

УДК 621.316

Ю.В. Товстик

Государственный Макеевский научно-исследовательский институт
по безопасности работ в горной промышленности, г. Макеевка
E-mail: maknii@tr.dn.ua

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОКО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Аннотация

Товстик Ю.В. Моделирование сопротивления тела человека при определении токо-временных параметров устройств защитного отключения. Выполнен анализ факторов, влияющих на характер изменения сопротивления тела человека как элемента электрической цепи. Предложены схемы замещения электрической сети в случае прикосновения человека к одной из фаз. Обоснована возможность моделирования сопротивления тела человека резистором сопротивления 850 Ом при продолжительности воздействия тока не более 0,5 с.

Ключевые слова: сопротивление тела человека, напряжение прикосновения, схема замещения сети, устройство защитного отключения.

Общая постановка проблемы.

При случайном прикосновении человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, возникают условия, при которых его организм становится элементом электрической цепи с определенным сопротивлением электрическому току.

Электрическое сопротивление цепи тока, протекающего через тело человека, является важнейшим параметром, позволяющим в практических целях определить величины напряжения прикосновения и поражающего тока в конкретных условиях возникающей электротравмы.

Многочисленными исследованиями различных авторов установлено, что сопротивление тела человека определяется проводимостью живого организма и обусловлено сложными биофизическими и биохимическими процессами, присущими лишь живому организму. Сопротивление тела человека зависит от ряда факторов и величина его имеет недетерминированный характер. Вместе с тем для разработки устройств защитного отключения и испытаний их в условиях конкретных параметров шахтных электрических сетей представляется актуальным знание и умение применять в инженерных расчетах с приемлемой погрешностью минимально возможные значения сопротивления тела человека.

Постановка задач исследования.

В настоящее время отсутствуют конкретные рекомендации об использовании величины сопротивления тела человека при определении параметров устройств защиты. Поэтому большинство исследований проводилось авторами путем моделирования минимального расчетного сопротивления тела человека активным резистором, равным 1000 Ом, без учета изменения его под воздействием таких факторов как фактическая величина напряжения прикосновения исходя из параметров электрической сети (активного сопротивления и емкости изоляции), тока и продолжительности воздействия его исходя из времени срабатывания защиты и времени воздействия на человека обратных э.д.с. отключенных электродвигателей.

ГОСТ 12.1.038-82 [1] регламентирует при определении предельно допустимых значений напряжения прикосновения и токов, протекающих через тело человека, при аварийном режиме электроустановок напряжением как до 1000 В, так и свыше 1000 В в сетях с изолированной нейтралью, сопротивление тела человека моделировать резистором сопротивлени-

ем 850 Ом при продолжительности воздействия до 0,5 с, свыше 0,5 с – резистором, имеющим сопротивление в зависимости от напряжения прикосновения согласно рисунку 1. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения переменного тока частотой 50 Гц в зависимости от продолжительности воздействия согласно требований ГОСТ 12.1.038 приведены в таблице 1.

При проверке токо-временных параметров аппаратов защиты от токов утечки на землю а шахтных электрических сетях пользуются ГОСТ 22929 [2], в котором при определении необходимого быстродействия защиты сопротивление однофазной утечки принимается равным 1000 Ом независимо от напряжения сети. Зависимости минимального сопротивления человека от линейного напряжения шахтной электрической сети по данным автора [3] приведены в таблице 2.

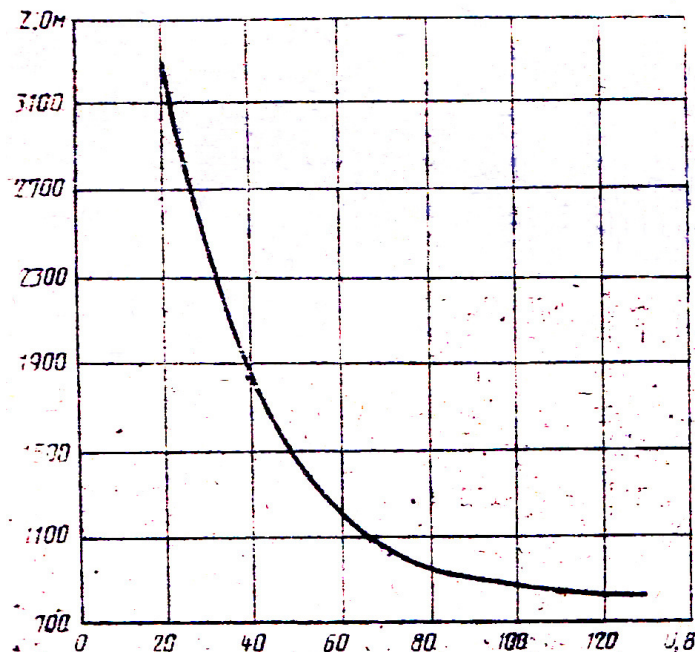


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления тела человека от напряжения прикосновения.

Таб-

лица 1

Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более при продолжительности воздействия тока t, с											
	0,01 - 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	> 1,0
U, В	530	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
I, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6

Таблица 2

Емкость сети мкФ/фазу	Минимальное сопротивление тела человека (Ом) при напряжении сети, В				
	127	220	380	660	1140
1,0	2160	1500	1100	760	560
0,2	2500	2130	1770	1450	1120

Задачей исследования является обоснование практических рекомендаций по использованию полученных зависимостей при моделировании сопротивления тела человека в процессе исследования параметров электробезопасности рудничных участков электротехнических комплексов.

Решение задач и результаты исследований.

Для решения рассматриваемой проблемы необходимо исходить из предложенной схемы замещения трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью трансформатора, к одной из фаз которой, например фазе А, прикоснулся человек. В данном случае имеет место путь тока «правая рука – ноги», который признан многими исследователями как наиболее опасен и часто встречающимся в практике.

В предложенной схеме замещения приняты следующие допущения:

- трехфазная сеть симметричная, т.е. напряжения всех фаз равны;
- емкости C_A, C_B, C_C и активные сопротивления R_A, R_B, R_C фаз относительно земли сосредоточенные и равны между собой, т.е. $C_A = C_B = C_C = C$ и $R_A = R_B = R_C = R$.

Расчетная и эквивалентная схемы сети для рассматриваемого режима прикосновения человека к фазе А приведены на рисунке 2.

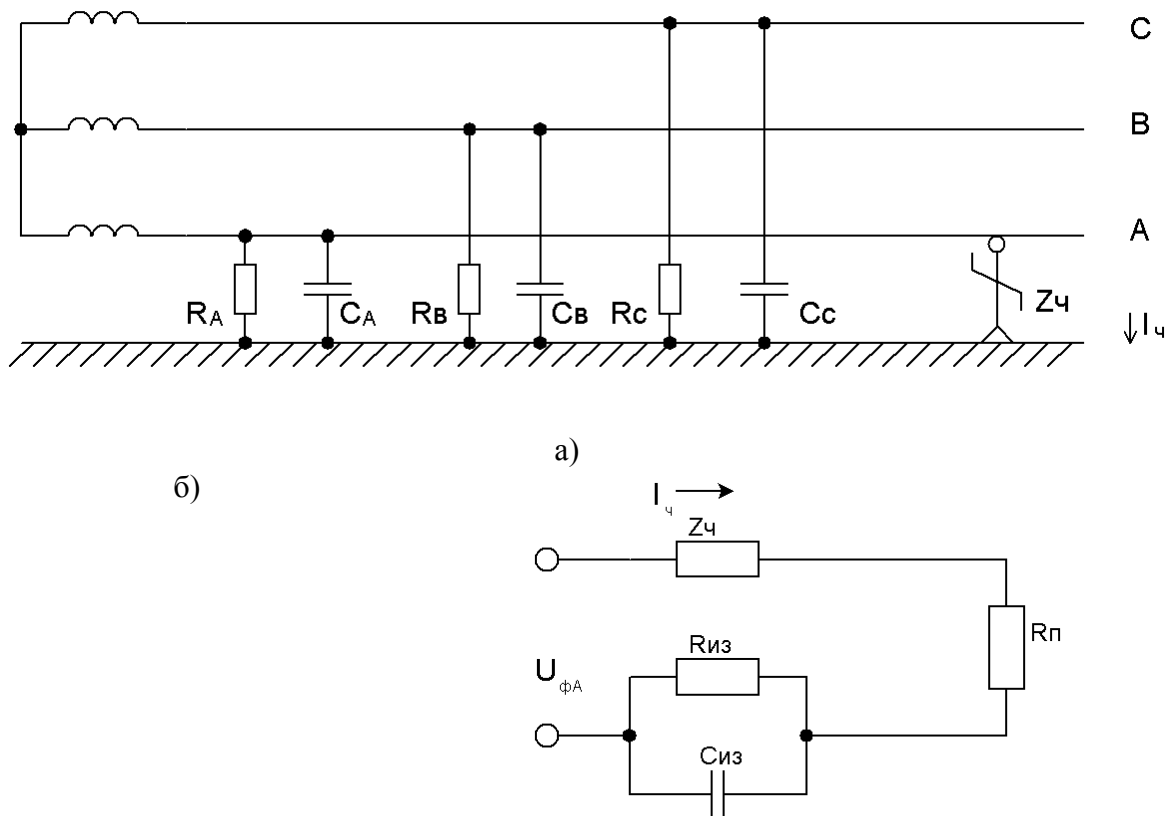


Рисунок 2 – Расчетная (а) и эквивалентная (б) схемы замещения трехфазной сети при прикосновении человека к фазе А.

На рис. 2б, исходя из принятых допущений, показаны $Z_ч$ – полное сопротивление человека; $R_п$ – переходное сопротивление обуви, одежды, грунта; $R_{из}$ - суммарное активное сопротивление и емкость $C_{из}$ изоляции фаз относительно земли, равные соответственно $R_{из} = \frac{R}{3}$ и $C_{из} = 3C$.

Таким образом, ток через человека $I_ч$ будет определяться фазным напряжением сети и сопротивлением электрической цепи, состоящим из полного сопротивления тела человека, переходного сопротивления и полного сопротивления изоляции фаз относительно земли.

Согласно рекомендаций Международной электротехнической комиссии (МЭК) для любого пути переменного тока частотой 50Гц, протекающего через тело человека, будь то «рука - рука» или «рука - ноги» полное сопротивление тела человека в комплектной форме равно сумме двух одинаковых сопротивлений наружного слоя кожи, т.е. эпидермиса Z_H , и одного сопротивления внутренних тканей тела R_B , которое принято считать чисто активным [4].

Данная схема замещения полного сопротивления тела человека принята и многими отечественными специалистами в области электробезопасности. Поэтому окончательная эквивалентная схема замещения трехфазной сети при однополюсном прикосновении человека приведена на рис. 3. Уравнение тока через человека в комплексной форме имеет следующий вид:

$$\dot{I}_ч = \dot{U} / (Z_ч + Z_{из} + R_{п.}) \tag{1}$$

Сопротивление тела человека $Z_ч$ может быть представлено выражением в комплексной форме:

$$Z_ч = 2Z_H + R_B = 2 / (1 / R_H + i\omega C_H) + R_B$$

или после соответствующих преобразований в действительной форме:

$$z_ч = \sqrt{(2R_H + R_B)^2 + \left(\frac{1}{0,5\omega C_H}\right)^2} \tag{2}$$

На основании данных литературных источников установлено, что емкость эпидермиса колеблется в пределах от десятков до сотен пФ. Поэтому для упрощения дальнейших расчетов, как рекомендуют многие авторы, можно принять ее равной нулю. Тогда модуль полного сопротивления тела человека может быть представлен выражением:

$$z_ч = 2R_H + R_B = R_ч \tag{3}$$

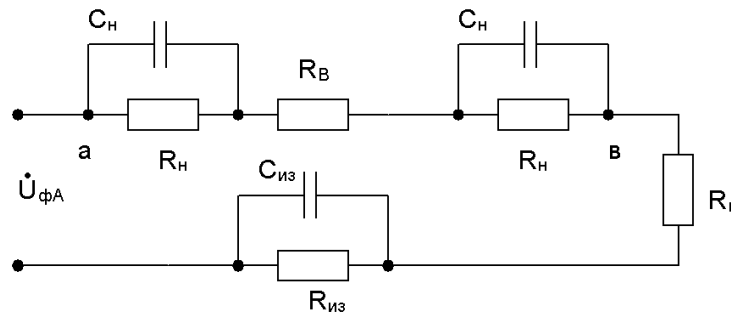


Рисунок 3 – Окончательная эквивалентная схема замещения трехфазной сети при однополюсном прикосновении человека.

Модуль полного сопротивления изоляции фаз сети относительно земли определяется выражением:

$$z_{из} = \sqrt{R_{из}^2 + X_{из}^2} = \sqrt{R_{из}^2 + \left(\frac{1}{\omega C_{из}}\right)^2} \tag{4}$$

С учетом принятых допущений выражение (4) имеет следующий вид:

$$z_{из} = \sqrt{\left(\frac{R}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3\omega C}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 \omega^2 C^2 + 1}{9\omega^2 C^2}} \tag{5}$$

Тогда модуль тока, протекающего через тело человека при случайном прикосновении его к фазе сети, определяется следующим выражением:

$$I_{\text{ч}} = 3U_{\phi} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 C^2 R^2}{[3(R_{\text{ч}} + R_{\text{н}}) + R]^2 + 9(R_{\text{ч}} + R_{\text{н}})^2 R^2 C^2}} \quad (6)$$

Напряжение прикосновения, т.е. падение напряжения между точками а и в (Рис.2) определяется выражением:

$$U_{\text{пр.}} = I_{\text{ч}} \cdot R_{\text{ч}} \quad (7)$$

Исходя из обширных материалов исследований воздействия электрического тока на тело человека установлено, что электрическое сопротивление зависит от места приложения электродов к телу человека, значений тока и приложенного напряжения, рода и частоты тока, площади электродов, длительности прохождения тока, температуры кожи, наличия в коже влаги и др. Сопротивление кожи у одного и того же человека на разных участках тела неодинаковое и определяется различной толщиной рогового слоя кожи, неравномерным распределением потовых желез на поверхности тела, неодинаковой степенью наполнения кровью сосудов кожи. Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук на участке выше ладоней, в особенности на стороне, обращенной к туловищу, подмышечных впадин, тыльной стороны кистей рук.

Повышение напряжения, приложенного к телу человека, приводит к увеличению напряженности электрического поля кожи.

Экспериментальными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что по мере увеличения напряжения, начиная от 20 до 50 В, сопротивление тела резко уменьшается примерно от 7-6кОм до 2,0 – 1,6 кОм, а при напряжении свыше 500 В остается практически неизменным и составляет 400-500 Ом [5]. При больших напряжениях сопротивление приближается к значению 300 Ом.

Применительно к рассматриваемой проблеме можно утверждать, что в зависимости от величины напряжения прикосновения (на рис. 2 обозначено точками а и в), его сопротивление изменяется от 7 кОм до 400 Ом. Причем минимальное значение сопротивления тела человека при напряжении прикосновения более 500 В уже равно активному сопротивлению внутренних тканей тела и не зависит от дальнейшего увеличения напряжения.

Кроме того, для анализа приняты во внимание самые неблагоприятные условия, что в шахте повышенная влажность атмосферы и обводненность горных выработок, не исключается контактирование человека в поврежденной резиновой обуви с металлическими заземленными конструкциями, в том числе рельсовыми путями. Поэтому переходное сопротивление $R_{\text{п}}$ в уравнении (1) было принято равным нулю. Выбор величины сопротивления резистора для моделирования сопротивления тела человека при испытаниях устройств защитного отключения шахтных электрических сетей конкретного класса напряжения должен осуществляться с учетом следующего. Известно, что в шахтах применяются электрические сети переменного тока напряжением 127, 220, 380, 660 и 1140 В.

Для данных напряжений сети исходя из требований ГОСТ 22929 критические сопротивления изоляции составляют соответственно 1,1; 3,3; 3,3; 10 и 20 кОм.

Если воспользоваться данными таблицы 2, ГОСТ 12.1.038 и ГОСТ 22929, то для моделирования сопротивления тела человека при испытаниях аппарата защиты от утечек тока в шахтных электрических сетях, например, напряжением 660 В может быть использован резистор сопротивлением соответственно 760, 850 или 1000 Ом.

Для определения токо-временных параметров аппарата защиты были проведены экспериментальные исследования на физической модели шахтной электрической сети. При этом активное сопротивление изоляции фаз относительно земли моделировалось резистором, величина которого изменялась от бесконечности до критического значения, равного 10 кОм. Емкость фаз относительно земли защищаемого участка сети также моделировалась сосредоточенным конденсатором, величина которого принималась равной 0: 0,5 и 1,0 мкФ на фазу.

Для защитного отключения сети использовался аппарат защиты от утечек тока на землю типа АЗУР1. Регистрация тока протекающего через тело человека (моделируемое резистором), и времени срабатывания аппарата защиты осуществлялась с помощью многоканального устройства РЕКОН. Причем были проведены два варианта опытов – при наличии и при отсутствии в сети устройства компенсации емкостной составляющей тока протекающего через тело человека. В результате экспериментов были получены зависимости тока протекающего через тело человека, времени срабатывания аппарата защиты от величины сопротивления тела человека. Для случая когда емкость фаз относительно земли максимально допустима и составляет 1,0 мкФ на фазу, а сопротивление изоляции равно бесконечности, данные замеров приведены в таблице 3.

Таблица 3

R _ч , Ом	при наличии компенсатора			без компенсатора		
	760	850	1000	760	850	1000
I _ч , mA	78	75	71	215	210	193
t _з , мс	68	68	70	86	86	89

Анализ данных таблицы 3 показывает, что если для моделирования сопротивления тела человека применять резистор, равный 850 Ом, как это регламентирует ГОСТ 12.1.038, тогда величина тока через человека больше на 5,3% значения тока при моделировании сопротивления тела человека резистором, равным 1000 Ом как это предписано ГОСТ 22929. В данном случае время срабатывания аппарата защиты при наличии компенсатора будет меньше на 2,8%.

Если для моделирования сопротивления тела человека применять резистор, равный 760 Ом, как это указано в таблице 2 для сети напряжением 660 В, тогда величина тока через человека будет больше на 3,8% значения тока при моделировании сопротивления тела человека резистором равным 850 Ом, а время срабатывания аппарата защиты будет меньше на 2,9%.

Аналогичным образом для случая отсутствия в сети компенсатора емкостной составляющей тока через тело человека было установлено, что при моделировании сопротивления тела человека резистором, равным 850 Ом, ток будет, соответственно, на 8,0% и 2,3% больше значения тока при моделировании сопротивления тела человека резисторами 1000 Ом и 760 Ом. При этом время срабатывания аппарата защиты будет, соответственно, меньше на 3,3% и 2,2%.

Следует принять во внимание тот факт, что если устройство компенсации неисправно или отключено, а его цепи не обладают самоконтролем, то произойдет увеличение как тока через тело человека, так и времени срабатывания аппарата защиты, соответственно, на 66% и 23%. Это противоречит требованиям ГОСТ 12.1.038 (см. таблицу 1) поскольку при значении тока 210 мА полное время защитного отключения должно быть не более 0,1 с.

Поэтому даже при времени срабатывания аппарата защиты, равном 0,088 с, следует учитывать время срабатывания коммутационного аппарата и время воздействия на человека э.д.с. отключенных, но вращающихся по инерции электродвигателей, которые в совокупности несомненно превысят значение 0,1 с.

Выводы.

Для моделирования сопротивления тела человека как это регламентирует ГОСТ 12.1.038 может быть использован резистор сопротивлением 850 Ом вместо 1000 Ом. При этом погрешности токо-временных параметров устройств защитного отключения типа АЗУР1 находятся в рамках допустимых $\pm 10\%$. Аналогичным образом должны быть проверены токо-временные параметры аппаратов защиты от утечек тока на землю, применяемых в шахтных электрических сетях различного класса напряжения.

Литература

1. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновений и токов: ГОСТ 12.1.038-82 [Срок введения с 1983 – 01.07]. – М.: Госстандарт СССР, 5 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
2. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929 [Срок введения с 1978 – 01.01] – М.: Госстандарт СССР, 17 с – (Государственный стандарт Союза ССР).
3. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок /Колосюк В.П./ - М.: Недра, 1980 – 334 с.
4. Технический отчет IEC479-1. Действие тока на людей и домашний скот. Часть 1: Общие аспекты. IEC479-1. Третье издание, 1994 – 09.
5. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках /Долин П.А./ - Учебное пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 448 с.

Abstract

Tovstyk Yu. V. Modeling of human body's resistance for determine parameters of current and time of devises for defense disconnection. *The factors of influence to the specific of change of body's resistance as element of electrical circuit are analyzed. Rated schemes of electrical grid for case of humans touch to one phase of electrical grid are proposed. The possibility of make a model of human body resistance by resistor of resistance 850 Ohm during of currents influence neither more then 0,5 c. is justified.*

Keywords: *resistance of human body, voltage of touch, rated scheme of electrical grid, devises for defense disconnection.*

Анотація

Товстик Ю.В. Моделювання опору тіла людини при визначенні струмо-часових параметрів пристроїв захисного відключення. *Виконан аналіз факторів, що впливають на характер зміни опору тіла людини як елемента електричного ланцюга. Запропоновані схеми заміщення електричної мережі для випадку торкання людиною однієї з фаз. Обґрунтована можливість моделювання опору тіла людини резистором опору 850 Ом при тривалості дії струму не більш, як 0,5 с.*

Ключові слова: *опір тіла людини, напруга доторкання, схема заміщення мережі, пристрій захисного відключення.*

Здано в редакцію:
04.03.2010 р.

Рекомендовано до друку:
к.т.н, доц. Маренич К.М.