

УДК 621.316.99 + 621.3.053.24

## О СООТНОШЕНИИ ВЕЛИЧИН СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ И ПОВТОРНЫХ ЗАЕМЛЕНИЙ

*А.И. Сидоров, Ш.С. Сайдалиев*

Высокий уровень электротравматизма в электрических сетях напряжением 380 В показывает, что зануления не всегда обеспечивает приемлемый уровень электробезопасности. В данной работе приведена оценка уровня электробезопасности в зависимости от соотношения сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений.

Ключевые слова: зануление, заземление нейтрали, повторное заземление.

В электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью (система  $TN-C$ [1]) широко применяемой защитной мерой является зануление, что регламентируется п. 1.7. ПУЭ [1].

Физическая сущность защиты занулением представлена на рис. 1.

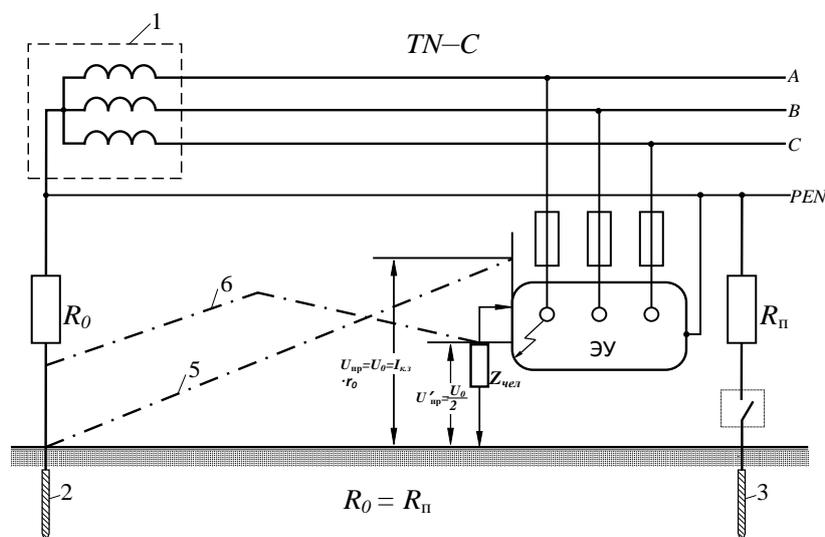


Рис. 1. Принципиальная схема защиты занулением:

1 – источник электроэнергии; 2 и 3 – заземлители; 4 – электроприемник; 5 – распределение напряжения прикосновения ( $U_{пр.}$ ) при отсутствии повторного заземлителя; 6 – то же самое при наличии повторного заземлителя;  $Z_{чел}$  – полное сопротивление тела человека;  $R_0$  – сопротивления заземления нейтрали источника питания;  $R_{п}$  – сопротивления повторного заземления;  $U_0$  – падение напряжения на  $PEN$ -проводе;  $U_{пр.}$  – падение напряжения на корпусе относительно земли, при отсутствии повторного заземлителя;  $U'_{пр.}$  – то же самое при наличии повторного заземлителя

Электробезопасность в системе зануления обеспечивается, прежде всего, временем отключения поврежденного участка сети аппаратами защиты.

Согласно новой редакции ПУЭ [1] главным критерием эффективности защиты в электрических сетях напряжением до 1000 В считается время ее срабатывания [2], которое не должна превышать значений 0,8 с., 0,4 с. и 0,2 с. при фазных напряжениях сети 127 В, 220В и 380 В соответственно. А в цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с [1].

Однако, при эксплуатации электрических сетей возникают режимы, когда, столь существенная простота и достаточно высокая надежность зануления не обеспечивают приемлемый уровень электробезопасности. Это могут быть отказы аппаратов защиты, обрывы PEN-провода, замыкания фазы на землю (ОЗЗ) и т.д.

Неспособность быстрого отключения поврежденного участка сети при однофазном коротком замыкании на сегодня считается основным недостатком системы зануления [3].

При замыкании любой из фаз на зануленную металлическую нетоковедущую часть и продолжительном ее существовании на PEN-проводе и подключенных к нему всех корпусах электрооборудований появляется напряжение относительно земли. Оно определяется падением напряжения на сопротивлении заземления нейтрали источника питания –  $R_0(U_0)$  и сопротивлениях повторных заземлений PEN-проводника –  $R_n(U_n)$  [4]:

– напряжение на аварийном корпусе относительно земли:

$$\underline{U}_h = \underline{U}_n = \frac{U_\phi R_n \underline{Z}_n}{(\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_n) (R_0 + R_n)}, \quad (1)$$

– напряжение нейтрали относительно земли:

$$\underline{U}_0 = \frac{U_\phi R_0 \underline{Z}_n}{(\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_n) \cdot (R_0 + R_n)}, \quad (2)$$

где  $\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_n$  – сопротивление цепи «фаза-нуль».

Комплексное выражение величин  $\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_n$  объясняется тем, что при больших значениях токов необходимо учитывать индуктивную составляющую сопротивления проводников.

Из выражений (1) и (2) следует, что  $U_n$  и  $U_0$  всегда меньше фазного напряжения источника питания сети и их значения определяются в значительной степени соотношениями  $\underline{Z}_\phi$  и  $\underline{Z}_n$ ,  $R_n$  и  $R_0$ .

Следует отметить, что параметры фазных и нулевых проводников  $\underline{Z}_\phi$  и  $\underline{Z}_n$ , а также сопротивление заземляющего устройства нейтрали источника питания  $R_0$  и повторных заземлений  $R_n$  нормируются [1], согласно, которой полная проводимость PEN-проводников во всех случаях должна быть не менее 50 % проводимости фазного провода. Сопротивление заземляющего устройства нейтрали источника питания, в любое время года не должно

превышать значения 2, 4 и 8 Ом соответственно при напряжениях сети  $U= 660/380, 380/220$  и  $220/127$  В. А общее сопротивление всех повторных заземлителей воздушной линий при тех же напряжениях сети должно быть не более 5, 10 и 20 Ом, соответственно.

Если для упрощения расчетов в (1) пренебречь индуктивными сопротивлениями петли фазного и нулевого проводников, а также считать, что последние обладают только активными сопротивлениями  $R_\phi$  и  $R_n$ , при этом допустить, что  $R_\phi = R_n$  и по PEN-проводнику протекает такой же ток  $I_{окз}$ , как и по фазному проводу, то (1) примет вид [5]:

$$U_{\Pi} = \frac{U_{\phi}}{R_{\Pi} + R_0} R_{\Pi} ,$$

или

$$U_{PEN} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{R_0}{R_{\Pi}}} . \quad (3)$$

Результаты расчета по (3) представлены на рис. 2.

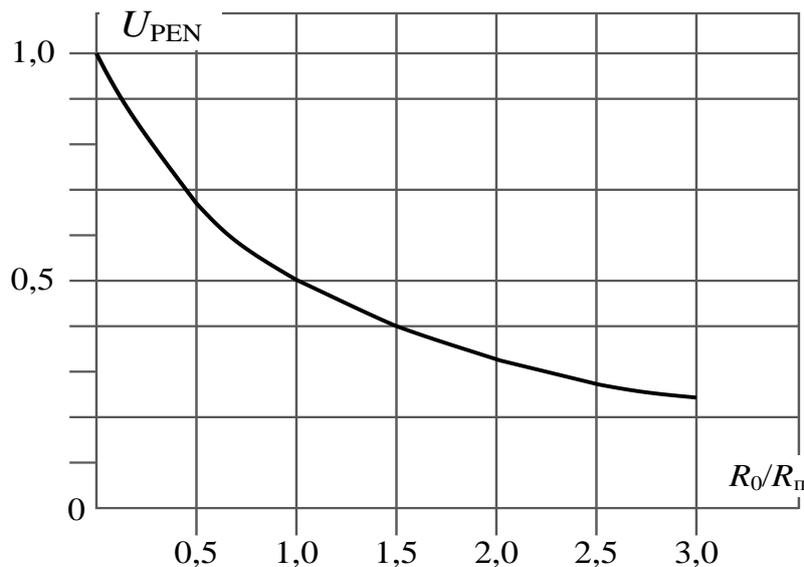


Рис. 2. Зависимость  $U_{PEN}$  (в долях от величины  $U_{\phi}$ ) от соотношения  $R_0$  и  $R_{\Pi}$  при однофазном замыкании на металлические нетоковедущие части

Из рис. 2 видно, что при однофазном замыкании на металлические нетоковедущие части и отказе аппарата защиты по тем или иным причинам, снижение значения  $R_0$  не улучшает условия электробезопасности, а наоборот, увеличивает  $U_{PEN}$  относительно земли, которое при  $R_0 = 0$  становится равным по величине фазному напряжению сети.

Такое положение ставит под сомнение оптимальность значений  $R_0$ , регламентированных в ПУЭ [1].

Тем не менее, при нормируемых в [1] значениях  $R_0$  и  $R_{\Pi}$ , величина  $U_{PEN}$  относительно земли остается неизменной при всех напряжениях сети – 660/380, 380/220 и 220/127 В и составляет  $0,714U_{\phi}$ . Следовательно, при замыкании фазы на корпус и отказе аппарата защиты, за местом замыкания,  $U_{PEN}$  относительно земли будет представлять угрозу для персонала, населения, а в сельской местности и для животных [5, 6].

Последнее позволяет утверждать, что при отказе аппарата защиты и замыкании фазы на корпус электроприемника, указанные в ПУЭ [1] значений  $R_0$  и  $R_{\Pi}$  не обеспечивают необходимый уровень электробезопасности.

При однофазном замыкании фазы на землю (ОЗЗ) значение напряжения  $PEN$ -провода относительно земли  $U_{PEN}$  определяется по формуле [7]:

$$U_{PEN} = I_{\text{з\textsubscript{м}}} R_0 = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{з\textsubscript{м}}} + R_0} R_0 ,$$

или

$$U_{PEN} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{R_{\text{з\textsubscript{м}}}}{R_0}} \tag{4}$$

где  $R_{\text{з\textsubscript{м}}}$  – сопротивление замыкания фазы на землю, Ом.

Результаты расчета по (4) представлены на рис. 3.

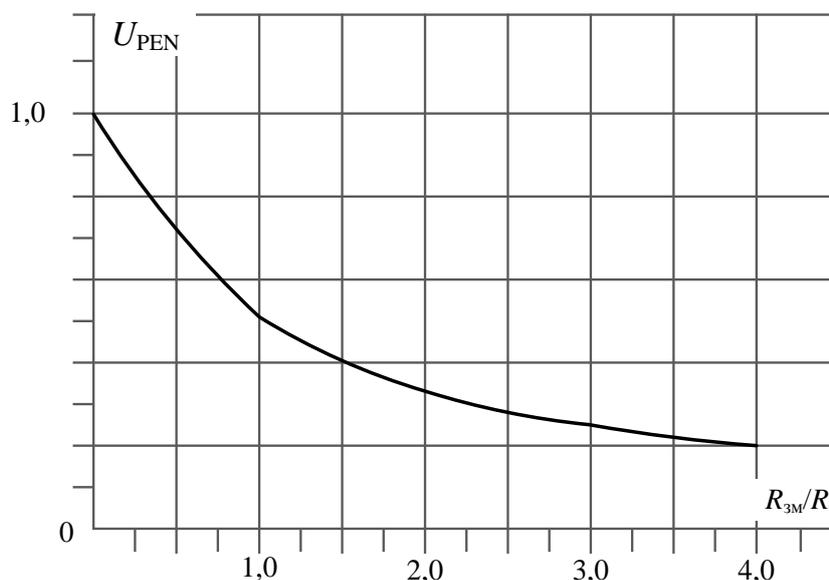


Рис. 3. Зависимость  $U_{PEN}$  при ОЗЗ от соотношения  $R_{\text{з\textsubscript{м}}}$  и  $R_0$  (в относительных единицах от  $U_{\phi}$ )

Из рис. 3 видно, что при ОЗЗ напряжение на  $PEN$ -проводе  $U_{PEN}$  и подключенных к нему металлических нетоковедущих частей в значительной степени зависит от сопротивления замыкания на землю  $R_{\text{з\textsubscript{м}}}$ , которое, является, прежде всего, функцией удельного сопротивления грунта в месте замыкания [8].

Установлено, что сопротивление замыкания фазного провода при контакте с землей составляет сотни и даже тысячи Ом, даже при сырой земле (провод погружен в грязь) – 15–20 Ом. Например, Н.П. Сейма, измеряя сопротивление заземления голого медного провода лежавшего на мягкой земле, установил, что оно находится в пределах 120–200 Ом. Когда этот же провод был вдавлен в землю, сопротивление заземления снизилось до 8–14 Ом [9].

Общеизвестно, что значительная часть ВЛ–0,38 кВ проходит по населенной местности и в результате обрыва фазный провод, помимо непосредственного падения на землю, может упасть на заборы, гаражи, деревья и другие не изолированные от земли объекты. При этом значения напряжения PEN-провода ( $U_{PEN}$ ) относительно земли и на всех присоединенных к нему металлических нетоковедущих частях в полной мере зависят от сопротивления самозаземления перечисленных объектов. Результаты исследования [10] представлены в табл.

Таблица

Результаты расчета сопротивлений самозаземления гаражей

Удельное электрическое сопротивление грунта	$\rho$ , Ом·м	20	40	100	300	700
Цельнометаллический гараж	$R_{сз}$ , Ом	1,47	2,94	7,36	22,06	51,48
Гараж из ж/б блоков с металлической крышей	$R_{сз}$ , Ом	2,4	4,7	11,8	35,4	82,5

В таком случае, если посмотреть оценку зануления по обеспечению условий электробезопасности при ОЗЗ, например, для  $U_{\phi} = 220$  В и расчетного значения удельного сопротивления грунта  $\rho = 100$  Ом·м, согласно выражению (4) и рисунку 3 получим: при замыкании фазы на крышу цельнометаллического гаража значение  $U_{PEN}$  составляет  $0,35U_{\phi}$ , а при замыкании фазы на крышу гаража из железобетонных блоков с металлической крышей –  $0,25U_{\phi}$ . Ток, проходящий при этом через тело человека, равен  $I_h = 64$  мА и  $I_h = 37$  мА соответственно, что существенно превышает значения порогового неотпускающего тока [4]. Следовательно, такие значения  $U_{PEN}$  и  $I_h$  не соответствуют требованиям [11].

Таким образом, установленные правилами устройств электроустановок 7-го издания [1] параметры заземления нейтрали и повторных заземлений не обеспечивают, в ряде случаев, приемлемый уровень электробезопасности.

#### Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
2. Валеев, Р.Г. Концепция построения защиты электрических сетей напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий / Р.Г. Валеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 30–33.

3. Щуцкий, В.И. Безопасность при эксплуатации электротехнических систем: учеб. Пособие / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 282 с.

4. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: Учебное пособие / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 344 с.

5. Савицкий, Л.В. Обоснование функций системы контроля состояния зануления / Л.В. Савицкий, К.С. Фетько, Ш.С. Сайдалиев, А.И. Сидоров // Электробезопасность. – 2012. – № 4. – С. 18–21.

6. Якобс, А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве / А.И. Якобс, А.В. Луковников. – М.: Колос, 1981. – 239 с.

7. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учебное пособие для вузов / П.А. Долин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

8. Ревякин, А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках / А.И. Ревякин, Б.И. Кашолкин. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.

9. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.

10. Сидоров, А.И. Замыкание фазного провода четырехпроводной сети 0,4 кВ на металлические корпуса или крыши гаражей / А.И. Сидоров, Ш.С. Сайдалиев // Электробезопасность. – 2014. – № 2. – С. 10–16.

11. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изм. № 1). – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.