



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)**

Кафедра «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ
по дисциплине «ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ»
для студентов заочной формы обучения
направления подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность»
профиль «Охрана труда и безопасность в техносфере»**

Ростов-на-Дону
2025 г.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Цель контрольной работы – освоить методы расчета риска аварийной ситуации и параметров электрической сети, применяемые в области промышленной безопасности и электробезопасности.

Задачи:

- рассчитать риск с помощью «дерева событий»;
- рассчитать силу тока, протекающего через человека, в сетях с изолированной и глухозаземленной нейтралью;
- рассчитать напряжение шага.

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа по дисциплине «Обеспечение безопасности производственных систем» включает решение 3-х практических задач и выполняется студентом в течение семестра.

Формой итогового контроля по дисциплине «Обеспечение безопасности производственных систем» является экзамен. Студент допускается к экзамену при условии представления курсовой работы и рецензии с положительной оценкой, а также зачета по лабораторным и практическим работам.

Контрольная работа должна содержать:

- титульный лист установленного образца с подписью студента;
- содержание, где отражается перечень заданий, содержащихся в работе;
- введение, где отражаются цели и задачи контрольной работы.
- индивидуальное задание, где излагаются последовательности решений заданий в соответствии с вариантом;
- список литературы – научно-теоретические источники (учебники, учебные пособия, Интернет – сайты и т.п.), которые рекомендуют преподаватели по изучаемым дисциплинам.

Текст должен быть оформлен в текстовом редакторе Word for Windows. Размер текста: обычный, размер 14 пт. Шрифт заголовков разделов: полужирный, размер 16 пт. Шрифт заголовков подразделов: полужирный, размер 14 пт. Межсимвольный интервал: обычный. Межстрочный интервал: одинарный. Формулы должны быть оформлены в редакторе формул Equation Editor и вставлены в документ как объект. Размеры шрифта для формул: обычный – 14 пт; крупный индекс – 10 пт; мелкий индекс – 8 пт; крупный символ – 20 пт; мелкий символ – 14 пт.

Иллюстрации (схемы, содержащиеся в рабочем задании) должны быть вставлены в текст. Текст выполняется на листах формата А4 (210×297 мм) без

рамки, соблюдая следующие размеры полей: левое – не менее 20 мм, правое – не менее 10 мм, верхнее – не менее 20 мм, нижнее – не менее 20 мм. Страницы следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту. Номер страницы проставляют внизу страницы от центра без точки в конце. Контрольная работа должна содержать 15-25 страниц машинописного текста.

Задание 1. Расчет риска с помощью «дерева событий»

Цель работы – определить вероятности появления иницирующего и результирующих событий, а также систем, смягчающих их последствия, используя модель последовательностей и взаимодействий различных факторов на основе «дерева событий».

Рабочее задание: Разгерметизация технологического трубопровода на эстакаде может инициировать 6 событий при 3 факторах защиты (рисунок 1). Система А предполагает возможность мгновенного воспламенения, система В – возможность образования взрывоопасного облака при испарении с пролива, система С – возможность отсроченного воспламенения. Рассчитать риск полного разрушения технологического трубопровода P , возникновения событий 1-6 P_1 - P_6 , а также успеха и отказа систем А, В и С P_a , P_b , P_c , P_d , P_e , P_f , P_g , P_h и P_i , если известны вероятности успеха и отказа систем А, В и С P_a , P_d , P_e , P_f , P_g и P_j . Значения параметров выбрать из таблицы 1 согласно варианту, определяемому по последней цифре зачетной книжки.

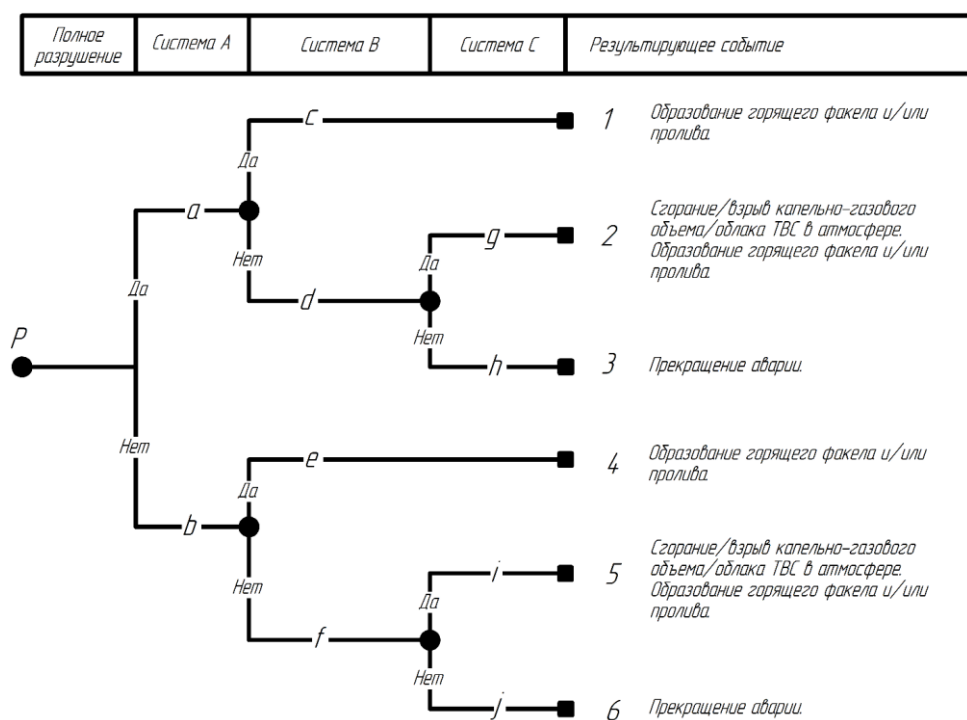


Рисунок 1 – «Дерево событий» при разгерметизации технологического трубопровода на эстакаде

Исходные данные к заданию 1

№ варианта	P_a	P_d	P_e	P_f	P_g	P_j
1	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
2	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$
3	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
4	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$
5	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$
6	$7 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$
7	$5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
8	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
9	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$
0	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$

Порядок расчета: Для описания основных принципов анализа для наглядности используется основное графическое представление дерева событий, представленное на рисунке 2. Здесь последовательные отказы систем А и В (факторы защиты) приводят к показанным выходам. В этом примере система В поддерживает систему А.

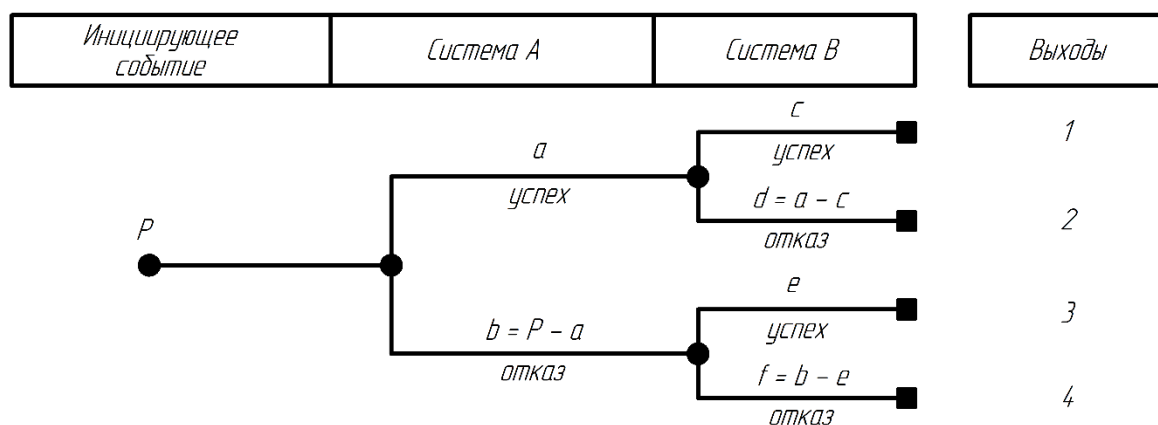


Рисунок 2 – Основное графическое представление дерева событий

Для вывода формулы (1) для вероятности P_1 последовательности 1 необходимо использовать теорему условной вероятности и определения:

$$P_1 = P_a P_c, \quad (1)$$

где P_a – вероятность успеха системы А; P_c – вероятность успеха системы В при успехе системы А.

Вероятность P_2 последовательности 2:

$$P_2 = P_a P_d = P_a (P_a - P_c), \quad (2)$$

где P_d – вероятность отказа системы В при успехе системы А.

Вероятность P_3 последовательности 3:

$$P_3 = P_b P_e = (P - P_a) P_e, \quad (3)$$

где P – вероятность инициирующего события; P_b – вероятность отказа системы А; P_e – вероятность успеха системы В при отказе системы А.

Вероятность P_4 последовательности 4:

$$P_4 = P_b P_f = (P - P_a)(P_b - P_e), \quad (4)$$

где P_f – вероятность отказа системы В при отказе системы А.

Пример расчета: Выход газовой фазы из цистерны с образованием шлейфа паров взрывопожароопасной жидкости на дыхательной арматуре (люке, зазоре) и его зажигание с формированием очага горения может сопровождаться 4 событиями при 3 факторах защиты (рисунок 3). Система А характеризуется затуханием очага горения, система В – распространением горения на всю цистерну, система С – возникновением взрыва в цистерне. Рассчитать риск воспламенения шлейфа P , возникновения событий 1-4 P_1 - P_4 , а также отказа систем А и С P_b и P_f , если известны вероятности успеха и отказа систем А, В и С $P_a = 8 \cdot 10^{-5}$, $P_c = 3 \cdot 10^{-4}$, $P_d = 5 \cdot 10^{-3}$ и $P_e = 2,5 \cdot 10^{-4}$.

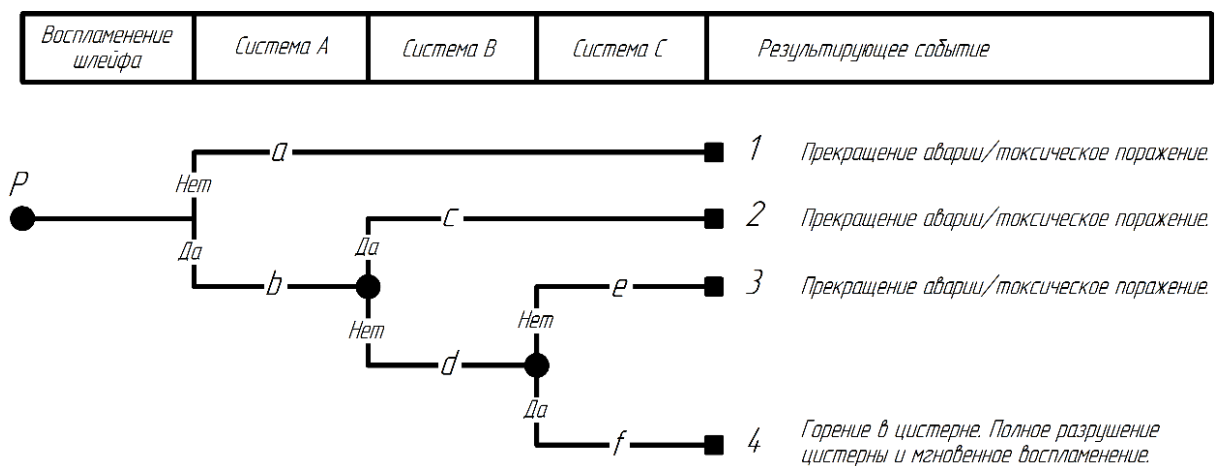


Рисунок 3 – «Дерево событий» при выходе газовой фазы из цистерны

1) Определим вероятность отказа системы С P_f , используя зависимости, изображенные на рисунке 2:

$$P_f = 5 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-4} = 4,75 \cdot 10^{-3}.$$

2) Вероятность отказа системы А P_b будет равна:

$$P_b = 3 \cdot 10^{-4} + 4,75 \cdot 10^{-3} = 5,05 \cdot 10^{-3}.$$

3) Рассчитаем вероятность инициирующего события P :

$$P = 8 \cdot 10^{-5} + 5,05 \cdot 10^{-3} = 5,13 \cdot 10^{-3}.$$

4) Вычислим вероятности возникновения событий 1-4 P_1 - P_4 , пользуясь формулами (1)-(4):

$$P_1 = 8 \cdot 10^{-5};$$

$$P_2 = 5,05 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 1,52 \cdot 10^{-6};$$

$$P_3 = 5,05 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 6,31 \cdot 10^{-9};$$

$$P_4 = 5,05 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 4,75 \cdot 10^{-3} = 1,2 \cdot 10^{-7}.$$

Задание 2. Расчет силы тока, протекающего через человека, в сетях с изолированной и глухозаземленной нейтралью

Цель работы – определить степень поражения человека электрическим током при заданных значениях параметров электрической сети и условиях включения человека в сеть.

Рабочее задание: В сети напряжением $U_{\phi} = 220$ В с изолированной нейтралью (рисунок 4, а) ток $I_{\text{ч}}$, А, проходящий через человека с сопротивлением тела $R_{\text{ч}} = 1000$ Ом, обуви $R_{\text{об}}$, Ом, и пола $R_{\text{п}}$, Ом, на котором он стоит, в землю, возвращается к источнику тока через изоляцию проводов сети, которая в исправном состоянии обладает большим сопротивлением $R_{\text{из}}$, Ом. В сети напряжением $U_{\phi} = 220$ В с глухозаземленной нейтралью (рисунок 4, б) цепь тока, проходящего через человека, помимо сопротивлений его тела, обуви и пола, включает и сопротивление заземления нейтрали источника тока $R_0 = 10$ Ом в соответствии с ПУЭ, что значительно меньше сопротивления тела человека. Значения параметров выбрать из таблицы 2 согласно варианту, определяемому по второй с конца цифре зачетной книжки.

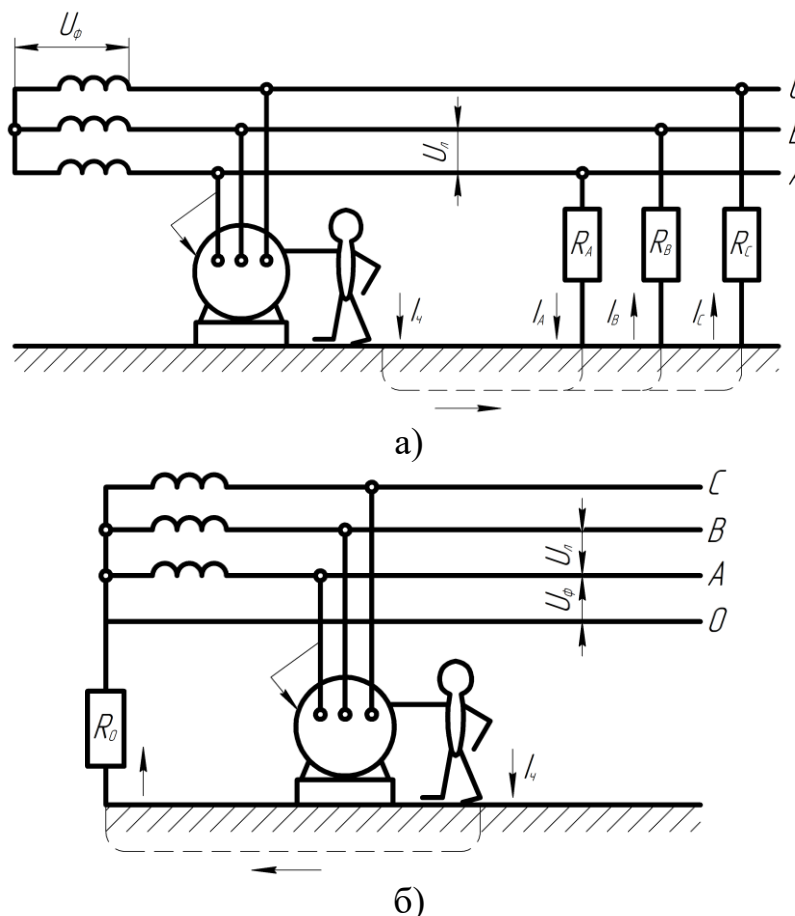


Рисунок 4 – Схемы однофазного включения человека в трехфазную сеть с изолированной (а) и глухозаземленной (б) нейтралью

Таблица 2

Исходные данные к заданию 2

Параметр	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R _{об} , кОм	0,01	0,12	0,89	0,45	0,57	1,0	0,36	0,23	0,94	0,68
R _п , кОм	10,0	3,5	1,7	5,1	2,8	4,4	8,6	0,2	6,3	7,8
R _{из} , кОм	50	25	37	43	12	74	68	99	86	11

Порядок расчета: В случае однофазного включения человека в трехфазную сеть с изолированной нейтралью ток, проходящий через человека $I_{\text{ч}}$, А, может быть определен по формуле:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + \frac{R_{\text{из}}}{3}}. \quad (5)$$

При однофазном включении человека в трехфазную сеть с глухозаземленной нейтралью ток, проходящий через человека $I_{\text{ч}}$, А, рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + R_0}. \quad (6)$$

Величина тока, проходящего через человека, является основным фактором, определяющим тяжесть электротравматизма. По степени воздействия электрического тока на организм человека различают три пороговых значения: ошутимое, неотпускающее и фибрилляционное (таблица 3).

Таблица 3

Степень воздействия электрического тока на организм человека

Степень воздействия	Сила тока, мА	Поражающее действие электрического тока	
		Переменный ток с частотой 50-60 Гц	Постоянный ток
Ощутимый ток	2-3	Сильное дрожание пальцев рук	Не ощущается
	5-10	Судороги рук, других мышц	Зуд, ощущение нагрева
	12-15	Сильные боли в руках, руки трудно оторвать от токоведущих частей. Состояние терпимо 5-10 с	Усиление ощущения нагрева
Неотпускающий ток	20-50	Руки парализуются, оторвать их от токоведущих частей невозможно. Сильные боли в мышцах. Дыхание затрудняется. Состояние терпимо не более 5 с	Усиление нагрева, незначительные сокращения мышц рук
Фибрилляционный (смертельный) ток	50-80	Паралич дыхания	Сильный нагрев. Сокращение мышц рук. Судороги. Затруднение дыхания
	90-110	Паралич дыхания. При контакте более 3 с – паралич сердца	Паралич дыхания

	300 и более	Паралич дыхания и сердца при контакте более 1 с	Поражение дыхания и сердца при контакте более 0,1 с
--	-------------	---	---

Пороговый *ощутимый ток* вызывает при прохождении его через организм ощутимые раздражения в форме легких покалываний, когда его величина достигает 0,5-1,5 мА (указанные пределы относятся к переменному току промышленной частоты 50 Гц). Постоянный ток вызывает такие же воздействия при больших значениях тока (6-7 мА). Ощутимый ток вызывает у человека малоболезненные раздражения, и самым главным является возможность человека самостоятельно освободиться от токоведущей части оборудования, находящейся под напряжением.

Неотпускающий ток при прохождении через человека приводит к возникновению неуправляемых судорожных сокращений мышц. Величина порогового неотпускающего тока составляет для переменного от 10 до 15 мА и для постоянного тока от 50 до 60 мА. Следует особо подчеркнуть, что при таких величинах тока человек уже не может целенаправленно управлять собственной мышечной системой и самостоятельно отключиться от электрической цепи.

Фибрилляционный ток вызывает при прохождении его через организм фибрилляцию сердца – хаотические сокращения волокон сердечной мышцы (фибрилл), при которых нарушается нормальный режим кровообращения. Пороговое значение фибрилляционного тока составляет 100 мА для переменного и 300 мА для постоянного тока при длительности действия в интервале от 1 до 2 с по характерным схемам включения человека в электрическую цепь «рука – рука» или «рука – ноги».

Пример расчета: Определить ток, проходящий через человека $I_{\text{ч}}$, мА, при его однофазном включении в трехфазные сети напряжением $U_{\text{ф}} = 220$ В с изолированной и глухозаземленной нейтралью при сопротивлении тела $R_{\text{ч}} = 1000$ Ом, обуви $R_{\text{об}} = 0,14$ кОм, пола $R_{\text{п}} = 2,5$ кОм, изоляции проводов $R_{\text{из}} = 12$ кОм и нейтрали источника тока $R_0 = 10$ Ом.

1) Рассчитаем по формуле (5) ток, проходящий через человека $I_{\text{ч}}$, мА, при его однофазном включении в трехфазную сеть с изолированной нейтралью:

$$I_{\text{ч}} = \frac{220}{1000 + 140 + 2500 + \frac{12000}{3}} = 0,029 \text{ А} = 29 \text{ мА}.$$

Согласно таблице 3, ток величиной 29 мА относится к неотпускающему току, способному вызвать паралич рук, сильные боли в мышцах, затрудненное дыхание.

2) По формуле (6) вычислим ток, проходящий через человека $I_{\text{ч}}$, мА, при его однофазном включении в трехфазную сеть с глухозаземленной нейтралью:

$$I_{\text{ч}} = \frac{220}{1000 + 140 + 2500 + 10} = 0,060 \text{ А} = 60 \text{ мА}.$$

Согласно таблице 3, ток величиной 60 мА относится к фибрилляционному (смертельному) току, способному вызвать паралич дыхания.

Задание 3. Расчет напряжения шага

Цель работы – изучить явление растекания тока в земле и выполнить расчет напряжения шага в зависимости от расстояния до заземлителя и его формы.

Рабочее задание: При пробое изоляции токоведущих элементов электроустановки произошло замыкание ее частей на землю (рисунок 5). В результате стекания тока величиной I_3 , А, в объеме земли вокруг заземлителя возник потенциал грунта, отличный от нуля. Заземленные части электроустановки располагаются на поверхности земли либо на глубине t_0 , м, и имеют различную форму, характеризующуюся диаметром d , м, длиной L , м, и шириной b , м. Определить разность между потенциалами ног $U_{\text{ш}}$, В, при длине шага a , м, в случае нахождении человека на расстоянии x , м, равном 0, 1, 2, 5, 10 и 20 м до заземлителя, и построить график зависимости $U_{\text{ш}} = f(x)$. Значения параметров выбрать из таблицы 4 согласно варианту, определяемому по третьей с конца цифре зачетной книжки.

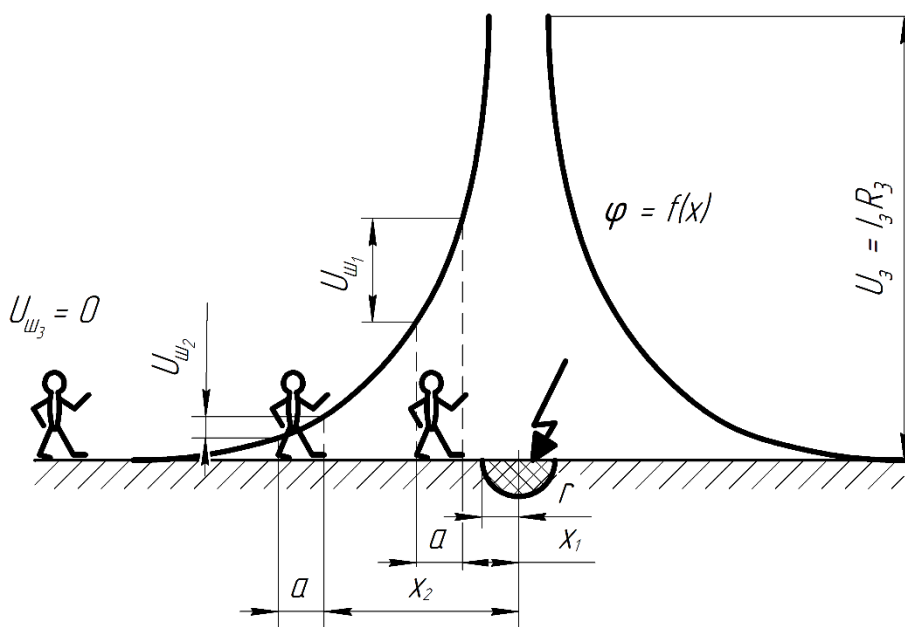


Рисунок 5 – Схема распределения потенциала на поверхности земли вокруг заземлителя

Исходные данные к заданию 3

№ варианта	$I_3, \text{ А}$	Тип заземлителя*	Грунт	$L, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$t_0, \text{ м}$	$a, \text{ м}$
1	3	ШЗ	Песок	-	0,4	-	0,6	0,6
2	4	ПШП	Гравий	-	0,3	-	-	0,7
3	5	СП	Супесь	3	0,02	-	-	0,8
4	6	УП	Суглинок	4	-	0,004	-	0,9
5	7	СЗ	Глина	5	0,03	-	0,7	1,0
6	8	УЗ	Садовая земля	6	-	0,006	0,8	0,6
7	9	ПСП	Чернозем	7	0,04	-	-	0,7
8	10	ППП	Торф	8	-	0,008	-	0,8
9	2	ПСЗ	Песок	9	0,08	-	0,75	0,9
0	1	ППЗ	Гравий	9	-	0,01	0,65	1,0

* Условные обозначения: ШЗ – шаровой в земле; ПШП – полушаровой у поверхности земли; СП – стержневой круглого сечения у поверхности земли; УП – уголкового у поверхности земли; СЗ – стержневой круглого сечения в земле; УЗ – уголкового в земле; ПСП – протяженный на поверхности земли (стержень); ППП – протяженный на поверхности земли (полоса); ПСЗ – протяженный в земле (стержень); ППЗ – протяженный в земле (полоса)

Порядок расчета: В случае, если человек находится на расстоянии x , м, от заземлителя, а длина шага равна a , м, напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, определяется как разность потенциалов между правой и левой ногами, находящимися в точках с координатами x и $x + a$:

$$U_{\text{ш}} = \varphi_x - \varphi_{x+a}, \quad (7)$$

где φ_x – потенциал в точке, находящейся на расстоянии x от точки замыкания на земле, В, определяется по формулам из таблицы 5 в зависимости от формы заземлителя и схемы его расположения в грунте; φ_{x+a} – потенциал в точке, находящейся на расстоянии x от точки замыкания на земле, с учетом длины шага a , В.

При $x = 0$ на человека действует потенциал заземлителя φ_3 , В:

$$\varphi_3 = I_3 R, \quad (8)$$

где I_3 – ток, стекающий на землю, А; R – сопротивление заземлителя растеканию тока, Ом (таблица 5).

При $x \rightarrow \infty$ (практически при $x > 20$ м) – $U_{\text{ш}} = 0$.

Если ступни ног человека находятся рядом друг с другом ($a = 0$), $\varphi_x = \varphi_{x+a}$, отсюда $U_{\text{ш}} = 0$.

Таблица 5

Расчетные формулы и схемы расположения заземлителя в грунте

№ п/п	Тип заземлителя и расчетная формула*	Схема расположения заземлителя в грунте
1	Шаровой в земле $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi \sqrt{x^2 + \left(t_0 + \frac{d}{2}\right)^2}};$ $R = \frac{\rho}{2\pi d} \left(1 + \frac{d}{4t_0 + 2d}\right)$	
2	Полушаровой у поверхности земли $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi x};$ $R = \frac{\rho}{\pi d}$	
3	Стержневой круглого сечения у поверхности земли $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + L^2} + L}{\frac{x}{4L}};$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$	
4	Угловой у поверхности земли $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + L^2} + L}{\frac{x}{4L}};$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{0,95b}$	
5	Стержневой круглого сечения в земле $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{\sqrt{4x^2 + L^2} + L}{2x} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + 3L}{4t_0 + L} \right);$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + 3L}{5t_0 + 1,5L} \right)$	
6	Угловой в земле $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{\sqrt{4x^2 + L^2} + L}{2x} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + 3L}{4t_0 + L} \right);$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{0,95b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + 3L}{5t_0 + 1,5L} \right)$	

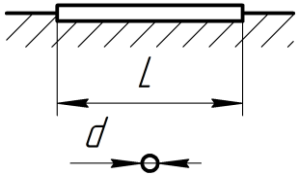
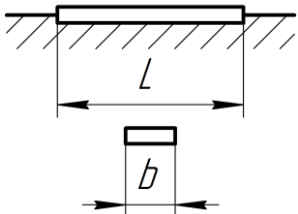
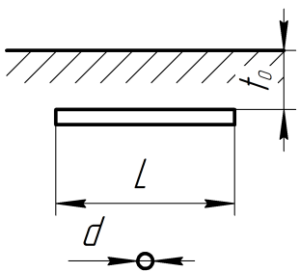
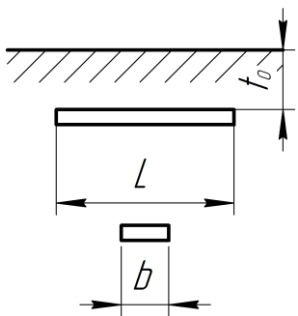
7	Протяженный на поверхности земли (стержень) $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \ln \frac{2x + 2L}{2x};$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L^2}{d^2}$	
8	Протяженный на поверхности земли (полоса) $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \ln \frac{2x + 2L}{2x};$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L^2}{(0,95b)^2}$	
9	Протяженный в земле (стержень) $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{\sqrt{4x^2 + L^2} + L}{2x} + \ln \frac{\sqrt{16t_0^2 + L^2} + L}{4t_0} \right);$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{dt_0}$	
10	Протяженный в земле (полоса) $\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{\sqrt{4x^2 + L^2} + L}{2x} + \ln \frac{\sqrt{16t_0^2 + L^2} + L}{4t_0} \right);$ $R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{0,95bt_0}$	
* Условные обозначения: ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м (таблица 6); t_0 – глубина заложения заземлителя, м; d – диаметр заземлителя, м; L – длина заземлителя, м; b – ширина заземлителя, м		

Таблица 6

Значения удельных сопротивлений различных грунтов

Грунт	Удельное сопротивление ρ , Ом·м
Песок	500
Гравий	300
Супесь	300
Суглинок	100
Глина	70
Садовая земля	50
Чернозем	30
Торф	20

Пример расчета: Определить напряжение шага человека в зоне растекания электрического тока величиной $I_3 = 8$ А, образуемой вблизи протяженного в земле элемента электроустановки диаметром $d = 0,35$ м и длиной $L = 4,5$ м,

размещенного на глубине $t_0 = 0,7$ м. Тип грунта – гравий. Длину шага принять равной $a = 0,8$ м, расстояние x , м, от человека до заземлителя – 0, 1, 2, 5, 10 и 20 м. По результатам расчетов построить график зависимости $U_{\text{ш}} = f(x)$.

1) Рассчитаем в соответствии с формулами из таблицы 5 сопротивление заземлителя растеканию тока R , Ом, и потенциал φ_{x+a} , В, в точке, находящейся на расстоянии $x = 0 + 0,8$ м от точки замыкания на земле:

$$R = \frac{300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \ln \frac{4,5^2}{0,35 \cdot 0,7} = 46,86 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{x+a} = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot (0 + 0,8)^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot (0 + 0,8)} + \right. \\ \left. + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 255,41 \text{ В}.$$

2) По формуле (8) вычислим потенциал заземлителя φ_3 , В:

$$\varphi_3 = 8 \cdot 46,86 = 374,88 \text{ В}.$$

3) Напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, согласно формуле (7), на расстоянии $x_1 = 0$ м составит:

$$U_{\text{ш}} = 374,88 - 255,41 = 119,47 \text{ В}.$$

4) Аналогично, используя формулу из таблицы 5, определим φ_x , В, при $x = 1$ м и φ_{x+a} , В, при $x = 1 + 0,8$ м:

$$\varphi_x = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot 1^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot 1} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = \\ = 237,82 \text{ В};$$

$$\varphi_{x+a} = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot (1 + 0,8)^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot (1 + 0,8)} + \right. \\ \left. + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 195,13 \text{ В}.$$

5) Напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, на расстоянии $x_2 = 1$ м составит:

$$U_{\text{ш}} = 237,82 - 195,13 = 42,69 \text{ В}.$$

6) Определим φ_x , В, при $x = 2$ м и φ_{x+a} , В, при $x = 2 + 0,8$ м:

$$\varphi_x = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot 2^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot 2} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = \\ = 188,29 \text{ В};$$

$$\varphi_{x+a} = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot (2 + 0,8)^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot (2 + 0,8)} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 168,62 \text{ В.}$$

7) Напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, на расстоянии $x_3 = 2$ м составит:

$$U_{\text{ш}} = 188,29 - 168,62 = 19,67 \text{ В.}$$

8) Определим φ_x , В, при $x = 5$ м и φ_{x+a} , В, при $x = 5 + 0,8$ м:

$$\varphi_x = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot 5^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot 5} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 143,20 \text{ В;}$$

$$\varphi_{x+a} = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot (5 + 0,8)^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot (5 + 0,8)} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 138,33 \text{ В.}$$

9) Напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, на расстоянии $x_4 = 5$ м составит:

$$U_{\text{ш}} = 143,20 - 138,33 = 4,87 \text{ В.}$$

10) Определим φ_x , В, при $x = 10$ м и φ_{x+a} , В, при $x = 10 + 0,8$ м:

$$\varphi_x = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot 10^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot 10} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 125,11 \text{ В;}$$

$$\varphi_{x+a} = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot (10 + 0,8)^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot (10 + 0,8)} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 123,73 \text{ В.}$$

11) Напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, на расстоянии $x_5 = 10$ м составит:

$$U_{\text{ш}} = 125,11 - 123,73 = 1,38 \text{ В.}$$

12) Определим φ_x , В, при $x = 20$ м и φ_{x+a} , В, при $x = 20 + 0,8$ м:

$$\varphi_x = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot 20^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot 20} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 115,70 \text{ В;}$$

$$\varphi_{x+a} = \frac{8 \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5} \left(\ln \frac{\sqrt{4 \cdot (20 + 0,8)^2 + 4,5^2} + 4,5}{2 \cdot (20 + 0,8)} + \ln \frac{\sqrt{16 \cdot 0,7^2 + 4,5^2} + 4,5}{4 \cdot 0,7} \right) = 115,33 \text{ В.}$$

- 13) Напряжение шага $U_{\text{ш}}$, В, на расстоянии $x_6 = 20$ м составит:

$$U_{\text{ш}} = 115,70 - 115,33 = 0,37 \text{ В.}$$

- 14) Строим график зависимости $U_{\text{ш}} = f(x)$ (рисунок 6).

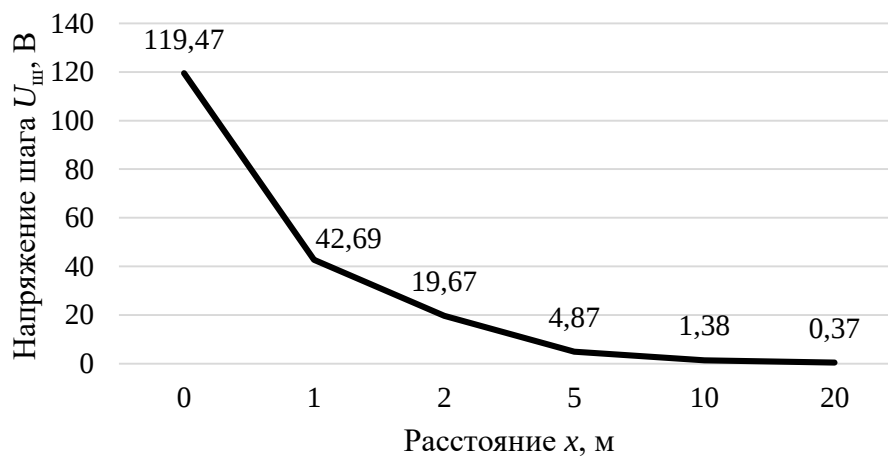


Рисунок 6 – График зависимости $U_{\text{ш}} = f(x)$

Допустимое напряжение шага ($U_{\text{ш}} = 40$ В) будет наблюдаться на расстоянии 2 м от заземлителя.