

2. Уланов И.М., Медведко В.С., Сидоренко С.А. Разработка экономичных источников света с большим экономическим ресурсом работы на основе индукционных разрядов трансформаторного типа с целью создания эффективных систем наружного и внутреннего освещения // Я электрик. – 2007. – № 6.
3. Индукционная УФ-лампа / И.М. Уланов, М.В. Исупов, А.Ю. Литвинцев [и др.] // Светотехника. – 2007. – № 5. – С. 37–40.
4. Стахович Д., Швецов С. Индукционная лампа. Альтернатива ртутным, натриевым и металлогалогенным лампам // www.electronica.nsys.by.
5. elektrik.info>Статьи>Электротехнические новинки>. Индукционная лампа.
6. koshcheev.ru>2012/03/28/induction-lamp.
7. http://prosvet36.ru.
8. Рейтер Т. Лампы для экономного освещения // Промышленно-строительное обозрение. – 2012. – № 142.
9. http://www.topband-inductionlight.com/; http://www.yml.cc; http://www.lvd.cc; http://www.adxny.com.



УДК 621.31.784

Н.И. Черкасова, Г.А. Гончаренко, О.К. Никольский

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАВМООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ

В статье рассматривается математическая модель электротравмы, являющаяся результатом взаимодействия элементов системы «человек – электрическая сеть – внешняя среда». Рассмотрен принцип формирования травмоопасной ситуации (электropоражение человека с летальным исходом). Дана классификация основных техногенных опасностей, возникающих в электрической сети в штатном и аварийном режимах, приведены формулы для определения напряжения прикосновения и тока, протекающего через тело человека.

**Ключевые слова:** электротравма, расчетная схема замещения электрической сети, напряжение прикосновения, ток через человека.

N.I. Cherkasova, G.A. Goncharenko, O.K. Nikolskiy

### MATHEMATICAL MODEL OF TRAUMATIC SITUATIONS IN 0,4 kW ELECTRIC NETWORKS

The mathematical model of electrical injury that results from the interaction of the system elements "man – electrical network – environment" is considered in the article. The principle of the traumatic situation formation (man electric injury with the lethal outcome) is revealed. The classification of major anthropogenic hazards arising from the electrical network in normal and emergency modes is given, the formulas for determining the contact voltage and current flowing through the human body is revealed.

**Key words:** electrical injury, calculated scheme of electrical network replacement, contact voltage, current through the human body.

Травмоопасной условимся понимать такую ситуацию, возникающую при эксплуатации электроустановок, при которой человек попадает под напряжение, вследствие чего через тело начинает протекать ток опасной величины, вызывающей электropоражение.



Рис.1. Причинно-следственная модель электротравмы

Рассматривая во взаимосвязи систему «человек – электрическая сеть – внешняя среда» (рис. 1), следует отметить, что травмоопасная ситуация (ТС) возникает при нарушении этой взаимосвязи и является прямым ее следствием. Поэтому для устранения возникновения ТС необходимо выявить специфические иммонентные свойства компонентов систем, формирующие опасную техногенную ситуацию и влияющие на исход электропоражения.

Компонента «человек» представляет биологическую составляющую, трудно поддающуюся формализованному описанию. В настоящее время в свете современных представлений о физиологическом воздействии электрического тока на живой организм обоснованы электрические параметры тела и сформулированы первичные критерии электробезопасности [1]. Вместе с тем, на наш взгляд, спорным является ряд важных положений относительно определения величины сопротивления тела, неучете его нелинейности и переходного процесса в момент попадания человека под напряжение.

Компонента «электрическая сеть» включает воздушную линию и питающие ее электроприемники, находящиеся в сфере обслуживания персоналом. Отметим, что интенсивность взаимодействия человека с электроустановками в существенной мере зависит от числа последних (чем больше электроустановок, тем выше вероятность возникновения ТС при прочих равных условиях).

Компонента «внешняя среда» отражает условия эксплуатации электроустановок. Причем, если внешняя среда, служащая своеобразным фоном создания благоприятных или опасных условий тяжести электротравмы, то электросеть как компонент системы (рис. 1) сама является источником возникновения ТС.

Параметры компонентов системы имеют как детерминированную, так и вероятностную природу. Известны методы [2], позволяющие учитывать функциональные и статистические взаимосвязи между рассматриваемыми компонентами системы. Отметим, что параметры модели следует рассматривать в виде случайных чисел, а электропоражение как сложное вероятностное событие, на которое воздействует ряд случайных факторов [3].

Рассмотрим достаточно типичную ситуацию – поражение человека электрическим током с летальным исходом как системное случайное событие  $R$ , которое является результатом одновременного совпадения следующих элементарных случайных событий:

$A$  – пробой изоляции и появление опасного электрического потенциала на металлическом корпусе электрооборудования;

$B$  – прикосновение человека к корпусу электрооборудования;

$C$  – нахождение человека в зоне токопроводящей среды (земли);

$D$  – электрическая защита неисправна или отсутствует (например, УЗО);

$E$  – ток, протекающий через человека, превышает порогового значения «неотпускающего» тока.

Тогда вероятность электропоражения человека с летальным исходом, согласно [3], можно представить как

$$P(R) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) \cdot P(E), \quad (1)$$

где  $P(A)$ ,  $P(B)$ ,  $P(C)$ ,  $P(D)$  и  $P(E)$  – вероятности соответственно событий  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$ . Методика расчета  $P(R)$  приведена в [4].

В соответствии с представленной схемой замещения (рис. 2) рассмотрим основные травмоопасные ситуации, возникающие в распределительных сетях 0,4 кВ. Выведем расчетные выражения для определения напряжения прикосновения ( $U_{np}$ ) и тока, протекающего через тело человека ( $I_h$ ).

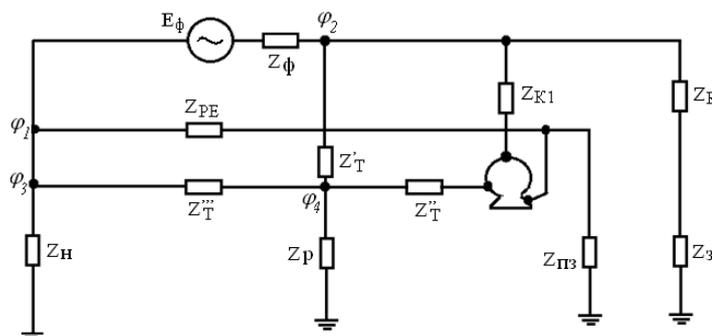


Рис. 2. Расчетная схема замещения электрической сети

Введем следующие условные обозначения к схеме (рис. 2):

$Z_\phi$  – сопротивление фазного провода;

$Z_H$  – сопротивление нейтрали трансформатора;

$Z_{PE}$  – сопротивление нулевого защитного проводника (PE) с учетом естественных защитных проводников на участках от нейтрали трансформатора до потребителя;

$Z_{ПЗ}$  – суммарное сопротивление повторного заземления;

$Z_p$  – сопротивление растеканию тока с ног человека;

$Z_3$  – сопротивление замыкания на землю;

$Z'_T, Z''_T, Z'''_T$  – сопротивления тела человека, учитываемые в соответствии с травмоопасной ситуацией;

$Z_{K1}, Z_{K2}$  – сопротивления, имитирующие однофазное КЗ;

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$  – потенциалы узлов в расчетной схеме.

Введем следующие допущения:

1) сопротивлением нулевого рабочего провода пренебрегаем;

2) сопротивление  $Z_T$  условимся считать равным 1000 Ом;

3) напряжение «до прикосновения»  $U_{д пр}$  равно напряжению «после прикосновения»  $U_{п пр}$ , так как их значения практически близки между собой.

Рассмотрим основные травмоопасные ситуации, связанные с попаданием человека под напряжение при эксплуатации электроустановки (табл.).

**Травмоопасные ситуации при эксплуатации электроустановки**

Номер травмоопасной ситуации	Описание травмоопасной ситуации	Расчетный параметр
1	Прикосновение к фазному проводу при нормальном режиме работы электрической сети	$Z'_T = 1000 \text{ Ом};$ $Z_{K1} = Z_{K2} = Z''_T = Z'''_T = \infty$
2	Прикосновение к фазному проводу и корпусу электрооборудования (нормальный режим)	$Z'_T = 1000 \text{ Ом};$ $Z''_T = 0;$ $Z_{K1} = Z_{K2} = Z'''_T = \infty$
3	Прикосновение к корпусу электрооборудования при однофазном коротком замыкании (ОКЗ)	$Z''_T = 1000 \text{ Ом};$ $(Z'_T = 1000 \text{ Ом});$ $Z_{K1} = 0;$ $Z_T = Z''_T = Z_{K2} = \infty$
4	Прикосновение к корпусу электрооборудования при ОКЗ на землю и обрыве системы зануления	$Z''_T = 1000 \text{ Ом};$ $Z_{K2} = 0;$ $Z'_T = Z'''_T = Z_{K1} = \infty$

Составим систему алгебраических уравнений с помощью метода узловых потенциалов, позволяющую определить напряжение прикосновения, ток, протекающий через человека ( $I_h$ ):

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{14} \\ \vdots & & \vdots \\ Y_{41} & \dots & Y_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  и  $\phi_4$  – комплексные электрические потенциалы узлов схемы;

$Y_{11}, Y_{22}, Y_{33}$  и  $Y_{44}$  – комплексные собственные проводимости ветвей соответствующих узлов схемы;

$I_1, I_2, I_3$  и  $I_4$  – комплексные узловые токи соответственно узлов 1, 2, 3 и 4.

$$Y_{11} = 1/Z_\phi + 1/Z_{PE} + 1/Z'''_T + 1/Z_H; \quad Y_{22} = 1/Z_\phi + 1/Z'_T + 1/Z_{K1} + \frac{1}{Z_{K2} + Z_3};$$

$$Y_{33} = 1/Z_{PE} + 1/Z_{ПЗ} + 1/Z_{K1} + 1/Z''_T; \quad Y_{44} = 1/Z'_T + 1/Z''_T + 1/Z'''_T + 1/Z_P;$$

$$Y_{12} = Y_{21} = 0; Y_{13} = Y_{31} = -1/Z_{PE}; Y_{23} = Y_{32} = -1/Z_{K1}; Y_{24} = Y_{42} = -1/Z_T';$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -1/Z_T''; I_3 = I_4 = 0; -I_1 = I_2 = \frac{\dot{E}_\phi}{Z_\phi}.$$

Напряжение прикосновения  $U_{np}$  определяется разностью потенциалов соответствующих узлов схемы. Тогда для травмоопасной ситуации 1:

$$U_{np1} = \frac{E_\phi Z_T}{Z_T + Z_P + \frac{Z_H Z_{n3}}{Z_H + Z_{n3}}}, \quad (3)$$

при условии, что  $Z \ll Z_T, Z_{PE} \ll Z_{n3}$ .

Учтем, что  $\frac{Z_H Z_{n3}}{Z_H + Z_{n3}} \leq 10 \text{ Ом}$  и составляет менее 5 % от слагаемого  $(Z_T + Z_P)$ . Тогда (3) приведет к упрощенному виду:

$$U_{np1} = \frac{E_\phi Z_T}{Z_T + Z_P}. \quad (4)$$

В соответствии с [5] можно определить напряжения для остальных травмоопасных ситуаций.

Величина тока  $I_n$ , протекающего через человека, может быть определена с помощью приближенного выражения, справедливого для первой и второй ТС.

$$I_n = \frac{U_\phi}{Z_T + Z_P + Z_H}. \quad (5)$$

Для третьей и четвертой ТС в выражении (5)  $U_\phi$  заменяется на  $U_{np}$ .

Как показывает анализ, одной из основных причин электротравматизма в СЭС является наличие напряжения на открытых проводящих частях (ОПЧ) электрооборудования. Электропоражения от прикосновения к этим частям составляют значительную долю всех несчастных случаев с летальным исходом. Поэтому при проектировании и испытании СЭС согласно [6] все ОПЧ электроприемников должны заземляться путем соединения с PEN-проводником в сетях TN-C (зануление) или с PE-проводником в сетях TN-S или TN-C-S.

Многолетний опыт использования PEN-, PE-проводников показал их достоинства, заключающиеся как в снижении напряжения на ОПЧ (а следовательно, и напряжения прикосновения) по сравнению с фазным напряжением, так и в создании условий для надежного срабатывания защиты от сверхтоков при возникновении замыкания на ОПЧ. Вместе с тем, как показали исследования [7], требование ПУЭ о необходимости применения систем TN-C-S и TN-S привело к появлению проблем, связанных с возникновением опасности пожаров из-за повреждения изоляции в электроприемниках с заземлением проводящими частями и т.д. Прикосновение человека к фазе и корпусу электрооборудования является наиболее опасным ТС, при которой заземление и зануление не обеспечивает электрическую защиту человека. Поэтому необходимо применять устройство защитного отключения (установка тока срабатывания 30 мА), которое обеспечивает безопасность при обрыве нулевого защитного проводника, когда на ОПЧ может появиться опасное для жизни человека напряжения. Однако протекающий ток через тело человека до 30 мА не вызывает фибрилляцию сердца, но его величина ( $I_n$ ) значительно превышает «неотпускающий» ток (более 6 мА). Поэтому не исключаются случаи электропоражений (в т.ч. смертельных), вызванных асфиксией органов дыхания. В этом случае следует рекомендовать использование УЗО с установкой тока срабатывания 6 мА в системе TN-S, TN-C-S – электроснабжения с отдельными нулевыми и защитными проводниками. Такая система электробезопасности обеспечивает максимальную электрозащитную эффективность, позволяющую снизить опасность электропоражения в десятки раз [4].

### Литература

1. Основы электромагнитной совместимости: учеб. для вузов / под ред. Р.Н. Карякина / Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2007.
2. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. – М.: Безопасность, 1996.

3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Фазматгиз, 1962.
4. *Еремينا Т.В.* Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2010.
5. *Альтшулер Э.Б.* Обеспечение допустимого напряжения прикосновения в электроустановках Крайнего Севера // Электрические станции. – 1981. – № 7.
6. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М., 2003.
7. *Слободкин А.Х.* О концепции электробезопасности в сетях 380/220 В с заземленной нейтралью и некоторые пути её реализации // Промышленная энергетика. – 1998. – № 4.

