

После этого конденсатор разряжается неизменным током:

$$u_C(\gamma_2) - \frac{x_C}{x} i_{\Sigma} \theta = \sin(\psi + \gamma_2 + \theta). \quad (25)$$

Время α_0 , предоставляемое для восстановления управляемых свойств тиристора, при этом составит:

$$\alpha_0 = \frac{x}{x_C} \frac{u_C(\gamma_2) - \sin(\psi + \gamma_2 + \alpha_0)}{i_{\Sigma}}. \quad (26)$$

Для приближенных расчетов (ввиду малости угла α_0), положив $\sin(\psi + \gamma_2 + \alpha_0) \approx \sin(\psi + \frac{\gamma_2}{2})$ и учитывая (23) -- (25), можно записать:

$$\alpha_0 = \sqrt{\left[\frac{1}{\sin \omega_0 \gamma_2} \right]^2 - \frac{x}{x_C}}, \quad (27)$$

где

$$\sin \omega_0 \gamma_2 = \frac{\omega_0 i_{\Sigma}}{u_C(0) - \sin(\psi + \frac{\gamma_2}{2})}. \quad (28)$$

Произведя расчеты по формулам (7), (9), (23) и (28), для одних и тех же значений I_{Σ} , α_0 и $U_C(0)$, можно убедиться, что в схеме рис. 3,б требуется коммутирующий конденсатор большей емкости, чем в схеме рис. 3,а.

Некоторым недостатком обеих схем является их нестабильная работа в зоне малых токов нагрузки. Следует также отметить, что в подобных схемах, по сравнению с непосредственным подключением конденсаторов или синхронных компенсаторов, мощность коммутирующего конденсатора, определенная согласно (10), не намного отличается от максимальной мощности, необходимой для компенсации реактивной составляющей 1-й гармоники сетевого тока.

Безусловно преимущество схем искусственной коммутации при наличии индуктивностей контак-

ной сети и преобразовательного трансформатора заключается в возможности очень быстро регулировать реактивную мощность и, в конечном итоге, приблизить ее потребление до нуля во всем диапазоне регулирования.

Схемы рис. 3,а и б позволяют в номинальном режиме теоретически получить максимальное значение коэффициентов мощности 0,975 в однофазной сети (см. рис. 3,в, пунктирную кривую тока и осциллограмму рис. 5,в).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schaefer Blind und scheinleistung — sverhalten auschnittgesteuerterelektrischer Triebfahrzeuge im streckendienst.— «Elektrische Bahnen», 1971, Н. 8.
2. Метелкин Б. А. Двухступенчатая искусственная коммутация в однофазной мостовой схеме выпрямления.— «Электротехника», 1967, № 3.
3. Чиженко И. М., Недзельский С. И. Улучшение коэффициента мощности преобразователей однофазного тока при регулировании напряжения сетками.— «Изв. Киевского политехнического института», 1957, т. XXVI.
4. Кучма К. Г. Повышение надежности и коэффициента мощности электровозов переменного тока.— «Электротехника», 1966, № 10.
5. Абрамов А. Н. Об искусственной коммутации тока двухполупериодного инвертера с нулевым выводом.— «Электротехника», 1964, № 4.
6. Карибов С. И. и др. Плавное регулирование однофазного выпрямленного напряжения с высокими значениями коэффициента мощности.— «Устройства преобразовательной техники». Труды конференции. Киев, 1968, вып. 3.
7. Mauersberger Chr. Ein pulsgesteuerter Stromrichter in einphasenbruckenschaltung.— «Elektrie», 1967, N 10.
8. Schulze M. Der Pulsleichrichter, ein einfaches stelliglied für Gleichstromantriebe im Einrichtungsbetrieb.— «Elektrie», 1968, № 11.
9. Сандлер А. С., Гусяцкий Ю. М., Щукин Г. А. Импульсные регуляторы напряжения на тиристорах.— «Электричество», 1966, № 7.
10. Минов Д. К., Карибов С. И. Интегральный способ оценки коэффициента мощности. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1966—1967 гг. Подсекция «Электрический транспорт», труды МЭИ.

[13.5.1974]



УДК 616—001.21:22

Первичные критерии электробезопасности при кратковременных воздействиях токов промышленной частоты

Врач БОГУШЕВИЧ М. С., канд. техн. наук ВЛАСОВ С. П.,
доктор мед. наук ГУРВИЧ Н. Л., канд. техн. наук СИБАРОВ Ю. Г.,
инж. СКОЛОТНЕВ Н. Н., канд. мед. наук ТАБАК В. Я.,
доктор техн. наук ШИШКИН Н. Ф., инж. ЯГУДАЕВ Б. М.
ЛЭФ АМН СССР, ИГД им. А. А. Скочинского, МИИТ

Широкое применение электрификации и рост энерговооруженности труда во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве, на транспорте и в строительстве ставят задачу создания более совершенных, быстродействующих защитно-отключающих средств от поражения электрическим током, новых методов расчета и нормирования заземлений и других мероприятий. Необходимость в таких разработках вызывается также тем, что в последнее время наблюдается непрерывная тенденция к повышению рабочих напряжений электропотребителей. Все это определяет необходимость проведения исследований по установлению допустимых для че-

ловека токов промышленной частоты при длительности воздействия менее 0,2 сек.

Подобные исследования представляют собой сложную задачу как в инженерно-техническом, так и медицинском отношении. Решение ее требует совместной работы различных специалистов. К настоящему времени накоплено достаточное количество как экспериментальных данных, полученных на моделирующих животных [Л. 1—4 и др.], так и статистических данных случаев электропоражения людей [Л. 5 и 10], свидетельствующих о том, что при воздействиях переменного электрического тока опасность поражения проявляется прежде всего в нару-

шении работы сердца — возникновении фибрилляции. Поэтому установление допустимых для человека токов при кратковременных воздействиях — первичных критериев электробезопасности — основывается на определении наибольших значений токов, действие которых с достаточно высокой вероятностью не приводит к возникновению фибрилляции сердца.

У нас в стране в качестве первичных критериев электробезопасности принимаются токи, при которых вероятность возникновения фибрилляции P_f не превышает 0,14% [Л. 11]. В других странах, например в США, по предложению [Л. 5] принята вероятность 0,5%. Статья посвящена определению первичных критериев электробезопасности при кратковременных воздействиях электрического тока в интервале от 0,01 до 0,1 сек.

Экспериментальное определение смертельно поражающих токов проводилось на подопытных собаках в Лаборатории экспериментальной физиологии АМН СССР. Выбор собак в качестве объекта для моделирования при изучении «сердечного» механизма смерти обусловлен, прежде всего, качественным сходством нарушений, происходящих под влиянием электрического тока в организме животного и человека [Л. 1].

Как известно, уязвимость сердца в различные периоды его деятельности неодинакова. Для определения минимальных кратковременно воздействующих токов, приводящих к возникновению фибрилляции сердца, необходимо наносить раздражение в раннюю, т. е. наиболее чувствительную к действию тока фазу T кардиоцикла. Поэтому для получения достоверных результатов осуществлялась кардиосинхронизация.

Опытные данные [Л. 1—10 и др.] позволяют считать установленным, что порог фибрилляции сердца животного не изменяется от многократных (повторных) воздействий на организм кратковременных импульсов переменного тока. Однако различия в индивидуальной чувствительности подопытных животных к электрическому току, обуславливающие статистический характер возникновения фибрилляции сердца при неизменных условиях эксперимента, требуют проведения достаточно большого числа опытов. Благодаря оживлению с помощью дефибриллятора, после каждого смертельного поражения, появилась возможность многократного измерения порога фибрилляции для различных длительностей воздействия на одном и том же животном и значительного сокращения их количества.

Опыты проводились на 35 собаках обоего пола массой 8—28 кг. За 30—40 мин до начала опыта для устранения беспокойства животному подкожно вводили 2%-ный раствор пантапона из расчета 0,4 мг на 1 кг массы, далее в процессе эксперимента давался поверхностный барбитуровый наркоз. Исследованиями [Л. 1, 3 и 8] показано, что поверхностный наркоз не изменяет условий возникновения фибрилляции сердца.

Пороговое значение фибрилляционного тока определялось постепенным повышением значения тока в серии последовательных воздействий. В первом опыте каждой серии значение воздействующего тока устанавливалось заведомо ниже порогового

значения. Затем при каждом последующем воздействии значение тока увеличивалось на 5—10% до тех пор, пока не возникла фибрилляция сердца. Действительное пороговое значение тока $I_{п}$ находится между полученными опытным путем минимальным значением фибрилляционного тока $I_{min ф}$ и максимальным значением тока, не вызвавшим фибрилляцию $I_{max н.ф}$, т. е. $I_{max н.ф} < I_{п} < I_{min ф}$ и составляет примерно $I_{п} \approx 0,95 I_{min ф}$.

Исходя из требований методики исследований, с учетом указанных особенностей физиологического воздействия кратковременного тока на живой организм, авторами была разработана специальная аппаратура, позволяющая осуществлять:

воспроизведение необходимых значений и длительностей воздействующего напряжения (тока) в пределах:

$$U = 0-3 \text{ кВ}; t = 0,003-5 \text{ сек};$$

кардиосинхронизацию для нанесения воздействия в раннюю фазу;

оживление организма — электрическую дефибрилляцию;

автоматическую регистрацию параметров воздействия и электрокардиограммы (ЭКГ) животного.

В результате экспериментальных исследований получен большой статистический материал. Мате-

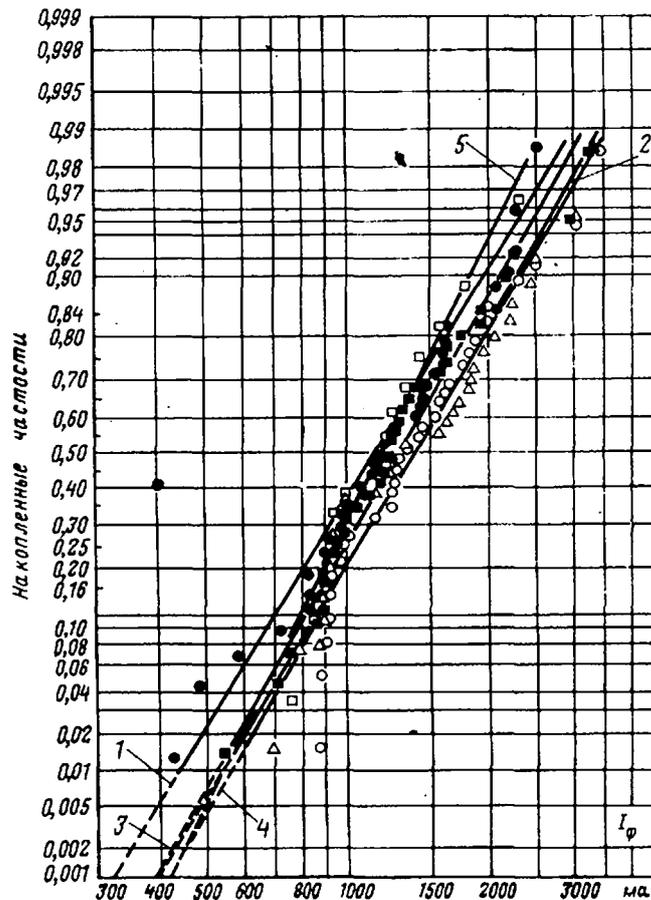


Рис. 1. Интегральные кривые распределения вероятности возникновения фибрилляции у животных для различных длительностей электрического воздействия.

1 — ● — 0,1 сек; 2 — △ — 0,05 сек; 3 — ■ — 0,03 сек; 4 — ○ — 0,02 сек; 5 — □ — 0,01 сек.

математическая обработка результатов показывает, что при кратковременных воздействиях (0,1 сек и менее) распределение пороговых значений фибрилляционного тока хорошо аппроксимируется логарифмически-нормальным законом.

На рис. 1 представлены интегральные кривые распределения вероятности возникновения фибрилляции у животных для длительностей электрического воздействия 0,1; 0,05; 0,03; 0,02 и 0,01 сек.

Значение тока, соответствующее любой требуемой вероятности возникновения фибрилляции $P\%$, с учетом количества опытов для логарифмически-нормального распределения можно определить по формуле:

$$I_{\Phi(P\%)} = e^{-\bar{T}_{50\%} \left(1 - \frac{\beta \bar{\sigma}}{I_{50\%}}\right)}, \text{ ма.} \quad (1)$$

где $\bar{T}_{50\%}$ — логарифм математического ожидания фибрилляционного тока; β — критерий Стьюдента, учитывающий ограниченное количество опытных точек при заданной вероятности; $\bar{\sigma}$ — среднеквадратичное отклонение логарифмов тока.

Определение допустимых токов при кратковременных воздействиях на живой организм проводилось с использованием коэффициента кратности фибрилляционного тока K_t . Коэффициент K_t для заданной вероятности $P\%$ возникновения фибрилляций показывает, во сколько раз значение тока, вызывающее фибрилляцию при кратковременном воздействии t больше тока при воздействии в 1—3 сек, и определяется по выражению:

$$K_t = \frac{I_{\Phi(P\%)} [\text{при } t]}{I_{\Phi(P\%)} [\text{при } t = 1-3 \text{ сек}]},$$

где $I_{\Phi(P\%)} [\text{при } t]$ и $I_{\Phi(P\%)} [\text{при } t = 1-3 \text{ сек}]$ — токи, вызывающие фибрилляцию с вероятностью ($P\%$) при длительности воздействия соответственно t и 1—3 сек.

Значения этих токов определялись по кривым, построенным на основании экспериментальных данных для каждой исследуемой длительности воздействия с учетом (1) при вероятности $P=0,14\%$. Ниже приведены значения коэффициента кратности K_t :

$t, \text{ сек}$	1—3	0,1	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01
K_t	1,00	9,2	10,2	10,3	11,0	11,0	10,4

Из приведенных данных следует, что в интервале от 0,08 до 0,01 коэффициент K_t остается практически неизменным, т. е. пороговое значение фибрилляционного тока не зависит от длительности его воздействия.

При расчетах и оценке уровня электробезопасности, особенно в зарубежной литературе, часто ссылаются на формулу Далзиела Ш., полученную путем статистической обработки экспериментальных данных Ферриса Л. [Л. 3] и Коувенховена В. [Л. 4]:

$$I = \frac{K}{\sqrt{t}}, \text{ ма,} \quad (2)$$

где I — действующее значение тока частотой 60 гц, ма; t — длительность воздействия 0,0083—5 сек; K — постоянный эмпирический коэффициент (в 1946—1960 гг. $K=165$; в 1968 г. $K=116$ [Л. 5]).

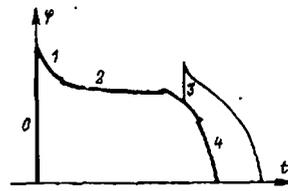


Рис. 2. Схема возникновения височередного возбуждения одиночного волокна под влиянием раздражающего тока.



Рис. 3. Нормальная электрокардиограмма человека (схема).

Известны также формулы Осипки П., Кеппе на С и Толаззи Г. вида $I=C/t$ для диапазона времени воздействия тока 50 гц от 0,1 до 1 сек.

В то же время проведенные нами экспериментальные исследования показали, что при раздражении сердца переменным током (50 гц) в раннюю фазу кардиоцикла пороговое значение тока, вызывающего фибрилляцию сердца, практически не изменяется при уменьшении длительности воздействия от 0,08 до 0,01 сек. Полученные результаты имеют физиологическое объяснение. Как известно, потенциал действия одиночного сердечного волокна имеет вид, представленный на рис. 2. Фаза 0 соответствует возбуждению волокна, а фазы 1, 2 и 3 — периоду восстановления возбудимости. В фазах 0, 1, 2 и частично 3 при воздействии внешнего раздражителя волокно невозбудимо. Электрокардиограмма (рис. 3) — есть результат суммирования потенциалов отдельных волокон всего сердца. При этом область зубца T соответствует фазе 3 одиночных волокон. Учитывая, что длительности потенциала действия различных групп волокон несколько различаются, то в момент нанесения раздражения не все сердце целиком, а лишь некоторая часть его волокон оказывается в состоянии, способном к развитию внеочередного возбуждения (экстрасистолы).

Возникновение фибрилляции желудочков обусловлено различной реакцией отдельных групп волокон на электрический раздражитель. Экстрасистола, являющаяся результатом воздействия 1/2 периода переменного тока пороговой силы, закономерно приводит к нарушению последовательности распространения возбуждения, которая свойственна сердцу в нормальных условиях, и, следовательно, к распаду его функциональной целостности — развитию фибрилляции. При раздражении сердца 4—5 периодами переменного тока также возникает фибрилляция желудочков. То обстоятельство, что пороговое значение тока не изменяется, свидетельствует об отсутствии эффекта суммирования раздражения по времени, т. е. решающим для развития фибрилляции является только первый раздражающий стимул, а применительно к нашим экспериментам — первый полупериод переменного тока. Последующие раздражения длительностью до 0,08—0,1 сек существенно не влияют на функциональное состояние сердца, поскольку все они попадают в фазу невозбудимости (рефрактерная фаза).

Возникает предположение, что «экстрасистола», вызванная первым полупериодом раздражающего

тока, укорачивается вследствие того; что реакция сердца на раздражение в фазу 3 носит характер так называемого местного ответа. На основании полученных результатов экспериментов длительность рефрактерного периода полученной экстрасистолы, по-видимому, близка к 0,08—0,1 сек. При воздействии переменного тока с длительностью, превышающей период невосбудимости сердца, порог фибрилляции снижается.

Значение допустимого для человека тока в зависимости от длительности воздействия и массы тела для любой заданной вероятности благополучного исхода $P_{н.ф}$ может быть определено по формуле

$$I_{P_{н.ф}}[\text{при } t, \text{ сек}] = I_{P_{н.ф}}[\text{при } t = 1 - 3 \text{ сек}] K_t, \quad (3)$$

где

$$I_{P_{н.ф}}[\text{при } t = 1 - 3 \text{ сек}] K_p I_p = K_p (3,76G + 30); \quad (4)$$

I_p — расчетное значение фибрилляционного тока в зависимости от массы тела G [Л. 2 и 6]; K_p — коэффициент вероятности (рассчитывается на основе интегральных кривых распределения вероятности фибрилляции у животных). При вероятности $P_{ф} = 50\%$ $K_p = 1$, а при $P_{ф} = 14\%$ $K_p = 0,33$; $P_{ф} = 1 - P_{н.ф}$.

Подставив в (4) значения K_p для $P_{н.ф} = 0,9986$, найдем значение допустимого тока для взрослого человека с минимальной массой $G = 50$ кг при воздействиях длительностью 1—3 сек:

$$I_{(0,9986)}[1-3 \text{ сек}] = 65 \text{ ма},$$

тогда согласно (3) значение допустимого тока в зависимости от длительности воздействия для принятой вероятности поражения и массы тела можно определить из выражения:

$$I_{(0,14\%)}[t, \text{ сек}] = 65 K_t. \quad (5)$$

Правомерность пересчета на человека опытных данных по воздействию кратковременного тока на животных с помощью эмпирической зависимости для расчетного фибрилляционного тока при воздействии 1—3 сек в зависимости от массы тела (G) установлена ранее исследованиями [Л. 1, 2, 5 и др.].

С учетом конкретных значений коэффициента K_t согласно выражению (5) получаем следующие значения допустимых токов в зависимости от длительности воздействия:

Длительность воздействия, сек	0,01—0,08	0,1	1,0
Допустимые токи, ма	670—710	600	65
Допустимые напряжения, в	670—710	600	65

Значения допустимых токов получены для пути тока руки — ноги. Для путей тока рука — рука и особенно нога — нога допустимые токи больше. Однако для обеспечения возможно большей электробезопасности целесообразно для всех указанных путей тока применять приведенные выше значения. Расчетное значение электрического сопротивления тела человека при токах 65—710 ма на основании отечественных и зарубежных исследований может быть принято равным 1000 ом. Получающиеся при этом значения допустимых напряжений на теле человека также приведены выше.

Выводы. При уменьшении длительности воздействия от 0,08 до 0,01 сек допустимые токи не изменяют своего значения и могут быть приняты равными 650 ма; при длительности же воздействия 0,1 сек — 500 ма. Приведенные результаты исследований авторы рассматривают как рекомендации по первичным критериям электробезопасности.

Рекомендуемые значения токов и напряжений не могут рассматриваться как обеспечивающие абсолютную безопасность, а принимаются в качестве практически приемлемых, т. е. допустимых с достаточно малой вероятностью смертельного поражения $P_{ф} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ в наиболее уязвимой к току фазе работы сердца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич Н. Л. Фибрилляция и дефибрилляция сердца. М., Медгиз, 1957.
2. Киселев А. П., Власов С. П. К вопросу о критериях электробезопасности. — «Промышленная энергетика», 1967, № 5.
3. Effect of Electrical Shock on the Heart. — «El. Eng.», 1936, May. Aut: Ferris L. P., King B. G., Spense P. W., Williams H. B.
4. A—S Shoks of Varying Parameters Affecting the Heart. — «Communication and electronics», N 2, 1959. Aut.: Kouwenhoven W. B., Knickerbocker G. G., Chesnut R. W., Milnor W. R., Sass D. J.
5. Dalziel C. F., Lee W. R. Lethal Electric Currents. — «IEEE Spectrum», 6, N 2, 1968, 44—50.
6. Киселев А. П. Пороговые значения безопасного тока промышленной частоты. — «Труды МИИТ», 1963, вып. 171.
7. Гурвич Н. Л., Акопян А. А., Жуков И. А. К вопросу о постоянстве величины поражающего электрического тока. — В сб.: Вопросы электропатологии и электротравматизма. Фрунзе, Изд. АН КиргССР, 1961, вып. 1.
8. Илипаев И. И. Некоторые новые данные по вопросу о фибрилляции сердца. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. мед. наук. Фрунзе, 1968.
9. Мищенко И. К. О порогах электрической фибрилляции сердца в условиях высокогорья. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. мед. наук. Фрунзе, 1963 (АН КиргССР).
10. Osipka P. Medtchnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen. Dissertation. Frankfurt, 1963.
11. Долин П. А., Сибаров Ю. Г. О проекте временных норм допустимых напряжений прикосновения и токов через тело человека. — «Промышленная энергетика», 1974, № 9.

[3.12.1974]

