravochnik [Grounding devices of electrical installations. Reference book]/ R.N. Karyakin. - М.: Energoservis. - 2002.

5 N.M. Zaytseva, B.B. Isabekova & M.Ya.Kletsel'. Determination of soil parameters to calculate soil resistivity.//Russian Electrical Engineering, 2015, Vol. 86, Issue 5, pp 275–281.

6 Dolin P.A. Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh[Fundamentals of safety in electrical installations: Textbook]: Ucheb. posobiye dlya vuzo v. М.: Energoatomizdat, 1984. – 448 с., il.

ТҮЙІН

Н.М. Зайцева, техника ғылымдарының кандидаты
Инновациялық Еуразия университеті (Павлодар қ, Қазақстан Республикасы)

Нақты емес логиканы пайдалана отырып, электртехникалық кешендердің электр қауіпсіздігі деңгейін анықтауды автоматтандыру

Мақала нақты климаттық жағдайлардағы ρ топырақ қабатының меншікті электрлік кедергісін анықтау негізіндегі электрқондырғылардың электрқауіпсіздік деңгейін бағалауды автоматтандыру міндетіне арналған. Топырақтың мәні жыл бойы айтарлықтай өзгеруі мүмкін және көптеген факторларға байланысты. Сондықтан шешім жасанды интеллект бағыттарының бірі - нақты емес логика негізінде модельдеу арқылы орындалды.

Түйін сөздер: электр қауіпсіздігі, топырақтың меншікті электр кедергісі, модельдеу, нақты емес логика, тиесілі функциясы, түйісу кернеуі, қадамдық кернеу

RESUME

N.M. Zaytseva, candidate of technical sciences
Innovative University of Eurasia (Pavlodar, Kazakhstan Republic)

Automation of determining the electrical safety level of electro technical complexes using fuzzy logic

The article is devoted to the task of automating the assessment of the electrical safety level of electrical installations based on the determination of the electrical resistivity of soil layers ρ in specific climatic conditions. The soil ρ value depends on many factors, which can vary significantly during the year. Therefore, the decision was made using modeling based on one of the areas of artificial intelligence: fuzzy logic.

Key words: electrical safety, electrical resistivity of the soil, modeling, fuzzy logic, membership functions, touch voltage, step voltage.