

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Оценка влияния переходного сопротивления цепи “фаза – нуль” вводно-распределительного устройства электроустановки и ее системы заземления на безопасность обслуживания электрооборудования

Савицкий Л. В., канд. техн. наук

Забайкальский государственный университет, Чита

Приведены результаты исследования влияния параметров цепи “фаза – нуль” (в частности, переходного сопротивления контактных соединений нулевых проводников в силовых шкафах), а также сопротивления повторных заземлителей силовых шкафов на значение тока, протекающего через тело человека, и напряжение прикосновения на корпусах электрооборудования при однофазных КЗ.

Ключевые слова: электробезопасность, переходное сопротивление, электроустановка, система заземления, PEN-проводник, напряжение прикосновения, автоматический выключатель, плавкий предохранитель, однофазное КЗ, повторный заземлитель.

При эксплуатации сетей до 1000 В с глухозаземленной нейтралью в качестве исходного условия для обеспечения электробезопасности принимают исправность цепи зануления. При этом контроль ее параметров проводится только при приемо-сдаточных и профилактических испытаниях (даже с учетом капитальных ремонтов электрооборудования).

Действующая до сих пор на промышленных предприятиях система заземления TN-C подразумевает использование совмещенного нулевого PEN-проводника как для обеспечения рабочего режима электроприемников, так и с целью электробезопасности. Большое количество контактных соединений нулевых проводников, как правило, характеризуются повышенными переходными сопротивлениями, обусловленными допускаемым использованием в качестве PE-шины стальных корпусов силовых распределительных шкафов и ослаблением контактов в местах присоединений.

Задача исследования — определение влияния параметров цепи “фаза – нуль” (в частности, переходного сопротивления контактных соединений нулевых проводников в силовых шкафах), а также сопротивления повторных заземлителей силовых шкафов на значение тока, протекающего через тело человека, и напряжение прикосновения на корпусах электрооборудования. Переходные сопротивления подвижных контактов коммутационных аппаратов (автоматических выключателей, ру-

бильников и т. п.), входящих в контур однофазных КЗ, в данном исследовании не учитываются для упрощения модели, хотя их влияние на параметры цепи “фаза – нуль” очевидно и требует проведения дополнительного анализа.

Известны результаты исследования влияния значения сопротивления и количества повторных заземлителей на условия электробезопасности в электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью [1], где в качестве первичных критериев безопасности рассмотрены значения допустимого напряжения прикосновения и времени воздействия опасного тока на человека. Однако в данной статье параметры цепи “фаза – нуль” учитываются в совокупности результирующей величины — тока однофазного замыкания на зануленные корпуса электрооборудования.

За основу принята радиальная схема электропитания производственного цеха, фрагмент которой представлен на рис. 1. В качестве части нагрузки рассматриваются два асинхронных электродвигателя (M_1 и M_2) с номинальными мощностями 15 и 37 кВт. Питание электроприемников осуществляется от вводно-распределительного устройства ВРУ, которое подключено к трансформаторной подстанции ТН 10/0,4 кВ посредством кабельной линии. Система заземления в питающей и распределительной сетях — TN-C.

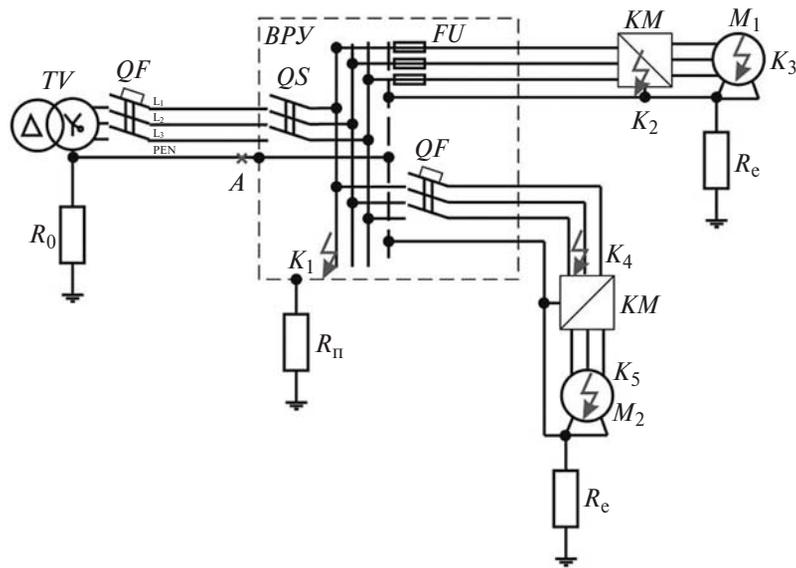


Рис. 1

На принципиальной схеме повторный заземлитель BPU учтен в виде активного сопротивления R_{Π} , а сопротивления естественного заземления (самозаземления) электроприемников представлены сопротивлением R_e . Сопротивление R_0 основного заземляющего контура цеховой трансформаторной подстанции согласно требованиям [2] принято равным 4 Ом. Так как абсолютное значение сопротивления повторного заземления не нормируется [2] (исходя из критериев электробезопасности [3] нормируется допустимое напряжение прикосновения), в данной модели диапазон его вероятных значений принят от 1 до 30 Ом.

Для моделирования опасного состояния сети зануления рассматривается нарушение целостности PEN-проводника в наиболее ответственном месте — контактом соединении нулевой жилы питающего кабеля с корпусом BPU (точка A на рис. 1). Контроль напряжения прикосновения предполагается осуществлять в точках $K_1 - K_5$ вероятных контактов человека с корпусами электрооборудования. Однако, учитывая близкое расположение корпусов магнитных пускателей и электродвигателей, можно допустить незначительное различие его значений в парах точек K_2, K_3 и K_4, K_5 . Таким образом, в модели рассматривались точки вероятных прикосновений K_1, K_3 и K_5 .

Параметры элементов модели соответствуют характеристикам реальной электроустановки, рассчитанным по паспортным и справочным данным следующего оборудования:

силовой трансформатор ТМ-400/10: $U_{B.H} = 10,5$ кВ; $U_{H.H} = 0,4$ кВ; $\Delta P_x = 0,93$ кВт; $\Delta P_k = 4,65$ кВт; $u_k = 4,5$ %; $I_x = 1,9$ %;

автоматический выключатель ВА51-35М3-34: $I_{НОМ} = 400$ А; уставки расцепителей: электромагнитного — $10I_{НОМ}$, теплового — $(1,05 - 1,30)I_{НОМ}$;

питающий кабель ААБ-4 × 185: $L = 100$ м; нагрузка M_1 (асинхронный двигатель серии 4А): $P_{НОМ} = 37$ кВт, $U_{НОМ} = 380$ В; $n = 1480$ об/мин; кабель присоединения АВВГ-4 × 35: $L = 10$ м; предохранитель ПН-2: $I_{НОМ} = 250$ А, $I_{ВСТ} = 200$ А, характеристика срабатывания — токовая, обратно зависимая от времени;

нагрузка M_2 (асинхронный двигатель серии 4А); $P_{НОМ} = 15$ кВт, $U_{НОМ} = 380$ В, $n = 1480$ об/мин; кабель присоединения АВВГ-4 × 10: $L = 6$ м; автоматический выключатель ВА47F29-3D40: $I_{НОМ} = 40$ А; уставки расцепителей: электромагнитного — $(10 - 14)I_{НОМ}$, теплового — характеристика типа D .

На основе приведенной схемы электропитания составлена математическая модель в матричной системе Matlab&Simulink версии R2009b.

При моделировании замыкания на корпус переходное сопротивление контакта соединения нулевой жилы питающего кабеля с корпусом BPU изменялось от 0,01 до 1 Ом. При этом фиксировались значения токов, протекающих через тело человека, прикоснувшегося к корпусу BPU (точка прикосновения K_1) и корпусам электродвигателей M_1 (точка K_3) и M_2 (точка K_5).

Указанные зависимости $I_{чел} = f(R_{пер})$ при различных значениях сопротивления повтор-

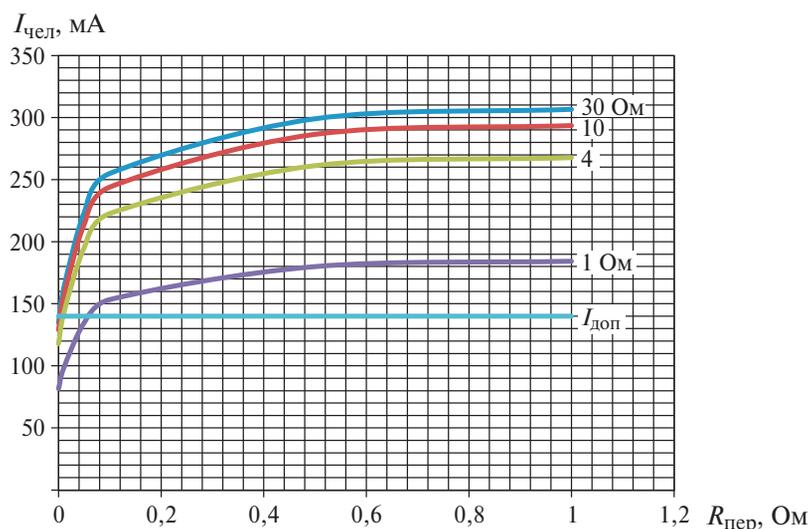


Рис. 2

ного заземлителя ВРУ показаны на рис. 2. Здесь же приведено значение допустимого тока ($I_{доп} = 140 \text{ мА}$), протекающего через тело человека, при продолжительности его воздействия не более 0,4 с [3, табл.2]. Сравнивая это значение с расчетными, можно сделать вывод о нарушении условия электробезопасности во всех точках вероятных прикосновений при переходном сопротивлении контакта PEN-проводника более 0,01 Ом.

Дополнительным фактором, влияющим на электробезопасность в конкретной ситуации, является условие работоспособности защитного аппарата в данной цепи, так как при замыканиях на зануленный корпус электроустановки в сети с глухозаземленной нейтралью основная мера защиты эксплуатационного персонала — быстрое отключение поврежденного участка сети за время не более 0,4 с [2, п. 1.7.57].

При указанных параметрах обобщенной электрической сети для защиты поврежденного электроприемника рассчитаны:

для точки K_1 — автоматический выключатель с уставкой расцепителя мгновенного действия 4000 А;

для точки K_3 — плавкий предохранитель с номинальным током плавкой вставки 200 А и обратно зависимой от времени характеристикой срабатывания (с целью выполнения требования о продолжительности отключения электроустановки данным предохранителем согласно [4, табл. 3] минимальный ток при 5 с и менее должен составлять 1250 А, а при 0,1 с и менее — 1910 А);

для точки K_5 — автоматический выключатель с уставкой расцепителя мгновенного действия, равной 400 А.

Зависимости значения тока замыкания на корпус электроустановки от переходного сопротивления контакта PEN-проводника в расчетных точках K_1, K_3, K_5 (1–3), а также соответствующие уставки аппаратов защиты (4–6) показаны на рис. 3.

Расчет с помощью математической модели не выявил явной зависимости тока однофазного КЗ от значения сопротивления повторного заземлителя шкафа ВРУ.

С использованием приведенных зависимостей можно определить граничные условия мгновенного срабатывания защитного аппарата (автоматического выключателя или плавкого предохранителя), в значительной степени влияющие на значение допустимого тока, протекающего через тело человека при электропоражении, связанное со временем воздействия [3, табл. 2].

В данной модели для расчетной точки K_1 расцепитель мгновенного действия надежно сработает при переходном сопротивлении контакта PEN-проводника не более 0,01–0,05 Ом. При этом время отключения выключателя согласно его защитной характеристике не превысит 0,02 с. Из зависимости на рис. 2 видно, что расчетный ток, протекающий через тело человека, для таких значений переходного сопротивления составит 270–280 мА, а это существенно ниже предельно допустимого значения, равного 650 мА согласно [3, табл. 2]. При больших значениях переходного сопротивления контакта PEN-проводника характеристика срабатывания выключателя ста-

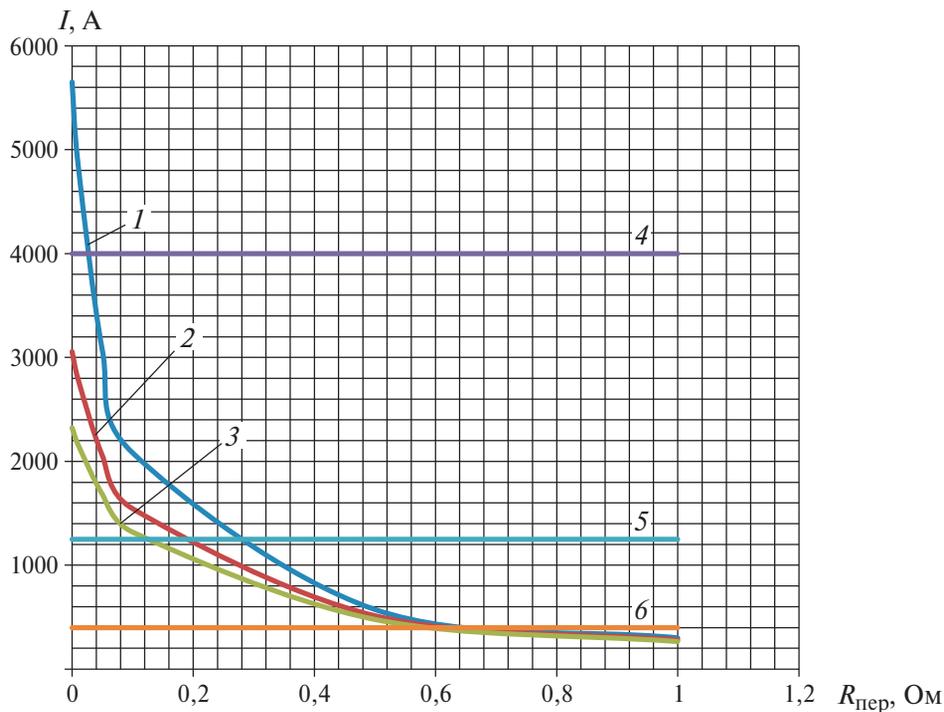


Рис. 3

новится зависимой от времени. Так, для $R_{\text{пер}} = 0,1$ Ом время срабатывания составит примерно 1 с, а предельно допустимый ток, протекающий через тело человека, для такого интервала — 50 мА, что нарушает условия электробезопасности по критерию допустимого тока [3, табл. 2].

Для точки K_3 продолжительность срабатывания плавкого предохранителя зависит от тока замыкания. Исходя из характеристики срабатывания предохранителя ПН-2 ($I_{\text{вст}} = 200$ А) [4], его отключение за время не более 0,4 с произойдет при токе не менее 1250 А. Из характеристики на рис. 3 (кривая 2) видно, что такой ток соответствует переходному сопротивлению контакта PEN-проводника, равному 0,2 Ом. На рис. 2 такому сопротивлению соответствует значение расчетного тока, протекающего через тело человека, от 170 до 250 мА (для различных сопротивлений повторного заземлителя). Предельно допустимый ток, протекающий через тело человека, для такого интервала — 140 мА, что противоречит условию электробезопасности по критерию допустимого тока [3, табл. 2].

В точке K_5 автоматический выключатель надежно срабатывает при переходном сопротивлении контакта PEN-проводника не более 0,7 Ом. При этом время отключения выключателя согласно его защитной характеристике не превысит 0,02 с. Исходя из зависимости на рис. 2, расчетный ток, протекающий через

тело человека, для таких значений переходного сопротивления составит 270 – 280 мА, что существенно ниже предельно допустимого значения 650 мА [3, табл. 2]. При больших значениях переходного сопротивления контакта PEN-проводника характеристика срабатывания выключателя становится зависимой от времени. Так, для $R_{\text{пер}} = 0,8$ Ом время срабатывания равно приблизительно 1 с, а предельно допустимый ток, протекающий через тело человека, для такого интервала — 50 мА, что нарушает условия электробезопасности по критерию допустимого тока [3, табл. 2].

Сравнивая условия срабатывания защитных аппаратов в рассматриваемой электрической сети по критерию допустимого тока, протекающего через тело человека, можно сделать заключение о том, что при сопротивлении контактного соединения PEN-проводника шкафа ВРУ не более 0,05 Ом значения расчетного тока, протекающего через тело человека, во всех точках удовлетворяют требуемым уровням по соответствию допустимого значения определенной продолжительности воздействия.

Выводы

1. При оценке состояния цепи зануления в качестве критерия электробезопасности следует рассматривать не только допустимое

напряжение прикосновения, но и зависящее от него значение допустимого тока, протекающего через тело человека, связанное с напряжением прикосновения согласно [3, п. 2.2] посредством сопротивления тела человека.

2. Значение переходного сопротивления контактного соединения PEN-проводника и значение сопротивления повторного заземлителя ВРУ взаимосвязаны с протекающим через тело человека током, определяющим тяжесть последствия электропоражения.

3. Для определения допустимого тока, протекающего через тело человека при замыкании на корпус электроустановки, необходимо учитывать параметры цепи “фаза – нуль”, обуславливающие время срабатывания защитного аппарата. В частности, переходное сопротивление контактных соединений нулевых проводников в силовых шкафах в заметной степени влияет на значение тока однофазного замыкания, от которого зависит время отключения защитных аппаратов — автоматических выключателей и предохранителей.

4. Зависимости, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о том, что наиболее жесткие требования к значению переходного сопротивления контакта PEN-проводника питающего кабеля с корпусом ВРУ относятся к точке K_1 . Она является одним из важных участков петли “фаза – нуль”, от характеристик которой в значительной степени зависит надежность работы защитных аппаратов при замыканиях на корпус, а следовательно, эффективность защитного отключения как основного способа обеспечения электробезопасности в низковольтных электрических сетях с глухозаземленной нейтралью.

5. Для достижения требуемого уровня электробезопасности посредством защитного

отключения необходим как периодический (предусмотренный графиком планово-предупредительных работ в данной электроустановке), так и непрерывный контроль параметров цепи однофазного замыкания на корпус, в частности переходного сопротивления контактного соединения PEN-проводника питающего кабеля на вводе в электроустановку.

6. При эксплуатации электроустановок для снижения опасности электропоражений персонала в электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью нужна методика оценки состояния контактных соединений нулевых проводников по критерию уровня электробезопасности, определяемому соответствием допустимого значения тока, протекающего через тело человека, определенной продолжительности его воздействия.

7. Допустимое значение переходного сопротивления контакта PEN-проводника питающего кабеля с корпусом ВРУ следует определять при проектировании и реконструкции для конкретных защитных аппаратов с учетом конфигурации электрических сетей.

Список литературы

1. **Макаров Д. А.** Повышение эффективности систем зануления на основе обеспечения первичных критериев электробезопасности: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Чита: РИК ЧитГУ, 2005.
2. **Правила** устройства электроустановок. Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 5-й вып. с изм. и доп. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2006.
3. **ГОСТ 12.1.038–82.** Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
4. **ГОСТ 17242–86.** Предохранители плавкие силовые низковольтные. Общие технические условия.

leo16061965@yandex.ru