

## РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

### Критерии электробезопасности

#### 2.1. Статистика смертельного электротравматизма в электроустановках

За последние несколько лет значение знаний о физиологическом действии тока, проходящего через тело человека, непрерывно возрастает. Публикация МЭК-479 отражает эти знания и делает их доступными для дальнейшего совершенствования стандартов и правил. Первая часть этой публикации имеет всеобщее значение, а новая III часть содержит дополнительные сведения применительно к воздействию тока на домашних животных.

Стало значительно больше известно о надежности и эффективности защитных устройств. Уровень отказов УЗО-Д и дифференциальных автоматов не превышает 10 на 10<sup>9</sup> часов. Статистика показывает, что число случаев поражения электрическим током уменьшается. Использована статистика, охватывающая период 1985—1989 гг. включительно, для шести высокоразвитых индустриальных стран. Конкретные типы распределительных систем и методы защиты от поражения электрическим током являются важнейшими факторами, определяющими безопасность.

Табл. 2.1 показывает типы сетей и защитные меры для различных стран. Табл. 2.2 показывает численность населения каждой страны и число зарегистрированных смертельных поражений электрическим током. В этой таблице представлены данные по Франции, Германии, Японии и США. Таблица 2.3 показывает аналогичные данные для Австрии и Швеции. Для этих двух стран представилась возможность идентифицировать и выделить данные, относящиеся к установкам напряжением до 1000 В.

Имеется несколько факторов, влияющих на число случаев смертельного электротравматизма, в число которых следует включать образование населения, уровень жизни, который влияет на число электроприборов в быту, рост применения изоляционных материалов в зданиях, включая различные коммуникации, используемые стандарты, регламентирующие требования к электробезопасности электроустановок и электрооборудования, и, наконец, меры, используемые для защиты от поражения электрическим током.

За прошедшие десятилетия число случаев смертельного поражения, приходящееся на одного жителя, уменьшилось. Например, в Австрии число случаев смертельного поражения электрическим током в 1950 г. было немного ниже 100, а в 1990 г. упало до 20. Предполагается, что это в значительной степени обусловлено массовым применением УЗО-Д и увеличением использования изоляционных конструкционных материалов, включая трубопроводы. Применение последних снижает вероятность контакта человека с частями, имеющими потенциал земли, что снижает опасность образования пути

тока через тело человека. Наименьшее число случаев поражения электрическим током зарегистрировано в Швеции, несмотря на относительно ограниченное использование УЗО-Д.

Таблица 2.1. Типичные системы и меры защиты для электроустановок

СТРАНА	СИСТЕМА СЕТИ	МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ
Россия	3-фазная звезда с заземленной нейтралью 220/380 В	Системы TT, TN+УЗО-Д, TN (зануление)
СНГ		
Германия	3-фазная звезда с заземленной нейтралью 230/400 В	Система TN (зануление) — 80%
Швеция		Система TT+УЗО-Д — 20%
Австрия		Система TN (зануление), Система TN+УЗО-Д (незначительная часть)
Франция		Система TN (зануление) — 50% Система TT+УЗО-Д — 50%
США	Однофазная система с заземленной средней точкой обмотки трансформатора 120/240 В	Система TN+GFCI (GFCI требуется для дополнительной защиты в цепях, питаемых от штепсельных розеток)
Япония	Однофазная система с заземленной средней точкой обмотки трансформатора 100/200 В	Система TT+УЗО-Д

Таблица 2.2. Число случаев смертельного электротравматизма за период 1985—1989

Страна и годы	Население, млн. человек	Число случаев	Число случаев на миллион населения
Франция			
1985	55.2	168	3.0
1986	55.4	142	2.6
1987	55.6	154	2.8
1988	55.8	115	2.0
1989	55.9	135	2.4

Продолжение табл. 2.2

Страна и годы	Население, млн. человек	Число случаев	Число случаев на миллион населения
Германия			
1985	60.9	109	1.8
1986	61.0	118	1.9
1987	61.0	88	1.4
1988	61.5	99	1.6
1989	62.0	121	1.95
Япония			
1985	121.0	69	0.57
1986	121.5	77	0.63
1987	121.5	83	0.68
1988	122.7	77	0.63
1989	123.2	67	0.54
США			
1985	239.0	802	3.35
1986	241.5	854	3.5
1987	244.0	760	3.1
1988	246.0	714	2.9
1989	246.0	702	2.85

Таблица 2.3. Число случаев смертельного электротравматизма за период 1985—1989

Страна и годы	Население, млн. человек	Число случаев		Число случаев на миллион населения	
		Всего	до 1000 В	Всего	до 1000 В
Австрия					
1985	7.5	27	9	3.6	1.2
1986	7.5	15	4	2.0	0.53
1987	7.5	18	9	2.4	1.2
1988	7.6	11	4	1.4	0.53
1989	7.6	14	4	1.8	0.53
Швеция					
1985	8.35	11	3	1.3	0.36
1986	8.4	14	8	1.7	0.95
1987	8.4	14	7	1.7	0.83
1988	8.4	13	5	1.5	0.60
1989	8.5	5	3	0.59	0.35

Хорошая организация системы стандартизации и испытаний, дисциплинированное население и широкое использование изоляционных конструктивных материалов — все это является причиной низкого числа случаев смертельного травматизма.

Значительно больший прогресс может быть достигнут в результате совершенствования правил, регламентирующих устройство распределительных сетей [24], [25].

## 2.2. Предельно допустимые значения токов и напряжений прикосновения

Обозначим сопротивление растеканию заземляющего устройства защищаемого электрооборудования символом  $R_A$ , а сопротивление растеканию заземляющего устройства питающего трансформатора — символом  $R_B$ .

При возникновении повреждения изоляции ток замыкания  $I_F$  протекает от токоведущей части через сопротивление  $R_A$  в землю и возвращается через сопротивление  $R_B$  в питающую систему. Напряжение на поврежденном оборудовании по отношению к условной земле (потенциал в точке замыкания) равно падению напряжения в защитном проводнике и сопротивлении  $R_A$ . В большинстве случаев падением напряжения в защитном проводнике можно пренебречь.

Тогда потенциал в точке замыкания

$$U_F = I_F R_A.$$

Потенциал замыкания измеряется вольтметром, имеющим большое внутреннее сопротивление, как правило, 40 кОм.

Значение 40 кОм является компромиссным. Дело в том, что если внутреннее сопротивление вольтметра будет слишком высоким, вольтметр будет давать ложные показания даже при отсутствии повреждения изоляции. Это вызвано тем, что напряжение сети будет распределяться между вольтметром и сопротивлением изоляции электрооборудования. Во избежание ложных показаний внутреннее сопротивление вольтметра должно быть существенно ниже сопротивления изоляции присоединенного электрооборудования.

Однако, если внутреннее сопротивление вольтметра слишком мало, вольтметр не сможет правильно показывать напряжение по отношению к условной земле. Вольтметр измеряет напряжение в точке повреждения за вычетом падения напряжения на вспомогательном измерительном электроде, выполняющим роль условной земли. Если сопротивление растеканию этого электрода достаточно велико по сравнению с внутренним сопротивлением вольтметра, погрешность измерения будет недопустимо высока. Для исключения ложных показаний внутреннее сопротивление вольтметра должно

быть существенно выше значения сопротивления растеканию вспомогательного электрода заземления.

Распределение потенциала повреждения вблизи заземляющих электродов существенно зависит от их геометрической конфигурации и взаимного расположения. Это распределение может быть измерено с помощью вспомогательного электрода. При достаточно большом удалении вспомогательного электрода от точки повреждения может быть определено напряжение повреждения по отношению к условной земле (потенциал повреждения).

Тело человека, касающегося доступных открытых проводящих частей поврежденного электрооборудования (ОПЧ) и стоящего на проводящем полу, преднамеренно зашунтировано связанной с оборудованием системой защитных проводников. Полное сопротивление, определяющее напряжение на теле человека после прикосновения (напряжение прикосновения), равно сумме сопротивлений тела человека, его обуви и пола. Сопротивление растеканию тока от ног человека в землю зависит от материала пола. Сопротивление пола практически бесконечно велико для пола, выполненного из изоляционного материала, например, резины или ПВХ, и практически равно нулю для металлических полов. Для приближенной оценки значения сопротивления пола может быть рекомендована следующая формула

$$R_{\text{пол}} = K\rho,$$

где  $K$  — постоянный коэффициент, принимаемый равным 1.6.

$\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала пола, Ом·м.

Если человек находится вне зоны растекания тока замыкания, тогда протекание тока через тело человека будет определяться полным потенциалом повреждения  $U_F$ , при этом напряжение до прикосновения  $U$  получается максимальным.

В зависимости от местонахождения человека потенциал или напряжение до прикосновения равны сумме напряжения на теле человека  $U_T$  и напряжения пола  $U_{\text{пол}}$ :

$$U_F = U_T + U_{\text{пол}}$$

или

$$U_{\text{дл}} = U_T + U_{\text{пол}}$$

где  $U_T$  — напряжение прикосновения на теле человека (или домашнего животного), вызванное током, протекающим через сопротивление тела.

Потенциал повреждения измеряется между доступными открытыми проводящими частями электрооборудования (ОПЧ) или сторонними проводящими частями (СПЧ) электроустановки и условной землей. Напряжение до прикосновения, являющееся частью потенциала (напряжения) повреждения,

измеряется между ОПЧ и/или СПЧ установки, которых можно коснуться одновременно.

Напряжение прикосновения — это напряжение на теле человека или животного при протекании тока прикосновения.

*Предельно допустимые значения потенциала при замыкании и соответствующие значения напряжения прикосновения при переменном токе частотой 50/60 Гц.*

Термин «напряжение прикосновения» не следует смешивать с измеряемым значением, которое также иногда называется «напряжением прикосновения», включая измеряемые значения с использованием вольтметра с высоким внутренним сопротивлением (до 1 МОм).

Эти измерения выполняются для определения электробезопасности рассматриваемой системы независимо от сопротивления тела человека (или животного).

#### *Предельно допустимое значение потенциала при замыкании*

Для установления предельно допустимого значения потенциала при замыкании должно быть рассмотрено несколько определяющих факторов. Эти факторы включают вероятные пути протекания тока, вероятные значения сопротивлений этих путей, таких как обувь и т. д., сопротивление пола, вероятность возникновения замыкания, вероятность прикосновения человека к частям, находящимся под потенциалом. Риск поражения электрическим током зависит от нескольких факторов, в число которых входят следующие:

1) При пути тока «руки-ноги» напряжение прикосновения обычно значительно ниже потенциала замыкания, так как

а) напряжение до прикосновения в месте нахождения человека, как правило, значительно ниже потенциала замыкания вследствие эффекта «потенциального шатра» под ногами человека;

б) влияет сопротивление обуви;

в) влияет сопротивление пола.

2) При пути тока «рука-рука» напряжение прикосновения меньше критического вследствие

а) коэффициент сердечного тока\* показывает, что при пути тока «рука-рука» вероятность возникновения вентрикулярной фибрилляции равна половине соответствующей вероятности при пути тока «рука-ноги»;

б) сопротивление тела выше.

Каждая система питания должна быть рассмотрена самостоятельно в отношении вероятности возникновения замыкания, доступности ее частей для прикосновения и возможности снижения потенциала повреждения в зависимости от напряжения линии по отношению к земле.

Все эти факторы должны быть рассмотрены с учетом предельно допустимого риска поражения электрическим током. Опыт эксплуатации различных

\* IEC Report 479, Part 1, 3-rd ed., Effects of Current Passing through the Human Body and through Livestock, Table 5.



типов сетей позволил дать сравнительную оценку их безопасности в зависимости от влияния указанных факторов и на основе этой оценки — разработать практические рекомендации, обеспечивающие снижение риска поражения до разумного минимума.

При рассмотрении опасности поражения должны быть приняты во внимание следующие обстоятельства:

1. При рассмотрении общего сопротивления тела человека следует учитывать сопротивление его кожи только при условии, что площадь контакта мала, а приложенное напряжение меньше 100 В. Однако, при напряжении 200 В сопротивление тела человека практически не зависит от площади контакта и состояния кожи и практически полностью определяется внутренним сопротивлением тела человека.

2. Опасность поражения зависит не только от значения тока, но и от его пути. Вероятные пути тока должны быть оценены с учетом предполагаемых сопротивлений этих путей. При этом должны быть приняты во внимание возможные электрофизиологические реакции в зависимости от значений тока, протекающего по этим путям.

В системе TN напряжение при повреждении изоляции часто составляет четвертую часть или менее номинального напряжения «фаза — нуль». Напряжение цепи обратного тока равно половине номинального фазного напряжения. В этом случае напряжение ОПЧ и СПЧ в точке к.з. по отношению к условной земле приблизительно равно половине падения напряжения между точкой к.з. и нейтралью трансформатора.

При фазном напряжении 230 В потенциал точки к.з. не превысит 65 В.

#### Напряжение прикосновения

Напряжение прикосновения всегда ниже потенциала в точке к.з. Напряжение прикосновения составляет только часть потенциала в точке к.з., что обусловлено влиянием потенциального шатра, а также влиянием сопротивления растеканию с ног человека в землю. Например, при потенциале в точке к.з. 65 В (система TN с фазным напряжением 230 В) напряжение прикосновения не превысит 30 В.

Таблица 2.4 содержит значения тока через тело человека при воздействии на человека напряжения 50 В при 50—60 Гц, при наименьших значениях сопротивления тела человека.

Таблица 2.4. Ток через тело человека при 50 В, 50/60 Гц при наименьших значениях сопротивления тела человека

Путь тока	Сопротивление тела, Ом	Ток через тело, мА
Рука — рука	1450	35
Обе руки — обе ноги	580	86
Обе руки — туловище	360	139

В момент включения напряжения происходит импульсный бросок тока, пиковое значение которого достигает 92 мА. Действующее значение установившегося тока составило 20 мА.\*

Длительное воздействие этого напряжения непереносимо из-за острой мышечной боли в обеих руках. Длительный ток 80 мА при пути рука — ноги, рука — спина, вызывает опасность вентрикулярной фибрилляции. Измеренные значения тока через тело человека показывают, что значение 50 В не может быть рекомендовано в качестве нормы напряжения прикосновения для оценки условий безопасности распределительных сетей.

Вентрикулярная фибрилляция является самой опасной физиологической реакцией организма на протекание электрического тока через тело. Она может быть вызвана относительно кратковременным воздействием тока. Возникшая у человека и домашних животных вентрикулярная фибрилляция не может самостоятельно прекратиться даже после отключения тока, и неминуемо заканчивается смертью пострадавшего. Именно поэтому многие нормы, основаны на пороге вентрикулярной фибрилляции, хотя имеются и другие физиологические реакции опасного характера.

Пороговые значения токов вентрикулярной фибрилляции получены из опытов на животных (собаки, овцы, свиньи). Предполагается, что человеческое сердце может быть менее чувствительным к воздействию электрического тока, чем сердце собаки, а следовательно пороговые кривые вентрикулярной фибрилляции, данные в Публикации МЭК-479 [21], [22], имеют существенный запас [18].

Однако, необходимо учитывать и другие электрофизиологические реакции при протекании тока через организм человека. Вентрикулярная фибрилляция является не единственным механизмом смертельного поражения при воздействии электрического тока.

Судороги и паралич мускульных тканей, приводящие к остановке дыхания, возникают в результате протекания токов, значения которых ниже порога вентрикулярной фибрилляции.

В США предельно допустимое значение напряжения прикосновения ограничивается пиковым значением 42.4 В для переменного тока (действующее значение 30 В при синусоидальной волне тока) и 60 В постоянного тока в сухих помещениях. В сырых помещениях, значения предельно допустимых напряжений снижаются в два раза. Эти нормы нашли отражение в Национальном Электротехническом Коде США.

Предельно допустимые значения напряжений, используемые в США, были установлены в результате обобщения практики эксплуатации много лет тому назад, и вероятно имеют достаточно большие запасы. Более низкие значения номинального напряжения сети, принятые в США, делают возможным легко использовать эти заниженные значения предельно допустимых напряжений прикосновения без применения каких бы то ни было дополнительных мер защиты.

\* Electrical Shock Safety Criteria Proceedings of the First International Symposium of Electrical Shock Criteria. Toronto. Pergamon Press, 1985.

Если исключить случаи поражения током в плавательных бассейнах, очень мало документально подтвержденных случаев смертельного поражения электрическим током при приложенном напряжении менее 50 В. Однако, утверждать, что все случаи поражения электрическим током были при приложенном напряжении более 50 В, все же нет оснований. Это объясняется тем, что схемы, представленные в отчетах о несчастных случаях, слишком часто неудовлетворительно отражают детали, связанные с определением действительно приложенного напряжения.

Экспериментально установлено, что пороговые значения фибрилляционных токов и значения сопротивления тела с достаточной для практических целей точностью описываются нормально-логарифмическими законами. В Публикации МЭК-479 установлено, что в 95% случаев пороговые значения фибрилляционного тока при частоте 50/60 Гц превышают 50 мА.

Обширные экспериментальные исследования зависимости пороговых значений тока, вызывающего вентрикулярную фибрилляцию, от длительности его воздействия были выполнены в 1936 г. Л. Феррисом, Б. Кингом, Б. Спенсом и Г. Вильямсом [2]. Опыты выполнялись на животных, масса сердца и общая масса которых были близки к массе сердца и общей массе человека. Время воздействия тока в эксперименте составляло 0,03, 0,1, 0,12, 0,5, 3 с. Эти опыты были продолжены в 1959 г. В. Коуенховеном. В качестве подопытных животных были использованы собаки. Время воздействия в эксперименте составляло 0,008, 0,016, 0,08, 0,16, 0,32, 1, 2, 5 с.

Статистический анализ результатов экспериментальных исследований Л. Ферриса, В. Коуенховена и других авторов выполнен Ч. Далзилом в работе [5], опубликованной в 1960 г. По мнению Ч. Далзила пороговое значение фибрилляционного тока  $I$  с заданной вероятностью в зависимости от длительности воздействия тока  $t$  в диапазоне от 0,006 до 7 с определяется выражением

$$I = C/\sqrt{t}, \quad (2.1)$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от массы животного и заданной вероятности фибрилляции.

В этой же работе Ч. Далзилом установлено, что во всем диапазоне изменения масс подопытных животных от 1 до 100 кг пороговое значение фибрилляционного тока определяется выражением

$$I = A + BG,$$

где  $A, B$  — постоянные, зависящие от заданной вероятности фибрилляции;  
 $G$  — масса животного.

На основе установленных зависимостей Ч. Далзил предложил формулу для расчета порогового значения фибрилляционного тока промышленной

частоты для взрослого человека массой 70 кг (вероятность фибрилляции 0,5%) в виде, мА:

$$I = \frac{165 + 185}{\sqrt{t}},$$

где  $t$  — время воздействия (0,03 с  $\leq t \leq$  3с).

В работе проф. А. П. Киселева [6], опубликованной в 1963 г., исследована зависимость расчетного значения минимального фибрилляционного тока промышленной частоты  $I_p$  от массы животного. Эксперименты были выполнены на собаках при времени воздействия 3 с. Установлено, что ток, мА:  $I_p = 30 + 3,7 G$ , где  $G$  — масса животного, кг.

На основе полученных данных проф. А. П. Киселевым сделан вывод о том, что пороговое значение нефибрилляционного тока для человека с массой 70 кг равно 92 мА. При увеличении времени воздействия от 3 до 30 с пороговое значение фибрилляционного тока не снижается.

Исследования Ч. Далзила, начатые в 1941 г. и продолженные в 1960 г., позволили установить, что при токе промышленной частоты, протекающем по пути рука — рука и равном 9 мА, возможен самостоятельный отрыв от токоведущих частей для 99,5 % мужчин. Для женщины значение отпускающего тока снижается до 6 мА. Значение отпускающего тока не зависит от длительности его протекания. Если длительность воздействия отпускающего тока не превышает 30 с, то опасность для здоровья человека не возникает.

Экспериментальные исследования, выполненные Ч. Далзилом в 1950 и 1954 гг., показали, что пороговое действующее значение ощущаемого тока изменяется в пределах 0,6—2 мА. Среднее значение этого тока, определенное из опытов над 167 мужчинами в возрасте от 18 до 50 лет, составило 1,086 мА (при пути тока ладонь — ладонь). Пороговое значение ощущаемого тока также не зависит от длительности его воздействия.

С целью исследования эффективности применения устройств защитного отключения, реагирующих на ток утечки, для защиты от поражения током при непосредственном прикосновении к частям, находящимся под напряжением, проф. Г. Бигельмайер (Австрия) провел на себе прямой натуральный эксперимент по выяснению воздействия на человека переменного тока частотой 50 Гц, близкого к порогу фибрилляции. В этом эксперименте напряжение прикосновения при контакте рука — рука было поднято до 200 В, ток достигал 189 мА при длительности его протекания до 20 мс [9].

Подробное изложение результатов экспериментальных исследований воздействия электрического тока промышленной частоты на организм человека содержится в [10]. Анализируя результаты этих исследований, проф. В. Е. Манойлов констатирует, что безопасным во всех случаях, в том числе и при совпадении любых неблагоприятных факторов, нужно считать ток, который был бы в 8—10 раз меньше начального ощутимого тока, т. е. не превышал бы 0,1 мА. Однако учитывая малую вероятность сочетания всех неблагоприятных событий, можно для отдельных защитных мероприятий принимать ток, равный ощутимому, т. е. 1 мА. А в некоторых случаях,

например на электротехнических объектах, обслуживаемых обученным персоналом (лицами электротехнических профессий), за основу расчета может быть принят ток, равный 10 мА.

На основе анализа известных электрофизиологических исследований можно сделать следующие выводы.

1. Пороговые значения токов, соответствующих физиологическим реакциям ощущения, неотпускания, вентрикулярной фибрилляции, носят вероятностный характер.

2. Пороговые значения ощущаемых и отпускающих токов не зависят от времени их воздействия. Пороговые значения этих токов носят чрезвычайно устойчивый характер.

3. Пороговые значения ощущаемых и отпускающих токов для женщин составляют примерно 0,67 соответствующих значений, полученных из эксперимента на мужчинах.

4. Пороговые значения фибрилляционных токов имеют достаточно сложный характер зависимости от времени воздействия. Из рассмотрения этой зависимости следует, что:

1) в диапазоне 0,1—1 с пороговое значение фибрилляционного тока существенно зависит от длительности его воздействия, формула (1), предложенная Ч. Далзилем [5], лишь приближенно описывает эту зависимость;

2) при времени воздействия более 1 с пороговое значение фибрилляционного тока остается равным 1 (t = 1 с);

3) при времени воздействия менее 0,1 с пороговое значение фибрилляционного тока остается равным 1 (t = 0,1 с).

5. При определении числовых значений коэффициента C, входящего в (1), Ч. Далзил исходил из предположения, что закон (1) распространяется на диапазон времени воздействия тока до 3 с. Поскольку за основу пороговых значений фибрилляционных токов были приняты значения токов, полученных при t = 3 с, для перехода к 1 с Ч. Далзил ввел поправочный коэффициент  $\sqrt{3}$ . Как уже было отмечено, I (t = 3 с) = I (t = 1 с) и, следовательно, истинное значение коэффициента C = 95 ÷ 107.

6. Таким образом, результаты экспериментальных исследований, выполненных Л. Феррисом, В. Коувенховеном, Н. Л. Гурвичем, А. П. Киселевым с учетом указанных замечаний можно сформулировать следующим образом.

Зависимость порогового значения фибрилляционного тока промышленной частоты (50—60 Гц) от времени воздействия для человека массой 70 кг с вероятностью 0,5 % описывается выражениями, мА:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{95 \div 107}{\sqrt{t}}, & 0,1 \text{ с} \leq t \leq 1 \text{ с}; \\ I &= 95 \div 107, & t \geq 1 \text{ с}; \\ I &= 300 \div 340, & t \leq 0,1 \text{ с}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Предлагается следующая система критериев электробезопасности, на основе которой можно оценить уровень электробезопасности при эксплуатации электроустановок.

В процессе работы через тело человека, работающего в электроустановке, непрерывно проходит электрический ток. Значение тока, длительно проходящего через тело, не должно превышать порогового значения неощущаемого тока.

При вынужденных режимах работы электроустановок возможны кратковременные (до 30 с) повышения потенциалов ОПЧ, СПЧ, РЕ — и PEN-проводников, сопровождающиеся заметным увеличением токов через тело рабочего. Значение этого тока при вынужденном режиме не должно превышать порогового значения отпускающего тока для женщин.

Наконец, при коротком замыкании в электроустановке возможно резкое увеличение потенциалов ОПЧ, СПЧ, РЕ — и PEN-проводников, сопровождающееся резким увеличением тока через тело рабочего. Значение этого тока должно быть ниже порога нефибрилляционного тока.

Исходя из физиологических реакций организма человека на прохождение через него тока различного значения и длительности и характерных режимов работы электроустановки, можно рекомендовать следующие критерии для оценки уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок [11]:

1) при длительности воздействия тока более 30 с — порог неощущаемого тока;

2) при длительности воздействия тока от 1 до 30 с — порог отпускающего тока;

3) при длительности воздействия тока 1 с и менее — порог нефибрилляционного тока.

Определение пороговых значений неощущаемых и отпускающих токов рекомендуется производить при вероятности наступления реакций ощущения и неотпускания, равной 0,5 %. В качестве третьего критерия электробезопасности рекомендуется принимать такое значение тока, при котором вероятность наступления фибрилляции сердца не превышает 0,14 % (правило «трех сигм») [12].

Пороговое значение неощущаемого тока (первый критерий) является основой для установления значений допустимого длительно и неслучайно протекающего токов. На основании результатов исследований неощутимых токов, для первого критерия при протекании тока по пути рука — рука или рука — ноги можно принять значение тока 1 мА.

Пороговое значение отпускающего тока является основой для установления значений допустимого тока, случайно проходящего при сравнительно большой длительности воздействия, измеряемой десятками секунд. Для второго критерия при протекании тока по пути рука — рука или рука — ноги в качестве допустимого можно принять значение тока 6 мА.

Пороговое значение нефибрилляционного тока является основой для



установления значений предельно допустимого тока при кратковременных случайных воздействиях в аварийных режимах.

Исследования по определению пороговых значений нефибрилляционных токов при времени воздействия от 0,2 до 3 с проводились в СССР на моделирующих животных — собаках (1966—1967 гг.) А. Х. Карасаевой и С. П. Власовым под руководством Н. Л. Гурвича и А. П. Киселева.

В 1971—1975 гг. эти исследования были продолжены при временах воздействия в диапазоне 0,01—1 с под руководством проф. Н. Л. Гурвича, Б. М. Ягудаевым, С. П. Власовым, В. Я. Табаком, М. С. Богушевич, Ю. Г. Сибаровым и Н. Н. Сколотневым [13].

Математическая обработка результатов экспериментов показала, что пороговые значения нефибрилляционных токов в диапазоне 0,01—3 с подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. В диапазоне 0,01—0,08 с поражающий ток в наиболее уязвимой фазе работы сердца (фаза  $T$ ) не зависит от длительности воздействия. Последнее обстоятельство получило электрофизиологическое обоснование.

В табл. 2.5 приведен предельно допустимый ток частотой 50 Гц в зависимости от продолжительности его воздействия с вероятностью 0,9986, не вызывающий фибрилляцию сердца [14].

В этой же таблице представлены математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение десятичного логарифма предельно допустимого тока. Экспериментальные данные пересчитаны на человека с массой тела 50 кг.

Приведенные в табл. 2.5 значения предельно допустимого тока включены в ГОСТ 12.1.038—82. Значения предельно допустимых токов получены с учетом наиболее неблагоприятных сочетаний условий: касание человеком заземленных частей электроустановки совпадает с моментом появления на них опасного потенциала в результате аварии, например короткого замыкания, и совпадает с наиболее уязвимой фазой работы сердца — фазой  $T$ .

Таблица 2.5. Зависимость допустимых токов от времени воздействия

Показатели	Продолжительность воздействия тока, с							
	0,01—0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1
Предельно допустимый ток, мА	650	500	250	165	125	100	85	50
Математическое ожидание десятичного логарифма предельно допустимого тока	3,498	3,413	2,918	2,672	2,556	2,492	2,41	2,197
Среднеквадратическое отклонение десятичного логарифма предельно допустимого тока	0,201	0,192	0,1	0,205	0,099	0,088	0,138	0,119

В связи с изложенным можно рекомендовать в диапазоне 0,1—1 с пороговое значение нефибрилляционного тока частотой 50 Гц с вероятностью 0,9986 для человека с массой 50 кг описывать формулой, мА:

$$I = 50/t, \quad (2.3)$$

где  $t$  — время воздействия тока, с.

На основе анализа известных опубликованных работ можно предположить, что наиболее вероятный механизм возбуждения вентрикулярной фибрилляции (ВФ) действует следующим образом [15].

В диапазоне  $0,1 \text{ с} \leq t \leq 0,8 \text{ с}$  возбуждение ВФ возникает при прохождении через тело человека электрического заряда, превышающего некоторые критические значения:

$$Q \geq Q_{кр}.$$

Значение критического заряда  $Q_{кр}$  для человека, имеющего массу тела 70 кг, равно 0,1 Кл (100 мА · 1 с).

При переносе через тело человека заряда, превышающего 0,1 Кл, происходит нейтрализация трансмембранного потенциала сердечных клеток, приводящая к прекращению спонтанного электрического возбуждения волокон миокарда.

Если скорость переноса заряда через тело человека, Кл/с,

$$\frac{dQ}{dt} < 5 \cdot 10^{-2} \quad (t \geq 0,8 \text{ с}),$$

то рост количества заряда, вызванный удлинением времени его переноса, не в состоянии вызвать ВФ. Это обстоятельство обусловлено тем, что продолжительность «памяти» сердечной клетки определяется продолжительностью одного периода трансмембранного потенциала  $T$  ( $0,8 \text{ с} \leq T \leq 1 \text{ с}$ ).

Наконец, если скорость переноса заряда достигает некоторого критического значения, Кл/с,

$$\frac{dQ}{dt} \geq 0,35 \quad (t < 0,1 \text{ с}),$$

то происходит разрушение (электрической пробой) мембраны сердечной клетки. Размеры «дырок» в стенах мембран становятся недостаточными для пропуска электрических зарядов с заданной скоростью. Это приводит к повышению напряженности электрического поля до значений, вызывающих механический разрыв стенок мембран. Возникает «катастрофа» на молекулярном уровне.

Исходя из выдвинутой автором гипотезы, можно сформулировать следующие выводы:

- 1) если электрический импульс не смог вызвать фибрилляции волокон сердца в течение одного кардицикла, то этот импульс не вызовет фибрилляции при любом увеличении его длительности;
- 2) при некотором минимальном значении возбуждающего фибрилляцию импульса должна быть 100 %-ная вероятность его встречи с уязвимой фазой кардицикла. Для этого длительность этого импульса должна быть не менее одного кардицикла;
- 3) существует некоторое минимальное значение импульса, возбуждающего фибрилляцию, при условии точного попадания в уязвимую фазу кардицикла;
- 4) длительность уязвимой фазы не превышает 0,1 с;
- 5) попадание импульса в уязвимую фазу вызывает образование вращающейся волны возбуждения в тканях сердца, приводящей к фибрилляции;
- 6) при продолжительности импульса меньше длительности кардицикла фибрилляция может быть вызвана при условии, если амплитуда тока будет больше минимальной. Закон изменения вызывающей фибрилляцию амплитуды тока от длительности импульса должен быть определен экспериментально.

Из соображений эвристического характера следует, что должно иметь место соотношение

$$\frac{I_{\Phi}(t) - I_0}{f(t)} = \text{const},$$

где  $I_{\Phi}(t)$  — зависимость пороговых значений допустимых токов (с заданной вероятностью не вызывающих фибрилляции) от длительности воздействия;

$I_0$  — минимальное пороговое значение нефибрилляционного тока;  
 $f(t)$  — плотность нормального закона распределения вероятностей:

$$f(t) = \Phi_1(a, t)$$

где

$$\Phi_1(a, t) = \Phi'(a, t) = \frac{2}{\pi} e^{-(a,t)^2}.$$

Из рассмотрения результатов экспериментальных исследований, изложенных выше (табл. 2.5), следует, что:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} e^{-(2,34t)^2}$$

и, следовательно,

$$I_{\Phi}(t) = 50 + 421\Phi'(2,34t). \quad (2.4)$$

Зависимость  $I(t)$ , рассчитанная для диапазона  $0,01 \text{ с} \leq t \leq 1 \text{ с}$  по формуле (2.4), представлена на рис. 2.1.

Функцию  $\Phi'(x)$  называют также производной интеграла ошибок. Удобные таблицы этой функции для аргумента  $x$  от 0 до 3 с шагом 0,01 содержатся в [16].

Интересно отметить, что предложенная Ч. Далзилем зависимость

$$I_D(t) = 185/\sqrt{t}$$

удовлетворительно согласуется с зависимостью  $I_{\Phi}(t)$  только в диапазоне  $0,15 \text{ с} < t \leq 0,3 \text{ с}$ . Стандартная зависимость  $I_c(t)$  (ГОСТ 12.1.038—82) удовлетворительно согласуется с зависимостью  $I_{\Phi}(t)$  в двух отдельных диапазонах:  $0,05 \text{ с} \leq t \leq 0,1 \text{ с}$  и  $t > 0,8 \text{ с}$ . Что же касается диапазона  $0,1 \text{ с} < t < 0,8 \text{ с}$ , представляющего наибольший практический интерес, то в нем отличие между  $I_{\Phi}(t)$  и  $I_c(t)$  достигает двукратного: при  $t = 0,3 \text{ с}$   $I_c = 165 \text{ мА}$ ,  $I_{\Phi} = 325 \text{ мА}$ . Можно предположить, что стандартная зависимость  $I_c(t)$ , имеющая два резких излома ( $t_1 = 0,1 \text{ с}$ ;  $t_2 = 1 \text{ с}$ ), весьма условно и приблизительно отражает истинную зависимость пороговых значений нефибрилляционных токов  $I_c(t)$ .

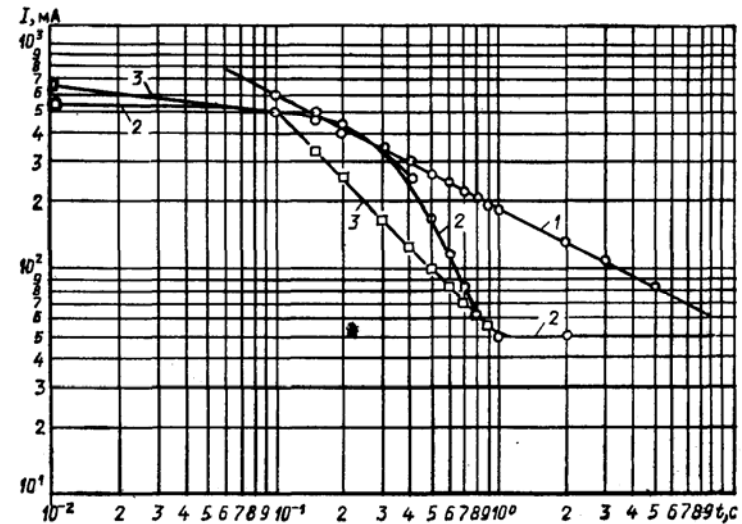


Рис. 2.1. Зависимости:  
 1 —  $I_{\Phi}(t)$ ; 2 —  $I_{\Phi}(t)$ ; 3 —  $I_c(t)$



Нетрудно убедиться в том, что полученная зависимость  $I_{\Phi}(t)$  во всем рассматриваемом диапазоне  $0,01 \text{ с} \leq t \leq 10 \text{ с}$  отвечает всем положениям, сформулированным выше. Это обстоятельство позволяет использовать зависимость  $I_{\Phi}(t)$  для оценки электробезопасности при однофазных коротких замыканиях в электроустановках с заземленной нейтралью.

### 2.3. Нормативные требования

При использовании данных ниже норм предельно допустимых значений токов и напряжений прикосновения необходимо иметь в виду следующие соображения.

1. Произведение порогового значения тока вентрикулярной фибрилляции и значения сопротивления тела человека могут дать пороговое значение напряжения вентрикулярной фибрилляции, но надо иметь в виду, что эти величины не являются независимыми. В действительности сравнительно незначительная часть людей имеет высокое сопротивление тела и низкий порог тока вентрикулярной фибрилляции, в то время как большая часть людей имеет низкое сопротивление тела и высокий порог тока вентрикулярной фибрилляции.

Поэтому произведение имеющих одинаковую вероятность значений сопротивления тела человека и пороговых значений тока вентрикулярной фибрилляции даст пороговые значения напряжений вентрикулярной фибрилляции, относящиеся к несуществующему человеку.

2. Даже если бы пороговые значения тока и значение сопротивления тела были бы взаимно независимы, то простое перемножение их значений, имеющих одинаковую вероятность, дало бы значение порогового напряжения, имеющее меньшую вероятность по сравнению с вероятностью каждого из двух перемножаемых значений.

3. Пороговые значения тока вентрикулярной фибрилляции, приведенные в Публикации МЭК-479, были получены из опытов на собаках. Более поздние исследования показывают, что сердце человека имеет более высокое пороговое значение тока вентрикулярной фибрилляции по сравнению с сердцем собаки и, следовательно, опубликованные пороговые значения могут рассматриваться как значения, данные с запасом.

#### 2.3.1. Неаварийный режим электроустановки

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, проходящих через тело человека, используются при проектировании электроустановок постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов установлены для путей тока от одной руки к другой и от рук к ногам.

Напряжения прикосновения и тока, проходящего через тело человека, при продолжительности воздействия не более 10 мин. в сутки не должны

превышать значений, приведенных в табл. 2.6. Данные табл. 2.6. относятся к электроустановкам всех классов напряжения как с изолированной, так и с заземленной нейтралью.

Таблица 2.6. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, проходящих через тело человека при неаварийном режиме электроустановки \*

Род тока	$I$ , мА	$U$ , В
Переменный, 50 Гц	0,3	2
Переменный, 400 Гц	0,4	3
Постоянный	1	8

#### 2.3.2. Аварийный режим электроустановки

Напряжения прикосновения и токи, проходящие через человека при аварийном режиме работы электроустановок напряжением до 1 кВ с заземленной или изолированной нейтралью и выше 1 кВ с изолированной нейтралью, не должны превышать значений, приведенных в табл. 2.7.

Напряжения прикосновения и токи, проходящие через человека при аварийном режиме работы электроустановок напряжением выше 1 кВ с эффективно заземленной нейтралью, не должны превышать значений, приведенных в табл. 2.8.

Для контроля нормированных значений напряжений прикосновения и токов должны быть измерены напряжения и токи в местах, где могут ожидать наибольшие значения контролируемых величин. При измерениях напряжений прикосновения и токов сопротивление тела человека должно моделироваться резистором, сопротивление которого определяется соотношением

$$R = [U] / [I],$$

где  $[U]$ ,  $[I]$  — нормированные значения напряжения прикосновения и токов, проходящих через тело человека, принимаемые по табл. 2.7—2.8 для рассматриваемых условий.

При измерении напряжений прикосновения и токов сопротивление растеканию тока с ног человека в землю должно моделироваться металлической плоской пластиной с площадью контактной поверхности  $625 \text{ см}^2$ . Прижим пластины к земле должен создаваться массой не менее 50 кг.

Измерения должны производиться для условий, соответствующих наибольшим значениям напряжений прикосновения и токов, проходящих через тело человека.

\* Напряжения прикосновения и токи для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (более  $25^\circ\text{C}$ ) и влажности (относительная влажность более 75 %), должны быть уменьшены в 3 раза.

Т а б л и ц а 2.7. Нормированные значения напряжения прикосновения и токов, проходящих через человека, для электроустановок напряжением до 1 кВ с заземленной и изолированной нейтралью и выше 1 кВ с изолированной нейтралью

Род тока	Нормируемая величина	Продолжительность 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	1—5
Переменный ток, 50 Гц	$I$ , мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
	$U$ , В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Переменный ток, 400 Гц	$I$ , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
	$U$ , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
Постоянный ток	$I$ , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
	$U$ , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
Выпрямленный двухполупериодный ток	$I$ , мА	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
	$U$ , В	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
Выпрямленный однополупериодный ток	$I$ , мА	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—
	$U$ , В	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—

Т а б л и ц а 2.8. Нормированные значения напряжения прикосновения и токов, проходящих через человека, для электроустановок напряжением выше 1 кВ частотой 50 Гц с эффективно заземленной нейтралью

Нормируемая величина	Продолжительность 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	1—5
$I$ , мА	650	500	400	325	250	200	160	130	110	105	100	50/ $t$
$U$ , В	650	500	400	325	250	200	160	130	110	105	100	50/ $t$

### Список литературы к разделу II

1. Biegelmeier G. New Knowledge on the Impedance of the Human Body. Electrical Shock Safety Criteria. Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria. Pergamon Press. New York. Oxford. Toronto. Sydney. Paris. Frankfurt. 1985.
2. Ferris L. P. King B. G., Spence P. W., Williams H. B. Effect of electric shock on the heart. *El. Eng.*, vol. 55, 1936.
3. Гурвич Н. Л. Фибрилляция и дефибрилляция сердца. М., Мед. изд. 1957.
4. Kouwenhoven W. B., Knickerbocker G. G., Chesnut R. W., Milnor E. R., Sass D. J., A-C Shocks on varying parameters affecting the hearts. *AIEE Trans. Part 1*, vol. 78, 1959.
5. Dalziel C. F. Threshold 60-Cycle Fibrillating Currents. *Pow. App. And Syst.*, Oct., 1960.
6. Киселев А. П. Пороговые значения безопасного тока промышленной частоты. Труды МИИТ. вып. 171. М. Трансжелдориздат., 1963.
7. Dalziel C. F. Temporary Paralysis Following «Freezing» to a Wire. *Pow. App. And Syst.*, June, 1960.
8. Dalziel C. F. Threshold of Perception Currents. *Trans. AIEE.*, vol. 73, pt III-B, aug., 1954.
9. Biegelmeier G. Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere. Berlin und Offenbach: VDE-Verlag, 1986.
10. Манойлов В. Е. Исследование особенностей электропроводности тела человека. *Электричество*, 1963 № 11.
11. Карякин Р. Н. Критерии безопасности заземлений устройств электрической тяги переменного тока — Вестник ВНИИ железнодорож. транс., 1966, № 2.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1980.
13. Богусевич М. С., Власов С. П., Гурвич Н. Л., Сибаров Ю. Г., Сколотнев Н. Н., Табак В. Я., Шишкин Н. Ф., Ягудаев Б. М. Первичные критерии электробезопасности при кратковременных воздействиях токов промышленной частоты. *Электричество*, № 5, 1975.



14. Karyakin R. N., Yagudaev B. M., Vlasov S. P. Safety Criteria — a Basis for Choosing the Parameters of Grounding Arrangements of 50 Hz Industrial Electrical Installations. Electrical Shock Safety Criteria. Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria. Pergamon Press. New York, Oxford, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 1985.
15. Karyakin R. Effects of electrical current on the human body. Proceedings 10th International Symposium of the International Section of the ISSA for the Prevention of Occupational Risks Due to Electricity. Wien. 1990.
16. Янке Е., Энде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М. Наука, 1968.
17. Карякин Р. Н. Научные основы концепции электробезопасности электроустановок жилых зданий — Промышленная энергетика, 1995 № 5.
18. Biegelmeier G., Kiefer G., Krefter K. H. Schutz in elektrischen Anlagen. Bd. I. Gefahren durch den elektrischen Strom. VDE — Verlag GMBH. Berlin. Offenbach 1996.
19. Карякин Р. Н. Научные основы концепции электробезопасности промышленных электроустановок. Промышленная энергетика, № 7, 1997.
20. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
21. IEC Technical Report 479-1. Effects of current on human beings and livestock. Part 1; General aspects. Third edition. 1994-09.
22. IEC Report 479-2. Effects of current passing through the human body. Part 2. Special aspects. Chapter 6. Effects of unidirectional single impulse currents of short duration. 1987.
23. ГОСТ Р 50571.3-94 (МЭК 364-4-41-92). Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током.
24. Карякин Р. Н. Нормативные основы устройства электроустановок. Изд-во «Энергосервис». М. 1998.
25. Карякин Р. Н. Концепция электробезопасности электроустановок. Промышленная энергетика, № 5, 1998.