

Проектные и научно-исследовательские разработки

УДК 616-001.21/22

ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ КРИТЕРИЕВ И НОРМ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Канд. техн. наук Б. М. ЯГУДАЕВ

Институт горного дела им. А. А. Скочинского

Канд. техн. наук С. П. ВЛАСОВ

Московский институт инженеров железнодорожного транспорта

Доктор мед. наук Н. Л. ГУРВИЧ

Лаборатория экспериментальной физиологии по оживлению организма АМН СССР

Разработка критериев и научно обоснованных норм допустимых токов через тело человека является одной из наиболее важных и сложных задач обеспечения безопасности применения электроэнергии в различных отраслях народного хозяйства. Эта задача решается на основе экспериментальных исследований с использованием результатов анализа несчастных случаев.

К настоящему времени в нашей стране разработаны первичные критерии электробезопасности [Л. 1, 2]. Комиссией по электробезопасности Научного совета по проблеме «Охрана труда» ГКНТ СМ СССР и ВЦСПС подготовлен проект «Временных норм допустимых напряжений прикосновения и токов через тело человека» [Л. 3]. Эти нормы официально не утверждены, однако успешно применяются в ряде отраслей промышленности для выбора параметров средств защитного отключения. Соответствующие критерии и нормы сформулированы и за рубежом [Л. 4, 6]. Разработка их стала возможной благодаря фундаментальным работам [Л. 1, 4—6, 11], в которых заложены основы экспериментального исследования электротравм. Эти работы объединяет единство в подходе и обосновании наиболее важных, принципиальных методических положений разработки критериев и норм электробезопасности. Однако многие авторы проводят эксперименты по собственным методикам, не учитывающим основных моментов и особенностей подобных исследований, поэтому рекомендуемые ими данные трудно сопоставимы. Некоторые исследователи исходят из различных, порою субъективных критериев оценки опасности электрического тока, не применяют при обработке экспериментальных данных широко известные методы теории вероятностей и математической статистики.

Причина указанного положения заключается в отсутствии системного подхода к тесно связанным между собой основным принципам разработки критериев и норм электробезопасности. Кроме того, методы инже-

нерного нормирования допустимых для человека токов и напряжений разработаны недостаточно полно, что приводит к односторонним, а иногда ошибочным оценкам при выборе и расчете технических средств защиты людей от поражения током. В связи с этим авторы, не претендуя на оригинальность отдельных положений, считают необходимым на основе критического анализа и обобщения основных исследований осветить взаимосвязь наиболее важных методологических принципов разработки критериев и норм электробезопасности.

Для разработки норм допустимых для человека токов и напряжений необходимо последовательно решить следующие вопросы: выбрать критерии оценки опасности электрического тока, модель для экспериментальных исследований, а также методики экспериментов, обработки опытных данных, инженерного нормирования допустимых для человека значений токов и напряжений.

Выбор критериев оценки опасности электрического тока. Принципы выбора критериев являются основополагающими. Указанные критерии должны достаточно объективно отражать единство качественной и количественной оценки действия электрического тока на организм человека. Так, если качество ответной реакции организма на действие тока (например, судорожные сокращения мышц, фибрилляция сердца) отражает ее физиологическую сторону, то количественным мерилем электрического тока, вызывающего появление этой физиологической реакции, может служить определенная физическая величина — пороговое значение тока, установленное экспериментально. Очевидно, только качественное различие ответных физиологических реакций позволяет регистрировать соответствующие им пороговые значения токов (на границе перехода одной ответной реакции в качественно другую). Отсюда вытекает первый важный принцип выбора критериев оценки опасности электрического тока: ответные физиологиче-

ские реакции, положенные в основу критериев, должны четко фиксироваться и давать возможность измерять соответствующие им пороговые значения токов.

С ростом электрического тока через тело человека ответные реакции организма претерпевают три качественных изменения: реакция ощущения переходит в реакцию неотпускания, а последняя — в фибрилляцию сердца. В нашей стране А. П. Киселевым и Р. Н. Карякиным предложены три классификационных признака, соответствующие трем качественно различным ответным реакциям организма человека: порог неощущаемого тока (первый критерий), порог тока, не вызывающего судорогу (второй критерий) и порог нефибрилляционного тока (третий критерий). По мере роста тока число и тяжесть ответных нежелательных реакций человека непрерывно возрастают (необязательно в прямой зависимости). При определенных условиях они могут привести к устойчивым изменениям различных функций организма. Общий характер зависимости степени опасности ответных реакций f в организме человека от тока I при постоянной длительности воздействия можно выразить графически¹ (см. рисунок).

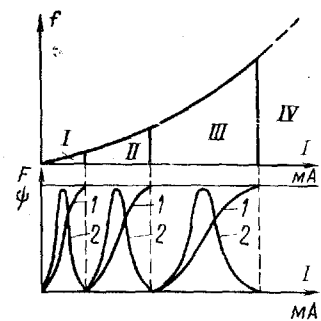
Анализ случаев гибели людей и экспериментальных данных [Л. 8] показал, что даже незначительный ток (порядка 10 мкА) при определенных условиях способен вызывать ответные реакции, не исключаяющие и возникновение различного рода функциональных изменений в организме. Таким образом, абсолютно безопасного для человека тока практически не существует. Это свидетельствует об условности критериев электробезопасности и о необходимости идти по единственно возможному пути — установлению количественной меры допустимости возникновения соответствующих ответных реакций. При этом возникает вопрос, на какой из указанных критериев безопасности нужно ориентироваться.

Часто выдвигается следующее требование: выбор средств защиты на основе обеспечивающих наибольшую безопасность критериев оценки пороговых значений отпускающего и даже неощутимого токов. Однако по техническим и экономическим соображениям, а также вследствие разнообразия специфических условий применения электричества требуется дифференцированный подход к выбору критерия. Так, в сетях горнодобывающих предприятий и железных дорог большинство случаев прикосновения к токоведущим частям сопровождается токами, которые в несколько раз превышают отпускающие. При ограничении защитными устройствами времени воздействия таких токов до долей секунды необходимо сделать так, чтобы эти кратковременные токи не были смертельными. Здесь целесообразно использовать третий критерий — порог нефибрилляционного тока.

Следует заметить, что правомочность применения указанных критериев признается большинством специалистов в нашей стране и за рубежом. Таким образом,

Характер зависимости степени опасности ответных реакций f в организме от воздействующего тока.

I, II, III, IV — области ощущения, неотпускания, фибрилляции сердца и электрофизического воздействия; 1 и 2 — функции распределения $F(I)$ и плотности вероятностей $\psi(I)$ ощущаемых, неотпускающих или фибрилляционных токов.



вторым важным принципом выбора критериев оценки опасности электрического тока является дифференцированный подход к выбору уровня обеспечения безопасности различных электроустановок с учетом технических и экономических факторов.

Выбор модели для экспериментальных исследований. Вид модели определяется прежде всего исследуемой ответной реакцией. Так, нахождение количественных характеристик критериев электробезопасности по реакциям ощущения и отпускания должно производиться непосредственно на людях, а пороговые значения фибрилляционных токов следует определять по результатам опытов, проведенных на крупных животных. Здесь наиболее важным моментом является качественное сходство ответных реакций на воздействие тока у животных и человека. Поскольку универсальных моделей не существует, то по каждой отдельной реакции необходимо тщательно выбирать определенный вид животных. Считается достаточно обоснованным, что для изучения фибрилляции сердца наиболее подходят крупные животные, а для изучения действия тока на органы дыхания — мелкие грызуны. С выбором моделирующих животных тесно связан также вопрос о применении наркоза, который позволяет устранить беспокойство животных в процессе эксперимента. Исследования [Л. 5, 6, 11] показали, что правильно подобранный по виду и глубине наркоз практически не влияет на порог фибрилляционного тока.

При исследовании пороговых значений фибрилляционных токов на животных необходим пересчет полученных данных. Методика пересчета [Л. 5] основана на наличии закономерной корреляционной связи между пороговым значением фибрилляционного тока и массой тела животного. Допустимый для человека ток $I_{доп}$ определяют как произведение тока I_B , соответствующего принятой вероятности поражения (берется из эмпирических функций распределения пороговых значений фибрилляционного тока), на коэффициент чувствительности к току экспериментального животного со средней массой G_{cp} при данной длительности воздействия. Значение коэффициента пересчета (чувствительности) находят по формуле

$$k_{п} = \frac{I_{расч}(G_{ч}) k_{в}}{I_{B}(G_{cp})}, \quad (1)$$

где $I_{расч}(G_{ч})$ — расчетное значение порогового фибрилляционного тока при массе тела, равной массе чело-

¹ Показан качественный характер зависимости. Количественно величину f можно рассматривать как вероятность наступления неблагоприятного исхода при соответствующей ответной реакции.

века (берется из корреляционной зависимости порогового фибрилляционного тока от массы тела млекопитающих, включая и человека); k_b — коэффициент вероятности.

Анализ исследований [Л. 1, 2, 5] показал, что при массе человека 50 кг и массе подопытных собак 15—17 кг коэффициент пересчета почти не зависит от длительности электрического воздействия (в пределах 0,003—3 с) и в среднем равен 2,5.

Методика экспериментов. Методика экспериментального определения пороговых значений неощущаемого, неотпускающего и нефибрилляционного токов разработана достаточно полно [Л. 1, 2, 4, 6]. Исследования показывают, что при одних и тех же неизменных и достаточно жестких условиях эксперимента наблюдается статистический характер возникновения реакций ощущения, отпущения или фибрилляции. Это обусловлено как различием индивидуальной чувствительности моделей к воздействию тока, так и влиянием большого числа случайных и трудноучитываемых факторов. Измеряемые при этом пороговые значения необходимо рассматривать как случайные величины, поэтому наиболее принципиальным моментом методики экспериментов является обязательное определение количества опытов, обеспечивающего заданную надежность и точность результатов.

Особенности методики математической обработки опытных данных. При статистическом характере возникновения ответных реакций для объективной оценки опасности воздействия тока на живой организм необходимо обрабатывать опытные данные с применением методов теории вероятностей и математической статистики. Совокупность результатов представляют в виде статистических (интегральных) распределений вероятности наступления какой-либо реакции² в зависимости от значения воздействующего тока и длительности воздействия. Отношение числа поражений к числу опытов $F_n(I_i)$ при ограниченном количестве опытов принимают равным вероятности поражения. Опытные точки на интегральной кривой распределения представляют собой упорядоченные значения пороговых токов и располагаются на ней согласно выражению

$$F_n(I_i) = \frac{i - 1/2}{n}, \quad (2)$$

где i — номер точки в порядке возрастания значения тока в вариационном ряду; n — количество опытных точек.

На вероятностной сетке, построенной для рассматриваемого распределения, интегральная функция представляет собой прямую линию; если опытные точки на графике расположены вблизи этой линии, эмпирическое распределение соответствует выбранному теоретическому закону.

Анализ экспериментальных данных о воздействиях фибрилляционных токов частотой 50—60 Гц показывает, что при воздействии тока в течение 0,2—3 с

² Для удобства изложения в дальнейшем рассматривается одна из опасных ответных реакций — возникновение фибрилляции сердца.

эмпирические результаты удовлетворительно аппроксимируются нормальным законом распределения. При времени воздействия менее 0,2 с более приемлемой оказывается модель логарифмически-нормального распределения.

Установив закон распределения и его параметры, можно при заданном количестве опытов, используя левую границу доверительного интервала для математического ожидания тока, определить значение тока при заданной вероятности. Так, для нормального распределения при ограниченном количестве опытов ($n \leq 35$) значение тока, соответствующее любой заданной вероятности (в области ниже 50%), можно найти из выражения

$$I_b^n = I_{50\%} - \sigma \left(\beta_n + \frac{\beta_c}{\sqrt{n}} \right), \quad (3)$$

где $I_{50\%}$ и σ — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение тока, мА; β_n — показатель доверительности для нормального распределения при заданной доверительной вероятности p ; β_c — показатель доверительности Стьюдента при заданной надежности оценки выборочной средней и заданном числе опытов.

При $n > 35$ показатели β_c и β_n примерно равны, и можно пользоваться выражением

$$I_b = I_{50\%} - \beta_n \sigma (1 + 1/\sqrt{n}). \quad (4)$$

При надежности, равной 0,95, и количестве опытов $n \leq 35$ выражение (3) с достаточной точностью можно заменить упрощенным выражением

$$I_b = I_{50\%} - \beta_{cp} \sigma. \quad (5)$$

Для логарифмически-нормального распределения на основании выражений (3) и (5) можно записать [Л. 2]:

$$I_b = e^{\bar{I}_{50\%} (1 - \beta_{cp} / \bar{\sigma}_{50\%})}, \quad (6)$$

где $\bar{I}_{50\%} = \ln I_{50\%}$ и $\bar{\sigma} = \ln \sigma$ — параметры логарифмически-нормального распределения.

Таким образом, статистический метод оценки по вероятности возникновения ответных реакций позволяет с достаточно высокой точностью судить о степени опасности действия электрического тока на организм и обоснованно перейти к нормированию.

Принципы инженерного нормирования допустимых для человека токов и напряжений вытекают из прикладного характера решаемых задач — выбора параметров различных технических средств защиты от поражения электрическим током и оценки эффективности их действия. Основная идея инженерного нормирования состоит в установлении количественных мерил допустимости возникновения опасных ответных реакций под действием электрического тока на основе вероятностного представления совокупности факторов (включая параметры первичных критериев электробезопасности), приводящих к электропоражению человека. Такими мерилami могут служить численные значения токов, соответствующие определенным численным значениям допустимой вероятности $P'_n(I, t)$ появления той или иной опасной ответной реакции при попадании человека под ток I в течение времени воздействия t .

Величину допустимой вероятности поражения током невозможно выбрать математически, так как неясно, насколько мала должна быть вероятность события для того, чтобы считать его практически невозможным. Ввиду условности этого положения допустимую вероятность поражения принимают в зависимости от требований к уровню безопасности эксплуатации электрооборудования. Количественным показателем этого уровня является вероятность безопасной работы человека P_6 за данный период времени [Л. 9, 10]. Последний должен определяться главным образом техническим уровнем эксплуатируемого электрооборудования и возможностями современных средств защиты.

Рекомендации «абсолютно» безопасных значений токов без указания допустимой вероятности не отражают реальной меры опасности электрического тока, не позволяют правильно выбрать параметры и количественно оценить эффективность защит, поэтому не могут быть использованы на практике. В США [Л. 4] в качестве допустимых по условиям отсутствия фибрилляции принимаются токи, вероятность поражения при которых не превышает 0,5%. В нашей стране [Л. 1] предложен более высокий уровень обеспечения безопасности — условная вероятность электропоражения при попадании под ток в первичных критериях принята равной 0,14%.

Следует отметить, что при оценке эффективности защиты с параметрами, выбранными по первичным критериям, нельзя рассчитывать именно на данную вероятность и ожидать соответствующий ей уровень безопасности. В реальных условиях эксплуатации электрических сетей и установок эта защита всегда обеспечивает значительно более высокий уровень безопасности, чем при $P'_n(I, t) = 0,014$, так как первичные критерии получены экспериментально исходя из наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств при электротравме без учета объективно существующих и влияющих на опасность поражения в реальной обстановке случайных факторов. Здесь как бы смоделированы условия, когда вероятность их появления равна единице. С методической точки зрения подобный прием получения первичных критериев вполне оправдан и удобен для последующего нормирования параметров защиты и уровня безопасности в конкретных условиях эксплуатации. Вероятность появления группы совместных и независимых случайных факторов, влияющих на общий уровень безопасности в сети с защитой, выбранной по первичным критериям, можно выразить в виде произведения:

$$P''_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (7)$$

где P_i — вероятность появления i -го фактора в реальных условиях эксплуатации конкретной электроустановки.

При соблюдении выражения (7) вероятность смертельного поражения человека электрическим током в этой сети на основании теоремы умножения вероят-

ностей записывается следующим образом:

$$P_n = \prod_{i=1}^n P_i P'_n(I, t) = P''_n P'_n(I, t). \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой комплексный параметр условной опасности электропоражения. На его основе можно разработать конкретные требования к средствам защиты и наиболее точно подойти к оценке их эффективности. Пользуясь известным методом нормирования [Л. 10], можно, например, показать, что при сокращении времени срабатывания защитной аппаратуры от 0,1 до 0,01 с вероятность поражения человека в электрической сети частотой 50 Гц (только при учете вероятности совпадения тока с уязвимой фазой кардиоцикла) снижается почти в 30 раз. При сохранении единой вероятности поражения $1,4 \cdot 10^{-3}$ при попадании под ток в электрической сети, снабженной указанной защитой, значение допустимого для организма тока увеличивается в 2,8 раза по сравнению с токами, допустимыми по первичным критериям. Этот пример показывает, что первичные критерии электробезопасности необходимо рассматривать лишь как общую физиологическую основу для инженерного нормирования параметров защит.

Для ограничения нежелательных последствий воздействия тока на организм человека целесообразно уменьшать уровень допустимой вероятности появления этих последствий (по сравнению с принятым) на основе существующих критериев электробезопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев А. П., Власов С. П. К вопросу о критериях электробезопасности. — Промышленная энергетика, 1967, № 5.
2. Первичные критерии электробезопасности при кратковременных воздействиях токов промышленной частоты/ Богушевич М. С., Власов С. П., Гурвич Н. А. и др. — Электричество, 1975, № 5.
3. Долин П. А., Сибаров Ю. Г. О проекте временных норм допустимых напряжений прикосновения и токов через тело человека. — Промышленная энергетика, 1974, № 9.
4. Dalziel C. F., Lee W. R. Lethal Electric Currents. — IEEE Spectrum, 1968, № 2.
5. Гурвич Н. Л. Фибрилляция и дефибрилляция сердца. М.: Медгиз, 1957.
6. Osipka P. Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. — Elektromedizin, 1963, № 8.
7. Киселев А. П., Власов С. П. О критериях электробезопасности. — «Промышленная энергетика», 1971, № 4.
8. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности. Л.: Энергия, 1976.
9. Якобс А. И., Королев С. Г., Коструба С. И. Оценка уровня электробезопасности и новые нормы на характеристики заземляющих устройств электроустановок с большими токами замыкания на землю. — Электричество, 1975, № 2.
10. Шишкин Н. Ф., Ягудаев Б. М., Власов С. П. Критерии нормирования допустимого времени срабатывания защитно-отключающей аппаратуры в электрических сетях горных предприятий. — Безопасность труда в промышленности, 1975, № 11.
11. Effect of Electric on the Heart/ Ferris L. P., King B. G., Spense P. W., Williams H. B. — Electric engineering, 1936, № 5.