

А.И. РЕВЯКИН
Б.И. КАШОЛКИН

**ЭЛЕКТРО-
БЕЗОПАСНОСТЬ
И ПРОТИВО-
ПОЖАРНАЯ
ЗАЩИТА
В ЭЛЕКТРО-
УСТАНОВКАХ**

А. И. РЕВЯКИН,
И. КАШОЛКИН

**ЭЛЕКТРО-
БЕЗОПАСНОСТЬ
И ПРОТИВОПОЖАРНАЯ
ЗАЩИТА
В ЭЛЕКТРО-
УСТАНОВКАХ**



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1980

ББК 31.29

Р 32

УДК [616.001.2÷614.84]:621.31.002.5

Р $\frac{30312-312}{051(01)-80}$ 111-89. 2302050060

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс характеризуется существенным повышением электровооруженности труда, и поэтому разработка электропожаробезопасных электроустановок, защитных мер и средств, исключающих случаи электротравматизма и пожаров от электроустановок на производстве и в быту приобретает первостепенное значение.

Вопросам электропожаробезопасности уделяется большое внимание. В условиях повсеместного использования электроэнергии особое значение приобретают автоматические меры защиты, которые предотвращают поражения человека электрическим током и аварийные режимы работы электроустановок либо обеспечивают безопасность при возникновении аварий.

В последние годы уделяется внимание работам по повышению эффективности мер предотвращения пожаров в электроустановках. Разработаны новые и пересмотрены действующие стандарты, регулирующие требования по снижению пожарной опасности электроустановок, разрабатываются мероприятия по обеспечению пожарной безопасности новых электротехнических устройств. Большое внимание уделяется специалистами проблеме техники безопасности при тушении пожаров в электроустановках и расследованию причин возникновения пожаров в них. Последнее имеет немаловажное значение для выяснения сущности пожарной опасности электроустановок и профилактики пожаров.

Вопросам обеспечения электропожаробезопасности электроустановок необходимо уделять внимание как на стадии проектирования, так и при их эксплуатации.

Цель данной книги—показать проблемы в области электропожаробезопасности и пути их решения. Первая часть книги посвящена автоматическим мерам защиты в электроустановках и их сочетанию с другими мерами по предотвращению электротравматизма. Большинство

работ, составивших содержание этой части, были выполнены в Московском энергетическом институте. Во второй части книги изложены сущность пожарной опасности электроустановок, пути ее снижения, а также вопросы, связанные с обеспечением электробезопасности при тушении пожаров.

Главы 1—3 написаны А. И. Ревякиным, а гл. 4—7 Б. И. Кашолкиным.

Авторы считают своим долгом выразить признательность доктору техн. наук, проф. П. А. Долину и канд. техн. наук, доц. В. Н. Черкасову, давшим ценные советы при рецензировании рукописи.

Замечания и пожелания, которые будут приняты с благодарностью, авторы просят сообщать в издательство «Энергия» по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

А. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Глава первая

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

1. ЭЛЕКТРОТРАВМЫ

Электротравма — травма, вызванная воздействием электрического тока или электрической дуги.

Современная теория, объясняя процессы, происходящие в теле человека при действии электрического тока, рассматривает их как рефлекторные, вызванные реакцией нервной системы в ответ на электрические раздражения. Одновременно электрический ток может оказать непосредственно тепловое и динамическое воздействия, вызвать электролизные процессы в организме.

Следует отметить, что действие электрического тока на организм человека еще не изучено полностью. Объясняется это сложностью процессов, происходящих в организме человека при протекании тока, и отсутствием хорошего аналога среди животных. Исследования на людях в диапазоне опасных токов по понятным причинам не проводятся. Несмотря на это, в настоящее время имеются необходимые данные для практического решения вопросов электробезопасности. Большая заслуга в этом принадлежит советским ученым [2].

Минимальное значение тока, раздражающее действие которого ощущается человеком, называется пороговым ощутимым током. Он зависит от рода тока, состояния человека, способа включения его в электрическую цепь и других факторов. У отдельных людей значение порогового ощутимого тока различно и характеризуется нормальным законом распределения. Для тока промыш-

ленной частоты (50 Гц), представляющего наибольший интерес для электроэнергетиков, среднее значение порогового осязательного тока составляет около 1 мА.

Если ток, протекающий через человека, превышает пороговый осязательный ток, то он вызывает более сильную реакцию организма. При токе 3—5 мА раздражающее действие ощущается кистью руки, при токе 6—10 мА мышцы руки уже непроизвольно сокращаются и возникает чувство сильной боли. При дальнейшем увеличении тока в мышцах возникают судороги и человек теряет способность контролировать действие руки, в част-

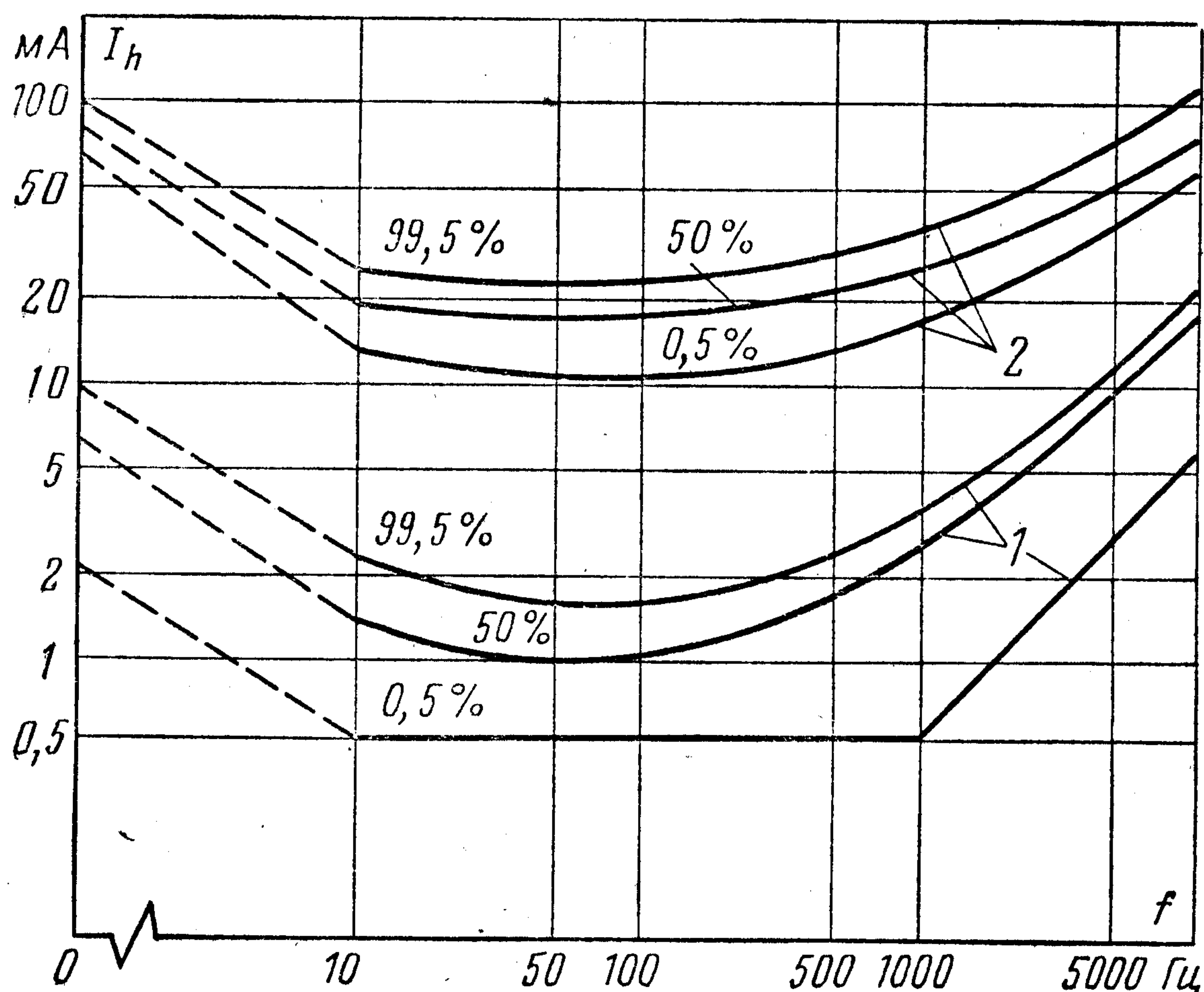


Рис. 1. Зависимость порогового осязательного и неотпускающего токов от частоты для различного количества людей, подвергнутых испытанию, для которых справедлива соответствующая кривая.

ности он не может самостоятельно освободиться от зажатого в руке проводника. Соответствующее минимальное значение тока называется пороговым неотпускающим током. Для различных людей значение этого тока также подчиняется нормальному закону распределения.

На рис. 1 приведены зависимости пороговых осязательного 1 и неотпускающего 2 токов от частоты. Числа указывают процент людей, подвергнутых испытанию, для которых справедлива соответствующая кривая. Эти зависимости приведены на основании публикации Международной электротехнической комиссии (МЭК) № 479.

На частотах выше 100 кГц действие тока переходит в чисто тепловое. При протекании через человека постоянного тока значение порогового ощутимого тока в несколько раз выше, чем при частоте 50 Гц, и ощущается как жжение.

Если электрический ток протекает через туловище человека, то он воздействует на органы дыхания и кровообращения. При токе 25—50 мА частотой 50 Гц возникает сильное сокращение дыхательных мышц грудной клетки, в результате чего может наступить смерть от удушья. Вероятность поражения органов дыхания в значительной степени зависит от длительности протекания тока.

Токи промышленной частоты выше 50 мА представляют опасность и для сердца. Эти токи могут вызвать фибрилляцию желудочков сердца, т. е. возникновение хаотического сокращения его желудочков, при этом нарушается насосная функция сердца и прекращается кровообращение. Опасность возникновения фибрилляции сердца в значительной степени определяется значением тока и временем его воздействия. При уменьшении времени воздействия тока на организм человека, как и значения этого тока, вероятность возникновения фибрилляции уменьшается.

Опасность фибрилляции заключается в том, что сердце человека не может самостоятельно возвратиться к нормальной работе, поэтому без квалифицированной помощи пораженный током погибает в течение нескольких минут от кислородного голодания. Погибают прежде всего наиболее высокоорганизованные клетки коры головного мозга. При обычной температуре они могут жить на одном гликолизе (т. е. без кислорода) не более 5—6 мин. После этого срока нейроны коры, как правило, гибнут, навсегда отнимая у человека способность мыслить. Следовательно, после клинической смерти, в течение которой путем реанимации можно оживить человека, наступает, если человеку не оказана необходимая помощь, интеллектуальная смерть, а затем, когда погибают остальные клетки, биологическая.

Кроме рассмотренных реакций организма электрический ток может вызвать паралич сердца, паралич дыхательного центра, повреждение нервной системы и ожоги.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Тело человека как элемент электрической цепи представляет собой сложное образование, состоящее из различных по своему строению тканей, электрические параметры которых колеблются в широких пределах. При рассмотрении вопросов электробезопасности важное значение имеет полное сопротивление тела человека, которое, как известно, является нелинейным, т. е. зависит от приложенного напряжения, длительности протекания тока и ряда физиологических факторов.

Полное сопротивление тела человека есть сумма сопротивлений живых тканей, расположенных на пути протекания тока. Поэтому

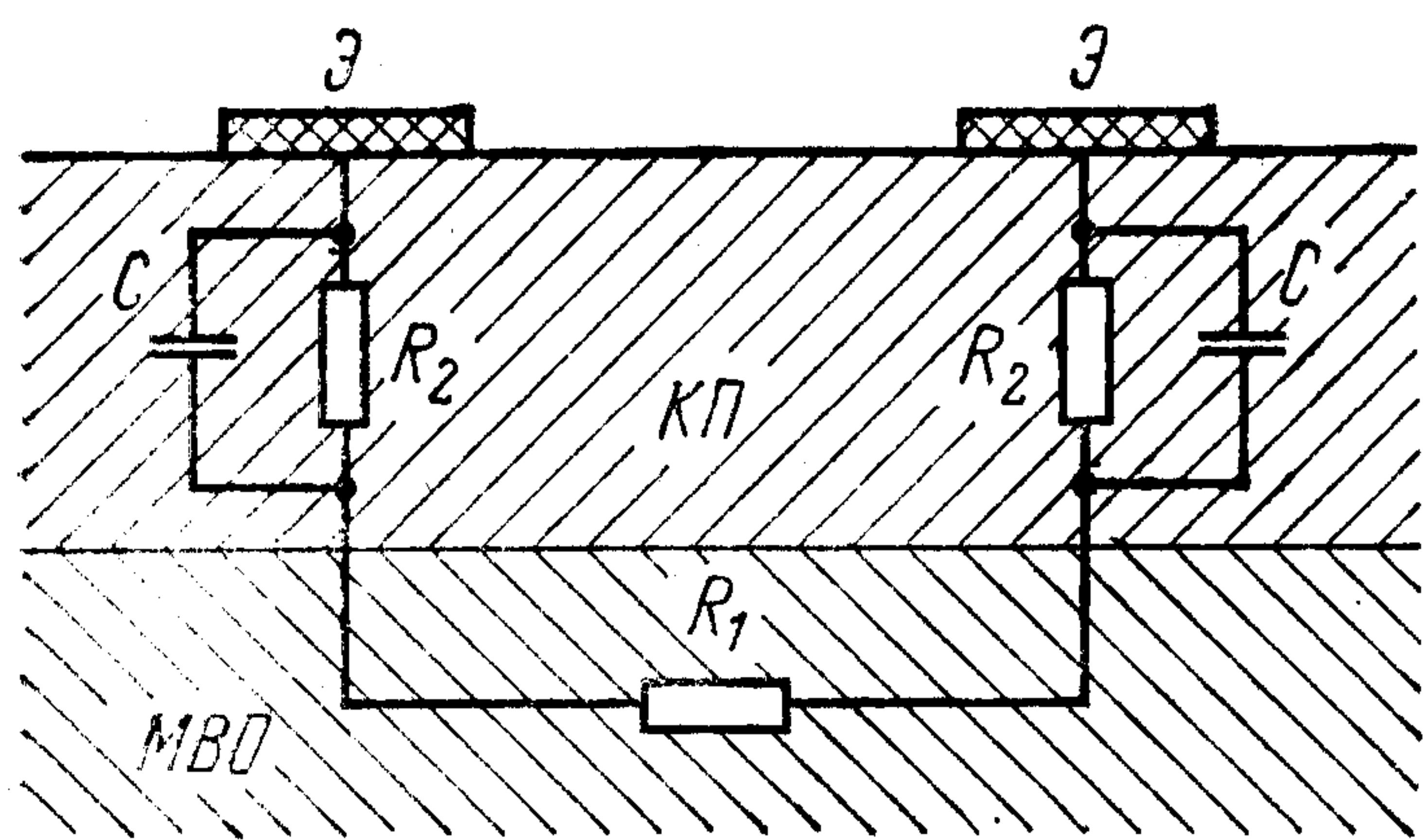


Рис. 2. Электрическая схема замещения тела человека.

Э — электроды внешней цепи; КП — кожный покров; МВО — мышцы внутренних органов.

оно зависит от мест контакта тела человека с элементами электрической цепи (электродами). В электробезопасности рассматриваются как характерные для электротравм три пути протекания тока: рука — рука, рука — ноги, нога — нога. Однако основным физиологическим фактором, определяющим величину полного сопротивления тела человека,

является состояние кожного покрова в цепи тока. Это объясняется тем, что удельное объемное сопротивление кожи на несколько порядков превышает этот параметр для мышечной ткани.

В простейшем случае тело человека можно представить схемой замещения, приведенной на рис. 2, где R_1 — сопротивление тканей внутренних органов; R_2 — сопротивление кожного покрова; C — емкость, обусловленная разницей сопротивлений отдельных участков пути (цепи) тока в теле человека.

В действительности электрическая схема замещения тела человека гораздо сложнее, так как сама по себе кожа имеет очень сложное строение и в ней есть ткани, которые между собой резко отличаются по своим физическим, химическим и биологическим свойствам. Наибольшими различиями обладают наружный слой (эпидермис), состоящий из мертвых клеток, заполненных

воздухом, и остальная часть кожи, содержащая живые клетки.

Изложенный материал отражает лишь качественную сторону рассматриваемого вопроса и объясняет трудности определения количественной, столь необходимой в электробезопасности оценки полного сопротивления тела человека.

Большинство авторов предлагают в расчетах сопротивление тела человека принимать равным 1000 Ом. Объясняется это тем, что при повреждении кожного покрова сопротивление тела человека определяется сопротивлением внутренних органов, которое примерно равно названному значению. Там, где расчет по наименьшему сопротивлению тела человека определяет более жесткие требования электробезопасности, с этим подходом еще можно согласиться, поскольку при других значениях сопротивления безопасность будет обеспечена. Однако в ряде случаев, прежде всего при разработке современных автоматических быстродействующих защитных мер, такой подход приводит к отрицательному эффекту.

В литературе приводятся другие противоречивые значения сопротивления тела человека в зависимости от различных факторов, но они в основном были получены на основании исследований на животных и трупах и в режимах, не характерных для быстродействующей защиты. Для получения наиболее точных значений сопротивления тела человека в зависимости от приложенного напряжения автором были проведены исследования по специально разработанной методике [3].

Суть методики состоит в следующем. При исследовании производились натурные измерения сопротивления тела человека с использованием импульсных напряжений. При этом использовался метод эквивалентов, при котором сравниваются импульсы тока, проходящего через человека, и импульсы тока, проходящего через эквивалент. Этот метод позволяет в зависимости от необходимой точности получить схему электрического эквивалента тела человека любой сложности. В целом методика позволила получить более точные результаты и расширить диапазон исследуемых напряжений.

Было установлено, что при подаче на человека прямоугольного импульса напряжения ток, протекающий через него, изменяется по нелинейному закону, характерному для цепей с емкостной составляющей. Это подтверждает принципиальную правильность схемы замещения, приведенной на рис. 2.

Исследования показали, что зависимость тока, протекающего через тело человека, от времени его воздействия с большой точно-

стью можно аппроксимировать двумя экспонентами, т. е. выражением

$$i_h(\tau) = Ae^{-\alpha\tau} + B(1 + Ce^{-\beta\tau}), \quad (1)$$

где A, B, C — постоянные цифровые коэффициенты; α, β — корни характеристического уравнения; e — основание натурального логарифма; τ — время.

Это выражение позволяет определить структуру электрической схемы, эквивалентной сопротивлению тела человека, путем использования преобразования Лапласа. После преобразования изображение тока запишется в виде

$$I(p) = \frac{A}{p + \alpha} + \frac{B}{p} + \frac{BC}{p + \beta},$$

где p — оператор Лапласа.

Изображение воздействующего на эквивалентную схему напряжения запишется в виде $E(p) = E/p$, тогда операторное сопротивление этой схемы будет определяться выражением

$$Z(p) = \frac{E(p)}{I(p)} = \frac{\frac{E}{p}}{\frac{A}{p + \alpha} + \frac{B}{p} + \frac{BC}{p + \beta}}. \quad (2)$$

Путем разложения дробно-рациональной функции на простые слагаемые и математических преобразований из (2) получим операторное сопротивление схемы, эквивалентной телу человека, в более удобной форме:

$$Z(p) = A_1 + \frac{\frac{A_2}{p}}{1 + \frac{A_3}{p}} + \frac{\frac{A_4}{p_4}}{1 + \frac{A_5}{p}}, \quad (3)$$

где $A_1—A_5$ — некоторые постоянные коэффициенты, определяемые величинами, входящими в исходные выражения.

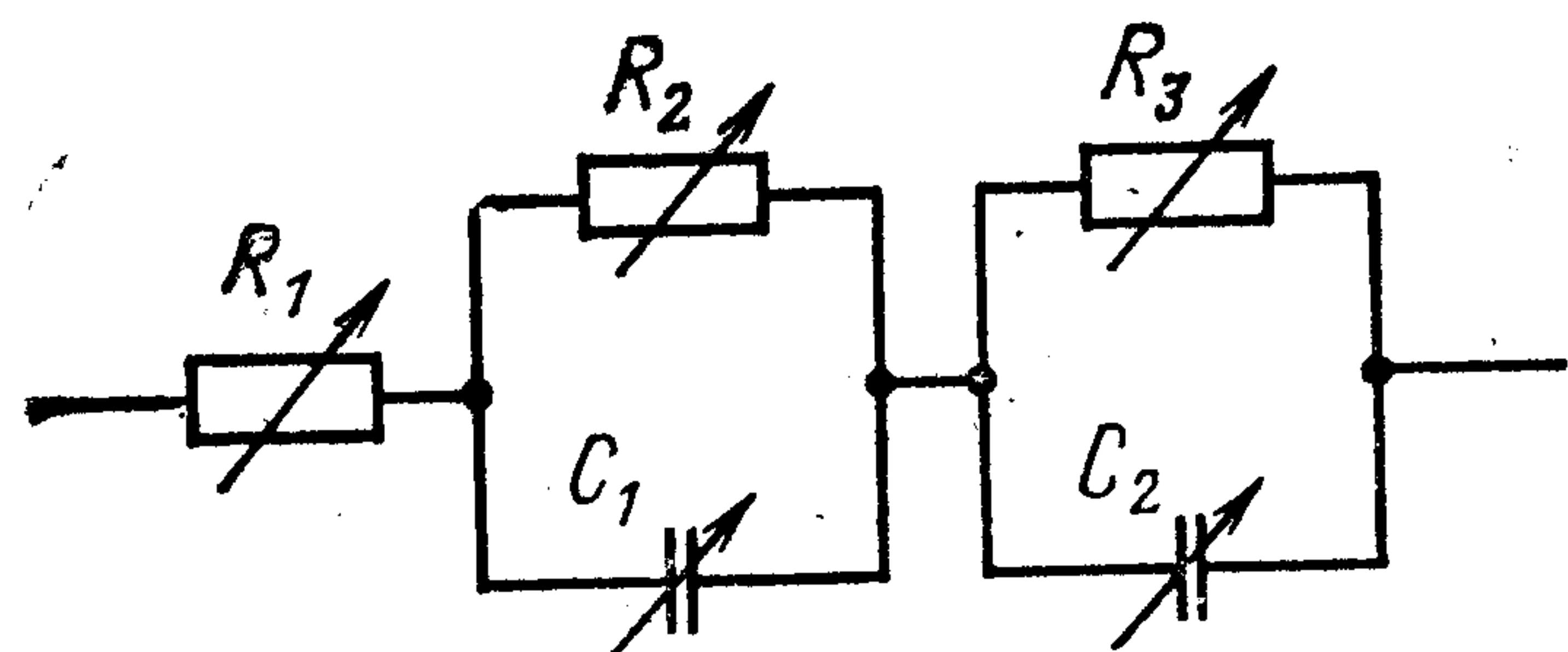


Рис. 3. Схема электрического эквивалента тела человека.

Анализ выражения (3) показывает, что ему соответствует структура эквивалентной схемы, приведенной на рис. 3. С помощью обратного преобразования Лапласа можно показать, что разложение выражения (2) на иные простые слагаемые не приводит к физически реализуемой схеме. Следовательно, полученная структура эквивалентной схемы является однозначной.

В соответствии с названной методикой экспериментально были определены значения входящих в схему эквивалента элементов. Измерения проводились при двух длительностях импульсов напряжения $\tau_1=20$ мс и $\tau_2=100$ мкс. При длительности импульса, равной 20 мс, обеспечивалась безопасность и достигалась высокая точность физиологического эксперимента. За это время, судя по эюграм импульсов тока, переходные процессы в цепи человека практически заканчиваются. Следовательно, полученные при τ_1 значения элементов схемы, приведенной на рис. 3, соответствуют полному сопротивлению тела человека.

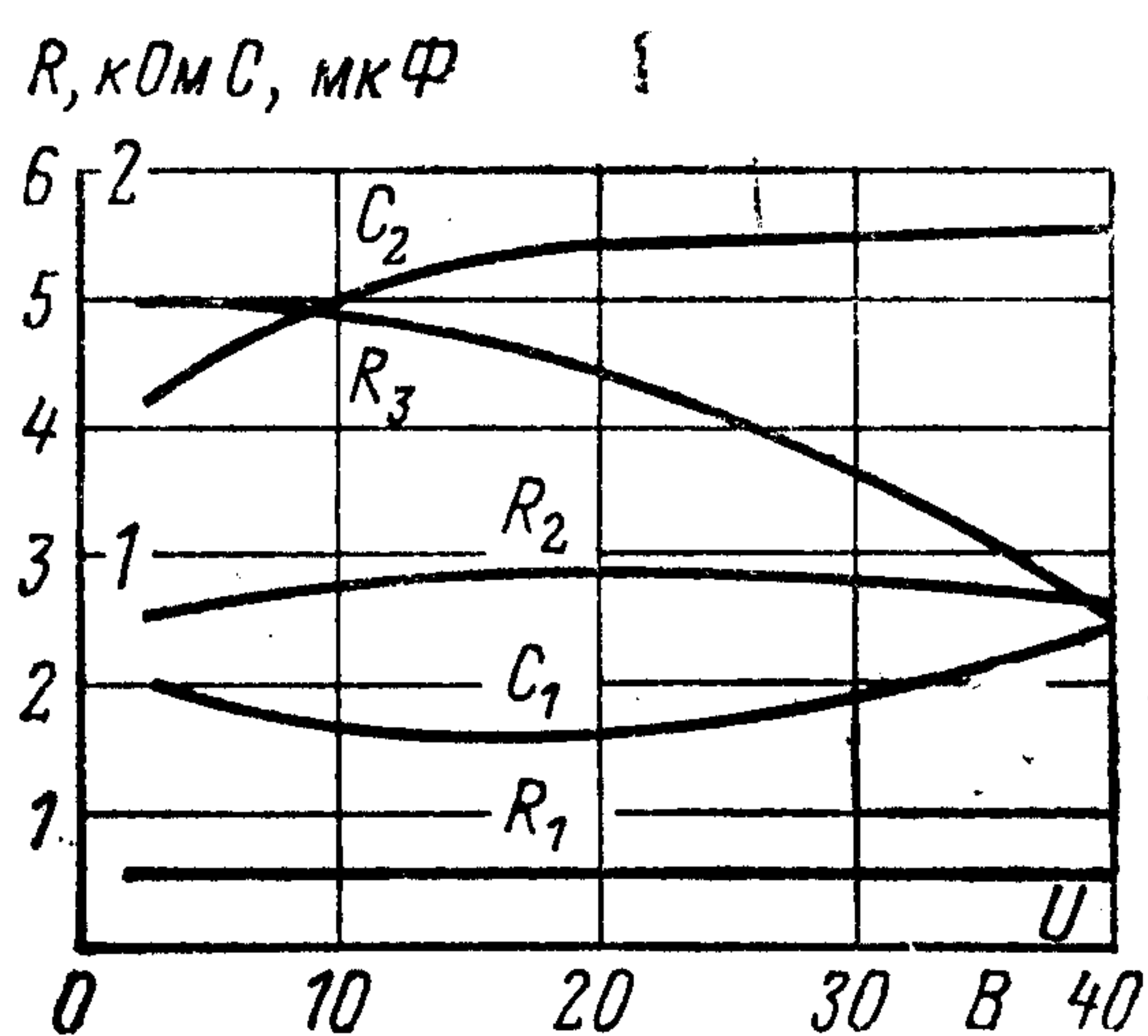


Рис. 4. Зависимость параметров схемы электрического эквивалента тела человека от приложенного напряжения.

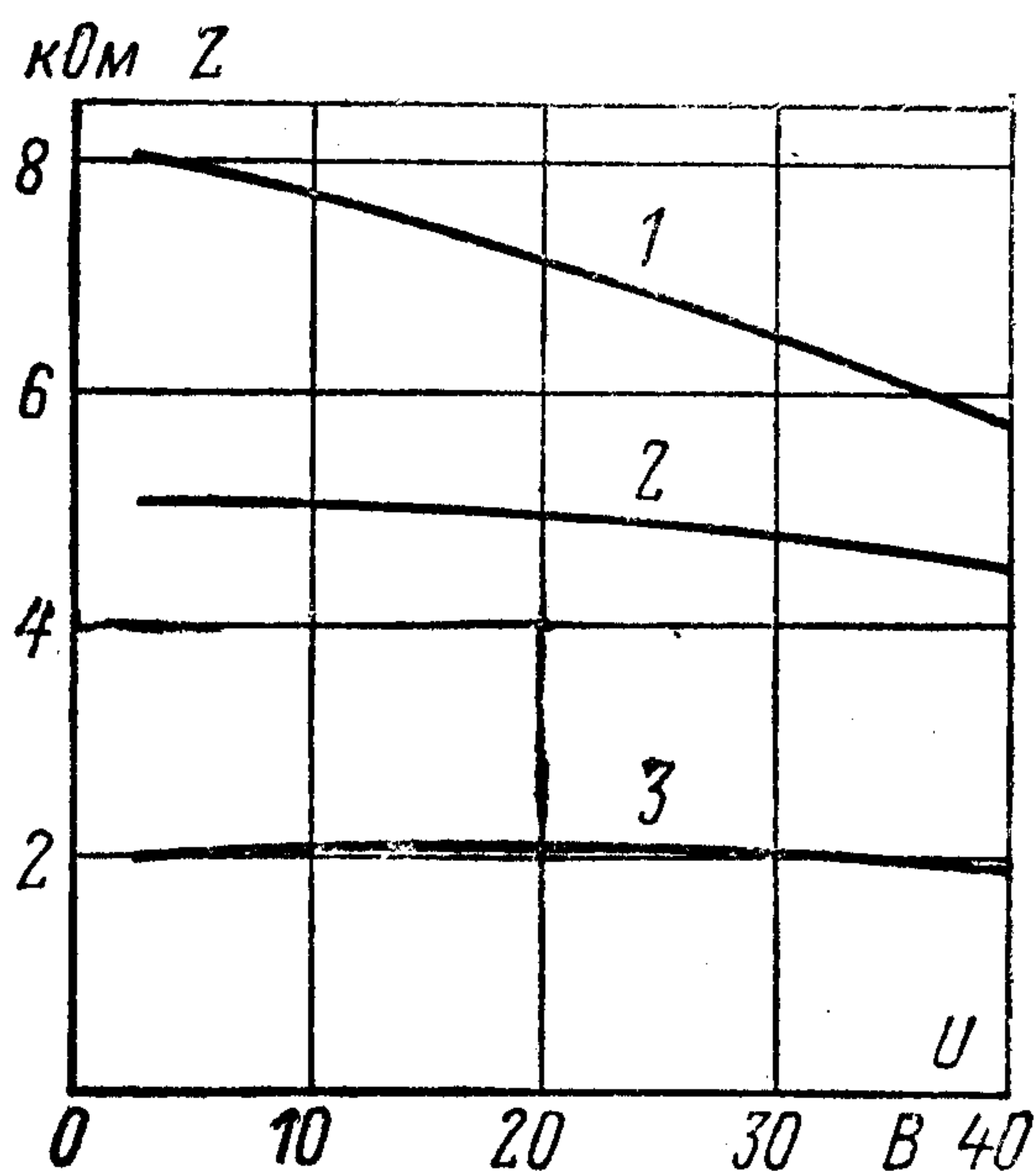


Рис. 5. Зависимость сопротивления тела человека от приложенного напряжения.

На рис. 4 приведены зависимости средних значений параметров эквивалентной схемы от приложенного напряжения, полученные путем эксперимента на большой группе людей при τ_1 . Эти данные позволили рассчитать значения сопротивления тела человека постоянному и переменному току в исследованном диапазоне напряжений. На рис. 5 приведены зависимости полного сопротивления тела человека постоянному (кривая 1) и переменному току частотой 50 Гц (кривая 2) от приложенного напряжения. Кривая 1 характеризует активное сопротивление, кривая 2 — комплексное.

При воздействии импульса длительностью 100 мкс емкостное сопротивление имеет малое значение, поэтому при τ_2 происходит измерение только внутреннего со-

противления тела человека. Его зависимость от напряжения приведена на рис. 5 (кривая 3). При увеличении приложенного напряжения до 60 В характер кривой не меняется.

Знание сопротивления тела человека и диапазона опасных для него токов позволяет определить диапазон опасных напряжений. Пользуясь изложенным материалом, нетрудно показать, что полученные значения сопротивлений соответствуют начальным значениям опасных для человека напряжений. Именно поэтому значения сопротивлений тела человека в исследованном диапазоне напряжений чаще всего нужны при расчете защитных мер в электроустановках. За пределами этого диапазона напряжений сопротивление тела человека в расчетах можно принять равным 1 кОм. Это не дает большой погрешности.

3. ПЕРВИЧНЫЕ КРИТЕРИИ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Первичные критерии электробезопасности — это пороговые значения электрического тока, соответствующие определенным ответным реакциям организма человека и необходимые для расчета защитных мер и средств в электроустановках. По установлению этих критериев проведены многочисленные исследования, однако до настоящего времени нет однозначных нормативных данных по допустимым для человека токам и напряжениям. В частности, это привело к тому, что значения напряжения переменного тока, при которых не требуется применения специальных защитных мер, значительно различаются в разных странах (от 25 В в Англии и Италии до 150 В в Японии и США). Это объясняется сложностью физиологических процессов при протекании тока через человека, неоднозначностью реакции организма отдельных лиц на одинаковые токи и техническими трудностями выполнения наиболее жестких требований электробезопасности при разработке электроустановок.

В данной работе вопрос рассматривается с позиций практического использования первичных критериев электробезопасности при разработке защитных мер и с учетом последних достижений в этой области. В связи с этим следует выделить три первичных критерия электробезопасности — пороговые осязаемый, неотпускающий и фибрилляционный токи. Выделение этих критериев объясняется не только физиологическими реакциями организма человека, о чем уже было сказано, но и техническими требованиями, в частности они нужны для обоснования необходимости и расчета параметров изоляции токоведущих частей и характеристик защитных мер в электроустановках.

Количественно эти критерии отдельными специалистами оцениваются по-разному. Наиболее обоснованными для электроустановок переменного тока частотой 50 Гц являются пороговый осязаемый ток — 0,5 мА и пороговый неотпускающий ток — 10 мА [4]. Из рис. 1 видно, что эти величины справедливы практически для всех взрослых людей. Предельно допустимые уровни для нефибрилля-

ционных токов I , мА, и напряжений прикосновения U , В, в зависимости от продолжительности воздействия приведены в табл. 1.

Данные этой таблицы составлены по результатам работ ученых многих организаций, выполненных за последние более чем десять лет. Они рекомендованы секцией «Электробезопасность» Научного совета по проблеме «Охрана труда» Госкомитета СССР по науке и

Т а б л и ц а 1

Предельно допустимые уровни для нефибрилляционных токов (I , мА) и напряжений прикосновения (U , В) в зависимости от продолжительности воздействия до 1 с

Частота нормируемой величины	Нормируе- мая вели- чина	Продолжительность воздействия тока τ , с											
		0,01— 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
50 Гц	$I_{\text{д}}$, мА $U_{\text{д}}$, В	650 650	500 500	250 250	165 165	125 125	100 100	85 85	70 70	65 65	55 55	50 50	
400 Гц	$I_{\text{д}}$, мА $U_{\text{д}}$, В		500 500	500 500	330 330	250 250	200 200	170 170	140 140	130 130	110 110	100 100	
Постоянный	$I_{\text{а}}$, мА $U_{\text{а}}$, В		500 500	400 400	340 340	280 280	250 250	230 230	210 210	190 190	165 165	150 150	
Выпрямлен- ный одно- полупериод- ный (50 Гц)	$I_{\text{а}}$, мА $U_{\text{а}}$, В		500 500	400 400	360 360	300 300	270 270	240 240	210 210	190 190	165 165	150 150	
Выпрямлен- ный двух- полупериод- ный (50 Гц)	$I_{\text{а}}$, мА $U_{\text{а}}$, В		500 500	400 400	370 370	330 330	300 300	280 280	260 260	240 240	220 220	200 200	

технике и ВЦСПС для использования в качестве общесоюзных временных норм.

Из таблицы видно, что предельно допустимые уровни напряжения прикосновения, т. е. напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек, определены с учетом сопротивления тела человека, равного 1 кОм, т. е. без учета его линейности. Поэтому значения предельно допустимых уровней токов следует считать более достоверными.

Из таблицы также видно, что постоянный ток представляет для человека меньшую опасность, чем переменный ток промышленной частоты. Это обстоятельство всегда является важным аргументом сторонников постоянного тока. Впервые этот аргумент использовался в 80-е годы прошлого столетия, когда был изобретен трансформатор и обсуждалась перспектива использования переменного тока.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

4. КЛАССИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ И ПРИЧИН ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

С учетом материала, изложенного в предыдущей главе, анализ опасности поражения человека в электроустановках сводится к определению значения тока в цепи тела человека. Однако задача эта не легкая, поскольку человек может иметь контакт с различными элементами электроустановки, напряжение между которыми зависит от ее параметров, условий и режима работы.

Из [4, 5] известно, что существует несколько условий поражения (схем включения) человека в электроустановках. Основные из них:

двухфазное прикосновение, т. е. одновременное прикосновение к двум фазам электроустановки, находящейся под напряжением;

однофазное прикосновение, т. е. прикосновение человека, имеющего гальваническую связь с землей, к одной фазе электроустановки, находящейся под напряжением;

прикосновение к токопроводящим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции (прикосновение к аварийному корпусу);

включение под напряжение шага, т. е. между двумя точками цепи тока, находящимися друг от друга на расстоянии шага, на которых одновременно стоит человек.

При рассмотрении поставленного вопроса наличие прямого контакта человека с токопроводящими частями или косвенного (через токопроводящий корпус электроустановки) не имеет принципиальной разницы, поэтому анализ опасности второго и третьего условий поражения можно объединить.

При классификации причин возникновения условий поражения следует различать прямой контакт человека с токопроводящей частью электроустановки и косвенный. Прямой контакт возникает, как правило, в результате нарушения правил эксплуатации электроустановок, а косвенный — в результате пробоя изоляции. Из этого следует, что для возникновения одного и того же усло-

вия поражения может быть несколько причин, а для его предотвращения или устранения — несколько защитных мер.

Основными причинами возникновения условий поражения человека током являются:

1) случайное прикосновение человека к токоведущим частям электроустановки;

2) возникновение аварийных режимов в электроустановках;

3) невыполнение требований правил устройства электроустановок;

4) нарушение требований правил эксплуатации электроустановок.

5. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОРАЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Достаточно полный анализ условий поражения электрическим током был проведен А. И. Кузнецовым в 1950 г. [6]. С тех пор он приводился во многих работах, но не претерпел существенного изменения. Основные выводы этого анализа не утратили своего значения до настоящего времени, но они не учитывают тех значительных изменений, которые произошли в электроустановках за последнюю четверть века. К этим изменениям следует отнести прежде всего появление дополнительных гальванических связей между токопроводящими элементами электроустановок и землей, обусловленных включением в электрическую сеть устройств контроля, защиты и автоматики.

С учетом сказанного наиболее полная схема замещения электрической сети имеет вид, приведенный на рис. 6, где $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ — комплексы фазных напряжений источника питания сети; $\dot{U}_{оп}$ — комплексное напряжение источника оперативного тока не промышленной частоты; \underline{Y}_0 — комплексная проводимость цепи нулевая точка источника питания сети (0) — земля; $\underline{Y}_{d,1}, \underline{Y}_{d,2}, \underline{Y}_{d,3}$ — комплексные проводимости, создающие искусственную нулевую точку O' для подключения датчика (нагрузки) устройства контроля, защиты или автоматики; $\underline{Y}_{н,1}$ — комплексная проводимость нагрузки датчика, подключенного к искусственной нулевой точке сети; Φ — фильтр (трансформатор тока) нулевой последовательности, являющийся датчиком селективных устройств контроля, защиты и автоматики; $\underline{Y}_{н,2}$ — комплексная проводимость нагрузки Φ ; $\underline{Y}_{e,a}, \underline{Y}_{e,b}, \underline{Y}_{e,c}$ — комплексные проводимости

изоляции соответственно фаз A, B, C относительно земли вне зоны действия Φ ; $\underline{Y}_{i,a}, \underline{Y}_{i,b}, \underline{Y}_{i,c}$ — комплексные проводимости изоляции фаз относительно земли в зоне защиты; G_h — проводимость цепи человека, в общем случае представляющая собой последовательное включение тела человека и дополнительного сопротивления обуви, пола и т. п.

Данная схема позволяет определить ток через человека при однофазном прикосновении в зависимости от параметров и режима работы сети, наличия и параметров устройств контроля, защиты и автоматики. Кроме

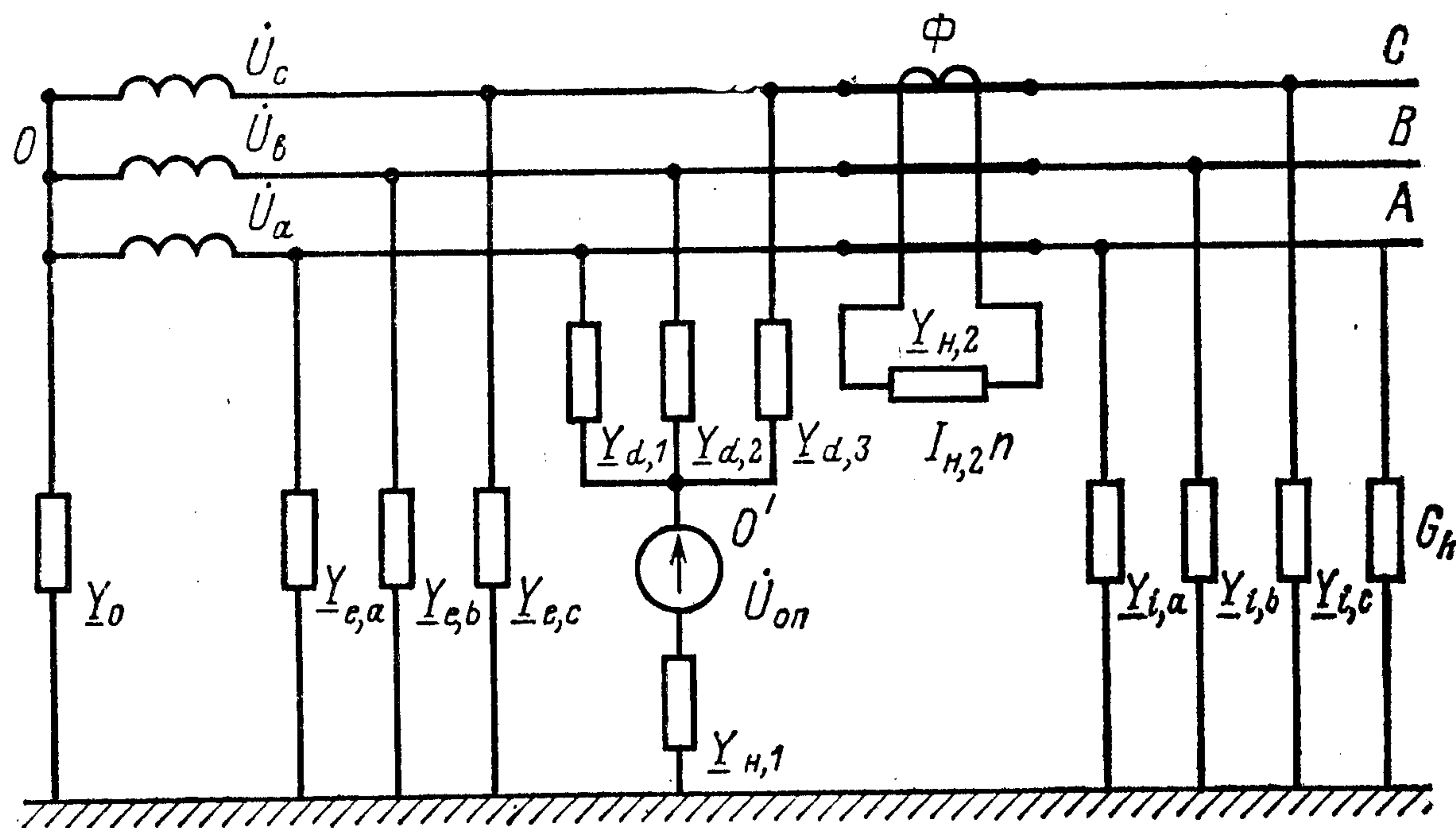


Рис. 6. Схема замещения электрической сети.

того, как это будет показано дальше, эта схема позволяет определить зависимость входного сигнала большинства известных устройств контроля изоляции и автоматических защитных мер от тока в цепи человека и параметров сети. Для этого необходимо найти общее решение уравнений, соответствующих данной схеме. Все перечисленные задачи будут являться частными случаями решения.

В настоящее время для решения вопросов электробезопасности нашли широкое применение методы симметричных составляющих и узловых потенциалов. Эти методы связаны с решением алгебраических уравнений, поэтому для расчета сложных схем требуют много времени и труда. Этим в некоторой степени объясняется то обстоятельство, что в электробезопасности найдены лишь частные решения.

В данной работе, учитывая сложность поставленной задачи, анализ электробезопасности проводится мето-

дом графов [7]. Этот метод, как и любой другой, имеет несколько направлений и различных способов решения поставленной задачи [8]. В этой работе использованы направленные графы.

Графом называется совокупность узлов и соединяющих их ветвей. Каждый узел графа характеризуется своей топологией, т. е. информацией о том, какими ветвями связаны друг с другом отдельные узлы графа и какова проводимость каждой ветви. Узлами в направленных графах являются напряжения или токи исследуемых электрических цепей. Каждая ветвь характеризуется величиной передачи. Под передачей ветви понимают отношение выходной величины к входной. Направленный граф содержит ту же информацию, что и система уравнений, только информация эта выражена графически.

Для построения графа схемы замещения исследуемой сети по законам Кирхгофа составим уравнения для точек 0 и $0'$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 \underline{Y}_0 = & (\dot{U}_a - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.1} + (\dot{U}_b - \dot{U}_0 - \\ & - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.2} + (\dot{U}_c - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.3} + \\ & + (\dot{U}_a - \dot{U}_0) (\underline{Y}_{e.a} + \underline{Y}_{i.a} + G_h) + (\dot{U}_b - \dot{U}_0) (\underline{Y}_{e.b} + \underline{Y}_{i.b}) + \\ & + (\dot{U}_c - \dot{U}_0) (\underline{Y}_{e.c} + \underline{Y}_{i.c}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{н.1} \underline{Y}_{н.1} = & (\dot{U}_a - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.1} + (\dot{U}_b - \dot{U}_0 - \\ & - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.2} + (\dot{U}_c - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.3}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \dot{U}_0 , $\dot{U}_{н.1}$ — напряжения соответственно на \underline{Y}_0 и $\underline{Y}_{н.1}$.

Ток во вторичной обмотке фильтра Φ с учетом коэффициента трансформации n будет равен:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{н.2} n = & \dot{U}_0 \underline{Y}_0 - [(\dot{U}_a - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.1} + \\ & + (\dot{U}_b - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.2} + (\dot{U}_c - \dot{U}_0 - \dot{U}_{н.1} - \\ & - \dot{U}_{оп}) \underline{Y}_{d.3} + (\dot{U}_a - \dot{U}_0) \underline{Y}_{e.c} + (\dot{U}_b - \dot{U}_0) \underline{Y}_{e.b} + \\ & + (\dot{U}_c - \dot{U}_0) \underline{Y}_{e.c}]. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что фазные напряжения источника питания сети симметричны, получаем:

$$\dot{U}_a = U; \dot{U}_b = a^2 U; \dot{U}_c = a U, \quad (7)$$

где a — фазный множитель; U — модуль фазного напряжения.

Решая уравнения (4) — (6) с учетом (7) относительно \dot{U}_0 и $\dot{U}_{H,1}$, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 (\underline{Y}_0 + \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3} + \underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{e,b} + \\ + \underline{Y}_{e,c} + \underline{Y}_{i,a} + \underline{Y}_{i,b} + \underline{Y}_{i,c} + G_h) = U [\underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{i,a} + \\ + \underline{Y}_{d,1} + G_h + a^2 (\underline{Y}_{e,b} + \underline{Y}_{i,b} + \underline{Y}_{d,2}) + a (\underline{Y}_{e,c} + \underline{Y}_{i,c} + \\ + \underline{Y}_{d,3})] - \dot{U}_{H,1} (\underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}) - \dot{U}_{оп} (\underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \\ + \underline{Y}_{d,3}); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{H,1} (\underline{Y}_{H,1} + \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}) = U (\underline{Y}_{d,1} + a^2 \underline{Y}_{d,2} + \\ + a \underline{Y}_{d,3}) - \dot{U}_0 (\underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}) - \dot{U}_{оп} (\underline{Y}_{d,1} + \\ + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{H,2} n = \dot{U}_0 (\underline{Y}_0 + \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3} + \underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{e,b} + \\ + \underline{Y}_{e,c}) - U (\underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{e,a} + a^2 \underline{Y}_{d,2} + a^2 \underline{Y}_{e,b} + a \underline{Y}_{d,3} + \\ + a \underline{Y}_{e,c}) + \dot{U}_{H1} (\underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}) + \dot{U}_{оп} (\underline{Y}_{d,1} + \\ + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}). \end{aligned} \quad (10)$$

Для сокращения записей обозначим:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_1 = \underline{Y}_0 + \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3} + \underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{i,a} + \underline{Y}_{e,b} + \\ + \underline{Y}_{i,b} + \underline{Y}_{e,c} + \underline{Y}_{i,c} + G_h; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\underline{Y}_2 = \underline{Y}_{H,1} + \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}; \quad (12)$$

$$\underline{Y}_3 = \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3}; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_4 = \underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{i,a} + \underline{Y}_{d,1} + G_h + a^2 (\underline{Y}_{e,b} + \underline{Y}_{i,b} + \underline{Y}_{d,2}) + \\ + a (\underline{Y}_{e,c} + \underline{Y}_{i,c} + \underline{Y}_{d,3}); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\underline{Y}_5 = \underline{Y}_{d,1} + a^2 \underline{Y}_{d,2} + a \underline{Y}_{d,3}; \quad (15)$$

$$\underline{Y}_6 = \underline{Y}_0 + \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{d,3} + \underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{e,b} + \underline{Y}_{e,c}; \quad (16)$$

$$\underline{Y}_7 = \underline{Y}_{d,1} + \underline{Y}_{e,a} + a^2 (\underline{Y}_{d,2} + \underline{Y}_{e,b}) + a (\underline{Y}_{d,3} + \underline{Y}_{e,c}). \quad (17)$$

Разделив правые и левые части уравнений (8) и (9) соответственно на \underline{Y}_1 и \underline{Y}_2 , с учетом принятых сокраще-

ний получим:

$$\dot{U}_0 = U \frac{Y_4}{Y_1} - \dot{U}_{н1} \frac{Y_3}{Y_1} - \dot{U}_{оп} \frac{Y_3}{Y_1}; \quad (18)$$

$$\dot{U}_{н,1} = U \frac{Y_5}{Y_2} - \dot{U}_0 \frac{Y_3}{Y_2} - \dot{U}_{оп} \frac{Y_3}{Y_2}; \quad (19)$$

$$\dot{I}_{н,2п} = \dot{U}_0 Y_6 - U Y_7 + \dot{U}_{н,1} Y_3 + \dot{U}_{оп} Y_3. \quad (20)$$

На основании этих уравнений осуществляем переход от рассматриваемой схемы к направленному графу [8]. Граф показан на рис. 7.

Применяя правило Мэзона [8], которое является основным при расчете графов, можно найти передачи всех ветвей полученного графа, а следовательно, определить все необходимые величины расчетной схемы. В [7] показано, что полный расчет составленного нами графа дает решение многих известных и ряда неизвестных решений вопросов электробезопасности. Объем данной работы не позволяет раскрыть всех зависимостей рассматриваемой схемы, поэтому будем возвращаться к ней по мере необходимости.

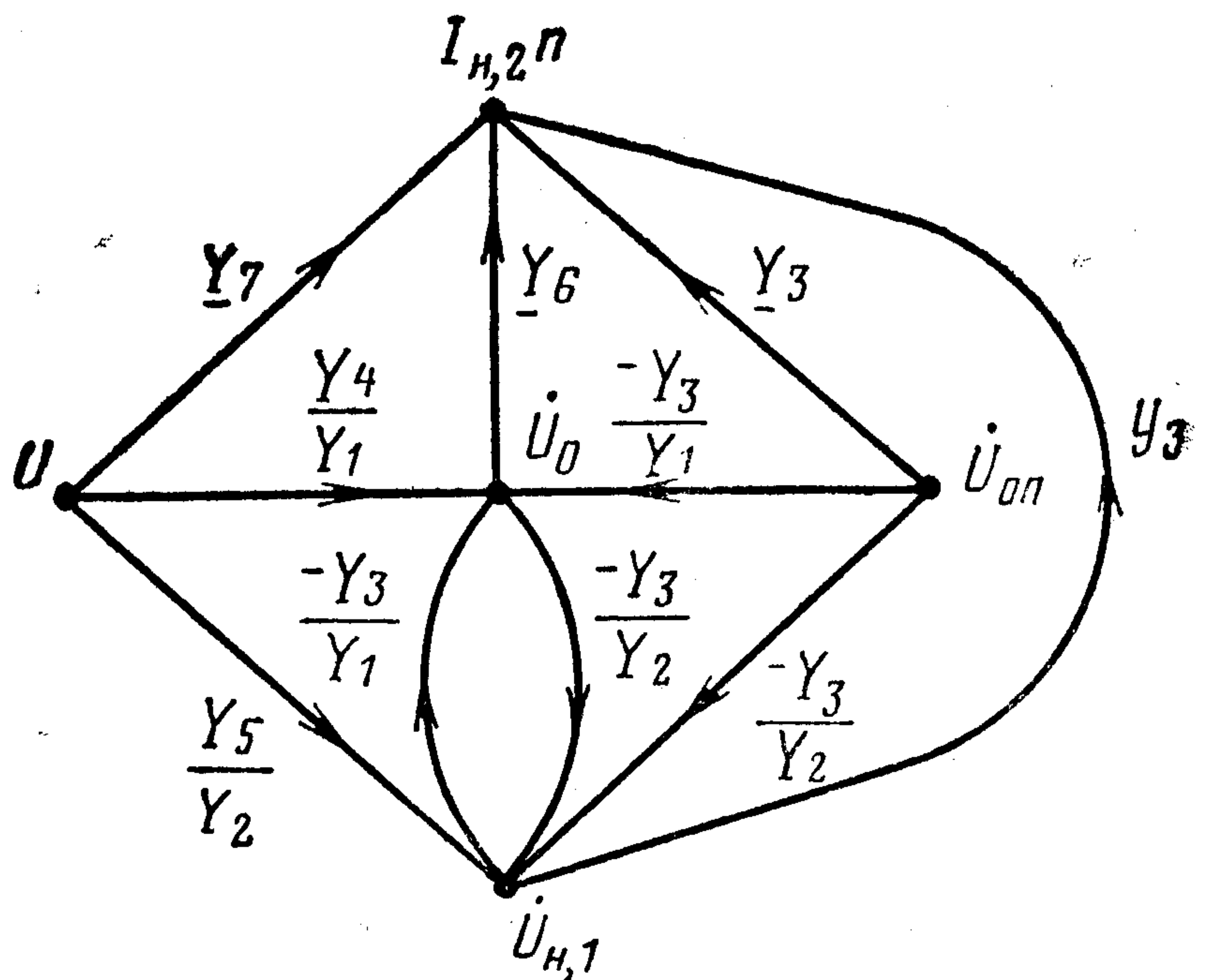


Рис. 7. Граф схемы замещения электрической сети.

При однофазном прикосновении человека к токоведущей части, как это следует из схемы замещения электрической сети и второго закона Кирхгофа, ток через человека будет равен:

$$\dot{I}_h = \dot{U}_{ф,з} G_h = (\dot{U}_a - \dot{U}_0) G_h, \quad (21)$$

где $U_{ф,з}$ — напряжение фазы, к которой прикоснулся человек, относительно земли.

Следовательно, с учетом (7) для определения I_h необходимо знать напряжение нейтрали источника питания сети относительно земли.

Применяя правило Мэсона для прямой передачи графа от узла U к узлу \dot{U}_0 , получаем

$$\dot{U}_0 = U \frac{\frac{Y_4}{Y_1} - \frac{Y_5 Y_3}{Y_1 Y_2}}{1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}} + \dot{U}_{оп} \frac{\frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2} - \frac{Y_3}{Y_1}}{1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}}. \quad (22)$$

Из (21) с учетом (22) и принятых сокращений видно, что ток через человека при однофазном прикосновении зависит от: напряжения источника питания сети, напряжения оперативного источника питания, проводимостей изоляции токоведущих частей электроустановки относительно земли, проводимости элементов, образующих искусственную нулевую точку сети, и проводимости нагрузки устройств контроля, защиты и автоматики, подключенных между O' и землей. Анализ указанных выражений также показывает, что величина проходящего через человека тока не зависит от соотношения проводимостей в зоне действия Φ и вне ее (т. е. не зависит от места установки фильтра), поэтому для поставленной задачи можно принять:

$$\underline{Y}_0 = \underline{Y}_{e,a} + \underline{Y}_{i,a}; \quad \underline{Y}_b = \underline{Y}_{e,b} + \underline{Y}_{i,b}; \quad \underline{Y}_c = \underline{Y}_{e,c} + \underline{Y}_{i,c}, \quad (23)$$

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ — комплексные проводимости изоляции соответственно фаз A, B, C относительно земли.

Более детальный анализ опасности однополюсного прикосновения рассмотрим для некоторых частных случаев. Если человек прикоснулся к фазному проводнику сети, в которой отсутствует искусственная нулевая точка, то $\underline{Y}_{d,1} = \underline{Y}_{d,2} = \underline{Y}_{d,3} = 0$, $\dot{U}_{оп} = 0$, $\underline{Y}_{н,1} = 0$. В этом случае выражение (22) значительно упростится и после подстановки его с учетом (7), (11), (14) и (23) в (21) получим

$$\dot{I}_h = U G_h \frac{\underline{Y}_0 + (1 - a^2) \underline{Y}_b + (1 - a) \underline{Y}_c}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + G_h}. \quad (24)$$

Анализ выражения (24) показывает, что ток через человека при однофазном прикосновении в трехфазных сетях прежде всего зависит от проводимости цепи нулевая точка источника питания (нейтрали) сети — земля. В этом смысле наибольший практический интерес пред-

ставляют сети с глухозаземленной и изолированной нейтралью.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль генератора или трансформатора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление.

Изолированной нейтралью называется нейтраль генератора или трансформатора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через аппараты, имеющие большое сопротивление.

Из определений следует, что в сети с глухозаземленной нейтралью $\underline{Y}_0 \gg \underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, G_h$, в сети с изолированной нейтралью $\underline{Y}_0 = 0$. Тогда выражение (24) для сети с глухозаземленной нейтралью примет вид:

$$I_h = U G_h, \quad (25)$$

для сети с изолированной нейтралью

$$\dot{I}_h = U G_h \frac{(1 - a^2) \underline{Y}_b + (1 - a) \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + G_h}. \quad (26)$$

Анализ этих выражений показывает, что ток через человека при однофазном прикосновении в сети с глухозаземленной нейтралью зависит от фазного напряжения источника питания и проводимости цепи человека, а в сети с изолированной нейтралью, кроме того, от проводимостей изоляции фаз относительно земли. Следовательно, опасность поражения будет меньшей, если в цепи человека имеется высокоомное дополнительное сопротивление, а в сети с изолированной нейтралью безопасность может быть обеспечена хорошей изоляцией токоведущих частей от земли. При этом следует отметить, что в реальных сетях проводимость фаз относительно земли включает в себя активную и емкостную составляющие.

Для сети с симметричной изоляцией, где $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}$, выражение (26) упрощается:

$$\dot{I}_h = U G_h \frac{3 \underline{Y}}{3 \underline{Y} + G_h} = \frac{3U}{3R_h + \underline{Z}}, \quad (27)$$

где R_h — сопротивление тела человека; \underline{Z} — комплексное сопротивление изоляции фаз относительно земли.

Если в этом выражении учесть только минимальное сопротивление тела человека, а дополнительным сопро-

тивлением в цепи человека пренебречь, то для обеспечения безопасности должно выполняться условие

$$\underline{Z} > 3 \left(\frac{U}{I_{h, д}} - R_h \right), \quad (28)$$

где $I_{h, д}$ — ток, допустимый для человека.

При отсутствии в сети защиты, ограничивающей время воздействия тока на человека, за допустимый ток следует принять пороговый неотпускающий ток. В этом случае человек самостоятельно может разорвать цепь тока и предотвратить электротравму.

Если человек прикасается к нетоковедущим частям (к корпусу) электроустановки, то ток через него зависит и от сопротивления изоляции между корпусом и токоведущими частями. В большей степени эта зависимость проявляется при прикосновении к корпусу однофазного электропотребителя в сети с глухозаземленной нейтралью. Схема замещения для этого случая приведена на рис. 8, где

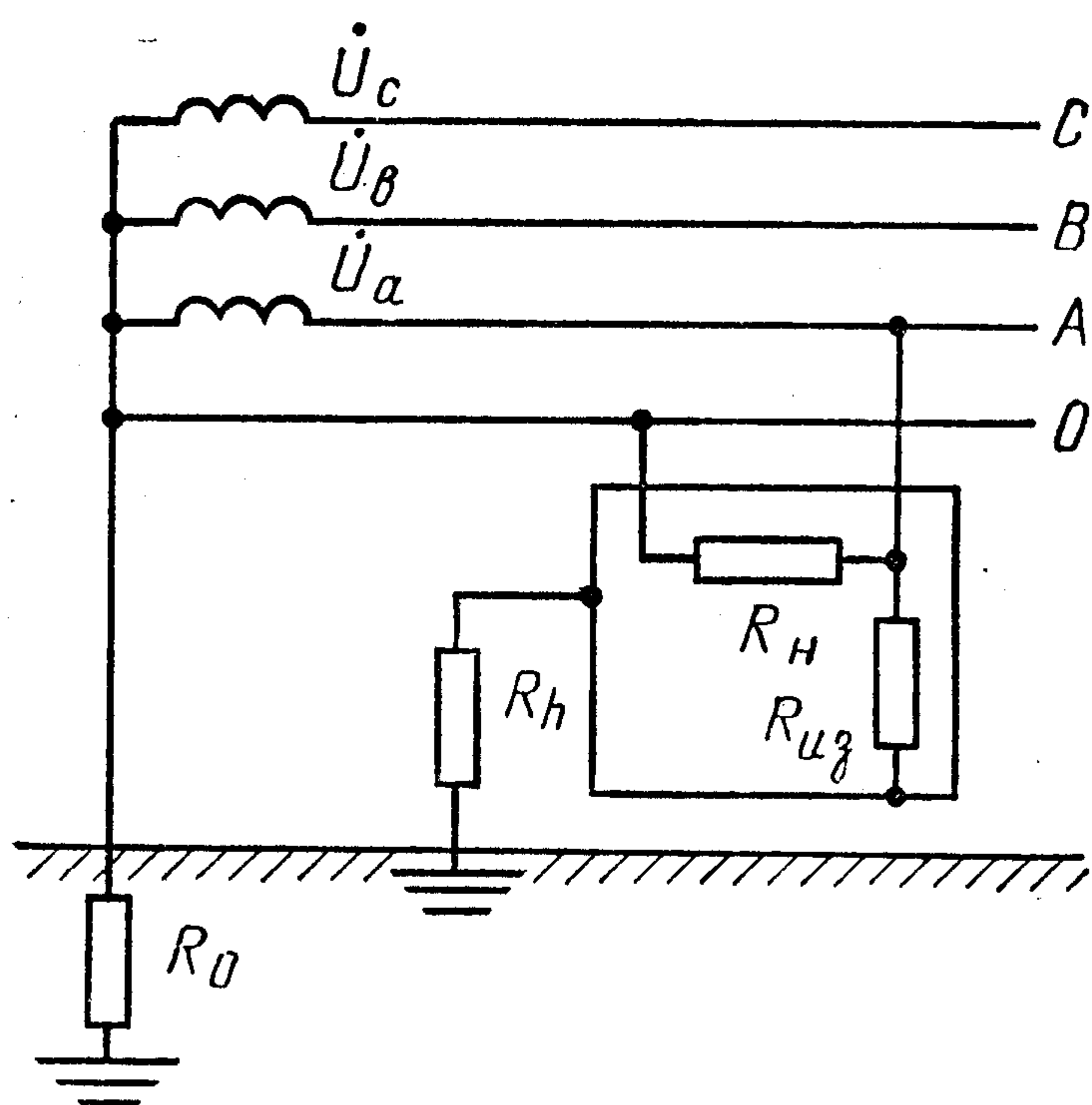


Рис. 8. Схема замещения сети с глухозаземленной нейтралью при прикосновении человека к корпусу электропотребителя.

R_h — сопротивление нагрузки электропотребителя, $R_{из}$ — сопротивление изоляции между корпусом и токоведущими частями электропотребителя.

Из схемы видно, что $R_{из}$ представляет собой дополнительное сопротивление в цепи человека, поэтому ток через человека в соответствии с (25) будет определяться выражением

$$I_h = \frac{U}{R_h + R_{из}}. \quad (29)$$

Сопротивление изоляции в этом случае должно удовлетворять условию

$$R_{из} > \frac{U}{I_{h, д}} - R_h. \quad (30)$$

Для обеспечения нормальной эксплуатации электропотребителя за допустимый ток следует принять поро-

вый неосязаемый ток. В этом случае человек не будет ощущать воздействия тока при обслуживании электроустановки.

В общем случае влияние $R_{из}$ на I_h можно определить из расчета схемы, приведенной на рис. 6. Для этого достаточно предположить, что искусственная нулевая точка O' образована проводимостями изоляции между корпусом электроустановки и токоведущими частями различных фаз. При этом в полученных выражениях для исходной схемы необходимо принять $Y_{н,1}=G_h$, $U_{оп}=0$. Нетрудно показать, что симметричное изменение изоляции токоведущих частей относительно земли и относительно корпуса электроустановки при данном включении человека не влияет на значение тока через него.

Учитывая, что на безопасность электроустановок значительное влияние оказывают сопротивления изоляции токоведущих частей относительно земли и корпусов электроустановок, в большинстве случаев эти сопротивления нормируются. В ряде случаев нормируются не указанные сопротивления изоляции, а токи, определяемые ими (токи утечки).

6. ВЛИЯНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Наибольшую опасность поражения человека электрическим током в электроустановках вызывают замыкание на корпус и замыкание на землю. Замыканием на корпус называется случайное электрическое соединение токоведущей части с металлическими нетокведущими частями электроустановки [9]. Замыканием на землю называется случайное электрическое соединение токоведущей части непосредственно с землей или нетокведущими проводящими конструкциями или предметами, не изолированными от земли [9].

Если человек касается изолированных от земли металлических нетокведущих частей электроустановки, то при замыкании на корпус он оказывается подключенным к одной из фаз электрической сети. Это условие поражения следует классифицировать как косвенное однофазное прикосновение человека к токоведущим частям электроустановки. Объясняется это тем, что расчетная схема в данном случае не будет отличаться от схемы, приведенной на рис. 6. Поэтому все формулы и выводы, полученные для прямого однофазного прикосно-

вения в нормальном режиме работы электроустановки, будут справедливы для рассматриваемого случая. Следовательно, замыкание на корпус представляет большую опасность для человека, обслуживающего электроустановку.

Замыкание на землю, как это следует из определения, представляет собой резкое снижение сопротивления (повышение проводимости) изоляции одной из фаз электроустановки относительно земли. При однофазном прикосновении к токоведущим частям такое изменение изоляции, как это видно из выражений (21), (22), (24) и (26), повлияет на значение тока, проходящего через тело человека.

Наибольшая опасность поражения при замыкании на землю существует в сети с изолированной нейтралью.

Если при наличии в сети замыкания на землю человек касается одной из исправных фаз, то он окажется под напряжением, близким к линейному напряжению источника питания. Например, при замыкании на землю фазы B (см. рис. 6) будет иметь место соотношение $\underline{Y}_b \gg \underline{Y}_a, \underline{Y}_c, G_h$. В этом случае (26) можно упростить:

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{(1 - a^2) \underline{Y}_b}{\underline{Y}_b} = (1 - a^2) UG_h. \quad (31)$$

Подставляя значение фазного множителя в (31), получаем:

$$I_h = \sqrt{3} U G_h = \frac{\sqrt{3} U}{R_h}. \quad (32)$$

Аналогичным путем можно показать, что при замыкании на землю фазы C значение тока через человека также будет определяться выражением (32). Следовательно, замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью представляет значительную опасность. В ряде случаев, как это следует из (32), однофазное прикосновение представляет практически такую же опасность, как и двухфазное.

Из выражения (26) видно, что при замыкании на землю той фазы, которой коснулся человек, когда $\underline{Y}_a \gg \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, G_h$, ток через человека снижается. Следовательно, замыкание на землю фазы, которой коснулся человек, вызывает снижение тока в цепи человека, а увеличение проводимости этой фазы относительно земли может снизить этот ток до безопасной величины.

В сети с глухозаземленной нейтралью, где \underline{Y}_0 соизмерима с \underline{Y}_a , \underline{Y}_b или \underline{Y}_c при замыкании на землю, прикосновение к различным фазам не имеет столь существенного отличия, как в сети с изолированной нейтралью. Например, при замыкании на землю фазы A , если $\underline{Y}_0 = \underline{Y}_a \gg \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, G_h$, то согласно (24)

$$I_h \approx \frac{1}{2} U G_h = \frac{U}{2R_h} \quad (33)$$

При прикосновении к исправной фазе (при замыкании, например, фазы B), если $\underline{Y}_0 = \underline{Y}_b \gg \underline{Y}_a, \underline{Y}_c, G_h$, то

$$I_h \approx 1,3 U G_h = \frac{1,3U}{R_h}. \quad (34)$$

Проведенный анализ опасности однофазного прикосновения при замыкании на землю с учетом (21) позволяет сделать следующие выводы:

1. Замыкание на землю приводит к изменению напряжения токоведущих частей электроустановок относительно земли и заземленных конструкций. Это может явиться причиной дальнейшего развития аварии, увеличения опасности поражения током, возникновения пожара, выхода из строя электрооборудования, отключения питающего напряжения и т. д.

2. Замыкание на землю всегда сопровождается растеканием тока в грунте, а это, как известно [4], приводит к возникновению нового условия поражения — включению под напряжение шага.

Напряжение шага возможно при нахождении человека в зоне растекания тока.

Зона растекания тока — зона земли, за пределами которой электрический потенциал, обусловленный токами замыкания на землю, может быть условно принят равным нулю [9].

Значение напряжения шага $U_{\text{ш}}$ в общем случае зависит от тока замыкания на землю I_z , удельного сопротивления грунта ρ и места нахождения человека в зоне растекания тока. На рис. 9 показано характерное для замыкания на землю распределение потенциала φ в зоне растекания тока. На рисунке также показано два частных случая расположения человека в зоне растекания тока. В положении 1 человек попадает под напряжение шага. Положение 2 характеризуется как однофазное прикосновение человека, находящегося в поле

растекания тока, к замкнутой на землю токоведущей части. В этом случае человек попадает под напряжение прикосновения $U_{\text{пр}}$, которое равно разности потенциалов рук и ног. Если эти потенциалы выразить через напряжения относительно земли с нулевым потенциалом, то получим:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф,з}} - U_{\text{х,з}}, \quad (35)$$

где $U_{\text{х,з}}$ — напряжение точки зоны растекания тока, в которой находится человек.

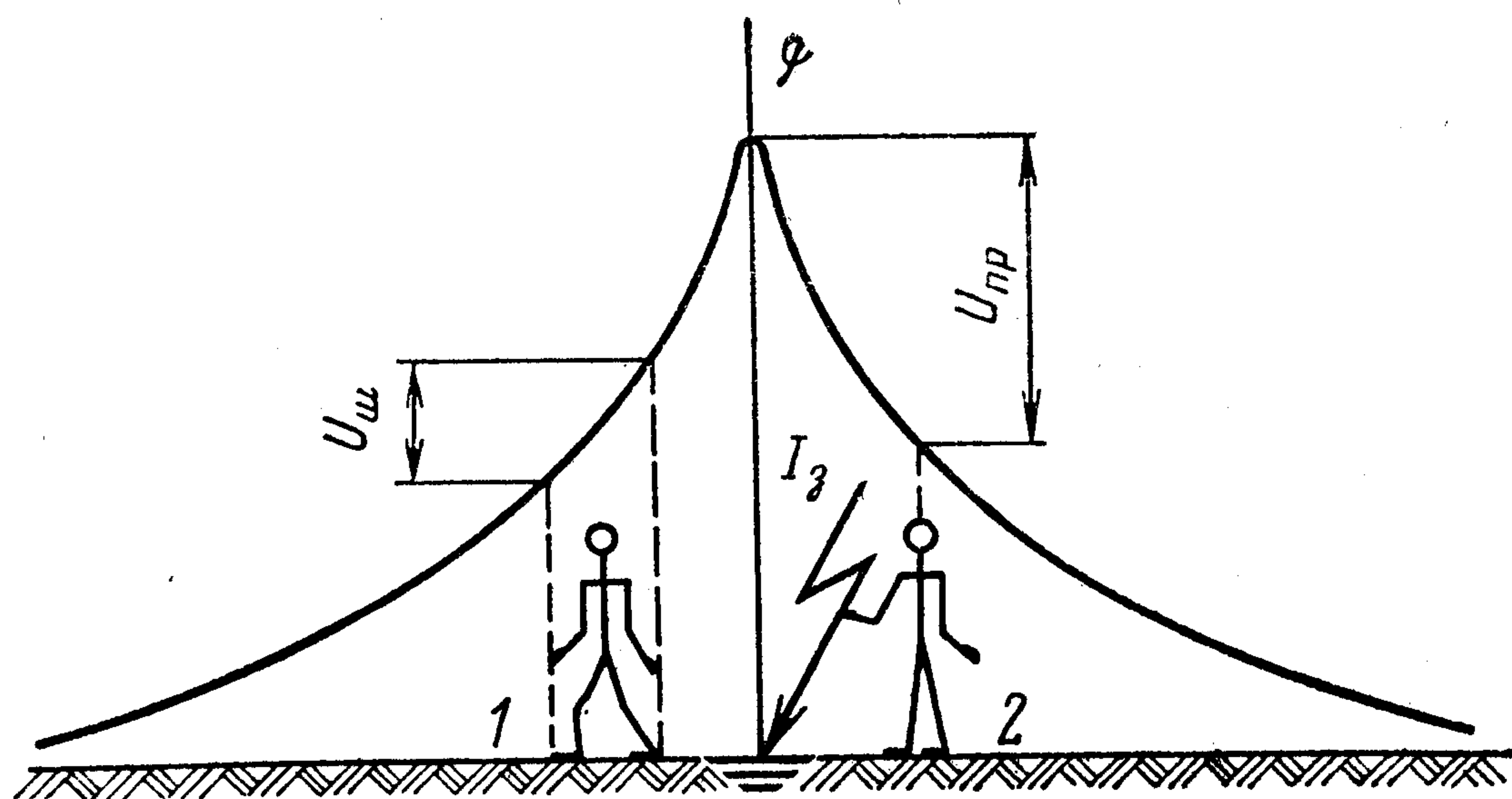


Рис. 9. Распределение потенциала в зоне растекания тока при замыкании на землю.

Ток, проходящий через человека, в этом случае определится выражением

$$\begin{aligned} I_h &= U_{\text{пр}} G_h = (U_{\text{ф,з}} - U_{\text{х,з}}) G_h = \\ &= U_{\text{ф,з}} G_h \frac{U_{\text{ф,з}} - U_{\text{х,з}}}{U_{\text{ф,з}}} = U_{\text{ф,з}} G_h \alpha, \end{aligned} \quad (36)$$

где α — коэффициент прикосновения, учитывающий влияние зоны растекания на напряжение прикосновения. Его значения в зависимости от места нахождения человека могут быть от 0 до 1.

Анализ выражений (21) и (36) показывает, что все выводы, полученные при рассмотрении опасности однофазного прикосновения в нормальном режиме работы электроустановки, будут справедливы и для данного случая. При известном значении α можно рассчитать ток через человека по полученным в предыдущем параграфе формулам. Если человек находится вне зоны растекания тока, то $U_{\text{х,з}} = 0$, $\alpha = 1$. В этом случае потенциальное поле зоны растекания тока не влияет на опасность поражения. Практически можно принять $\alpha = 1$ на расстоянии 20 м от места замыкания на землю.

7. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОТРАВМЫ

Анализ опасности поражения человека электрическим током может быть наиболее полным лишь в том случае, когда будут учтены по возможности все объективные факторы, влияющие на электротравму. Только в этом случае можно наиболее правильно определить профилактические и защитные меры в электроустановках.

Изучение электротравм показывает, что поражение человека электрическим током носит вероятностный характер и наступает при совпадении двух факторов [10]: $P(A)$ — вероятности того, что при прикосновении к электроустановке человек попал под напряжение, и $P(B)$ — вероятности того, что электрический ток, проходящий через человека, превысит с учетом времени воздействия допустимое значение.

Фактор B зависит от фактора A , поэтому вероятность поражения человека электрическим током будет равна:

$$P_h = P(B/A)P(A).$$

Фактор A может наступить лишь в том случае, если контакт человека с электроустановкой совпадает по времени с наличием напряжения на ней. Следовательно, вероятность появления фактора A можно определить, применив теорему умножения вероятностей, тогда

$$P(A) = P(C)P(D),$$

где $P(C)$ — вероятность прикосновения человека к электроустановке; $P(D)$ — вероятность появления на электроустановке напряжения.

Обозначив $P(C) = P_1$, $P(D) = P_2$, $P(B/A) = P_3$, вероятность поражения человека электрическим током будет равна:

$$P_h = P_1 P_2 P_3. \quad (37)$$

Знание величин, входящих в выражение (37), и факторов, их определяющих, позволяет количественно оценить опасность поражения человека при работе с отдельными типами электроустановок, объяснить статистику электротравматизма и определить эффективные пути его снижения. Вероятности наступления факторов A , B , C и D для конкретных типов электроустановок можно определить путем анализа их надежности и условий эксплуатации, хронометрии производственного процесса и расчета тока через человека в соответствии с материалом, изложенным выше. При этом необходимо

учитывать только те отказы (аварии) в электроустановках, которые ведут к возникновению условий поражения.

Из (37) видно, что снижение вероятности поражения электрическим током может быть достигнуто как уменьшением всех входящих в него величин, так и уменьшением одной из них. Меры по обеспечению безопасности в электроустановках можно разделить на три вида:

1) организационные меры — инструктаж, изучение правил безопасности ведения работ, правильная организация рабочего места и режима труда, применение защитных средств, предупредительных плакатов и сигнализации, подбор кадров с учетом профессиональных особенностей и т. п. Применение организационных мер снижает вероятность P_1 ;

2) профилактические меры — изоляция и ограждение токоведущих частей электроустановок, выбор менее безопасного режима работы электроустановки, изготовление корпусов и органов управления электроустановок из нетокопроводящих материалов и т. п. Применение этих мер уменьшает вероятность P_2 ;

3) защитные меры — технические системы, обеспечивающие предотвращение условий поражения или снижение тока через человека и времени его воздействия при их возникновении.

Ликвидация электротравматизма может быть достигнута лишь путем применения всех перечисленных мер. Их сочетание должно определяться типом электроустановок и условиями их эксплуатации. Поэтому классификация электроустановок и факторов, влияющих на их опасность, является важным этапом в борьбе с электротравматизмом.

8. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ПОМЕЩЕНИЙ

Проведенный анализ показывает, что опасность поражения человека электрическим током зависит от номинального напряжения электроустановки, режима нейтрали источника питания, тока замыкания на землю, сопротивления изоляции токоведущих частей относительно земли и заземленных конструкций, сопротивления тела человека, переходного сопротивления в цепи человека, удельного сопротивления грунта в зоне растекания тока и вероятности соприкосновения человека с токоведущими частями. Поэтому в отношении мер безопасности электроустановки делятся на:

электроустановки напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью;

электроустановки напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью;

электроустановки напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью;

электроустановки напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью;

электроустановки с малым напряжением (номинальное напряжение не более 42 В);

электроустановки с малыми токами замыкания на землю ($I_z \leq 500$ А);

электроустановки с большими токами замыкания на землю ($I_z > 500$ А).

Условия эксплуатации электроустановок также существенно влияют на опасность поражения. Так, влажность, повышенная температура, едкие пары, токопроводящая пыль изменяют сопротивление изоляции токоведущих частей электроустановки. Под их действием изменяется и сопротивление тела человека, поэтому помещения, в которых находятся электроустановки, имеют следующую классификацию [11]:

сухие — помещения, в которых относительная влажность воздуха не превышает 60%;

влажные — помещения, в которых относительная влажность воздуха имеет значения от 60 до 75%;

сырые — помещения, в которых относительная влажность воздуха длительно превышает 75%;

особо сырые — помещения, в которых относительная влажность воздуха близка к 100% (стены, пол и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой);

жаркие — помещения, в которых температура длительно превышает $+30^\circ\text{C}$;

пыльные — помещения, в которых по условиям производства выделяется технологическая пыль в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь электрооборудования;

с химически активной средой — помещения, в которых по условиям производства постоянно или длительно содержатся пары или образуются отложения, действующие разрушающе на изоляцию и токоведущие части электрооборудования.

По степени опасности поражения людей электрическим током все помещения делятся на три класса [11]:

с повышенной опасностью, особо опасные и без повышенной опасности.

К помещениям с повышенной опасностью относятся помещения пыльные, сырые, жаркие с токопроводящими полами и помещения, в которых возможно одновременное прикосновение к электроустановкам и имеющим связь с землей металлическим конструкциям. Следовательно, признаками повышенной опасности являются:

наличие токопроводящей пыли;

наличие сырости (относительная влажность воздуха выше 75%);

наличие токопроводящих полов;

возможность одновременного прикосновения к токопроводящим корпусам или токоведущим частям электрооборудования и металлическим конструкциям, имеющим связь с землей.

К особо опасным относятся помещения с химически активной средой и особо сырые помещения. Таким образом, признаками особой опасности являются:

наличие особой сырости (относительная влажность воздуха близка к 100%);

наличие химически агрессивной среды.

Если помещения характеризуются несколькими признаками повышенной опасности, то они относятся к особо опасным, остальные относятся к помещениям без повышенной опасности.

По доступности электрооборудования помещения делятся на:

замкнутые электротехнические — закрытые помещения, в которых установлено электрооборудование, не требующее постоянного надзора. Доступ в эти помещения разрешен только лицам, имеющим достаточную электротехническую квалификацию, на непродолжительное время;

электротехнические — помещения или отгороженные части помещения, в которых установлено электрооборудование, требующее постоянного присутствия электротехнического персонала;

производственные — помещения, в которых установлено электрооборудование, доступное в течение длительного времени лицам неэлектротехнических специальностей;

конторские и бытовые — столовые, жилые комнаты и т. п.

ЗАЩИТНЫЕ МЕРЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

9. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЩИТНЫХ МЕР

В соответствии с Правилами устройства электроустановок для защиты людей от поражения электрическим током должна применяться по крайней мере одна из следующих защитных мер: заземление, зануление, защитное отключение, малые напряжения, разделяющие трансформаторы, выравнивание потенциалов, двойная изоляция. Перечисленные меры защиты не являются универсальными. Их эффективность зависит от условий поражения, типа электроустановки и режимов ее работы, а также от условий эксплуатации. Поэтому классификация защитных мер является важной предпосылкой для рационального их использования.

Малым напряжением называется номинальное напряжение не более 42 В, применяемое в электроустановках для обеспечения электробезопасности [9]. Малые напряжения применяются для питания ручного инструмента и переносных ламп в любых помещениях, а также вне помещений. Кроме того, они применяются в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных для питания светильников местного стационарного освещения с лампами накаливания и светильников общего освещения обычной конструкции, если они размещены над полом на высоте не менее 2,5 м.

Двойной изоляцией электроприемника называется совокупность рабочей и защитной (дополнительной) изоляции, при которой доступные прикосновению части электроприемника не приобретают опасного потенциала при повреждении рабочей или защитной изоляции.

Из определения следует, что эта мера базируется на защитных свойствах дополнительного сопротивления в цепи человека. В последние годы двойная изоляция широко применяется для обеспечения безопасности ручного электроинструмента. При этом в качестве защитной изоляции применяются нетокопроводящие корпуса, рукоятки, детали электромеханического привода и т. п. Применение двойной изоляции значительно снижает вероятность поражения током.

Разделяющими трансформаторами называются трансформаторы, предназначенные для отделения приемника энергии от первичной электрической сети и сети заземления (зануления). Разделительный трансформатор используется, как правило, для питания отдельных электропотребителей при эксплуатации их в особо опасных условиях (на открытых площадках, в металлических резервуарах и т. п.). В этом случае питающая сеть оказывается короткой, с изолированной нейтралью и хорошей изоляцией. Следовательно, эта мера использует защитные свойства изоляции сети с изолированной нейтралью. При двухфазном прикосновении, естественно, разделительный трансформатор не обеспечивает безопасности.

Заземлением называется преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Заземление служит для превращения замыкания на корпус в замыкание на землю с целью снижения напряжения на корпусе относительно земли до безопасной величины, при этом используются отмеченные в предыдущей главе защитные свойства снижения сопротивления изоляции

относительно земли той фазы, которой коснулся человек. Там же отмечалось, что зависимость тока в цепи человека от указанного сопротивления в большей степени проявляется в сети с изолированной нейтралью. Поэтому следует ожидать, что заземление более эффективно будет обеспечивать безопасность именно в этой сети. Однако, как уже отмечалось, первостепенное значение будет иметь сопротивление (проводимость) изоляции замкнутой на корпус фазы.

При наличии заземления сопротивление изоляции замкнутой на корпус фазы будет определяться в основном сопротивлением заземляющего устройства R_3 . Поэтому для определения тока в цепи человека, прикоснувшегося к аварийному корпусу, достаточно в выра-

жении (24) принять $\underline{Y}_Q = \frac{1}{R_3}$.

С учетом принятых соотношений $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ для случая замыкания на землю (на заземленный корпус) получим:

для сети с глухозаземленной нейтралью

$$I_h = U G_h \frac{\underline{Y}_0}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_Q} = \frac{U R_3}{R_h (R_0 + R_3)}, \quad (38)$$

для сети с изолированной нейтралью

$$I_h = U G_h \frac{3\underline{Y}}{\underline{Y}_Q} = \frac{3UR_3}{R_h Z}. \quad (39)$$

Из принципа работы заземления видно, что эта мера может обеспечить безопасность только при прикосновении к корпусу электроустановки, оказавшемуся подключенным к фазе в результате повреждения изоляции. Заземление выполняется в соответствии с [11 и 13].

Выравнивание потенциала — метод снижения напряжения прикосновения и шага между точками электрической цепи, к которым возможно одновременное прикосновение или на которых может одновременно стоять человек [9]. Выравнивание потенциала осуществляется электрическим соединением металлических конструкций, находящихся вблизи электроустановки, с ее корпусом, а также формированием зоны растекания путем использования специальных заземляющих устройств. Защитные свойства этой меры объясняются выражениями (35), (36) и рис. 9. Проявляются они только в аварийных режимах работы электроустановки.

Занулением называется преднамеренное электрическое соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью источника питания сети. При замыкании на корпус зануление создает цепь однофазного короткого замыкания. В результате срабатывает максимально-токовая защита и аварийный участок цепи отключается от сети. Кроме того, до срабатывания защиты ток короткого замыкания вызывает перераспределение напряжений в сети и, как следствие, снижение напряжения аварийного корпуса относительно земли [4]. Таким образом, зануление снижает напряжение прикосновения и ограничивает время его воздействия при возникновении опасности поражения в результате замыкания на корпус.

Защитное отключение — быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возник-

новении в ней опасности поражения током [9]. Из определения, несмотря на его неконкретность, видно, что защитное отключение обеспечивает безопасность путем ограничения времени протекания через человека опасного тока. Защита осуществляется устройством защитного отключения (УЗО), которое постоянно контролирует условия поражения и осуществляет отключение сети или участка ее при их возникновении.

Признаками условий поражения являются электрические параметры сети, изменяющие свое значение при подключении человека. Электрический параметр сети, несущий в себе информацию об опасности поражения, для УЗО является входным сигналом λ . Величина входного сигнала, соответствующая наибольшему значению длительно допустимого тока через человека ($I_{h,д}$), называется критической величиной входного сигнала $\lambda_{кр}$.

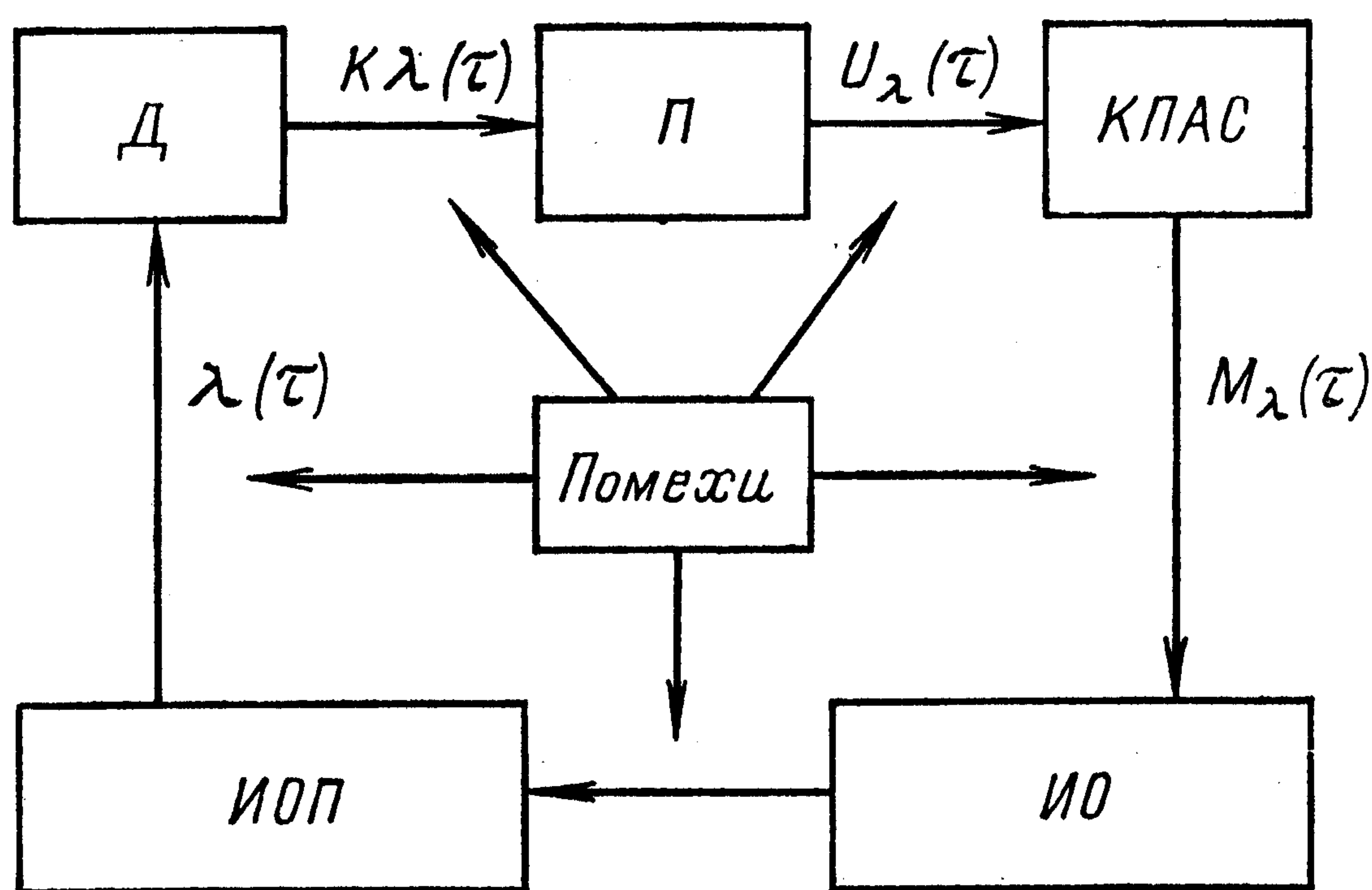


Рис. 10. Структурная схема устройств защитного отключения.

Д — датчик; П — преобразователь; КПАС — канал передачи аварийного сигнала; ИО — исполнительный орган; ИОП — источник опасности поражения.

Принцип работы УЗО состоит в том, что оно постоянно контролирует входной сигнал и сравнивает его с наперед установленным значением (уставкой) λ_y , а при $\lambda \geq \lambda_y$ осуществляет отключение сети. Устройство защитного отключения наиболее эффективно осуществляет защиту, когда $\lambda_y = \lambda_{кр}$. При $\lambda_y < \lambda_{кр}$ будет неоправданное отключение сети (перезащита), при $\lambda_y > \lambda_{кр}$ в некотором диапазоне опасных для человека токов защита не будет работать (недозащита).

Все УЗО могут быть представлены структурной схемой, изображенной на рис. 10. Из схемы видно, что УЗО состоят из датчика, преобразователя, канала передачи аварийного сигнала и исполнительного органа. На схеме показаны также источник опасности поражения и всевозможные помехи, влияющие на работу устройства. Источник опасности поражения — это прежде всего электроустановка, обслуживаемая человеком. Следует отметить, что эта схема характерна для всех автоматических мер защиты [10].

Датчик — это чувствительный элемент устройства, реагирующий на входной сигнал. Датчик иногда называется фильтром входного сигнала (входной величины).

Преобразователь служит для преобразования входной величины, соответствующей опасности поражения, в аварийный сигнал.

Канал передачи аварийного сигнала служит для передачи сигнала с преобразователя на исполнительный орган.

Исполнительный орган осуществляет защитную функцию по устранению опасности поражения; для УЗО — это отключение сети.

При возникновении условия поражения человека током появляется или изменяется входной сигнал $\lambda(\tau)$. Датчик реагирует на изменение входной величины и на его выходе выделяется сигнал $K\lambda(\tau)$, где K — коэффициент передачи датчика. При необходимости сигнал с датчика усиливается.

Сигнал с датчика подается на преобразователь, где он сравнивается (с учетом K) с уставкой; если он равен или превышает уставку, то преобразовывается в аварийный сигнал. Последний через канал передачи аварийного сигнала подается на исполнительный орган.

В зависимости от необходимой мощности сигнала для управления исполнительным органом выбирается коэффициент передачи канала аварийного сигнала. Исполнительный орган при поступлении аварийного сигнала $M_\lambda(\tau)$ осуществляет отключение сети.

Наличие помех может изменить значение входного или аварийного сигнала, что приводит к перезащите или недозащите. Особенно подвержен помехам входной сигнал УЗО. При воздействии на него помех защита реагирует на суммарный сигнал

$$\lambda_s(\tau) = f[\lambda(\tau), \lambda_n(\tau)]. \quad (40)$$

По типу входного сигнала, который, как следует из принципа защиты, имеет функциональную связь с I_h , т. е. $\lambda(\tau) = f(I_h)$, все известные УЗО можно разделить на четыре группы:

устройства, реагирующие на несимметрию фазных токов утечки (ток нулевой последовательности);

устройства, реагирующие на несимметрию напряжений фаз относительно земли (напряжение нулевой последовательности);

устройства, реагирующие на токи и напряжения оперативных источников питания;

устройства, реагирующие на напряжение корпуса электроустановки относительно земли.

Из анализа электробезопасности следует, что названные величины имеют различную функциональную связь с I_h и зависят прежде всего от условий поражения, типа электроустановки и режима ее работы. Поэтому эффективность УЗО зависит не только от входного сигнала, но и от названных факторов. Для повышения эффективности УЗО иногда используется несколько входных сигналов. В этом случае устройство называется комбинированным [4].

Быстродействие защитного отключения должно обеспечивать безопасность во всем диапазоне опасных для человека токов. Поэтому оно выбирается по максимально возможному I_h для данной электроустановки с учетом зависимости $I_{h,d}$ от времени воздействия. Для токов промышленной частоты эта зависимость приведена на рис. 11. Путем аппроксимации этой зависимости и несложных преобразований получено аналитическое выражение для определения времени срабатывания УЗО [14], с,

$$\tau_{cp} \leq \frac{1}{20 \operatorname{Sh} I_{h, \max}}, \quad (41)$$

где $I_{h, max}$ — максимально возможный ток в цепи человека для условия поражения, на который реагирует УЗО, А.

Проведенные автором исследования показали, что в ряде случаев целесообразно применять УЗО с автоматическим изменением времени срабатывания в зависимости от тока в цепи человека. Это позволяет повысить помехоустойчивость защиты. Однако при этом токовременная характеристика не должна выходить за пределы области эффективной защиты, показанной на рис. 11.

Из назначения и принципа действия защитного отключения следует, что УЗО должно отвечать следующим основным требованиям:

- 1) иметь достаточную чувствительность для того, чтобы контролировать входной сигнал во всем диапазоне опасных для человека токов;
- 2) иметь достаточное быстродействие для того, чтобы своевременно осуществить отключение сети;
- 3) иметь стабильные характеристики во времени для того, чтобы исключить перезащиту и недозащиту;
- 4) иметь высокую надежность в условиях длительной непрерывной работы;
- 5) осуществлять контроль исправности устройства;
- 6) обладать высокой перегрузочной способностью;
- 7) осуществлять селективную защиту, т. е. отключать только аварийные участки сети;
- 8) иметь минимальное обратное отрицательное влияние на источник опасности поражения, т. е. не вносить дополнительной опасности при эксплуатации электроустановки;
- 9) потреблять минимальную энергию в дежурном режиме;
- 10) быть универсальным и иметь модернизационную гибкость;
- 11) иметь хорошую технологичность конструкции и возможность использования стандартных и унифицированных элементов;
- 12) иметь эргономическую и психологическую целесообразность.

В каждом конкретном случае применения УЗО одни из перечисленных требований могут быть первостепенными, другие — второстепенными.

Классификация защитных мер по функциональным и структурным признакам показывает, что ни одна из них, ни их некоторая совокупность не могут полностью обеспечить безопасность электроустановок. Следовательно, на данном этапе развития электробезопасности по-прежнему важное значение имеют организационные и профилактические меры по обеспечению безопасности в электроустановках. Однако в условиях стремительного роста числа электроустановок и лиц, обслуживающих их (рост вероятности P_1), сдержать рост электротравм организационными мерами также не представляется возможным. По мнению многих специалистов, проблема элек-

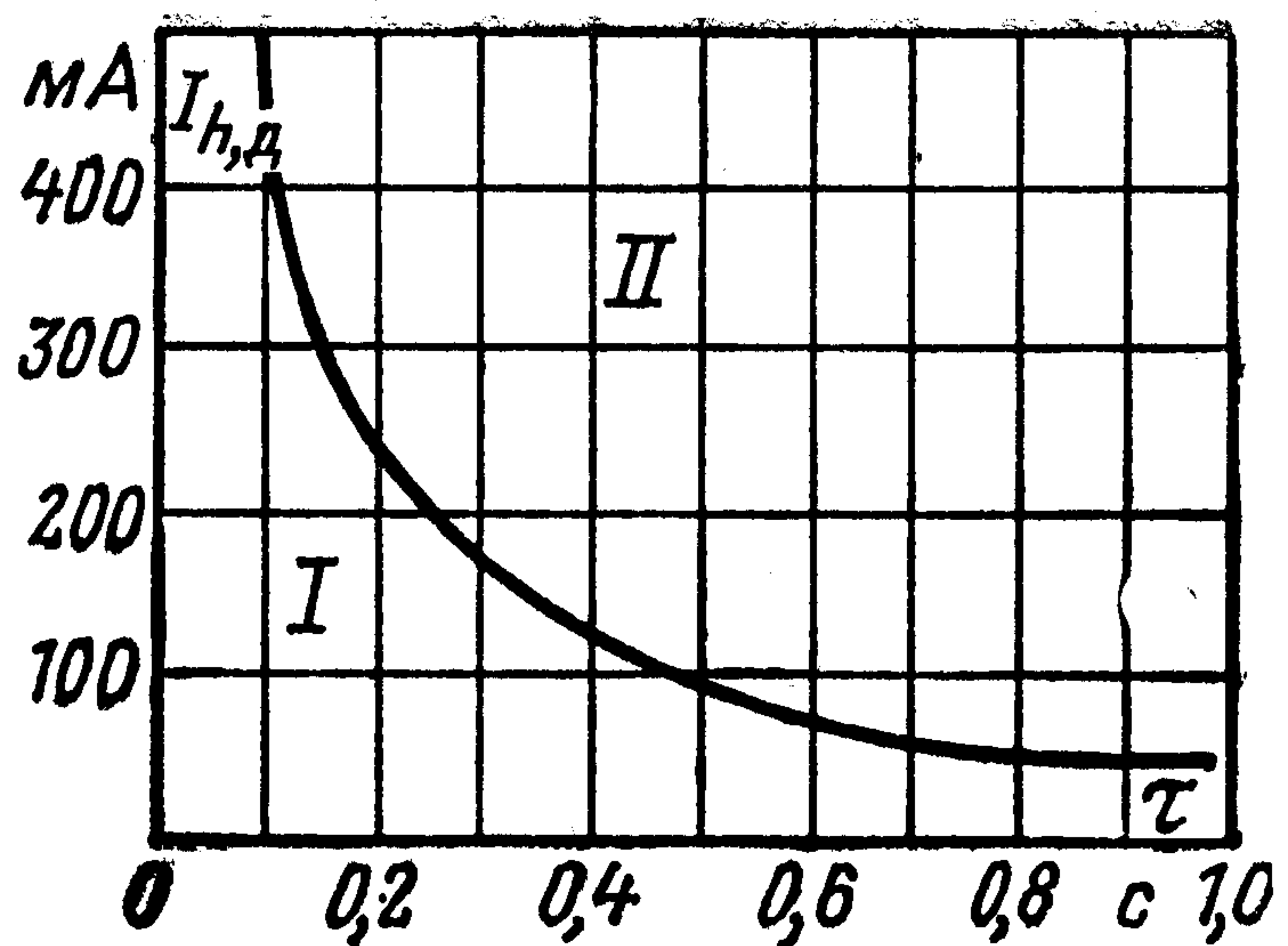


Рис. 11. Зависимость допустимого для человека тока от времени его воздействия.

I — область эффективной защиты;
II — область неэффективной защиты.

робезопасности должна решаться прежде всего дальнейшим совершенствованием заземления, зануления и широким внедрением защитного отключения и других автоматических защитных устройств [15].

10. ЗАНУЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Зануление — это одна из первых защитных мер в электроустановках. В настоящее время зануление находит широкое применение во многих странах мира, однако известно, что ее эффективность снижается с ростом мощности электропотребителей и протяженности сети. Поэтому в некоторых странах, например во Франции, зануление не развивалось и в настоящее время не применяется.

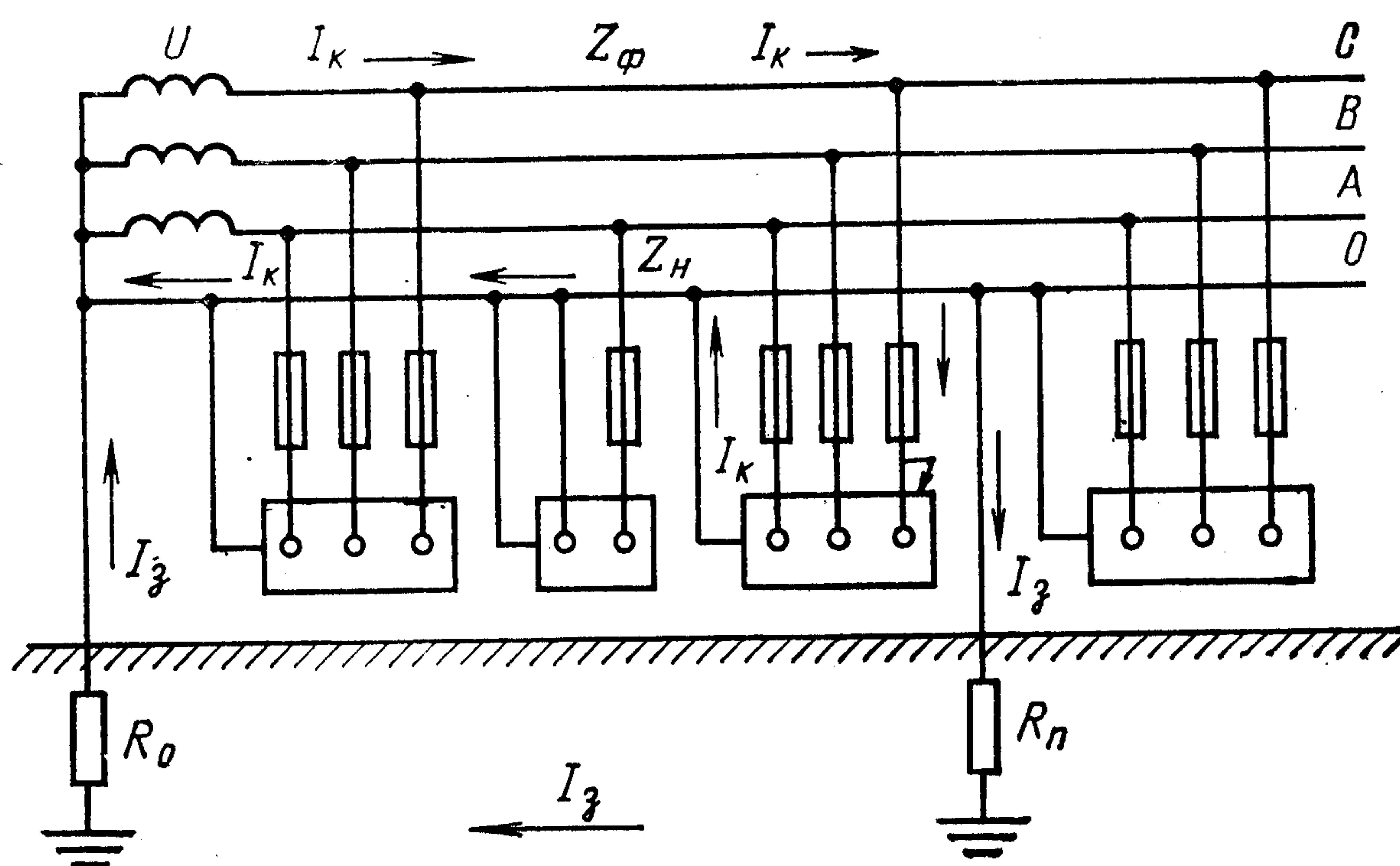


Рис. 12. Принципиальная схема зануления.

В Советском Союзе зануление нашло широкое применение. Правда, сам термин «зануление» ПУЭ 1966 г. был исключен из официального употребления. Однако практика показала, что сделано это было необоснованно, и в настоящее время этот термин восстановлен [9].

Принципиальная схема зануления приведена на рис. 12. Особенностью электроустановки с занулением является то, что нейтраль источника питания (генератора или трансформатора) подключена к рабочему заземлителю R_0 при помощи отдельного проводника. Этот заземлитель располагается в непосредственной близости от источника питания или около стены здания, в котором он находится. В сети с занулением необходимо различать нулевой защитный и нулевой рабочий проводники.

Нулевой защитный проводник — проводник, соединяющий зануляемые части с глухозаземленной нейтральной точкой обмотки источника тока или ее эквивалентом [13].

Нулевой рабочий проводник — проводник, используемый для питания электроприемников, соединенный с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора. Он, как правило, может одновременно служить и защитным проводником, при этом должны быть учтены требования, предъявляемые и к нулевому и к защитному проводникам.

На воздушных линиях электропередачи зануление осуществляется нулевым рабочим проводником, при этом на концах линии (или ответвлении) длиной более 200 м нулевой рабочий проводник заземляется повторно (R_n). То же самое делается на вводах в здания, электроустановки которых должны быть занулены.

Зануление предусматривает также наличие в цепи питания электропотребителей максимальной токовой защиты (предохранитель, автоматический выключатель). Ток срабатывания этой защиты $I_{ср}$ выбирается согласно ПУЭ в зависимости от номинального тока I_n электропотребителя.

При замыкании на зануленный корпус в цепи одного из фазных проводов возникает ток короткого замыкания I_k . Этот ток определяется фазным напряжением источника питания U , сопротивлением цепи фазного \underline{Z}_ϕ и нулевого \underline{Z}_n проводов:

$$I_k = \frac{U}{\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_n}. \quad (42)$$

Сопротивление цепи «фаза — нуль» $\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_n$ выражается комплексными величинами. Это объясняется тем, что при протекании больших токов необходимо учитывать индуктивную составляющую сопротивления проводников.

При надлежащем выполнении зануления I_k должен превышать $I_{ср}$ и тем самым обеспечивать срабатывание максимальной токовой защиты и безопасность лиц, имеющих контакт с зануленным электрооборудованием. Быстродействие защиты определяется кратностью отношения $I_k/I_{ср}$.

Для анализа эффективности зануления значительный интерес представляет также напряжение прикосновения,

воздействующее на человека с момента замыкания на корпус до срабатывания защиты. Оно определяется падением напряжений на $R_0(U_0)$ и $R_{\Pi}(U_{\Pi})$ от тока замыкания на землю I_3 . Выражая I_3 через параметры сети, получаем [4] (для расчетной схемы):

напряжение на аварийном корпусе относительно земли

$$\dot{U}_h = \dot{U}_{\Pi} = \frac{UR_{\Pi}\underline{Z}_H}{(\underline{Z}_{\Phi} + \underline{Z}_H)(R_0 + R_{\Pi})}, \quad (43)$$

напряжение нейтрали относительно земли

$$\dot{U}_0 = \frac{UR_0\underline{Z}_H}{(\underline{Z}_{\Phi} + \underline{Z}_H)(R_0 + R_{\Pi})}. \quad (44)$$

Напряжения на остальных зануленных корпусах электрооборудования не будут превышать U_{Π} и U_0 и будут определяться потенциалом нулевого проводника относительно земли в точке их подключения. Поэтому требования к быстрдействию зануления должны определяться зависимостью $U_{h,д}$ от времени воздействия (см. табл. 1) с учетом U_{Π} и U_0 . Из (43) и (44) видно, что U_{Π} и U_0 всегда меньше фазного напряжения источника питания, а их значения определяются в значительной степени соотношениями \underline{Z}_{Φ} и \underline{Z}_H , R_{Π} и R_0 . Следовательно, зануление не только ограничивает время воздействия тока на организм человека при возникновении условия поражения, но и снижает напряжение прикосновения. Причем это снижение можно планировать нормированием параметров сети.

Если соотношения \underline{Z}_{Φ} и \underline{Z}_H , R_{Π} и R_0 определяются режимом работы зануления при замыкании на корпус, то их абсолютные значения принимаются исходя из других аварийных режимов. Основные из них — замыкание на землю, обрыв нулевого провода или переход напряжения в источнике питания с обмотки высшего напряжения на обмотку низшего напряжения. Например, замыкание на землю, как это следует из (22), приводит к резкому возрастанию напряжения нейтральной точки источника питания сети относительно земли. В сети с занулением это ведет к появлению опасного напряжения на зануленном электрооборудовании относительно земли. Причем это напряжение в значительной степени зависит от со-

противления замыкания на землю, которое, как уже отмечалось, является функцией удельного сопротивления грунта в месте замыкания. Следовательно, почвенно-климатические условия эксплуатации электроустановок также влияют на эффективность зануления и выбор ее параметров.

При обрыве нулевого проводника система зануления превращается в систему заземления, поэтому опасность поражения при прикосновении к одному из корпусов за местом обрыва можно определить по выражению (38). Во всяком случае, опасность при указанном обрыве возрастает. Нетрудно также показать, что при переходе высшего напряжения на сторону низшего напряжение прикосновения на зануленных электропотребителях будет определяться общим сопротивлением рабочего и повторных заземлителей.

В последние годы рядом организаций проведены серьезные исследования по определению влияния различных факторов на работу зануления. В результате существенно изменены требования к занулению и получен значительный технико-экономический эффект [13]. Согласно современным требованиям сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль источника питания, в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока. Общее сопротивление всех повторных заземлителей воздушной линии должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В, при этом сопротивление каждого из повторных заземлителей должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях. Кроме того, при удельном электрическом сопротивлении грунта более 100 Ом·м допускается увеличение указанных выше значений R_0 и R_{Σ} в отношении $\rho/100$, но не более чем в 10 раз.

При выполнении зануления проводники цепи «фаза — нуль» должны быть выбраны таким образом, чтобы при замыкании на корпус возникал ток короткого замыкания, превышающий не менее чем в 3 раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя и номинальный ток расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратозависимую от тока характеристику.

При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, сопротивление цепи «фаза — нуль» должно быть таким, чтобы был обеспечен ток короткого замыкания, равный величине уставки тока мгновенного срабатывания, умноженный на коэффициент, учитывающий разброс (по заводским данным), и на коэффициент запаса 1,1. При отсутствии заводских данных для автоматов с номинальным током до 100 А кратность тока короткого замыкания относительно величины уставки следует принимать равной 1,4, для автоматов с номинальным током более 100 А — 1,25. Выполнение указанных требований обеспечит необходимое быстродействие защиты. При этом полная проводимость нулевых защитных проводников во всех случаях должна быть не менее 50% проводимости фазного проводника, что обеспечивает необходимое снижение напряжения прикосновения до срабатывания защиты.

Соединения нулевых защитных проводников между собой должны обеспечивать надежный контакт и выполняться сваркой. Присоединение указанных проводников к частям оборудования, подлежащих занулению, выполняется сваркой или болтовым соединением. Присоединение должно быть доступно для осмотра. Включение выключателей и предохранителей в нулевой защитный проводник запрещается. Открыто проложенные нулевые защитные проводники должны иметь отличительную окраску — по зеленому фону желтые полосы. Перечисленные требования являются лишь примерами особенностей выполнения нулевого защитного проводника, направленными на обеспечение его целостности в процессе эксплуатации. Практика показывает, что выполнение зануления в соответствии с [13] обеспечивает его высокую надежность.

Отмеченные новые положения в нормировании и выполнении зануления, безусловно, повышают надежность, эффективность и технико-экономические показатели этой меры защиты. Однако и они не устраняют принципиальных недостатков зануления. Основные из них:

зануление не обеспечивает безопасность при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям электроустановки;

нулевой защитный проводник обеспечивает вынос потенциала (даже при отсутствии замыкания на кор-

пус) на все зануленные электропотребители, что представляет опасность поражения и создает помехи для радиоэлектронного оборудования;

в сети с занулением нельзя использовать заземление отдельных электропотребителей (без соединения их с нулевым защитным проводником), так как при замыкании на заземленный корпус зануленные электропотребители оказываются под опасным напряжением в течение длительного времени;

одновременное прикосновение к токоведущим частям электроустановки и ее зануленному корпусу представляет большую опасность;

одновременное прикосновение к незануленному и зануленному электрооборудованию также представляет значительную опасность;

ошибки при монтаже и подключении электропотребителя могут привести к тому, что его корпус окажется непосредственно подключенным к фазе через нулевой защитный проводник;

перегорание одного предохранителя при замыкании на корпус не обеспечивает полного отключения от сети трехфазного электропотребителя;

токи короткого замыкания, токи утечки, искры при замыкании на корпус, перегревы трехфазных электропотребителей при работе на двух фазах, обусловленные наличием зануления, представляют пожарную опасность;

трудности выполнения требований ПУЭ к занулению в протяженных сетях и при занулении мощных электропотребителей;

трудности контроля целостности цепи зануления.

Перечисленные недостатки показывают, что зануление уже не соответствует современному уровню электрификации народного хозяйства страны и нуждается в принципиальной переработке или замене более совершенными мерами защиты.

11. ЗАЗЕМЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Электроустановки напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью относятся к электроустановкам с большими токами замыкания на землю. К ним также относятся электроустановки 110 кВ и выше,

в которых нейтрали отдельных трансформаторов изолированы или заземлены через резисторы или реакторы.

Основной расчетной формулой тока в цепи человека при прикосновении к аварийному заземленному корпусу является выражение (38), из которого видно, что обеспечить безопасность в рассматриваемых электроустановках только снижением сопротивления заземляющего устройства R_z не представляется возможным. Поэтому заземление в данных электроустановках применяется совместно с выравниванием потенциалов. Выравнивание потенциалов осуществляется сооружением на территории электроустановки (например, распределительной подстанции) контурного заземляющего устройства. Это устройство представляет собой систему электродов длиной 2,5—5 м, забитых в землю и соединенных между

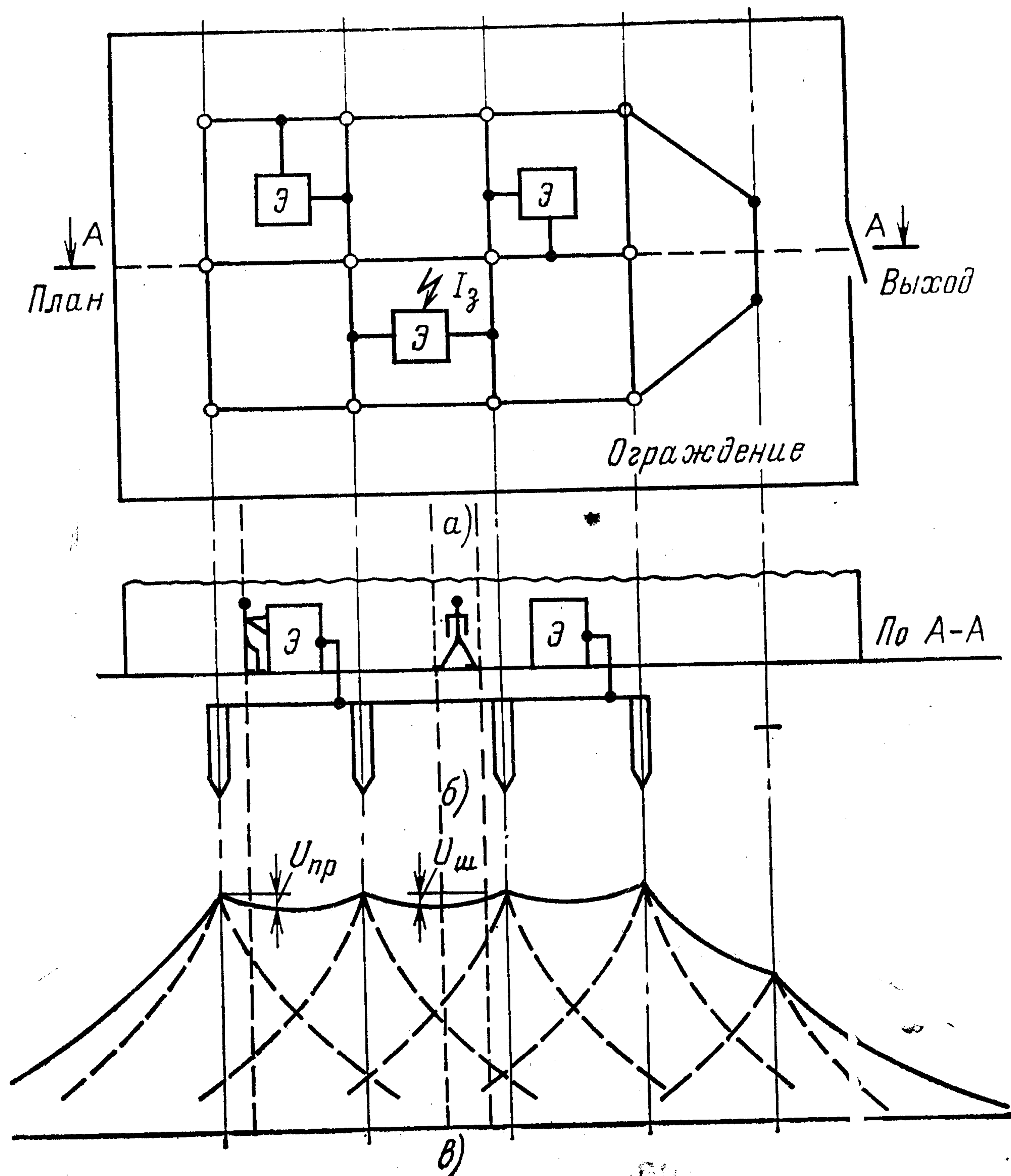


Рис. 13. Распределение потенциала в зоне растекания тока (в) при использовании заземления с выравниванием потенциалов (а, б)

собой стальными полосами. Вся эта система сооружается в траншеях глубиной 0,6—0,7 м и представляет собой металлическую сетку, расположенную в земле на территории размещения электрооборудования Э, подлежащего заземлению (рис. 13,а и б).

При замыкании на заземленный корпус стекающий в землю ток образует зону растекания. Распределение потенциалов в зоне растекания определяется конструкцией заземляющего устройства. Для контурного заземляющего устройства характерным является то, что потенциалы зоны растекания отдельных электродов суммируются и в результате потенциал грунта на территории электроустановки выравнивается и принимает значение, близкое к потенциалу заземлителя. Ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к заземленному электрооборудованию, в этом случае определяется выражением (36). Из этого выражения видно, что изменением коэффициента α можно обеспечить снижение тока в цепи человека до безопасной величины. Напряжение шага, как это следует из рис. 9, также уменьшается при использовании контурного заземляющего устройства. Пример формирования зоны растекания контурным заземляющим устройством показан на рис. 13,в.

Заземляющие устройства электроустановок с большими токами замыкания на землю, находящиеся в настоящее время в эксплуатации, сооружены в соответствии с требованиями ПУЭ 1966 г. [11]. Эти требования были в основном сформулированы в 1946 г. [17]. Они соответствовали уровню развития электроэнергетики того времени и основывались на концепции о целесообразности упрощения методов расчета и проектирования заземляющих устройств. Основное требование предъявлялось к сопротивлению R_z , которое не должно было превышать 0,5 Ом. Это сопротивление могло быть обеспечено применением как искусственных, так и естественных заземлителей, при этом конструкция искусственного заземлителя была строго определена ПУЭ.

Бурное развитие электроэнергетики привело к тому, что в ряде случаев указанные требования не могли быть выполнены или их выполнение требовало значительных затрат. Основными факторами, повлиявшими на моральное старение требований к заземляющим устройствам, являются:

значительное расширение диапазона токов замыкания

на землю (I_3 большинства электроустановок выше 1000 В составляет единицы и десятки килоампер);

различная вероятность поражения током в отдельных электроустановках даже при выполнении требований к заземлению;

значительное расширение площадей территорий, на которых размещается электрооборудование, подлежащее заземлению (например, площадь подстанций сверхвысокого напряжения доходит до $350 \cdot 10^3 \text{ м}^2$);

уменьшение естественных заземлителей из-за широкого применения кабелей с полимерными покрытиями и систем водоснабжения из нетокопроводящих материалов;

создание методов расчета сложных заземляющих устройств с помощью электронных вычислительных машин;

унификация требований к заземляющим устройствам в международном масштабе;

дальнейшее развитие релейной защиты, обеспечивающей отключение сети при замыкании на землю;

необходимость сооружения заземляющих устройств в многолетнемерзлых и горных грунтах. Например, сооружение искусственного заземляющего устройства с $R_3 = 0,5 \text{ Ом}$ в условиях вечной мерзлоты составляет 35—37% стоимости подстанции [18].

В последние годы группой организаций были проведены исследования по оптимизации заземляющих устройств и сформулированы новые требования к ним [17]. Принципиально новым является то, что нормируется не только сопротивление заземляющих устройств, но и напряжение прикосновения. Внесены изменения и в требования к конструкции заземляющих устройств [13]. В частности, изменены ограничения на расстояние между поперечными (выравнивающими) электродами заземляющей сетки с 6 до 30 м. Все это позволяет в каждом конкретном случае определить оптимальную конструкцию заземляющего устройства и обеспечить безопасность электроустановки.

Заземляющее устройство, которое выполняется по требованиям к его сопротивлению, должно иметь $R_3 \leq \leq 0,5 \text{ Ом}$, при этом необходимо максимально использовать естественные заземлители. В последние годы наметилась четкая тенденция к использованию в качестве заземлителей железобетонных фундаментов зданий и

сооружений. При строительстве крупных производственных комплексов это позволяет вообще отказаться от использования искусственных заземлителей, так как при современном заполнении промышленной площадки зданиями их основания можно рассматривать как заземляющую сетку.

При выполнении заземляющего устройства по требованиям к напряжению прикосновения оно должно быть выполнено таким образом, чтобы напряжение прикосновения не превышало допустимого для человека значения с учетом времени воздействия. В расчетах за время воздействия напряжения прикосновения следует принимать суммарное время срабатывания релейной защиты и выключателя. При этом для рабочих мест следует принимать время действия резервной защиты, а для остальной территории — основной защиты. Таким образом, быстродействием защиты компенсируется повышенная вероятность возникновения опасности поражения на рабочих местах.

Напряжение на заземлителе при максимальном токе замыкания на землю не должно превышать 5 кВ. Это необходимо для обеспечения надежности работы кабелей связи, отходящих от электроустановки, и предотвращения выноса потенциала с территории электроустановки по протяженным металлическим коммуникациям. Если таких опасностей не существует, то напряжение на заземлителе может превысить указанную величину.

12. ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В сетях с глухозаземленной нейтралью могут быть использованы УЗО, реагирующие на несимметрию фазных токов утечки (ток нулевой последовательности), и устройства, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли. Это следует из анализа зависимости входного сигнала УЗО различных групп от тока в цепи человека и режима нейтрали. Устройства, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли, обеспечивают безопасность только при возникновении опасности поражения в результате замыкания на корпус. Это устройство несложное и достаточно подробно рассмотрено в литературе [4—6, 12], оно имеет ряд серьезных недостатков и поэтому не нашло широкого применения

в рассматриваемых электроустановках. В связи с этим рассмотрим только устройства, реагирующие на несимметрию фазных токов утечки.

Датчиком (фильтром) этих устройств является трансформатор тока с магнитопроводом тороидальной формы. Первичными обмотками трансформатора являются фазные проводники, пропущенные через окно магнитопровода, вторичная обмотка равномерно расположена на магнитопроводе. Существуют и другие конструкции датчика, но они в настоящее время не находят широкого применения.

Влияние параметров сети на работу УЗО на несимметрии фазных токов утечки можно определить из схемы, приведенной на рис. 6. Для этого необходимо найти зависимость входной величины устройства $I_{н,2n}$ от параметров сети и произвести анализ этой зависимости. Это можно сделать с помощью графа схемы замещения электрической сети, приведенного на рис. 7.

Применяя правило Мэзона, получаем:

$$I_{н,2n} = U \frac{\frac{Y_4 Y_6}{Y_1} - Y_7 \left(1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}\right) - \frac{Y_5 Y_3 Y_6}{Y_1 Y_2} + \frac{Y_5 Y_3}{Y_2}}{1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}} +$$

$$+ U_{оп} \frac{Y_3 \left(1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}\right) - \frac{Y_3 Y_6}{Y_1} + \frac{Y_3 Y_3 Y_6}{Y_1 Y_2} - \frac{Y_3 Y_3}{Y_2}}{1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}}. \quad (45)$$

Анализ этого выражения с учетом (11)—(17) показывает, что входной сигнал УЗО имеет сложную зависимость от напряжения сети, напряжения оперативного источника питания, проводимостей изоляции сети и проводимости цепи человека. Для сети с глухозаземленной нейтралью, где $U_{оп}=0$, $Y_{d,1}=Y_{d,2}=Y_{d,3}=0$, $Y_0 \gg Y_{e,a}$, $Y_{e,b}$, $Y_{e,c}$, выражение (45) с учетом (11), (14), (16) и (17) примет вид:

$$I_{н,2n} = I_{\Sigma} = U Y_0 \frac{Y_{i,a} + a^2 Y_{i,b} + a Y_{i,c} + G_h}{Y_0 + Y_{i,a} + Y_{i,b} + Y_{i,c} + G_h}, \quad (46)$$

где I_{Σ} — суммарный ток первичных обмоток трансформатора тока,

Из (46) видно, что входной сигнал УЗО в сети с глухозаземленной нейтралью зависит прежде всего от симметрии проводимостей изоляции фаз относительно земли в зоне защиты и проводимости цепи человека. До прикосновения человека к фазе, когда $C_h=0$,

$$I_{\Sigma} = U \underline{Y}_0 \frac{\underline{Y}_{i,a} + a^2 \underline{Y}_{i,b} + a \underline{Y}_{i,c}}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_{i,a} + \underline{Y}_{i,b} + \underline{Y}_{i,c}}. \quad (47)$$

При симметрии проводимостей фаз относительно земли, когда $\underline{Y}_{i,a} = \underline{Y}_{i,b} = \underline{Y}_{i,c} = \underline{Y}_i$,

$$I_{\Sigma} = U \underline{Y}_0 \frac{(1 + a^2 + a) \underline{Y}_i}{\underline{Y}_0 + 3 \underline{Y}_i} = U \underline{Y}_0 \frac{0 \cdot \underline{Y}_i}{\underline{Y}_0 + 3 \underline{Y}_i} = 0. \quad (48)$$

При прикосновении к фазе в сети с симметричной изоляцией в зоне защиты с учетом, что $\underline{Y}_0 \gg \underline{Y}_i, G_h$, и выражения (25)

$$I_{\Sigma} = I_h = U G_h. \quad (49)$$

Анализ выражений (46) — (49) показывает, что УЗО будет работать более эффективно в сети с симметричной изоляцией в зоне защиты. В этом случае до прикосновения человека к фазе входная величина будет равна нулю, после прикосновения — току через человека, при этом установка устройства определяется однозначно. Если $\underline{Y}_{i,a} \neq \underline{Y}_{i,b} \neq \underline{Y}_{i,c}$, то входной сигнал существует до прикосновения человека к фазе. Его значение может превысить уставку, и устройство сработает. В ряде случаев это будет неоправданным (ложным) отключением. При прикосновении человека к фазе в этом случае результирующий входной сигнал будет равен векторной сумме двух сигналов. Один из них будет определяться токами утечки через изоляции фаз относительно земли, другой — током через человека. Следовательно, при несимметрии изоляции сети в зоне защиты однозначной зависимости входного сигнала УЗО от I_h не существует,

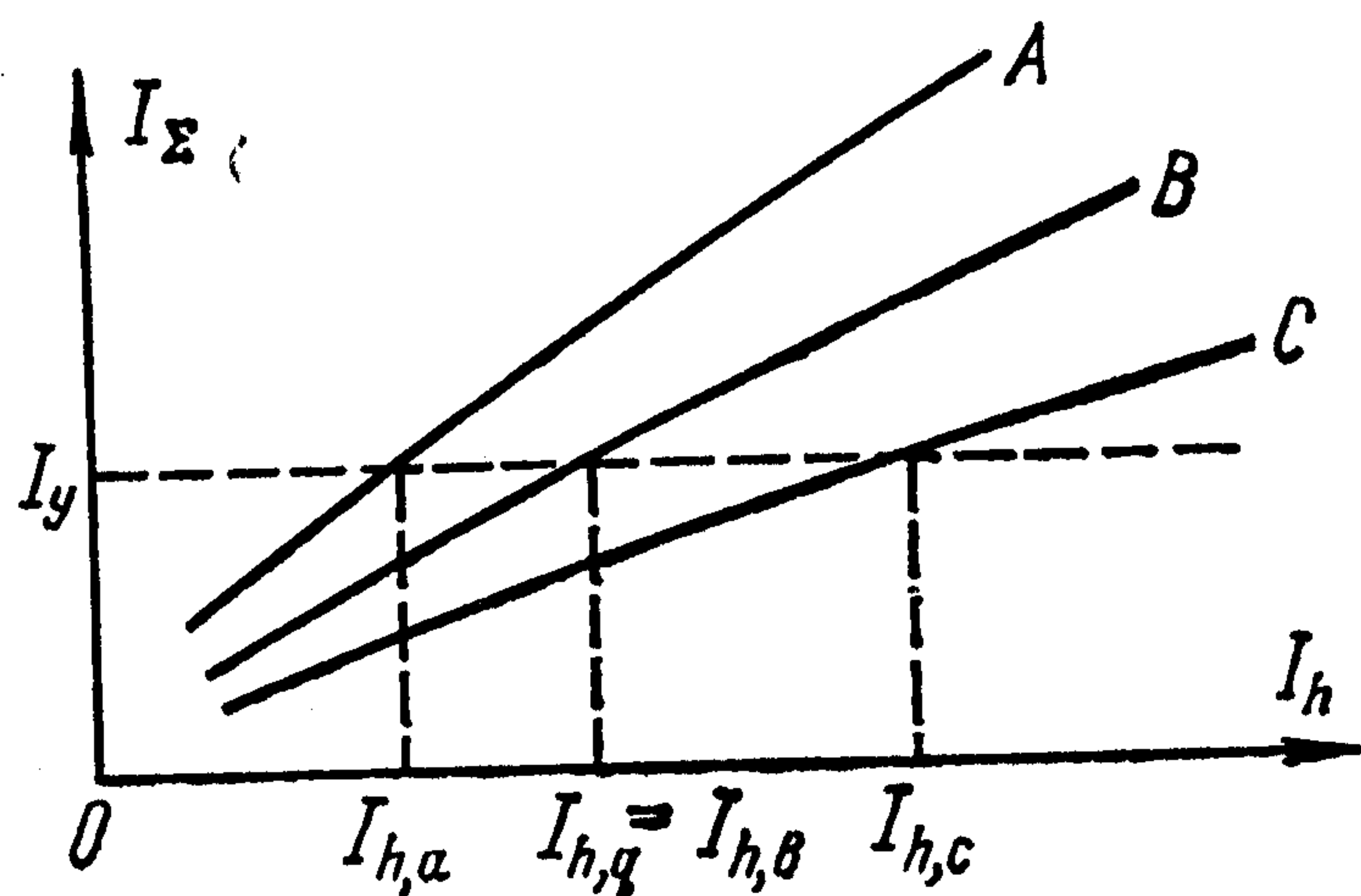


Рис. 14. Зависимость входного сигнала УЗО от тока в цепи человека при прикосновении к фазам A, B и C в сети с несимметричной изоляцией в зоне защиты.

превысить уставку, и устройство сработает. В ряде случаев это будет неоправданным (ложным) отключением. При прикосновении человека к фазе в этом случае результирующий входной сигнал будет равен векторной сумме двух сигналов. Один из них будет определяться токами утечки через изоляции фаз относительно земли, другой — током через человека. Следовательно, при несимметрии изоляции сети в зоне защиты однозначной зависимости входного сигнала УЗО от I_h не существует,

поэтому при прикосновении к различным фазам УЗО будет срабатывать от различных токов в цепи человека.

На рис. 14 показан пример характерной зависимости I_{Σ} от I_h при прикосновении к фазам с различными сопротивлениями изоляции в зоне защиты, при этом уставка УЗО I_y выбрана по допустимому току в цепи человека при прикосновении к фазе В. Из рисунка видно, что ток через человека при прикосновении к фазе А $I_{h,a}$ будет вызывать срабатывание защиты раньше, чем в этом есть необходимость (перезащита). При прикосновении к фазе С защита срабатывает от тока $I_{h,c}$, значение которого значительно превышает допустимое (недозащита).

Найденная зависимость $I_{\Sigma} = f(I_h)$ позволяет сделать вывод, что в сети с несимметричной изоляцией фаз в зоне защиты существует противоречие между необхо-

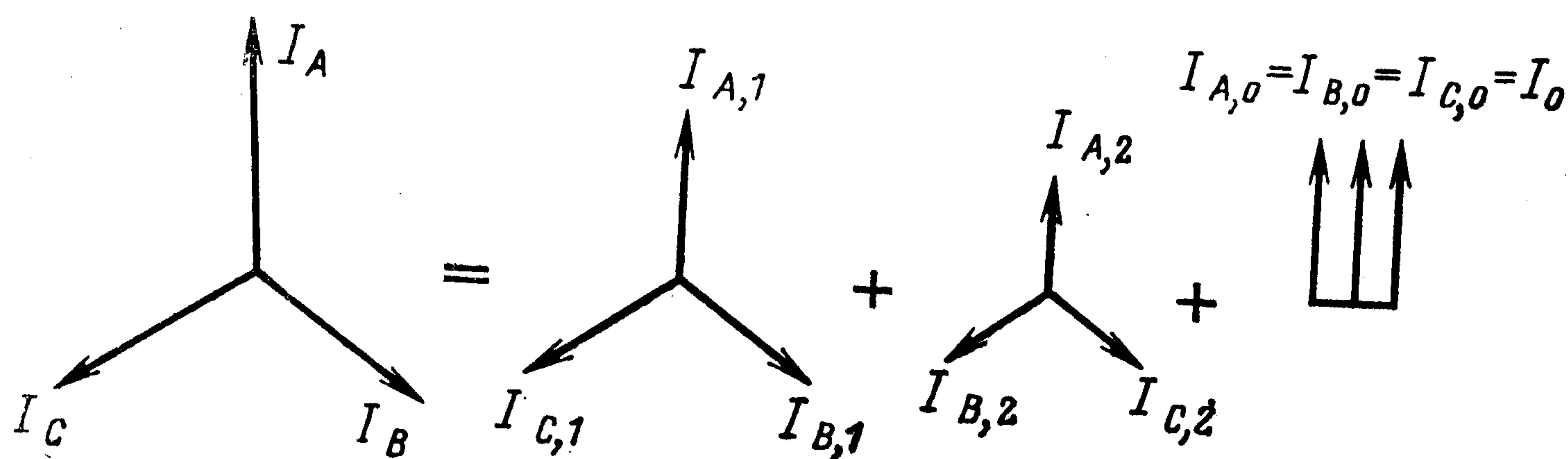


Рис. 15. Симметричные составляющие фазных токов.

димостью снижения уставки для обеспечения безопасности во всем диапазоне опасных для человека токов и необходимостью повышения уставки для исключения ложных срабатываний УЗО. Это противоречие устраняется далеко не во всех сетях [19]. Следует также отметить, что входным сигналом рассматриваемого УЗО является векторная сумма токов (через изоляции и человека), стекающих на землю в зоне защиты. Поэтому применяемое иногда название «защита по току утечки» является довольно условным.

Более обоснованным является название «защита на токе нулевой последовательности». Оно связано с решением электротехнических задач методом симметричных составляющих. Согласно этому методу любую несимметричную систему векторов фазных токов I_A, I_B, I_C можно разложить на три симметричные системы прямой $I_{A,1}, I_{B,1}, I_{C,1}$, обратной $I_{A,2}, I_{B,2}, I_{C,2}$ и нулевой $I_{A,0}, I_{B,0}, I_{C,0}$ последовательностей (рис. 15) [8]. При этом сумма

векторов полученных систем составляет исходную систему.

Поскольку датчик УЗО представляет собой суммирующее устройство фазных токов, то

$$I_{\Sigma} = I_A + I_B + I_C = 3I_0. \quad (50)$$

Суммы векторов прямой и обратной последовательностей равны нулям, так как их модули и углы между ними равны. Токи прямой и обратной последовательностей создаются токами нагрузки, токи нулевой последовательности создаются токами утечки и током через человека. Следовательно, входным сигналом УЗО действительно является ток нулевой последовательности ($I_{\Sigma} = 3I_0$), а датчиком — трансформатор (фильтр) тока нулевой последовательности (ТТНП).

Влияние конструкции ТТНП на эффективность защиты определяется током небаланса $i_{нб}$. Наличие этого тока не вытекает из принципа работы УЗО, оно является следствием геометрического несовершенства ТТНП. Практически невозможно расположить фазные проводники равнозначно по отношению к магнитопроводу, поэтому даже одинаковые токи, протекающие по разным проводникам, наводят различные магнитные потоки в сердечнике ТТНП. При суммировании магнитных потоков не происходит их полного взаимного уничтожения и во вторичной обмотке ТТНП появляется ток небаланса. Следовательно, $i_{нб}$ для УЗО является помехой.

Рассмотрим зависимость тока небаланса от параметров ТТНП с двумя первичными обмотками. Будем считать, что тороидальный сердечник ТТНП обладает магнитной проницаемостью μ , вторичная обмотка расположена на нем равномерно, влияние внешних полей отсутствует. Найдем зависимость $i_{нб}$ от геометрии расположения первичных обмоток в окне магнитопровода.

На рис. 16 показаны геометрические размеры сердечника и расположение проводов в окне магнитопровода.

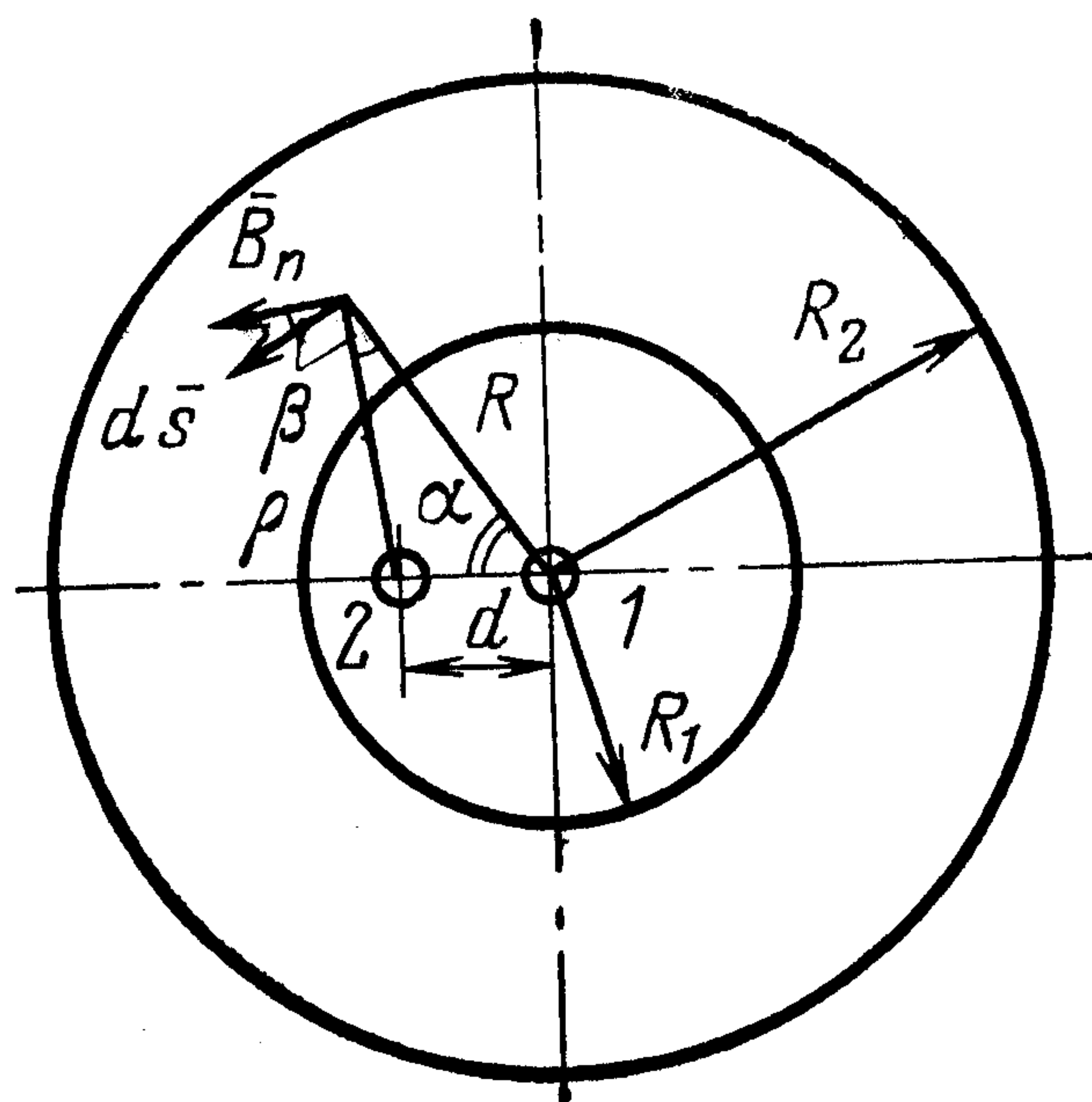


Рис. 16. К расчету тока небаланса ТТНП.

По проводам 1 и 2 в противоположных направлениях проходят токи равного значения I , А. Магнитный поток, возникающий в магнитопроводе от тока, протекающего в проводе 1, будет [20]:

$$\Phi_1 = \frac{\mu\mu_0 b I}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (51)$$

где b — высота магнитопровода, м; R_1, R_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы магнитопровода, м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м.

Магнитный поток, создаваемый током провода 2, с учетом смещения этого провода относительно геометрического центра магнитопровода определится выражением

$$\Phi_2 = - \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu\mu_0 b I}{2\pi r} \cos \beta dR, \quad (52)$$

где β — угол между векторами; r — расстояние от провода 2 до элементарной площадки ds , м.

Выражая $r, \cos \beta, ds, \alpha$ через геометрические размеры магнитопровода и расположения обмоток ТТНП, после преобразования получаем [20]:

$$\Phi_2 = - \frac{\mu\mu_0 b I}{4\pi} \ln \frac{d^2 - 2R_2 d \cos \alpha + R_2^2}{d^2 - 2R_1 d \cos \alpha + R_1^2}, \quad (53)$$

где $\alpha = \frac{2\pi}{w}$; w — количество витков вторичной обмотки

ТТНП; d — расстояние от геометрического центра магнитопровода до центра провода с током, м.

Используя принцип суперпозиции, находим общий магнитный поток от тока, протекающего по проводам 1 и 2. Далее с помощью схемы замещения ТТНП определим ток небаланса ТТНП, работающего на нагрузку Z_H , который будет равен [20]:

$$i_{\text{нб}} = \frac{4,44 f w \mu\mu_0 b I \ln \frac{R_2 \sqrt{d^2 - 2R_1 d \cos \alpha + R_1^2}}{R_1 \sqrt{d^2 - 2R_2 b \cos \alpha + R_2^2}}}{2\pi \left[\left(\mu\mu_0 f w^2 b \ln \frac{R_2}{R_1} \right)^2 + Z_H \right]}, \quad (54)$$

где f — частота протекающего по проводам тока, Гц.

Выражение (54) показывает, что ток небаланса ТТНП, вызванный несимметричным расположением фазных проводов в окне магнитопровода, зависит от многих

факторов как электрического, так и конструктивного характера. Его анализ позволяет сделать следующие выводы:

ток небаланса зависит от значения номинального тока нагрузки, подключенной в зоне защиты;

ток небаланса зависит от частоты протекающего по первичным обмоткам тока;

ток небаланса зависит от геометрических размеров магнитопровода (особенно от соотношения R_2/R_1);

ток небаланса зависит от степени смещения фазных проводов относительно геометрического центра магнитопровода.

Сделанные выводы справедливы и для ТТНП с большим количеством первичных обмоток. На рис. 17 приведена характерная зависимость $i_{нб}$ от номинального тока нагрузки I_n , подключенной в зоне защиты [21]. Эта зависимость показывает, что с увеличением номинальных токов нагрузки помехоустойчивость УЗО резко снижается. По оси $i_{нб}$ не указан масштаб, так как в каждом конкретном случае он определяется конструкцией ТТНП. Наиболее рациональная конструкция ТТНП приведена на рис. 18 [22]. Ее особенностью является свивка первичных обмоток 1 с шагом, равным высоте магнитопровода. Это позволяет наиболее идентично расположить их относительно магнитопровода 3. Вторичная обмотка 2 равномерно размещена на магнитопроводе.

Изготовление такой конструкции ТТНП на большие токи нагрузки представляет значительные трудности,

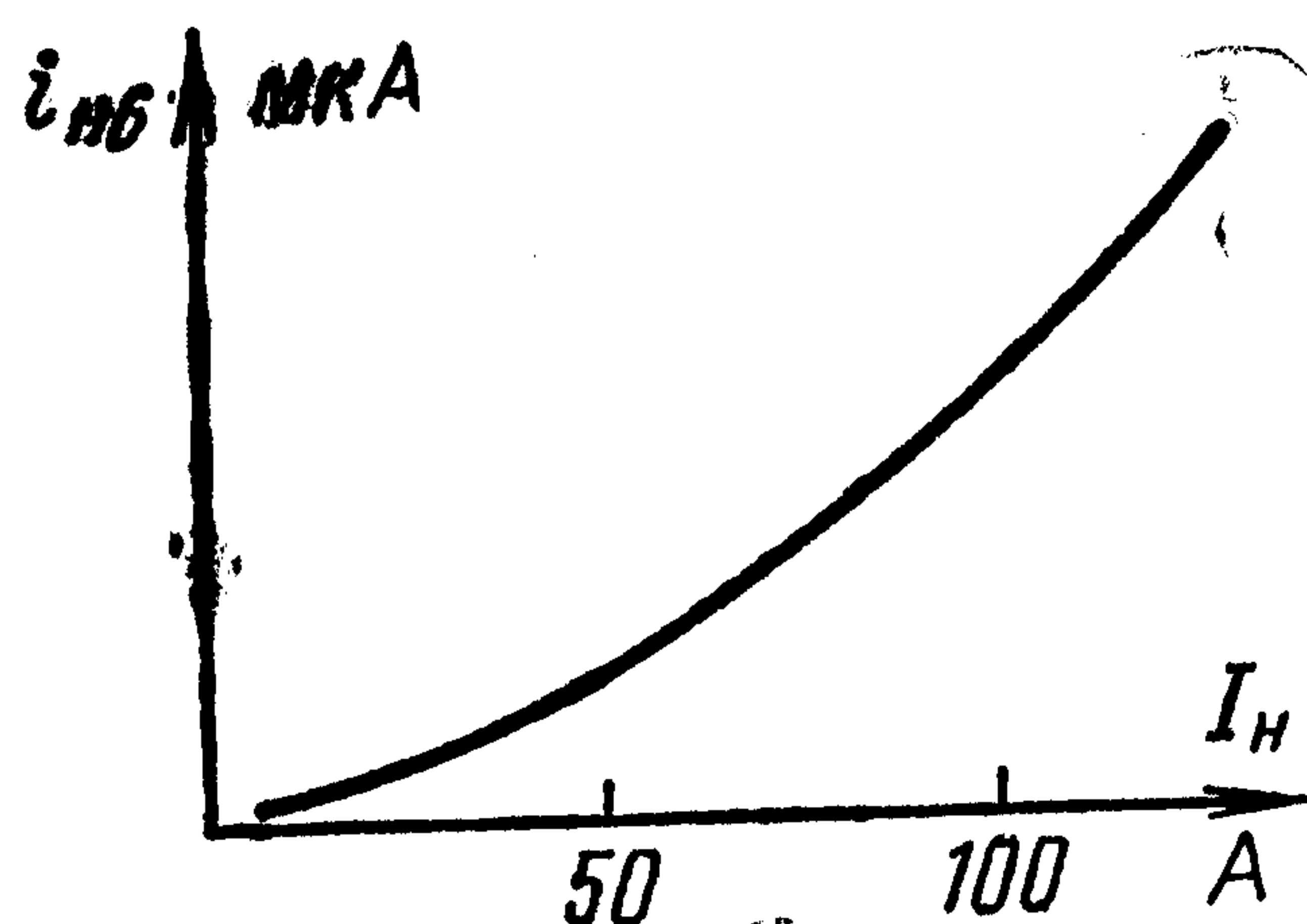


Рис. 17. Зависимость тока небаланса ТТНП от тока нагрузки.

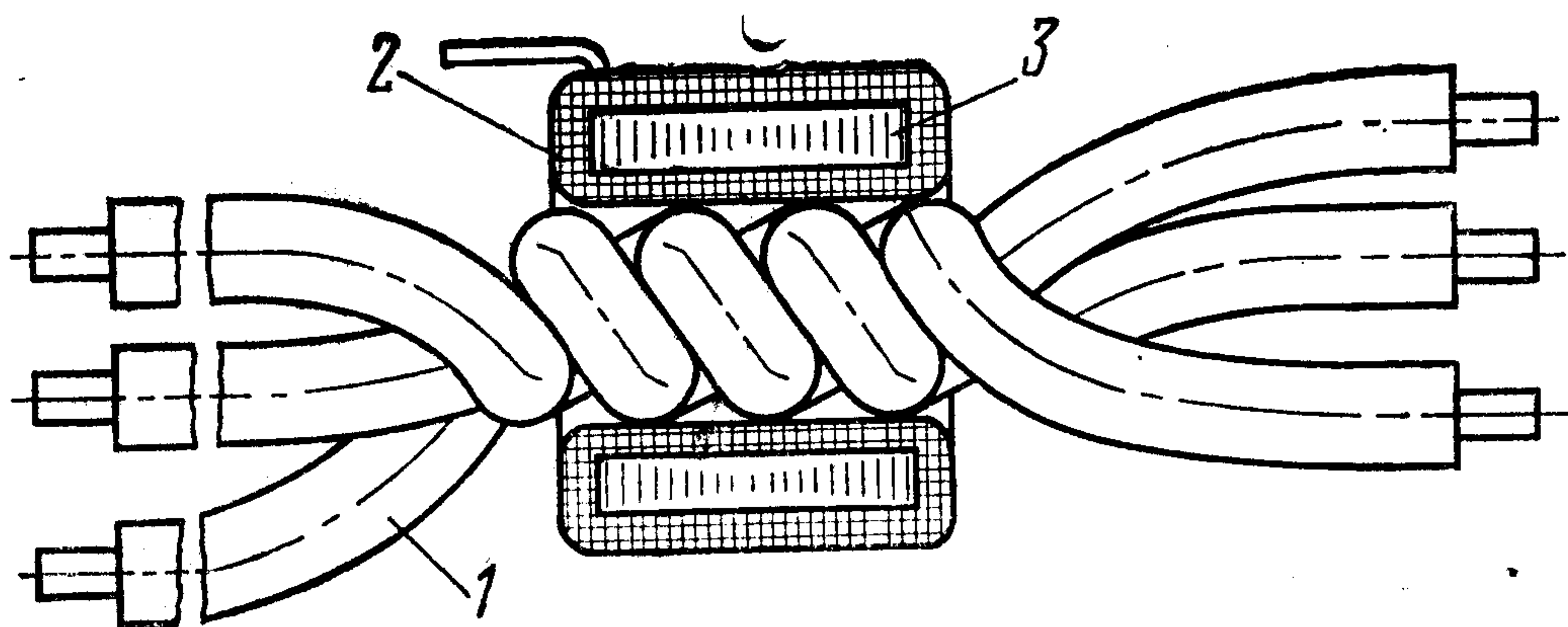


Рис. 18. Принципиальная схема конструкции трансформатора тока нулевой последовательности.

поэтому в качестве первичных обмоток используется отрезок симметричного кабеля. В этом случае недопустимы перекосы кабеля в окне магнитопровода.

Существуют также и другие конструкции ТТНП. В частности, автором разработан датчик УЗО, который позволяет контролировать не только прикосновение человека к фазе, но и обрывы в цепи тока нагрузки [23]. Достигается это суммированием не полных фазных токов, а их полупериодов. Его применение целесообразно в электроустановках с полупроводниковым электроприбором.

Влияние качества электроэнергии на работу УЗО определяется наличием высших гармоник напряжения и тока в сети. Качество электроэнергии оценивается рядом показателей. Согласно ГОСТ 13109-67 для сетей трехфазного тока нормируются допустимые значения колебаний и отклонений напряжения и частоты, несимметрии напряжения промышленной частоты и несинусоидальности формы кривой напряжения.

Рассмотренные выше зависимости справедливы для синусоидального и симметричного напряжения источника питания сети, т. е. когда справедливо выражение (7). Однако в реальных сетях существует большое количество нелинейных и однофазных нагрузок, неравномерно распределенных по фазам. К ним прежде всего относятся вентильные преобразователи, электросварочные агрегаты, индукционные и электродуговые печи, пускорегулирующая аппаратура люминесцентных и газоразрядных ламп, осветительные установки и ручной электроинструмент. Их включение в сеть вызывает искажение питающего напряжения.

Разложение периодической несинусоидальной функции напряжения сети на гармоники позволяет несинусоидальный установившийся режим в сети рассматривать как совокупность взаимно налагающихся синусоидальных режимов кратных частот [24]. При этом, если в гармониках напряжения совпадают по фазе $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ (к таким относятся гармоники, кратные трем, — 3, 6, 9 ...), то они образуют нулевую последовательность, так как

$$\begin{aligned} \sin \left[k\omega \left(\tau - \frac{T}{3} \right) + \psi_k \right] &= \sin \left[k\omega \left(\tau + \frac{T}{3} \right) + \psi_k \right] = \\ &= \sin (k\omega \tau + \psi_k), \end{aligned} \quad (55)$$

где ω — угловая частота; ψ_k — начальная фаза k -й гармоники; T — период.

Следовательно, токи утечки в зоне защиты гармоник, кратных трем, совпадают по фазе, суммируются и представляют собой входной сигнал УЗО. Для сети с симметричной изоляцией ($\underline{Y}_{i,a} = \underline{Y}_{i,b} = \underline{Y}_{i,c} = \underline{Y}_i$) он будет равен:

$$i_{\Sigma, k} = 3i_{o, k} = \dot{U}_{o, k} \underline{Y}_{i, k} \sin(k\omega\tau + \psi_k). \quad (56)$$

Экспериментальные исследования подтвердили влияние высших гармоник на работу УЗО. Основное влияние оказывает третья гармоника. При невыполнении требований ГОСТ 13109-67 она может достигать значений, способных вызвать ложное срабатывание защиты даже при симметричной изоляции сети. Это говорит о том, что на эффективность защиты влияет не только появление несимметрии сопротивлений изоляции в зоне защиты, но и снижение их абсолютных значений.

При наличии в сети полупроводниковых преобразователей в токе нагрузки возможно присутствие постоянной составляющей. Она подмагничивает ТТНП, что ведет к изменению его чувствительности и уставки УЗО. Кроме того, следует отметить, что прикосновение человека к фазе сети с несимметричным или несинусоидальным напряжением вызывает протекание токов высших гармоник в его теле, причем преобладает также третья гармоника. Например, нами была снята осциллограмма тока через эквивалент тела человека [25], подключенного в зоне защиты группы потребителей, состоящей из асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока с вентильным выпрямителем и магнитными усилителями ПМУ-5М-4. Наличие вентилей привело к сильному искажению питающего напряжения, что отразилось на форме кривых токов входного сигнала и через эквивалент человека. Гармонический анализ этих кривых, выполненных с помощью ЭВМ, показал, что их коэффициенты несинусоидальности составляют примерно 0,6. Это означает, что 0,6 I_h составляют высшие гармоники. Следовательно, входной сигнал, вызванный прохождением через человека высших гармоник, не является для УЗО помехой, так как он несет в себе информацию об опасности поражения.

Влияние переходных процессов в сети на работу УЗО определяется кратковременным возрастанием входного

сигнала. Если его значение превышает уставку, а продолжительность — быстродействие преобразователя УЗО, то происходит ложное срабатывание защиты. Переходные процессы в сети возникают при коммутационных процессах, включении мощных электропотребителей, возникновении аварийных режимов, заряде и разряде конденсаторов и индуктивностей, выполнении сварочных работ и т. д. При переходных процессах значительно возрастает влияние многих факторов на входной сигнал УЗО.

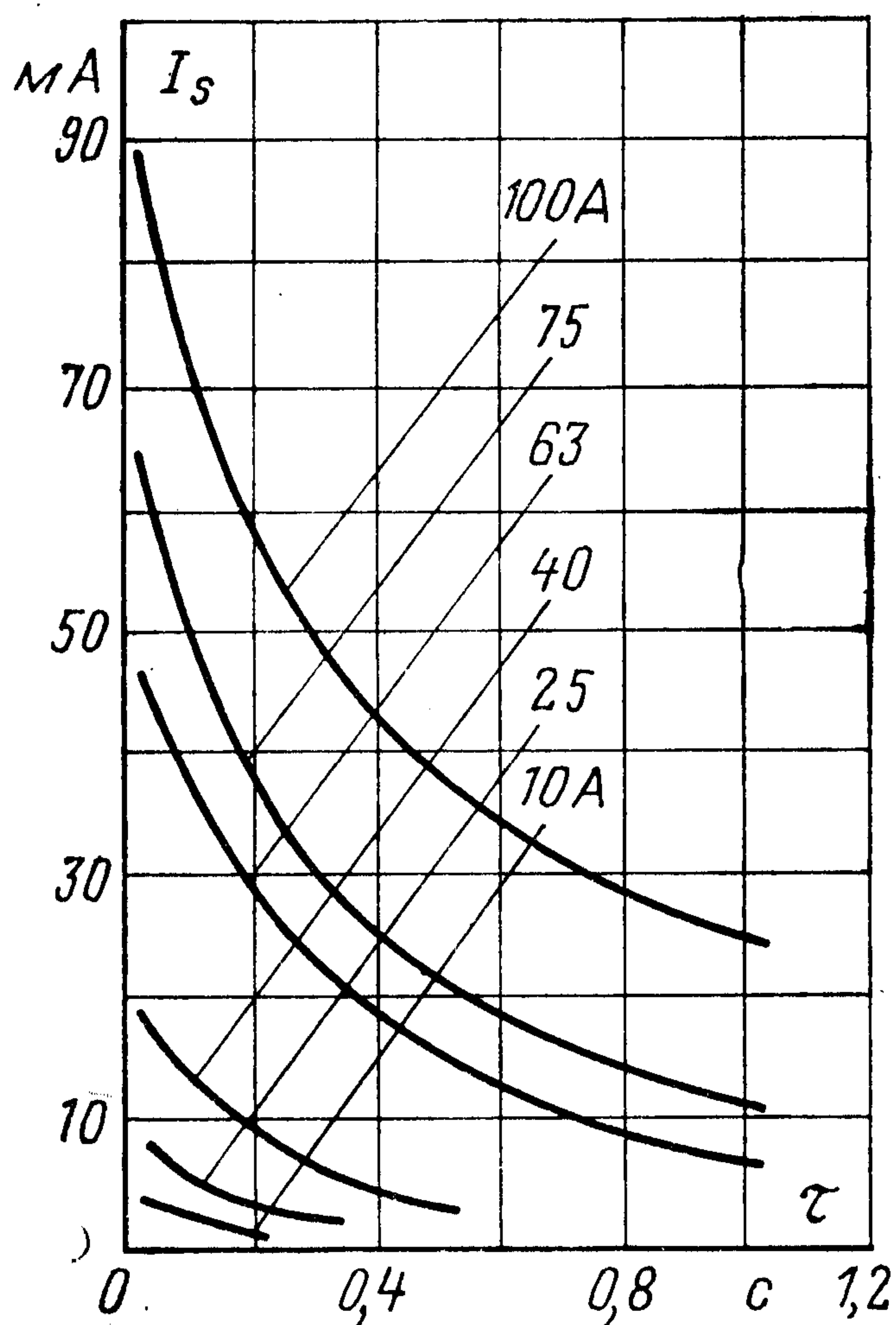


Рис. 19. Зависимость входного сигнала УЗО от времени при пуске электродвигателей с различным номинальным током.

В качестве примера рассмотрим влияние включения неподвижного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как наиболее широко распространенного типа электропотребителя во многих отраслях народного хозяйства страны. В момент включения в сеть асинхронный двигатель с неподвижным ротором представляет собой трансформатор с вращающимся полем и короткозамкнутой вторичной обмоткой. При этом ток каждой из обмоток двигателя в момент пуска зависит от фазового угла приложенного к нему напряжения. Так как

фазовые углы приложенных напряжений неодинаковы, то неодинаковы и токи в момент пуска. Возникшая таким образом несимметричная нагрузка порождает несимметрию напряжений, а это, как было показано, приводит к появлению токов нулевой последовательности. Пусковые токи также вызывают повышенные токи небаланса. Причем с увеличением мощности двигателя растут пусковые токи и входной сигнал.

На рис. 19 показаны зависимости входного сигнала УЗО I_s от времени при пуске двигателей с различным номинальным током I_n , А. Анализ этих зависимостей с учетом $I_{h,д} = f(\tau)$ (см. рис. 11) показывает, что при $I_n > 25$ А переходные процессы существенно влияют на

эффективность защиты. Следовательно, их влияние должно учитываться при обосновании уставки и быстродействия УЗО.

Влияние аварийных режимов работы электроустановок на эффективность УЗО определяется также изменением входного сигнала. Это происходит при коротких замыканиях, замыканиях на землю и на корпус.

Короткое замыкание в зоне защиты сопровождается протеканием значительных токов по первичным обмоткам ТТНП и изменением формы кривой питающего напряжения. В результате возрастают ток небаланса и токи нулевой последовательности высших гармоник. При малых уставках преобразователь УЗО выдаст сигнал на отключение. Исполнительный орган в этом случае должен отключать токи короткого замыкания. Если в сети не предусмотрена более быстродействующая максимальная токовая защита, то контакты исполнительного органа должны быть рассчитаны на указанный режим работы. В противном случае возможно залипание контактов исполнительного органа.

Замыкание на землю и замыкание на корпус вызывают резкое возрастание входного сигнала. Его значение, как это видно из (47), практически становится равным току замыкания на землю. Наибольшее значение входной сигнал приобретает при замыкании на зануленный корпус. В этом случае входной сигнал равен току короткого замыкания. Столь существенное увеличение входного сигнала угрожает опасностью выхода из строя преобразователя УЗО. Кроме того, при протекании больших токов происходит намагничивание сердечника ТТНП. В результате изменяются его чувствительность и уставка УЗО [26].

В нормальном режиме ТТНП работает при малой напряженности магнитного поля. На начальной кривой намагничивания магнитная проницаемость не изменяется, поэтому уставка УЗО остается постоянной. При протекании больших токов сердечник намагничивается до остаточной индукции, соответствующей предельной петле гистерезиса. В результате изменяются магнитная проницаемость магнитопровода ТТНП и уставка УЗО.

Экспериментально установлено, что сердечник из применяемого в практике пермаллоя 79НМ-У насыщается при 10—15 А/м, следовательно, во многих случаях

возможен ток в цепи ТНП, превышающий ток насыщения.

Остаточная индукция зависит от тока в первичной обмотке трансформатора в момент отключения сети. Исследования показали, что в зависимости от предшествующего состояния сердечника ТНП уставка после протекания больших токов может уменьшаться или увеличиваться в 2—3 раза. Намагниченное состояние сердечника, если не принять мер, может сохраняться продолжительное время, в течение которого эффективность защиты будет снижена.

Для предотвращения указанного эффекта применяются настройка УЗО при предварительно намагниченном сердечнике ТНП до остаточной индукции и специальная технология изготовления сердечников, а также используются материалы с малым коэффициентом прямоугольности петли гистерезиса. Однако эти меры не являются универсальными, с чем необходимо считаться при разработке и эксплуатации УЗО.

Значительный интерес представляет зависимость входной величины УЗО от тока в цепи человека, прикоснувшегося к нетоковедущим частям электроустановки, при замыкании на заземленный корпус. Этот аварийный режим сопровождается возникновением опасности и изменением входного сигнала УЗО. Поэтому представляется возможным отключение аварийной электроустановки с помощью УЗО. При этом для предотвращения поражения человека током необходимо уставку и быстродействие УЗО выбрать с учетом зависимости допустимого напряжения прикосновения от времени его воздействия.

При замыкании на заземленный корпус одной из фаз ее проводимость относительно земли \underline{Y}_3 будет определяться сопротивлением заземляющего устройства R_3 . Тогда с учетом соотношения $\underline{Y}_{i,b}$, $\underline{Y}_{i,c}$ и \underline{Y}_3 выражения (46) и (47) примут вид:

$$I_{\Sigma} = U \frac{\underline{Y}_0 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_3} = \frac{U}{R_0 + R_3} = I_3. \quad (57)$$

Совместное решение (38) и (57) позволяет получить зависимость

$$I_{\Sigma} = I_h \frac{R_h}{R_3} = \frac{U_{\text{пр}}}{R_3}. \quad (58)$$

С учетом того, что допустимое напряжение прикосновения зависит от времени его воздействия, уставка УЗО должна удовлетворять соотношению

$$I_y \leq \frac{U_{\text{пр, д}}(\epsilon)}{R_3}. \quad (59)$$

Это соотношение позволяет определить уставку и быстродействие УЗО при заданном сопротивлении заземляющего устройства, и наоборот — по известным параметрам УЗО определить R_3 . Анализ выражения (59) показывает, что для обеспечения безопасности при прикосновении к аварийному заземленному корпусу требования к УЗО предъявляются не столь жесткие, как при прикосновении к незаземленному корпусу или токоведущим частям электроустановки. Например, без учета быстродействия УЗО при $R_3 = 100$ Ом безопасность может быть обеспечена устройством с уставкой 350 мА. Этот пример показывает, что совместное использование заземления и защитного отключения обеспечивает безопасность при замыкании на заземленный корпус и существенно снижает требования к их параметрам. Такое сочетание защитных мер имеет ряд преимуществ перед другими системами и нашло широкое применение во многих странах.

Выбор уставки УЗО определяется зависимостью входного сигнала от тока в цепи человека и факторов, влияющих на нее. Анализ отечественных и зарубежных устройств защитного отключения показывает, что до настоящего времени нет единой методики выбора уставки. Для различных устройств ее значение изменяется от 5 до 650 мА.

Впервые норма на чувствительность УЗО была установлена во Франции в 1962 г. [27]. В международном масштабе эта проблема впервые была рассмотрена в 1969 г. На неофициальном совещании представителей Франции, США, Англии, Дании и ФРГ обсуждались требования к чувствительности, быстродействию, помехоустойчивости, надежности и коммутационным способностям УЗО. Отсутствие необходимого опыта эксплуатации УЗО и недостаточное знание различных факторов, влияющих на его работу, не позволили определить четких требований к защите. Однако были определены основные проблемы защитного отключения. С 1970 г. во многих странах разработаны национальные правила и стандарты на защитное отключение. В качестве основ-

ных параметров нормируются уставки и быстродействие УЗО. Различие схем электроснабжения, их параметров и принципов построения преобразователей УЗО не позволяет до сих пор найти общего мнения по выбору уставок.

В Советском Союзе первая работа по данному вопросу была опубликована в 1969 г. [28]. Однако реализовать предложенную в ней методику определения уставок долгое время не удавалось из-за отсутствия данных по изменению входного сигнала в реальных электрических сетях. Проведенные впоследствии исследования по выяв-

Т а б л и ц а 2

Рекомендуемые значения уставок унифицированного ряда УЗО на токе нулевой последовательности для сетей напряжением 380/220 В в зависимости от тока нагрузки в зоне защиты

Номинальный ток нагрузки в зоне защиты, А	Уставка при работе в зоне защиты, мА	
	одиночного потребителя	группы потребителей
10, 16	10	10
25	10	30
40	30	30
63	30	100
100	100	300
160	300	500
250	500	500
400	500	1000
630	1000	1000

лению факторов, влияющих на работу УЗО, и количественной их оценке, а также обобщение опыта эксплуатации существующих устройств позволили обосновать уставки унифицированного ряда УЗО для сетей 380/220 В с глухозаземленной нейтралью [29]. Их значения для различных номинальных токов нагрузки приведены в табл. 2. Время срабатывания УЗО в этих сетях не должно превышать 0,2 с. Рекомендации по выбору уставок и быстродействия УЗО унифицированного ряда разработаны в Московском ордена Ленина энергетическом институте, одобрены Научным советом по проблеме «Охрана труда» Госкомитета СССР по науке и технике и ВЦСПС и приняты к внедрению рядом отраслей народного хозяйства страны.

Анализ данных табл. 2 показывает, что наиболее эффективная защита с помощью УЗО может быть обеспечена в электроустановках с номинальным током нагрузки до 25 А. В этих электроустановках вероятность поражения будет незначительной как при прямом, так и при косвенном прикосновении человека к токоведущим частям. Эффективность УЗО с уставками 30 и 100 мА также может обеспечить безопасность человека при прикосновении к токоведущим частям, но в ограниченном диапазоне опасных токов. Устройства с уставками 300, 500 и 1000 мА весьма эффективны только при замыканиях на землю и заземленный или зануленный корпус.

Долгое время отрицалась необходимость разработок УЗО с уставкой более 10 мА. Анализ показал, что многие электротравмы могли быть предотвращены этими устройствами, поэтому в настоящее время планируется внедрение УЗО с различными уставками. Кроме того, следует отметить, что в рассматриваемых сетях сосредоточенные токи утечки, превышающие 300 мА, представляют пожарную опасность. Исследования промышленных сетей показали, что в них существуют токи утечки, значительно превышающие это значение. Эти токи в настоящее время не контролируются. Поэтому внедрение унифицированного ряда УЗО явится важной профилактической и защитной мерой.

Требования к преобразователю УЗО определяются токовременными и частотными характеристиками входного сигнала. Основные из этих требований:

- способность при необходимости усиления входного сигнала;

- помехоустойчивость;

- устойчивость к перегрузкам;

- необходимость иметь наибольший коэффициент передачи для основной гармоники входного сигнала;

- достаточное быстродействие;

- устойчивый режим работы при выдаче аварийного сигнала;

- сохранение стабильных параметров при изменении напряжения сети в заданных пределах и при эксплуатации в различных условиях.

В настоящее время развиваются два основных направления в построении преобразователей УЗО. В ряде европейских стран, прежде всего в Австрии, ГДР, Франции и ФРГ, в качестве преобразователей УЗО использу-

ются высокочувствительные дифференциальные трансформаторы. Их применение позволяет получить уставку не ниже 30 мА. Аварийный сигнал в этом случае передается с помощью кинематической системы. Устройства защитного отключения с такими преобразователями отличаются простотой, надежностью и хорошей помехоустойчивостью. Их недостатками являются сложность изготовления и резкое ухудшение параметров при низких температурах окружающей среды [27].

В СССР и США в качестве преобразователей УЗО используются полупроводниковые усилители с релейным элементом на выходе. Полупроводниковые элементы более устойчивы к вибрациям и низким температурам, имеют большой регулируемый коэффициент усиления. Это позволяет достичь высокой технологичности изготовления УЗО с уставкой 10 мА.

В ряде случаев к преобразователю УЗО предъявляются дополнительные требования. В литературе наибольшее внимание уделено построению преобразователей, осуществляющих автоматический контроль исправности схемы УЗО [23, 30]. Для этих целей используются колебательные процессы в схемах УЗО. Если учитывать вектор тока нулевой последовательности, то представляется возможным построение преобразователя, регистрирующего фазу, которая замыкается на землю [31].

Требования к исполнительному органу УЗО определяются необходимым быстродействием и надежностью защиты. Кроме того, исполнительный орган не должен вносить дополнительной опасности поражения током в различных режимах работы УЗО. В зарубежных УЗО, как правило, исполнительный орган изготавливается вместе с другими узлами устройства, при этом его контакты не рассчитываются на аварийные режимы в сети, а защитное отключение не объединяется с другими видами защиты. Для отключения токов короткого замыкания исполнительный орган не рассчитывается.

Отечественные устройства защитного отключения разрабатываются в основном на базе серийно выпускаемой коммутационной аппаратуры (магнитных пускателей и автоматических выключателей), имеющей катушки дистанционного управления. Это направление, по нашему мнению, является более перспективным, поскольку при этом исключается дублирование аппаратов, дости-

гается большая экономия материалов, сокращается номенклатура изделий, снижается трудоемкость, повышается коммутационная способность и обеспечивается единая технология производства. Кроме того, расширяются функциональные свойства УЗО. Оно может являться одновременно коммутационным аппаратом, обеспечивать защиту при коротких замыканиях, осуществлять предварительный контроль изоляции подключаемого участка сети.

Изготовление УЗО на большие номинальные токи нагрузки представляет определенные трудности. Поэтому исполнительный орган таких устройств не имеет единой конструкции с датчиком и преобразователем, которые выполняются отдельным блоком (реле). Сборка его с исполнительным органом осуществляется при монтаже электроустановки. Примером УЗО такого типа является РУД-05, которое в настоящее время готовится к широкому внедрению.

Многие ученые предлагают использовать для построения УЗО бесконтактные исполнительные органы на базе тиристорных переключателей. По сравнению с контактными они имеют следующие основные преимущества: более высокое быстродействие, безыскровую коммутацию, отсутствие механических элементов, меньшую мощность сигнала управления, большую частоту срабатывания (циклоустойчивость), большую вибро- и удароустойчивость, возможность произвольного расположения при работе [32, 33]. Однако, учитывая технико-экономические показатели тиристорных переключателей, пока не представляется возможным рекомендовать бесконтактные исполнительные органы УЗО к широкому внедрению. В то же время в отдельных случаях они являются более эффективными и их следует применять. Например, при использовании одного исполнительного органа для защитного отключения и ограничителя напряжения холостого хода сварочного трансформатора целесообразно использовать бесконтактный вариант. Это обеспечит необходимую надежность и циклоустойчивость устройства [34].

Принципиальная схема УЗО типа ИЭ-9813, приведенная на рис. 20,а, полностью отражает уровень развития защитного отключения на современном этапе. По своим защитным свойствам и технико-экономическим показателям оно является одним из лучших известных в на-

стоящее время УЗО. При его разработке автором были учтены достижения теории и практики защитного отключения, а также использованы перспективные электромеханические и электронные приборы. Внешний вид устройства показан на рис. 20,б.

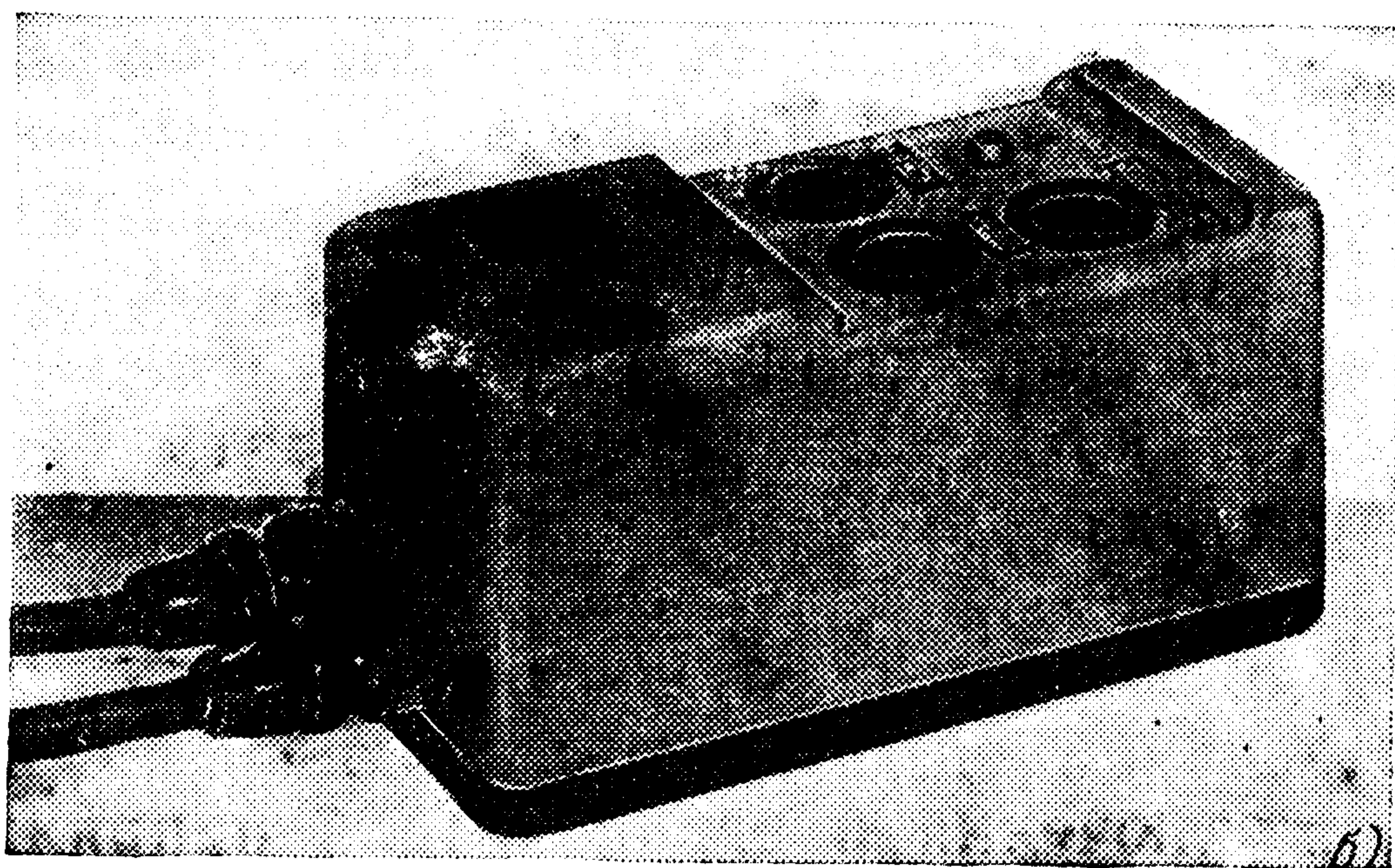
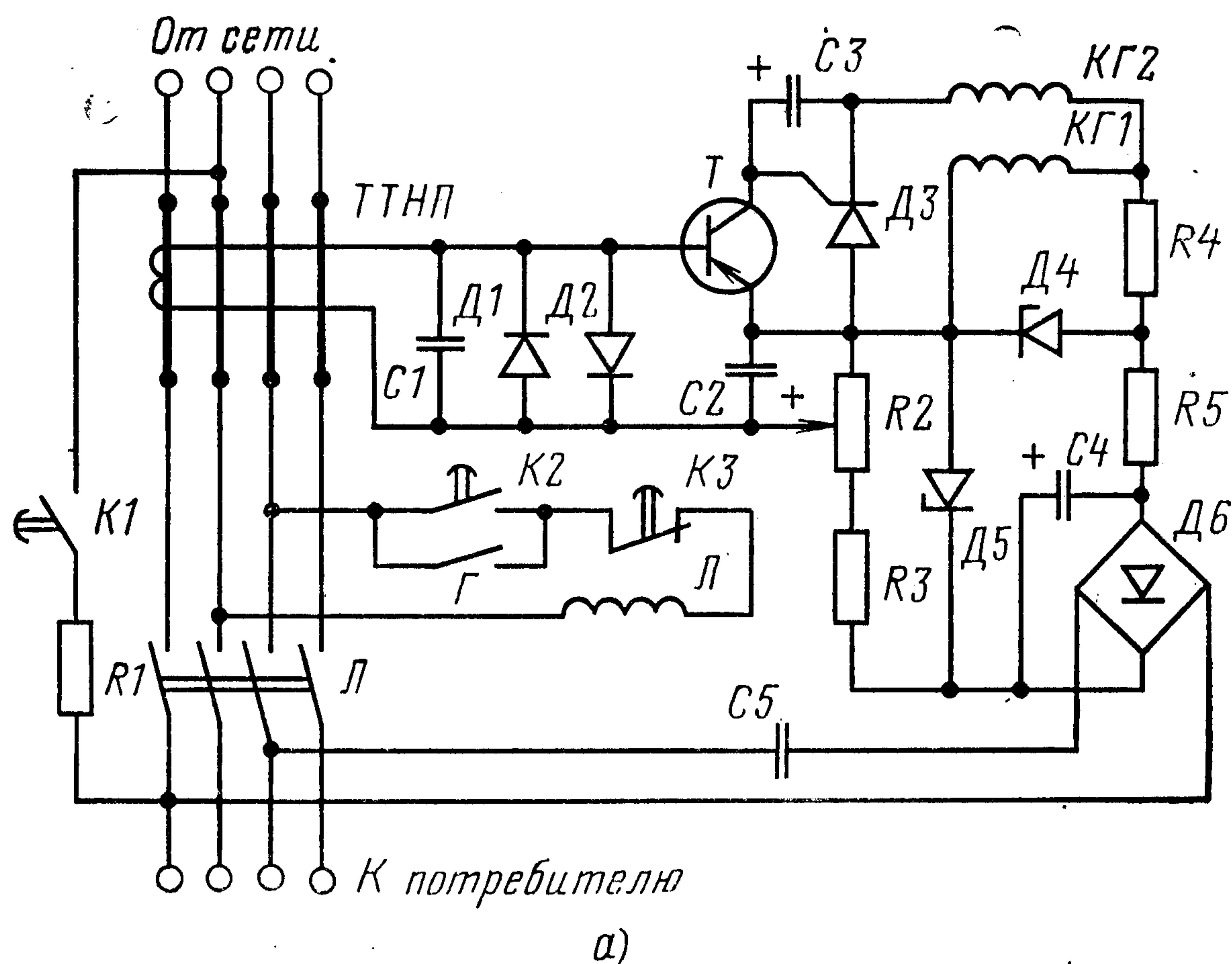


Рис. 20. Принципиальная схема и внешний вид УЗО типа ИЭ-9813.

Датчиком этого устройства является трансформатор тока нулевой последовательности. Параллельно вторичной обмотке *ТТНП* подключены конденсатор *С1* и диоды *Д1* и *Д2*, включенные встречно. Конденсатор совместно с вторичной обмоткой *ТТНП* образует *LC*-контур

с частотой резонанса 50 Гц. Настройка вторичной обмотки *ТНП* и *С1* в резонанс позволяет примерно вдвое увеличить полезный сигнал, снимаемый с датчика, и значительно ослабить влияние помех и высших гармонических составляющих на работу УЗО, т. е. повысить его помехоустойчивость. Диоды *Д1* и *Д2* ограничивают амплитуду сигнала, подаваемого на базу транзистора *Т* при коротких замыканиях в зоне защиты и при появлении импульсных помех большой амплитуды. Через конденсатор *С2* сигнал поступает на переход база — эмиттер транзистора *Т*.

Транзистор *Т* в дежурном режиме закрыт, так как на его базу подается положительное напряжение с делителя, образованного потенциометром *Р2* и резистором *Р3*. При изменении положения движка потенциометра *Р2* изменяется напряжение смещения транзистора *Т*, и, следовательно, уставка УЗО.

Коллекторный ток транзистора протекает через цепь управляющего электрода тиристора *Д3*. Переход управляющий электрод — катод тиристора шунтирован конденсатором *С3*. Он отфильтровывает импульсы коллекторного тока транзистора *Т*, вызванные помехами при переходных процессах в сети. Кроме того, конденсатор *С3* способствует уменьшению чувствительности устройства к высшим гармоникам. В цепь тиристора *Д3* включена одна из обмоток управления геркона *КГ2*. Другая обмотка *КГ1* не коммутируется и предназначена для удержания геркона *Г* в дежурном режиме во включенном состоянии.

Питание электронной схемы устройства осуществляется без помощи понижающего трансформатора. Это позволило значительно снизить размеры и массу устройства. Основная часть линейного напряжения сети гасится на конденсаторе *С5*. Далее ток проходит по диодной сборке — выпрямительному мосту *Д6*, резистору *Р5* и соединенным последовательно стабилитронам *Д4* и *Д5*. Часть тока ответвляется в обмотку геркона *КГ1* через резистор *Р4*, часть — в делитель напряжения *Р2*, *Р3*. В цепи транзистора *Т* и тиристора *Д3* ток в дежурном режиме практически не протекает. Конденсатор *С4* предназначен для фильтрации выпрямленного напряжения. Вследствие того, что питающие схему напряжения стабилизированы, устройство сохраняет работоспособность при очень больших колебаниях напряжения сети.

Включение устройства осуществляется нажатием на кнопку $K2$ «Пуск», при этом замыкается цепь, состоящая из замыкающих контактов кнопки $K2$, размыкающих контактов кнопки $K3$ «Стоп» и обмотки исполнительного органа (пускателя) L . Пускатель срабатывает, подключая нагрузку в зоне защиты. Через конденсатор $C5$ на схему подается напряжение. Геркон G срабатывает, блокируя кнопку $K2$. Все эти процессы происходят достаточно быстро, поэтому специальной задержки кнопки $K2$ при нажатии не требуется. После отпускания кнопки $K2$ УЗО остается в дежурном режиме работы.

С помощью кнопки $K1$ «Контроль» к сети подключается резистор $R1$, имитирующий сопротивление утечки. При нажатии на нее устройство должно сработать, что свидетельствует о его исправности.

При появлении утечки (например, при прикосновении человека к фазе) во вторичной обмотке $TНП$ индуцируется напряжение, пропорциональное току нулевой последовательности. Если ток утечки превышает уставку, то это напряжение открывает транзистор T . Импульс коллекторного тока проходит через управляющий электрод тиристора $D3$ и включает его. Поле, вызванное током, протекающим через обмотку геркона $KГ2$, компенсирует поле обмотки $KГ1$ (обмотки $KГ1$ и $KГ2$ намотаны встречно), контакты геркона G размыкаются, разрывая цепь питания обмотки пускателя L . Исполнительный орган срабатывает.

При размыкании контактов пускателя отключается потребитель и одновременно отключается само УЗО. Для повторного включения необходимо снова нажать на кнопку $K2$. Кнопка $K3$ предназначена для выключения устройства вручную. При нажатии на нее разрывается цепь обмотки пускателя и потребитель отключается.

Устройство типа ИЭ-9813 предназначено для работы с электрифицированным инструментом, номинальный ток которого не превышает 10 А. Оно также может быть использовано с другими аналогичными электропотребителями. Уставка УЗО регулируется в широких пределах. Наименьшая уставка — 1,5 мА, номинальная — 10 мА. Время срабатывания УЗО зависит от значения входного сигнала. Эта зависимость при номинальной уставке приведена на рис. 21. Она согласуется с зависимостью допустимого для человека тока от времени воздействия (см. рис. 11), поэтому позволяет отстроиться от кратко-

временных помех без снижения эффективности защиты. Зависимость установки устройства от частоты тока нулевой последовательности приведена на рис. 22. Эта зависимость согласуется с зависимостью опасности для человека тока от его частоты (см. рис. 1), поэтому также позволяет отстраиваться от высокочастотных помех без потери защитных свойств. Напряжение питания устрой-

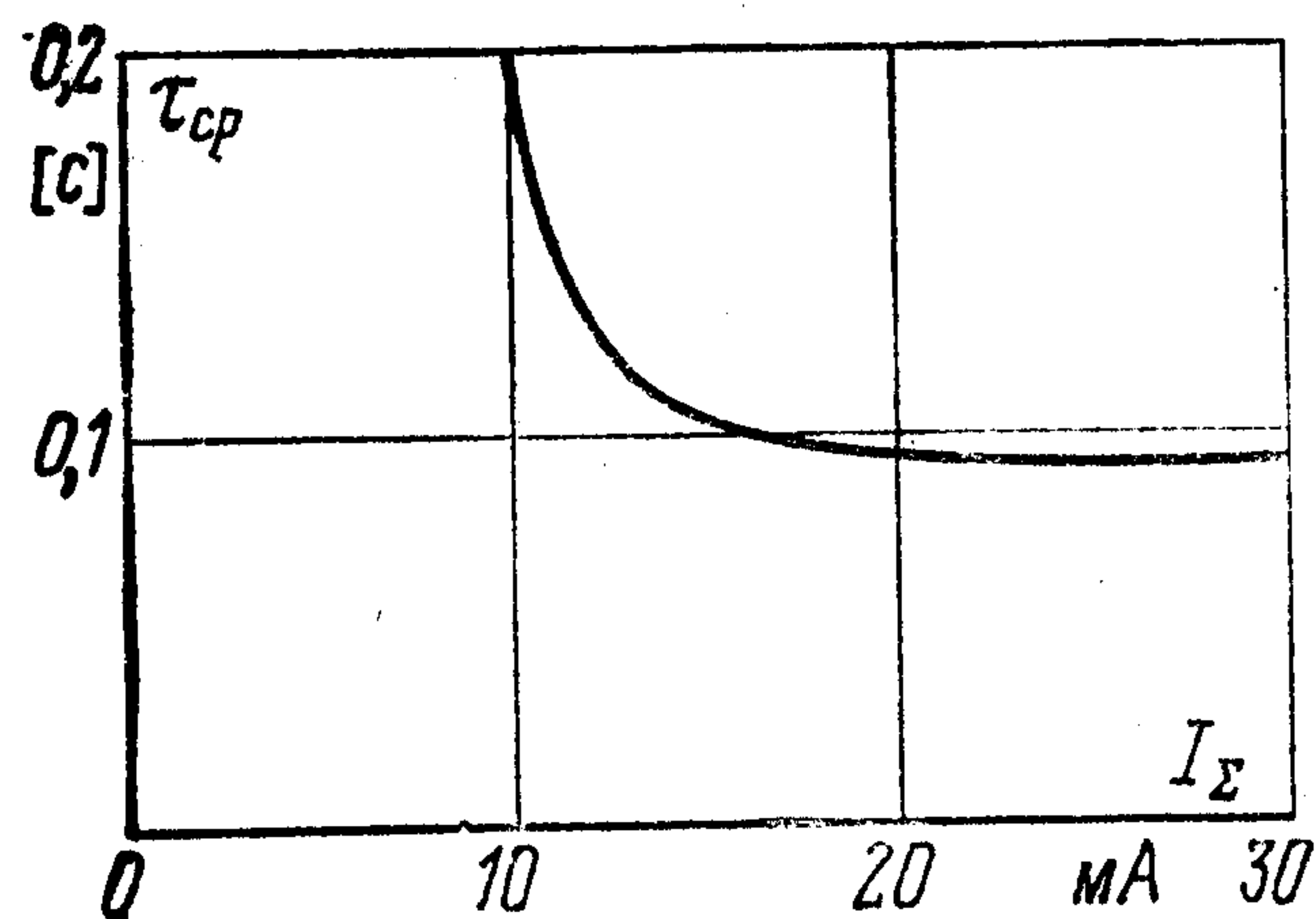


Рис. 21. Зависимость времени срабатывания УЗО типа ИЭ-9813 от величины входного сигнала.

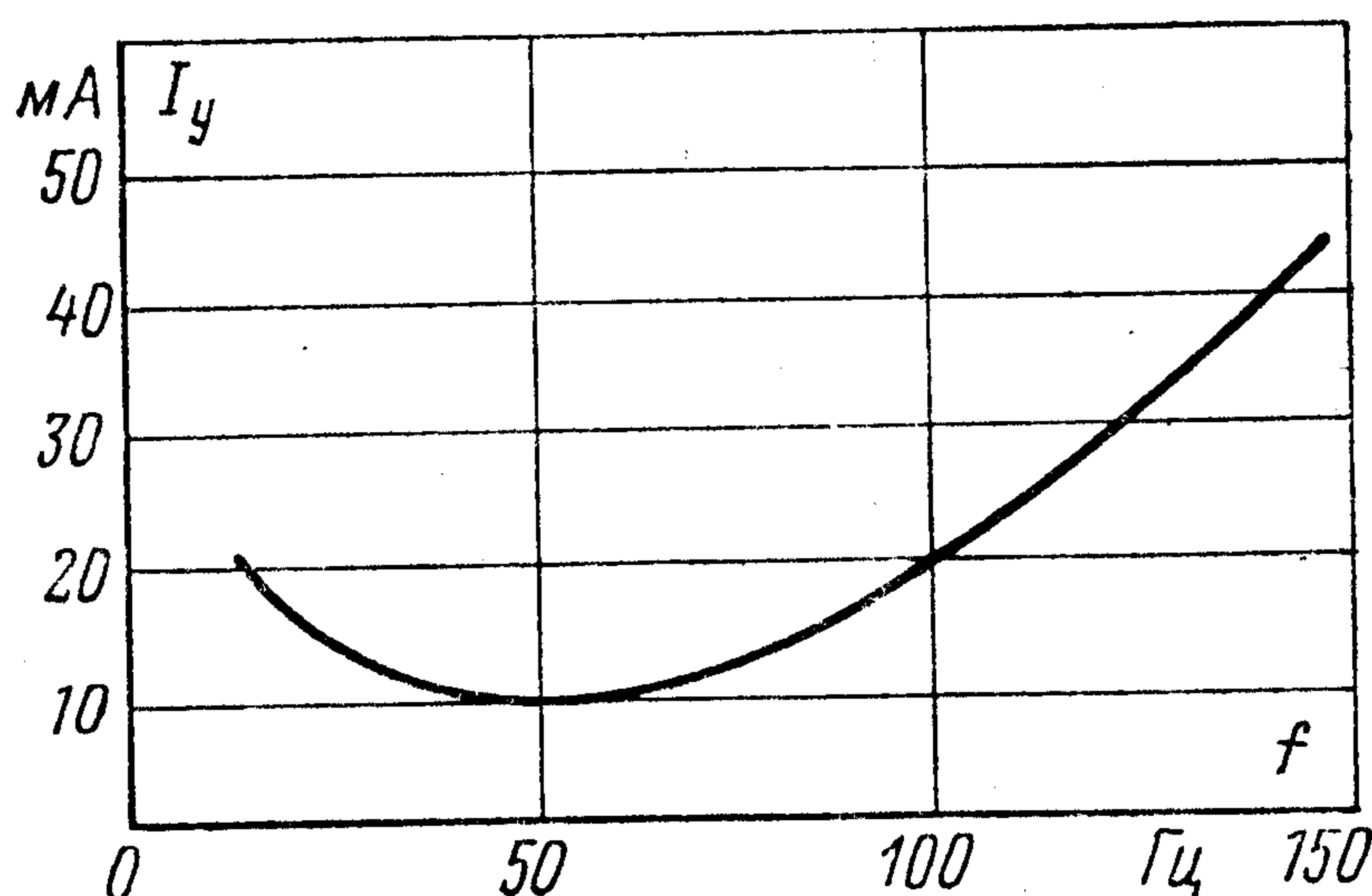


Рис. 22. Зависимость установки УЗО типа ИЭ-9813 от частоты входного сигнала.

ства — 220 В, 50 Гц, потребляемая мощность — 20 Вт. Устройство типа ИЭ-9813 отличается от других УЗО повышенной стабильностью параметров при изменении напряжения сети и температуры окружающей среды. Выполнено оно в виде отдельного блока и снабжено кабелями для подключения к сети и электроинструменту.

Схемы включения УЗО в сеть существенно влияют на эффективность защиты. В большей степени это влияние проявляется при использовании защитного отключения совместно с занулением. Возможные схемы включения УЗО в сеть с занулением приведены на рис. 23.

Схема подключения трехфазной нагрузки *Н1* характерна тем, что нулевой рабочий и нулевой защитный проводники совмещены в одном. Этот проводник подключен последовательно с одной из первичных обмоток *ТТНП* (пропущен в окно магнитопровода). Такая схема включения УЗО позволяет обеспечить с помощью четырехжильного кабеля подключение в зоне защиты трехфазных и однофазных нагрузок *Н* и защиту человека (при соответствующей установке) при прикосновении к токоведущим частям. Однако использовать эту схему включения не рекомендуется, так как при замыкании на корпус в зоне защиты УЗО не срабатывает. Объясняет-

ся это тем, что ток короткого замыкания в цепи «фаза—нуль» пройдет в прямом и обратном направлениях через *ТНП* и не создаст тока нулевой последовательности, способного вызвать отключение аварийного участка сети.

Схема подключения трехфазной нагрузки *Н2* позволяет более эффективно использовать *УЗО*. При таком включении через *ТНП* проходят только три фазных провода, нулевой проводник минует его. Такая схема

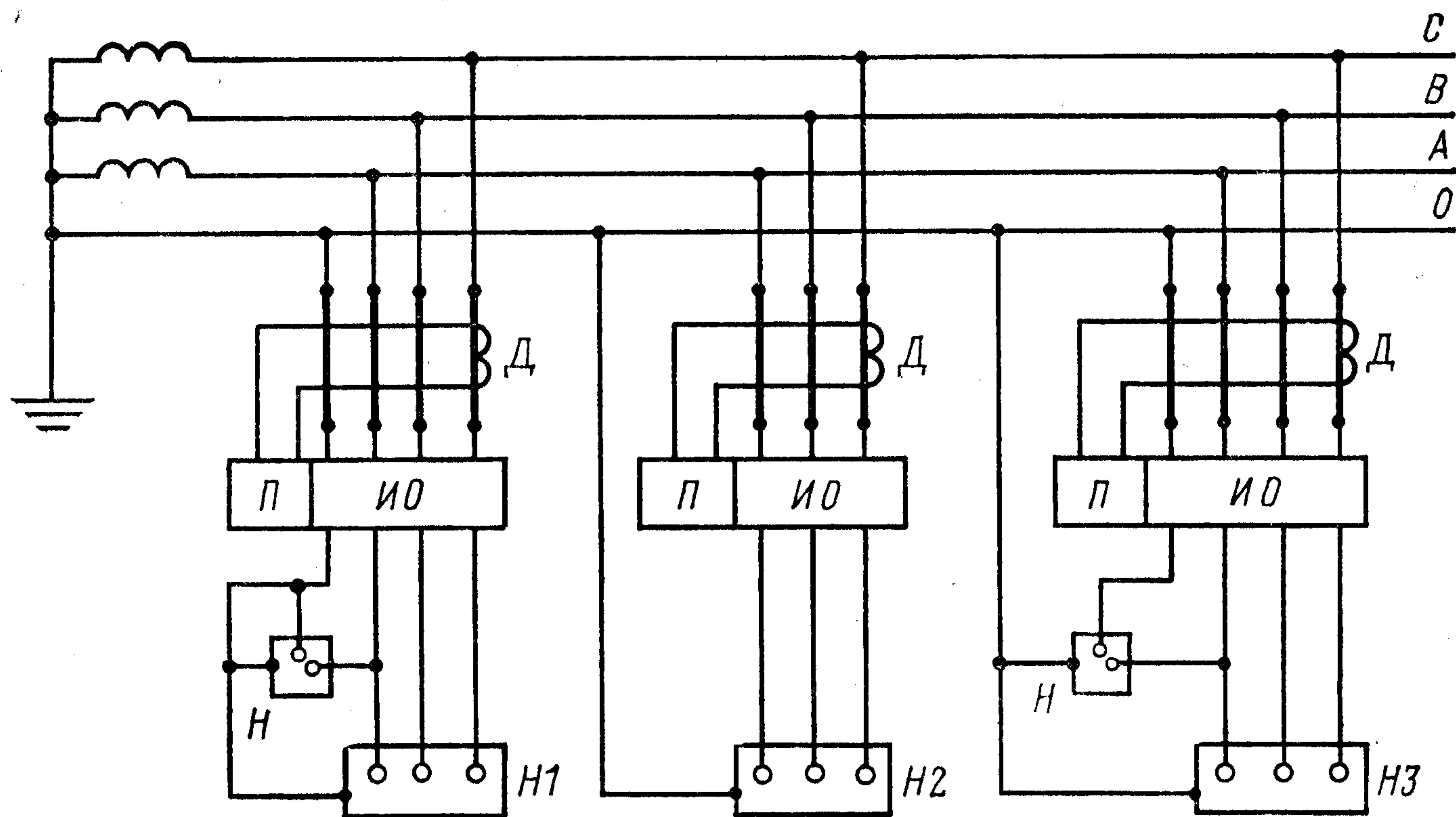


Рис. 23. Схемы включения *УЗО* в сети с занулением.

Д — датчик; *П* — преобразователь; *ИО* — исполнительный орган *УЗО*.

включения *УЗО* обеспечивает защиту при прикосновении к токоведущим частям, при замыкании на землю и на корпус в зоне защиты. Однако она не обеспечивает возможности подключения однофазных нагрузок в зоне защиты между фазными и нулевым проводами. Их включение вызывает срабатывание защиты от тока нагрузки, так как он проходит через *ТНП* только в одном направлении.

Схема подключения трехфазной нагрузки *Н3* позволяет максимально использовать эффективность *УЗО* и дает возможность подключить в зоне защиты однофазные нагрузки *Н*. Через *ТНП* в этом случае проходят фазные и нулевой рабочий проводники. Такое включение обеспечивает суммирование защитных свойств защитного отключения и зануления. При этом существенно снижаются требования к выполнению зануления, так как при замыкании на корпус отключение *УЗО* вызыва-

ют незначительные по сравнению с I_H токи. Однако рассмотренная схема включения УЗО не устраняет ряда принципиальных недостатков зануления, поэтому более перспективным представляется применение защитного отключения совместно с заземлением.

Внутренние электрические связи схемы УЗО с сетью также оказывают существенное влияние на эффективность защиты. К этим связям относятся прежде всего цепь источника питания схемы преобразователя, цепь

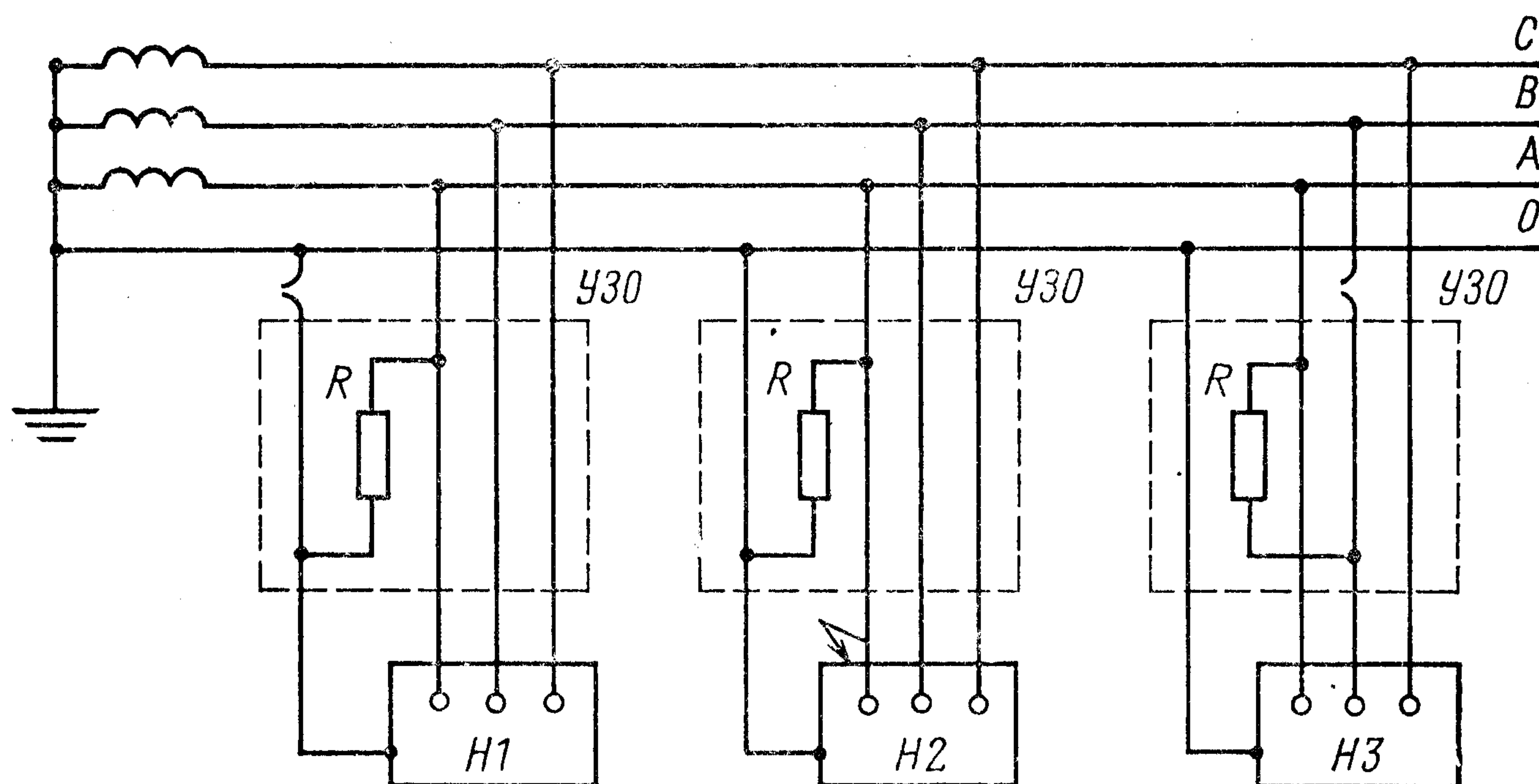


Рис. 24. Схемы соединения элементов УЗО с сетью.

управления исполнительным органом и цепь проверки исправности УЗО. Эти цепи обладают определенным сопротивлением R . Возможные схемы включения их в сеть приведены на рис. 24. На нем также показаны некоторые аварийные режимы работы сети, влияющие на эффективность УЗО.

Например, нагрузка $H1$, как это следует из схемы, подключена к сети через УЗО, имеющее электрическую связь между фазой и нулевым проводником. В этом случае значительную опасность представляет обрыв нулевого провода. При обрыве выходят из строя и зануление, и защитное отключение. В то же самое время через R на корпус $H1$ выносится потенциал, который представляет опасность. Через систему зануления вынос опасного потенциала может быть осуществлен на другие электропотребители.

На примере подключения нагрузки $H2$ рассмотрим опасность замыкания на корпус той фазы, которая имеет электрическую связь через сопротивление R с нулевым

проводником. Замыкание на корпус шунтирует сопротивление R и на нем резко снижается напряжение. В одном случае это снимает напряжение питания схемы преобразователя УЗО, в другом — его исполнительного органа. То и другое может резко изменить характеристики защиты или совсем вывести ее из строя.

Нагрузка $H3$ подключена к сети через УЗО, питание которого осуществляется от линейного напряжения. Такое устройство менее подвержено влиянию аварийных режимов в сети. Однако обрыв одного из фазных проводов также обесточивает схему УЗО. Этот обрыв не вызывает непосредственной опасности для человека и может быть обнаружен быстрее, чем обрыв нулевого проводника. Тем не менее при разработке УЗО необходимо предусмотреть срабатывание защиты при снятии напряжения. В устройстве типа ИЭ-9813 это достигается соответствующим включением питания преобразователя и исполнительного органа УЗО. При обрыве фазного провода исполнительный орган отключает сеть и самопроизвольное включение ее невозможно, так как контакты геркона при снятии напряжения разомкнутся.

Приведенные примеры не исчерпывают всех возможных схем включения УЗО в сеть. Они лишь подчеркивают необходимость тщательного анализа эффективности защиты в зависимости от особенностей схемы электроснабжения и электропотребителя при разработке, монтаже и эксплуатации устройств защитного отключения на токи нулевой последовательности. Это необходимо тем более, что в настоящее время эта мера защиты человека от поражения электрическим током широко внедряется в народное хозяйство страны. Кроме названных устройств внедрены ЗОУП-25, ЗОУ-1 [15].

Основные характеристики устройств защитного отключения составляющих совместно с УЗО ИЭ-9813 унифицированный ряд, следующие: ЗОУП-25: напряжение сети 380/220 В, номинальный ток нагрузки — до 25 А; уставка — 10 мА; время срабатывания — 0,1 с; выпускается гомельским заводом «Электроаппаратура»;

АЕ-2443: напряжение сети 380/220 В; номинальный ток нагрузки — до 63 А; уставки — 30, 100 мА; время срабатывания — 0,1 с; серийное производство осваивается на Дивногорском электроаппаратном заводе;

РУД-05 (реле утечки): напряжение сети — 380/220 В; номинальный ток нагрузки — до 100 А; уставки — 30,

100, 300 мА; время срабатывания — 60 мс; серийное производство освоено Калининским электроаппаратным заводом.

13. ЗАЩИТНЫЕ МЕРЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Из анализа электробезопасности следует, что сети с изолированной нейтралью наиболее опасны при наличии в них замыкания на землю. Поэтому применение устройств, обеспечивающих быстрое обнаружение замыкания на землю в этих сетях, является первостепенной задачей и называется защитой от замыканий на землю.

В сетях с изолированной нейтралью опасность представляет также снижение изоляции ниже допустимого уровня, т. е. когда не выполняется условие (28). С целью своевременного обнаружения недопустимого снижения в данных сетях применяется периодический и постоянный контроль изоляции [35]. Естественно, что постоянный контроль изоляции сети относительно земли является более эффективным. Осуществляется он с помощью устройств, которые по своей структуре соответствуют схеме, приведенной на рис. 10. Однако по своим параметрам, методике их определения и защитным функциям они отличаются от УЗО. Наиболее характерным для устройств контроля изоляции является то, что при определении их параметров используется зависимость входного сигнала от параметров изоляции сети, а уставка определяется критическим ее значением. Устройство контроля изоляции должно иметь высокое внутреннее сопротивление для того, чтобы не снижать общее сопротивление изоляции сети относительно земли. Их исполнительные органы могут осуществлять три защитные функции — индикацию параметров изоляции, предупредительную сигнализацию о снижении сопротивления изоляции до опасного уровня и отключение сети. Контроль изоляции является важной профилактической мерой, обеспечивающей достаточно высокую безопасность электроустановок с изолированной нейтралью.

Защитное отключение также находит широкое применение в сетях с изолированной нейтралью. Его целесообразно применять прежде всего там, где возникают трудности поддержания изоляции на безопасном уровне. В этом случае безопасность обеспечивается снижением вероятности P_3 , входящей в выражение (37), т. е. огра-

ничением времени воздействия опасного для человека тока при возникновении опасности поражения.

В ряде случаев одно и то же устройство может осуществлять контроль изоляции и защитное отключение. Таким образом, совмещаются профилактические и защитные функции. Такие устройства, как правило, относятся к защитному отключению, поскольку эта защитная функция является более эффективной [10].

Устройства защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью в большинстве случаев осуществляют неселективную защиту. В качестве их входного сигнала используются напряжение нулевой последовательности и напряжения оперативных источников питания. Для определения эффективности защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью устанавливается зависимость входного сигнала УЗО от параметров цепи человека.

Входной сигнал устройства, реагирующего на напряжение нулевой последовательности, датчик которого включен между нулевой точкой питания сети и землей, в общем виде определяется выражением (22). Учитывая, что в реальных сетях при наличии данной защиты $U_{оп}=0$, $\underline{Y}_{d,1}=\underline{Y}_{d,2}=\underline{Y}_{d,3}=0$, $\underline{Y}_{e,a}+\underline{Y}_{i,a}=\underline{Y}_a$, $\underline{Y}_{e,b}+\underline{Y}_{i,b}=\underline{Y}_b$, $\underline{Y}_{e,c}+\underline{Y}_{i,c}=\underline{Y}_c$, это выражение упростится:

$$\dot{U}_0 = U \frac{\underline{Y}_a + a^2 \underline{Y}_b + a \underline{Y}_c + G_h}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + G_h}. \quad (60)$$

Анализ этого выражения показывает, что устройство данного типа должно иметь высокое внутреннее сопротивление ($\underline{Y}_0=0$), а его эффективность будет выше в сети с симметричной изоляцией ($\underline{Y}_a=\underline{Y}_b=\underline{Y}_c=\underline{Y}$). В этом случае выражение (60) примет вид:

$$\dot{U}_0 = U \frac{G_h}{3\underline{Y} + G_h} = U \frac{1}{\frac{3\underline{Y}}{1 + \frac{G_h}{\underline{Y}}}}. \quad (61)$$

Этим выражением можно пользоваться для расчета параметров УЗО в рассматриваемой сети. Из выражения также видно, что чувствительность датчика устройства будет большей в сети с низкой изоляцией фаз относительно земли.

Входной сигнал устройства, реагирующего на напряжение оперативного источника питания, датчик которого подключен к искусственной нулевой точке сети, мо-

жет быть определен с помощью графа схемы замещения электрической сети, приведенного на рис. 7.

Применяя правило Мэзона, получаем:

$$\dot{U}_{н.1} = U \frac{\frac{Y_5}{Y_2} - \frac{Y_4 Y_3}{Y_1 Y_2}}{1 - \frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2}} + \dot{U}_{оп} \frac{\frac{Y_3 Y_3}{Y_1 Y_2} - \frac{Y_3}{Y_2}}{1 - \frac{Y_3 Y_2}{Y_1 Y_2}}. \quad (62)$$

Принимая, что $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}$, $\underline{Y}_{d,1} = \underline{Y}_{d,2} = \underline{Y}_{d,3} = \underline{Y}_d$, и учитывая выражения (11) — (15), получаем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{н.1} = & -U \frac{\frac{3\underline{Y}_d G_h}{3\underline{Y}_d + 3\underline{Y} + G_h}}{1 - \frac{3\underline{Y}_d 3\underline{Y}_d}{(3\underline{Y}_d + 3\underline{Y} + G_h)(\underline{Y}_{н.1} + 3\underline{Y}_d)}} + \\ & + \dot{U}_{оп} \frac{\frac{3\underline{Y}_d 3\underline{Y}_d}{(3\underline{Y}_d + 3\underline{Y} + G_h)(\underline{Y}_{н.1} + 3\underline{Y}_d)} - \frac{3\underline{Y}_d}{(\underline{Y}_{н.1} + 3\underline{Y}_d)}}{1 - \frac{3\underline{Y}_d 3\underline{Y}_d}{(3\underline{Y}_d + 3\underline{Y} + G_h)(\underline{Y}_{н.1} + 3\underline{Y}_d)}}. \quad (63) \end{aligned}$$

Обычно для улучшения характеристик защиты устройство выполняется так, чтобы проводимость \underline{Y}_d для токов промышленной частоты имела небольшое значение. В этом случае первое слагаемое выражения (63) имеет малое значение и его можно не учитывать, тогда

$$\dot{U}_{н.1} = -3\dot{U}_{оп}\underline{Y}_d \frac{3\underline{Y} + G_h}{(3\underline{Y}_d + 3\underline{Y} + G_h)(\underline{Y}_{н.1} + 3\underline{Y}_d) - 9\underline{Y}_d}, \quad (64)$$

или

$$\dot{I}_{н.1} = -\dot{U}_{оп} \frac{3\underline{Y} + G_h}{\frac{\underline{Y}_{н.1} + 3\underline{Y}_d}{\underline{Y}_{н.1} 3\underline{Y}_d} (3\underline{Y}_d + 3\underline{Y} + G_h) + 1}. \quad (65)$$

Анализ этих выражений показывает, что при прикосновении человека к фазе входной сигнал изменяет свое значение и вызывает срабатывание защиты, при этом чувствительность УЗО определяется соотношением проводимостей \underline{Y}_d , \underline{Y} , $\underline{Y}_{н.1}$. Эти выражения позволяют рассчитывать УЗО на оперативных токах и напряжениях.

Анализ выражения (63) также показывает, что возможно построение УЗО при подключении его датчика между нулевой искусственной точкой сети и землей без

применения оперативного источника питания. В этом случае входной сигнал устройства будет определяться первым слагаемым указанного выражения. При симметричной проводимости изоляции фаз относительно земли и симметричной проводимости элементов датчика до прикосновения человека к фазе ($G_h=0$) входной сигнал будет равен нулю. После прикосновения возникает входной сигнал и защита срабатывает. Следовательно, это УЗО относится к устройствам, реагирующим на несимметрию напряжений фаз относительно земли (напряжение нулевой последовательности).

Проводимости \underline{Y}_d , образующие искусственную нулевую точку сети, входят в схему УЗО и могут быть индуктивными, емкостными и активными [4]. В качестве нагрузки датчика в большинстве случаев используется обмотка электромеханического реле. Реле в этом случае является преобразователем. Его контакты включены в цепь управления исполнительного органа. Напряжение (ток) срабатывания реле является уставкой УЗО. В последнее время вместо реле находят широкое применение полупроводниковые бесконтактные элементы с релейной характеристикой. При необходимости используется усилитель входного сигнала.

Для обеспечения селективности защиты совместно с рассмотренными входными сигналами используется ток нулевой последовательности, т. е. применяется комбинированная схема УЗО. В качестве второго датчика УЗО используется уже рассмотренный нами ТТНП.

Зависимость тока нулевой последовательности в данном случае определяется выражением (45). Степень упрощения этого выражения зависит от выбора второго входного сигнала, который определяет наличие тех или иных элементов расчетной схемы. При использовании ТТНП совместно с датчиком напряжения нулевой последовательности, подключенным к нулевой точке источника питания сети, в сети с симметричным сопротивлением изоляции фаз вне зоны защиты выражение (45) примет вид:

$$I_{н,2} = U \frac{(\underline{Y}_0 + 3\underline{Y}_e)(\underline{Y}_{i,a} + a^2\underline{Y}_{i,b} + a\underline{Y}_{i,c} + G_h)}{\underline{Y}_0 + 3\underline{Y}_e + \underline{Y}_{i,a} + \underline{Y}_{i,b} + \underline{Y}_{i,c} + G_h}. \quad (66)$$

При использовании только одного ТТНП и полной симметрии сопротивлений изоляции сети

$$I_{н,2} = UG_h \frac{3\underline{Y}_e}{3\underline{Y}_e + 3\underline{Y}_i + G_h}. \quad (67)$$

Анализ этих выражений показывает, что чувствительность ТТНП в сети с изолированной нейтралью зависит от соотношения проводимостей в зоне защиты и вне ее. При включении одного ТТНП у источника питания сети ($\underline{Y}_e=0$) входной сигнал будет равен нулю.

Этим объясняется то, что УЗО, реагирующие только на ток нулевой последовательности, не нашли применения в сетях с изолированной нейтралью.

Использование трех входных сигналов для построения УЗО, значительно увеличивает возможности защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью. Защитное отключение в рассматриваемых сетях нашло также широкое практическое применение. Опыт и результаты эксплуатации УЗО в данных сетях подтверждают необходимость дальнейшего внедрения защитного отключения в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Заземление является второй важной защитной мерой в электроустановках с изолированной нейтралью. Оно предназначено для обеспечения безопасности при замыкании на корпус. Защитные свойства заземления вытекают из выражения (39). Из этого же выражения видно, что заземление особенно эффективно в сетях с хорошей изоляцией фаз относительно земли. Поэтому согласно ПУЭ в электроустановках напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью заземление должно быть выполнено совместно с устройством, обеспечивающим постоянный контроль изоляции сети.

Анализ выражений (38) и (39) показывает, что заземление более эффективно в сети с изолированной нейтралью. Уменьшением сопротивления заземляющего устройства можно существенно снизить ток в цепи человека. Однако нормирование величины R_z в данной сети более затруднено, так как имеется большое влияние сопротивления изоляции сети, которое в реальных условиях изменяется в широких пределах. Этим объясняется более дифференцированный подход к нормированию сопротивления заземляющего устройства в электроустановках с изолированной нейтралью.

Сопротивление заземляющего устройства в электроустановках напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью должно быть не более 4 Ом. При мощности генераторов и трансформаторов 100 кВ·А и менее заземляющие устройства могут иметь сопротивление не более 10 Ом. Если генераторы или трансформаторы ра-

богаты параллельно, то сопротивление 10 Ом допускается при суммарной их мощности не более 100 кВт·А.

В электроустановках напряжением выше 1000 В применяется компенсация емкостных токов замыкания на землю, что способствует снижению напряжения прикосновения при замыкании на корпус. Компенсация этих токов находит применение и в электроустановках напряжением до 1000 В, но еще не в таких масштабах, чтобы нужно было выделять их в отдельную группу при нормировании заземления. Возможность компенсации емкостных токов замыкания на землю (в частном случае I_h) вытекает из выражения (24). Из этого выражения видно, что соответствующим подбором проводимости Y_0 можно уменьшить ток в цепи человека. Это осуществляется включением определенной индуктивности между нейтралью сети и землей. Если проводимости фаз относительно земли будут иметь емкостный характер, то возможна практически полная компенсация тока в цепи человека. В этом случае индуктивность выбирается из условия равенства нулю числителя выражения (24).

В электроустановках напряжением выше 1000 В (с малыми токами замыкания на землю) без компенсации емкостных токов сопротивление заземляющего устройства, Ом, при протекании расчетного тока замыкания на землю I_3 , А, должно быть не более

$$R_3 = \frac{250}{I_3}.$$

Если заземляющее устройство одновременно используется для электроустановок напряжением до 1000 В, то

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3}.$$

При этом сопротивление заземляющих устройств должно также удовлетворять требованиям к электроустановкам напряжением до 1000 В.

Расчетным током является полный ток замыкания на землю. Он должен быть определен для той возможной в эксплуатации схемы сети, при которой токи замыкания на землю имеют наибольшее значение. Если электроустановки напряжением выше 1000 В с изолированной нейтралью отключаются защитой при замыкании на землю, то в качестве расчетного принимается ток срабатывания этой защиты (уставка). В этом случае ток замыкания на землю должен быть не менее полутора-

кратного тока срабатывания защиты. Если в качестве защиты используется предохранитель, то указанная кратность должна быть не менее трех.

Кроме замыкания на землю и замыкания на корпус в электроустановках с изолированной нейтралью большую опасность представляет повреждение изоляции между обмотками высшего и низшего напряжений трансформатора. В этом случае напряжение нейтрали и в соответствии с (21) напряжение фаз сети низшего напряжения относительно земли резко возрастают, что может

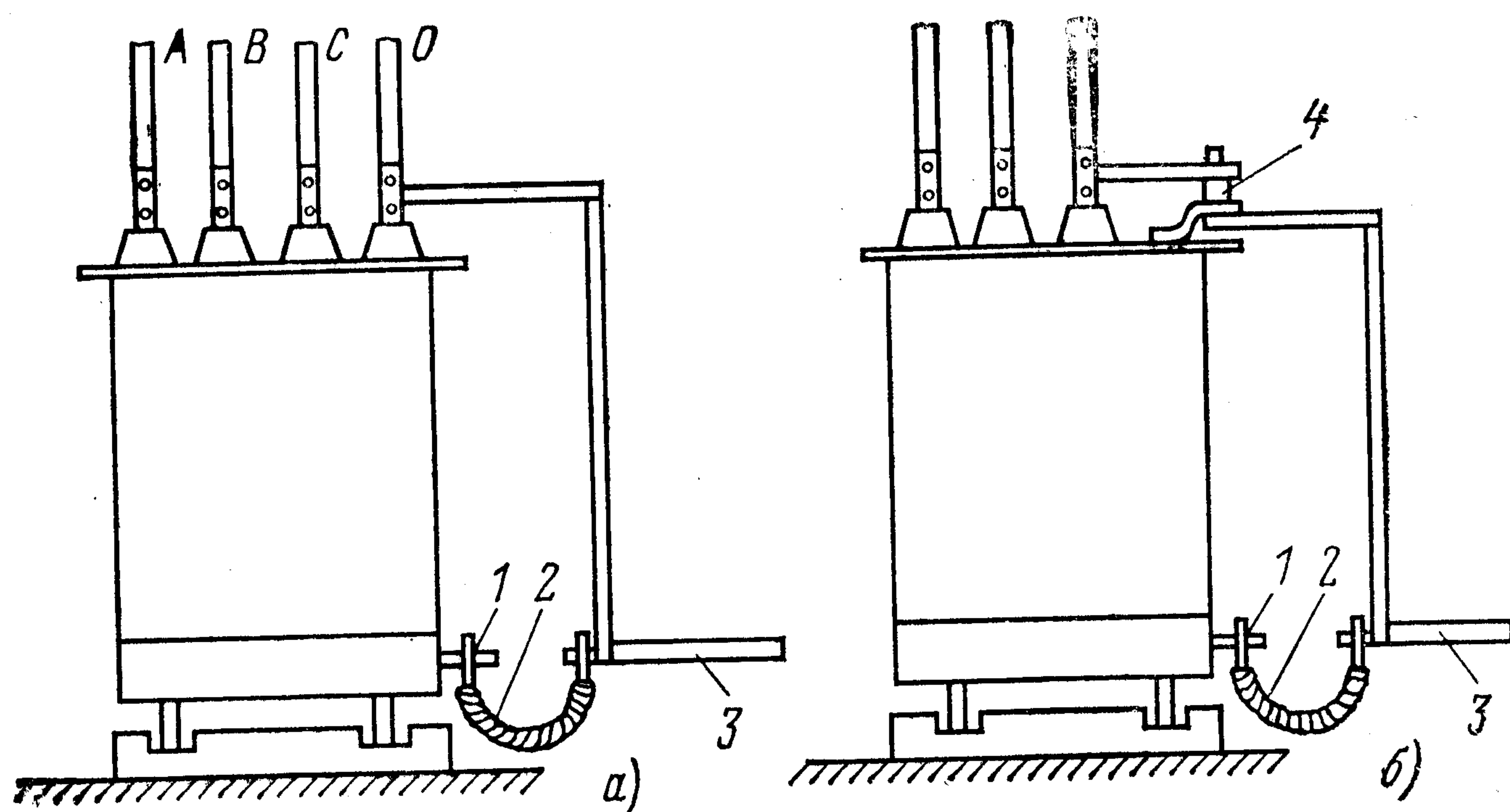


Рис. 25. Заземление силового трансформатора.

a — с глухозаземленной нейтралью вторичной обмотки напряжением до 1000 В; *б* — с изолированной нейтралью; 1 — заземляющий болт; 2 — гибкая перемычка; 3 — магистраль заземления; 4 — пробивной предохранитель.

вызвать дальнейшее развитие аварии и возникновения условий поражения. Поэтому трехфазные сети до 1000 В с изолированной нейтралью, связанные через трансформаторы с сетями напряжением выше 1000 В, должны быть защищены от указанной опасности пробивным предохранителем, установленным в нейтрали или фазе на стороне низшего напряжения трансформатора. При возникновении аварии пробивной предохранитель срабатывает и соединяет сеть с землей, устраняя тем самым перенапряжения.

На рис. 25, *a*, *б* в качестве примера показано заземление (зануление) корпуса силового трансформатора в сетях соответственно с глухозаземленной и изолированной нейтралью с использованием в последнем случае пробивного предохранителя. У силового трансформатора с глухозаземленной нейтралью вторичной обмот-

ки трансформатора напряжением до 1000 В нейтраль трансформатора должна соединяться с заземлителем отдельным проводником [13]. Заземлитель следует располагать по возможности ближе к трансформатору.

В установках с изолированной нейтралью заземление обмотки трансформатора напряжением до 1000 В осуществляется через пробивной предохранитель (рис. 25,б).

Для заземления корпуса силового трансформатора заземляющий проводник присоединяется к заземляющему болту на корпусе трансформатора. Это подсоединение должно быть выполнено так, чтобы не было необходимости нарушения проводки при выкатке трансформатора. В противном случае присоединение должно быть выполнено гибким проводником на подходе к трансформатору [13].

Согласно ПУЭ в электроустановках напряжением до 1000 В в местах, где в качестве защитной меры применяются разделяющие или понижающие трансформаторы, их вторичное напряжение должно быть соответственно не более 380 и 42 В. При этом от разделяющих трансформаторов разрешается питание только одного электроприемника с номинальным током плавкой вставки предохранителя или расцепителя автомата на первичной стороне не более 15 А. Заземление вторичной обмотки разделяющих трансформаторов запрещается, т. е. потребитель должен подключаться к сети с изолированной нейтралью. Корпус трансформатора в зависимости от режима нейтрали сети, питающей первичную обмотку, должен быть заземлен или занулен. Заземление корпусов электроприемников, присоединенных к таким трансформаторам, не требуется, а соединение с сетью зануления не допускается.

Понижающие трансформаторы с вторичным напряжением 42 В и ниже могут служить в качестве разделяющих, если они удовлетворяют соответствующим требованиям. Если понижающие трансформаторы не являются разделяющими, то в зависимости от режима нейтрали сети, питающей первичную обмотку, следует заземлять или занулять корпус трансформатора. Для снижения опасности поражения током при замыкании обмоток трансформатора следует также заземлять или занулять один из выводов (одну из фаз) или нейтраль (среднюю точку) вторичной обмотки.

Применение зануления в электроустановках с изолированной нейтралью не допускается. Это объясняется прежде всего тем, что при замыкании на землю зануленное электрооборудование оказывается по отношению к земле практически под фазным напряжением, что, естественно, представляет значительную опасность.

Приведенный ряд конкретных требований ПУЭ показывает, что знание основ теории электробезопасности позволяет правильно их понимать, выполнять и учитывать при разработке, монтаже и эксплуатации электроустановок. Это способствует снижению электротравматизма в нашей стране.

Б. ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Глава четвертая

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

14. СТАТИСТИКА ПОЖАРОВ ОТ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Как показывает статистика пожаров [36, 43, 44] на различных объектах народного хозяйства, ежегодно примерно пятая часть всех пожаров в стране, а в некоторых отраслях и более, происходит от теплового проявления электрического тока, при этом наиболее часты среди них (табл. 3) пожары от короткого замыкания (к. з.). С одной стороны, это связано с интенсивной электрификацией всех отраслей народного хозяйства и быта советских людей (табл. 4 и 5), вследствие чего растет частота возникновения самих случаев непредусмотренного теплового проявления электрического тока, а с другой, увеличивается вероятность возникновения пожара при тепловом проявлении электрического тока, поскольку автоматизация и механизация производственных процессов на основе электрификации в определенной мере снижают контролируемость человеком производственных помещений.

Темпы роста энерговооруженности труда в промышленности [37], % к показателям за 1965 г., приведены ниже:

Год	1970	1971	1972	1973	1974
Темпы роста	129	136	144	151	159

Распределение пожаров от электрических причин по типам электроустановок и объектам [43]

Наименование электроустановок	Количество пожаров, %										Всего пожаров
	Производственные здания	Жилые дома	Сельскохозяйственные объекты	Магазины, кафе, столовые, рестораны, буфеты	Склады, базы, крашлица	Административные здания	Кiosки	Ватончики, будки, бытовки	Сараи, навесы, производственные площади, частные гаражи		
Провода воздушных линий электропередачи	0,07	0,09	0,11	—	0,07	0,02	—	—	0,04	0,4	
Трансформаторы промышленного назначения	0,09	0,03	0,04	0,07	—	0,09	—	—	—	0,32	
Электрический ввод	0,39	4,63	0,23	0,1	0,1	0,34	—	0,63	—	6,42	
Трубой	0,02	1,02	0,09	—	—	—	—	—	0,02	1,15	
Электрические щиты	0,48	0,34	0,43	0,23	0,07	0,34	0,02	0,09	0,02	2,02	
Электрические счетчики	—	0,34	—	—	—	—	—	—	—	0,34	
Рубильники	0,06	—	0,04	—	0,08	0,02	—	0,07	0,02	0,29	
Автоматические выключатели	0,02	—	—	0,04	0,05	0,02	—	0,05	—	0,18	
Электрическая проводка	5,08	22,06	3,27	2,43	1,95	1,29	0,16	3,02	5,6	44,86	
Электроустановочные изделия	0,23	0,9	0,14	0,02	0,05	0,11	—	—	—	1,45	
Электрические двигатели	0,52	0,04	0,12	0,09	0,12	0,07	—	0,02	—	0,98	
Магнитные пускатели	0,04	—	0,09	—	0,02	0,02	—	—	—	0,17	
Лампы накаливания	0,41	1,11	0,61	0,41	0,43	0,39	—	0,05	0,48	3,89	
Люминесцентные светильники	0,09	0,05	—	0,21	0,05	0,25	—	—	—	0,65	
Телевизоры	—	1,89	—	—	—	—	—	—	—	1,89	
Радиоприемники сетевые и магнитофоны	—	0,04	—	—	—	—	—	—	—	0,04	
Бытовые стабилизаторы и трансформаторы напряжения	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—	1,0	

Наименование электроустановок	Количество пожаров, %										Всего пожаров
	Производствен- ные здания	Жилые дома	Сельскохозяй- ственные объекты	Магазины, ка- фе, столовые, рестораны, буфеты	Склады, базы, хранилища	Административные здания	Киоски	Вагончики, буд- ки, бытовки	Сараи, навесы, производствен- ные площадки, частные гара- жи		
Бытовые электрические нагреватели Бытовые холодильники Елочные электрогирлянды Аккумуляторы и зарядные устройства	0,23	0,54	0,14	0,05	—	0,09	—	0,11	—	1,16	
	—	0,41	—	—	—	—	—	—	—	0,41	
	—	0,29	—	—	—	—	—	—	—	0,29	
	0,41	—	—	—	—	—	—	—	—	0,41	

Электроустановки без присмотра

Электрические утюги	0,16	5,0	—	0,023	—	0,23	—	0,045	—	5,45
Электрические плитки	0,48	1,81	0,023	0,14	0,16	0,16	0,023	0,14	—	2,94
Электрические камины	0,09	0,14	—	0,023	0,05	0,02	0,05	0,07	—	0,44
Электрические самодельные нагреватели	—	0,02	—	0,02	0,03	—	—	0,23	—	0,3
Электрические грелки	—	0,41	—	—	—	—	—	—	—	0,41
Электрические котлы	0,11	0,34	0,07	0,02	0,09	0,18	0,02	—	—	0,83
Электрические чайники	0,07	0,04	—	0,05	0,02	0,11	—	—	0,03	0,32
Прочие электрические нагреватели (неуста- новленного образца)	1,04	3,27	0,23	0,34	0,5	0,68	0,18	0,98	—	7,22
Телевизоры	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—	1,0
Электрические печи	0,02	0,2	—	0,07	—	0,04	0,05	0,14	0,07	0,59
Сетевые радиоприемники и магнитофоны	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—	1,0
Бытовые стабилизаторы и трансформаторы апряжения	—	0,29	—	—	—	—	—	—	—	0,29

Наименование электроустановок	Количество пожаров, %										Всего пожаров
	Производствен- ные здания	Жилые дома	Сельскохозяй- ственные объекты	Магазины, ка- фе, столовые, буфеты	Склады, базы, хранилища	Административ- ные здания	Кiosки	Вагончики, буд- ки, бытовки	Сараи, навесы, производствен- ные площадки, частные гара- жи		
Большое переходное сопротивление электрических контактов											
Электрический ввод, трубостой	0,02	0,2	—	0,05	—	0,02	—	—	—	0,29	
Электрические щиты	0,14	0,11	0,07	—	0,07	0,02	—	—	—	0,41	
Электрическая проводка	0,23	1,21	0,43	0,2	0,36	0,32	0,07	0,02	0,27	3,71	
Электроустановочные изделия	0,09	0,25	0,05	0,11	—	0,14	0,09	0,08	—	0,81	
Прочее	0,09	0,11	—	0,02	0,03	0,02	0,03	—	—	0,3	
Перегрузка электроустановок											
Электрические двигатели	0,07	0,02	—	0,07	0,04	0,02	—	—	0,05	0,27	
Электрическая проводка	0,2	0,63	0,2	0,09	0,04	0,07	0,02	0,09	0,05	1,39	
Электрические нагреватели	0,07	0,14	0,09	—	—	0,02	—	0,05	0,07	0,39	
Трансформаторы промышленного назначения	0,02	0,02	—	—	—	0,03	—	—	0,02	0,09	
Электроустановочные изделия	0,02	0,11	0,02	—	—	0,03	—	—	—	0,18	
Электрические светильники	—	0,04	0,02	0,05	0,02	—	—	—	—	0,13	
Электрические щиты	—	—	0,02	—	—	0,03	—	—	—	0,05	
Прочее	0,02	0,09	0,04	0,05	—	—	—	—	—	0,2	
Несоблюдение пожаробезопасного расстояния до легковоспламеняющихся веществ, материалов и конструкций											
Электрические светильники	—	0,29	0,07	0,03	0,07	0,11	—	0,04	0,24	0,85	
Электрические нагреватели	0,09	0,78	—	0,04	0,04	0,1	0,03	0,18	0,09	1,35	
Прочее	0,14	0,24	0,04	0,05	—	0,05	—	—	0,04	0,56	
Всего пожаров	11,31	53,11	6,63	5,1	4,51	5,45	0,74	6,04	7,11	100	

Темпы электрификации сельского хозяйства в различные годы [38]

Показатели	1970	1971	1972	1973	1974
Общее потребление электрической энергии в сельском хозяйстве, млрд. кВт·ч	38,6	45,6	51,6	57,6	65,8
Потребление электрической энергии сельскохозяйственным производством, млрд. кВт·ч	25,6	30,5	35,5	40,6	47,1
Электровооруженность труда в сельском хозяйстве, кВт·ч (чел-год)	1080	1300	1520	1720	1950

Пожары от теплового проявления электрического тока в промышленности возникают при к. з., токовых перегрузках, больших переходных сопротивлениях, касаниях токоведущих частей электроустановок заземленных конструкций (замыканиях на землю).

Статистика пожаров в сельском хозяйстве показывает, что около 35% составляют пожары, которые возникли от к. з. в электрических проводках зданий, 27% — от замыкания в воздушных электрических сетях, 13,4% — от перегрузки электрических двигателей, 8,9% — из-за больших переходных сопротивлений, 6,7% — из-за аварийных режимов в светильниках с лампами накаливания, 4,4% — из-за несоблюдения пожаробезопасного расстояния до светильников с лампами накаливания и 4,4% — из-за касания токоведущих частей электроуста-

Т а б л и ц а 5

Темпы производства товаров культурно-бытового назначения и хозяйственного обихода (тыс. шт.) в различные годы [37]

Наименование товаров	1940	1965	1970	1971	1972	1973	1974
Телевизоры	0,3	2715	3749	3184	3249	3480	3601
Радиоприемники и радиолы	144	2919	4811	5383	5389	5003	4963
Холодильники бытовые	3,2	1164	2773	3011	3198	3333	3442
Стиральные машины	—	2193	3310	2533	1762	1675	1760
Электропылесосы	—	568	1015	1171	1462	1780	2245
Электрополотеры	—	51	142	163	137	102	122

Распределение пожаров от электрических причин

Наименование объекта	Крыша, ввод, потолок, чердак	Жилая комната	Коридор
Производственные здания	1,15	0,04	0,05
Жилые дома	11,54	24,77	4,6
Сельскохозяйственные объекты	1,45	—	0,04
Магазины, столовые, рестораны, кафе, буфеты	0,58	—	0,08
Склады, базы, хранилища	0,15	—	—
Административные здания	0,63	0,9	0,61
Вагончики, будки, бытовки	1,28	0,2	0,18
Киоски	0,02	—	—
Сараи, постройки, навесы и др.	1,23	—	0,04
Всего пожаров	18,33	25,91	5,56

новок заземленных конструкций. Количество пожаров от электрических причин, приходящееся на 1 млн. кВт·ч потребляемой электроэнергии, в сельскохозяйственном производстве значительно выше, чем в промышленности.

Пожары от электрического тока в жилых зданиях возникают чаще всего в результате к. з. в электрических сетях и оставленных без присмотра электронагревательных приборов (см. табл. 3).

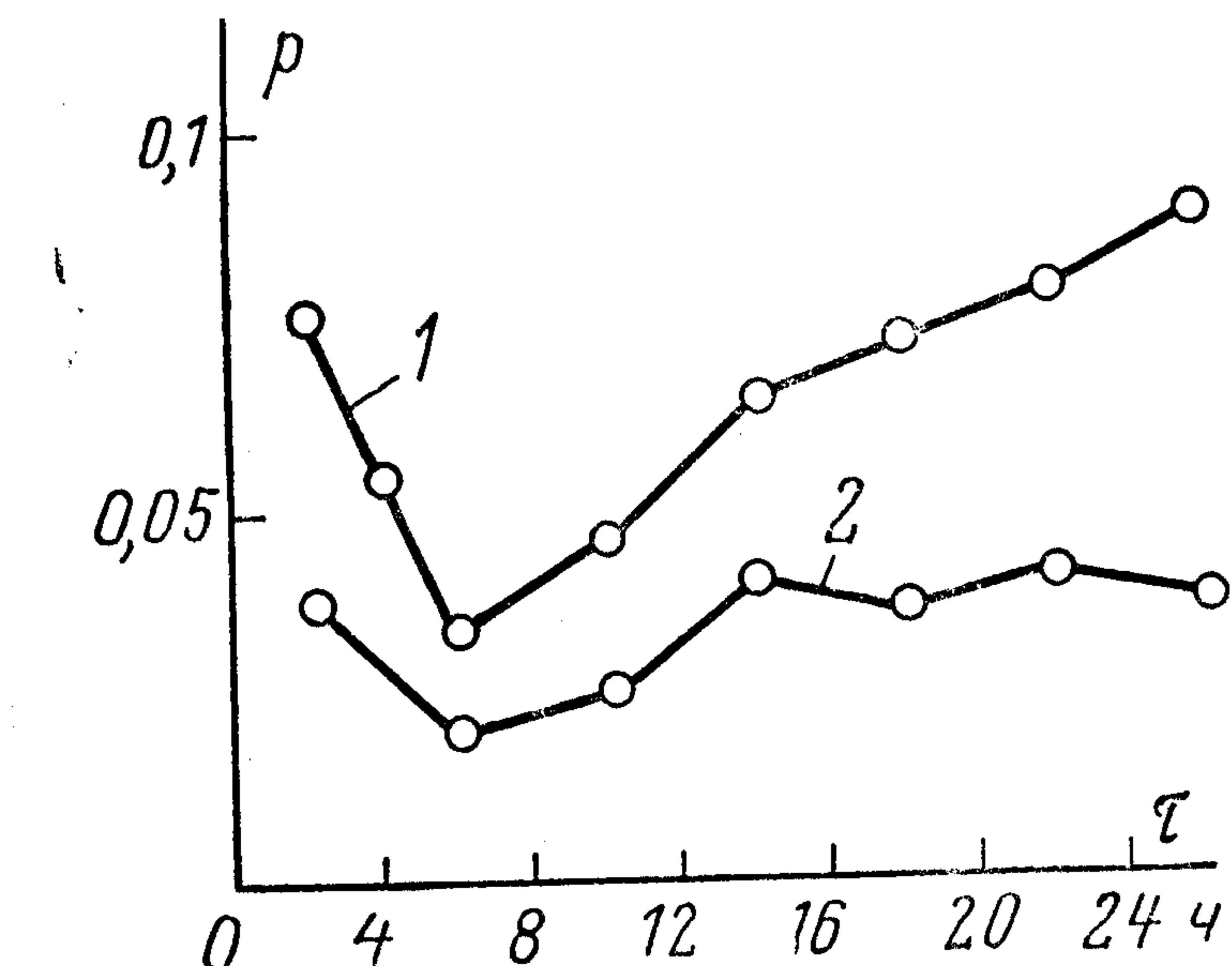


Рис. 26. Частота возникновения пожаров ρ в жилых зданиях от к. з. в электропроводках в зависимости от времени суток (Московская обл., 1971—1972 гг).

1 — в домах на правах личной собственности; 2 — в домах государственного фонда.

Причем частота пожаров (рис. 26) в жилых домах, являющихся личной собственностью, значительно выше, чем в домах государственного фонда [36]. В подавляющем большинстве они происходят в помещениях с постоянным пребыванием людей (табл. 6). Вышеизложенное свидетельствует, что рост электровооруженности народного хозяйства ведет к увеличению числа потенциальных источников пожарной опасности. В связи с этим перед

(%) по объектам и местам возникновения

Кухня	Подвал	Пристройка к дому	Подсобное помещение	Бытовка	Технологическая установка	Производственное помещение	Место возникновения не установлено	Всего пожаров
0,04	0,04	0,12	1,2	0,9	3,12	3,52	1,12	11,31
4,76	0,58	2	2,73	0,27	—	—	1,86	53,11
0,1	—	0,2	1,3	0,18	0,61	1,55	1,21	6,63
0,29	0,09	0,08	1,49	0,18	0,2	1,01	1,1	5,1
—	0,09	0,09	0,78	0,52	0,65	0,25	1,7	4,51
0,25	0,04	—	0,63	0,49	0,13	0,61	1,17	5,45
0,07	—	0,02	0,4	0,18	0,09	0,78	2,69	6,04
—	—	—	—	—	—	—	0,72	0,74
—	0,09	0,04	1,59	0,09	—	—	4,03	7,11
5,51	0,87	2,55	10,22	3,0	4,8	7,71	15,6	100

электроэнергетикой стоит важнейшая задача — усиление эффективности и повышение качества профилактической работы в электроустановках с целью предотвращения возникновения пожаров, поскольку речь идет о защите социалистической собственности и имущества граждан от огня.

15. ПОНЯТИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И ПУТИ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

Понятие «пожарная опасность электрических установок» включает в себя способность их при определенных условиях быть причиной зажигания (электрические дуги, искры, нагрев токоведущих элементов и т. п. и способность их распространять горение (например, вдоль электрических проводок и кабелей). Кроме того, некоторые типы электроустановок характеризуются большой пожарной нагрузкой (например, силовые масляные трансформаторы, кабельные потоки и т. п.). Пожарная опасность электроустановок обуславливается также и теми последствиями, которые будут иметь место при выходе их из строя во время пожара. В ряде случаев убытки от пожара могут быть значительными, а порой тяжкими (происходит остановка производства, выходит из строя технологическое оборудование, не обеспечива-

ется поставка электрической энергии и т. п.). Тяжелые последствия возможны даже и в том случае, если пожар и не получил существенного развития. Например, при пожаре в вычислительном центре само тушение может быть причиной выхода из строя дорогостоящего электронного оборудования.

Очевидная возможность возникновения пожаров от электрического тока создала ложное представление об их неизбежности при аварийных режимах в электроустановках. В действительности же все зависит от того, сложилась ли пожароопасная ситуация в момент аварийного режима, которая, как известно, в присутствии окислителя возникает при совмещении горючих материалов с источниками зажигания, имеющими достаточную для их воспламенения температуру и необходимый запас тепловой энергии. Хотя совмещение источников зажигания, образующихся при аварийных режимах в электроустановках, с горючими материалами возможно в силу непредвиденных обстоятельств, можно считать, что возникновение пожара, как правило, является результатом нарушения или несоблюдения мероприятий, направленных на предотвращение пожаров от электрического тока, или несовершенства этих мероприятий. В общем случае пожары в электроустановках можно предотвратить созданием таких условий, при которых исключается возникновение пожароопасных ситуаций, а если пожар все же возникнет, то тушение производится быстро и эффективно без последствий для электрооборудования. Путей снижения пожарной опасности электроустановок несколько, к ним можно отнести: правильный выбор и расчет электрической защиты, соответствующие исполнение и размещение электроустановок, использование огнезащитных покрытий, внедрение высокоэффективных систем извещения о пожарах и загораниях и систем пожаротушения.

Правильный выбор средств и способов обеспечения или повышения пожарной безопасности электроустановок зависит от того, насколько точно оценивается пожарная опасность самих электроустановок, поскольку по уровню пожарной опасности электроустановки существенно отличаются друг от друга. Однако независимо от того, что составляет и что определяет их пожарную опасность, мероприятия по предотвращению пожаров от электроустановок в значительной степени зависят от

проектировщиков, монтажников и эксплуатационников, которые должны ясно представлять себе суть пожарной опасности обслуживаемых, монтируемых или проектируемых ими электроустановок. Ниже дается изложение пожарной опасности ряда электроустановок и аварийных режимов, которые возможны в них.

16. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Пожарная опасность открытых электрических проводов

Совокупность проводов с относящимися к ним крепежными, поддерживающими и защитными конструкциями, а также другими вспомогательными деталями носит название электрической проводки. По назначению и способу исполнения электрические проводки делятся на силовые, осветительные и вторичные цепи напряжением до 1000 В переменного и 1500 В постоянного тока. Проводки выполняются, как правило, изолированными установочными проводами всех сечений, а также небронированными силовыми кабелями с резиновой или пластмассовой изоляцией в металлической, резиновой или пластмассовой оболочке сечением до 16 мм² включительно [40]. Прокладка электрических проводов может осуществляться по наружным и внутренним стенам зданий и сооружений, по потолкам, фермам и т. п. Такой способ прокладки называется открытым. Прокладка в трубах (металлических, пластмассовых), замкнутых каналах, пустотах строительных конструкций, пазах под штукатуркой, а также путем замоноличивания в строительные конструкции при их изготовлении носит название скрытой прокладки, а сами электропроводки — скрытыми. С точки зрения пожарной опасности наибольшего внимания заслуживают открытые электрические проводки, так как при их загорании, а также возникновении в них аварийных режимов возможны распространение горения вдоль электрических проводов и появление новых очагов горения, вызванных выбросами искр и частиц расплавленного металла. Необходимо отметить, что появление источников зажигания возможно также и в электрических проводках, проложенных в металлических трубах.

В общем случае пожарная опасность электрических проводов обуславливается возможностью образования при их эксплуатации таких источников зажигания, как электрические искры, дуги, раскаленные частицы метал-

лов, нагретые контактные соединения, нагретые токоведущие жилы, открытый огонь воспламенившейся изоляции, и способностью электрических проводов распространять горение. Каждый из этих источников зажигания характеризуется своими особенностями.

Пожарная опасность нагрева токоведущих жил заключается в опасности загорания изоляции, а также горючих конструкций, находящихся в непосредственном контакте с электрической проводкой. Нагрев токоведущих жил может быть локальным, местным и общим. Локальный нагрев — это такой нагрев, когда размером зоны его распространения можно пренебречь, местный — это нагрев, когда он охватывает часть длины проводника, а общий — когда проводник нагревается по всей его длине.

Локальный нагрев токоведущих жил возникает при коротком замыкании в точке касания их между собой, если при этом образуется контакт с большим переходным сопротивлением (например, при слабом нажатии). Если плотность тока в точке контакта значительна, то выделяется большое количество теплоты, что ведет к быстрому нагреву контактной зоны. Нагрев может вызвать оплавление проводов в зоне контакта, а также их пережог. Продолжительность тепловыделения в зоне замыкания определяется временем срабатывания $\tau_{уст}$ и током уставки $I_{уст}$ аппарата защиты, а при отсутствии электрической защиты и достаточной мощности источника электрической энергии — временем $\tau_{п}$, необходимым для пережога жил. Если ток к. з. меньше тока уставки аппарата защиты, то возможно только оплавление токоведущих жил в точке замыкания. Если же ток к. з. больше тока уставки аппарата защиты, а время срабатывания аппарата защиты больше времени, необходимого для пережога токоведущих жил, то пережог жил неизбежен.

Процесс нагрева токоведущих жил в зоне к. з. (в зоне контакта) происходит одновременно с процессом теплоотдачи в окружающее пространство и близлежащим к контактной точке участкам токоведущих жил проводов. Температура нагрева контактной точки может быть приближенно определена по формуле [41]

$$T_{кон} = I_k^2 R_{п} / 2\pi^2 \lambda_p, \quad (68)$$

где $T_{кон}$ — температура контактной точки, °С; I_k — ток к. з., А; $R_{п}$ — переходное сопротивление в зоне контак-

τ_a , Ом; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);
 ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

В действительности локальный нагрев токоведущих жил электрических проводов при их замыкании между собой происходит чрезвычайно быстро и может быть представлен как локальный тепловой удар. Темп выделения теплоты в контактной точке очень высок (порядка нескольких тысяч градусов в секунду). Потери ее в окружающую среду незначительны. Это способствует аккумуляции тепла в контактной точке, поэтому можно считать, что в зоне контакта в течение определенного весьма малого промежутка времени существует очень высокая температура, близкая к температуре кипения металла проводника (свыше 2000°С для меди и 1800°С для алюминия). Учитывая изложенное, уравнение распределения температуры вдоль проводника в зоне локального нагрева можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\gamma c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (69)$$

или

$$b^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (70)$$

где

$$b = \sqrt{\frac{\lambda}{c\gamma}}; \quad (71)$$

c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С).

При $\tau=0$ $T=T_0$ для всех значений $x>0$ (T_0 — температура окружающей среды). При $\tau=\infty$ $T=T_{max}$ для всех значений x . Учитывая, что температура нагрева токоведущих жил в зоне контакта очень высокая, следует ожидать воспламенения изоляции, находящейся вблизи зоны нагрева. Ее воспламенению способствует также тепловой эффект электрической дуги, которая, как правило, неизбежно возникает при к. з. Возможность воспламенения изоляции в зоне к. з. определяется длительностью аварийного режима $\tau_{к.з}$ и временем τ_b , необходимым для подготовки изоляции к воспламенению (временем индукции). Если $\tau_{к.з} > \tau_b$, то воспламенение практически неизбежно, а если $\tau_{к.з} \leq \tau_b$, то воспламенение носит вероятностный характер. На рис. 27 приведены зависимости, полученные экспериментальным путем, которые позволяют ориентировочно при извест-

ных кратности тока K и времени пережога τ_n токоведущих жил проводов определить вероятность воспламенения изоляции проводов в зоне к. з. Для проводов с резиновой изоляцией критическое значение кратности тока, при превышении которого вероятность воспламене-

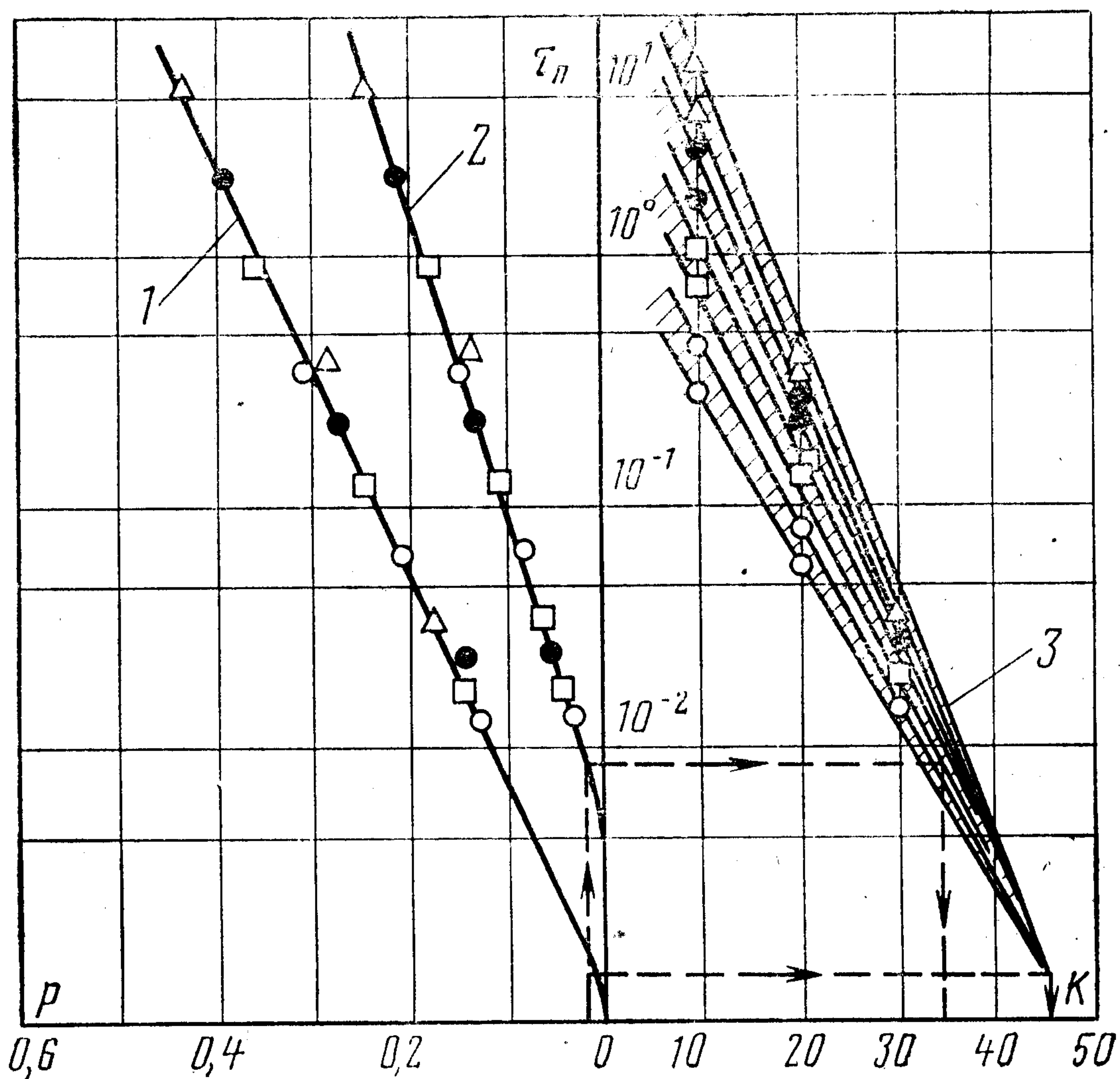


Рис. 27. Зависимости частоты воспламенения изоляции алюминиевых проводов p от продолжительности пережога токоведущих жил $\tau_{п}$ (1 и 2) и зависимости продолжительности пережога алюминиевых проводов от кратности тока к. з. (3).

1 — провода с резиновой изоляцией; 2 — провода с поливинилхлоридной изоляцией; ○ — сечение жил 2,5 мм²; □ — то же 4 мм²; ● — то же 6 мм²; △ — то же 10 мм².

ния изоляции в месте к. з. будет менее 10^{-2} , может быть принято равным 45, а проводов с поливинилхлоридной изоляцией — 35 [42]. С физической точки зрения существование критических значений кратности тока к. з. для зажигания изоляции в зоне к. з. можно объяснить тем, что продолжительность аварийного режима при этих кратностях очень мала и она недостаточна для подготовки изоляции к воспламенению. Приведенные на рис. 27 зависимости имеют определенное практическое значение, в частности при выполнении пожарно-технических экспертиз.

Местный нагрев электрических проводов возможен при соединении проводов скруткой без опрессовки. В этом случае процессы нагрева, обусловливаемые местным увеличением переходного сопротивления, проходят медленно. С некоторым приближением они могут быть описаны уравнением

$$T = T_y(1 - e^{-\tau/\theta}) + T_0 e^{-\tau/\theta}, \quad (72)$$

где T_y — установившееся значение температуры нагрева провода в месте скрутки, °С; θ — постоянная нагрева, с⁻¹; T_0 — температура окружающей среды, °С; T — превышение температуры провода в месте скрутки над температурой окружающей среды, °С.

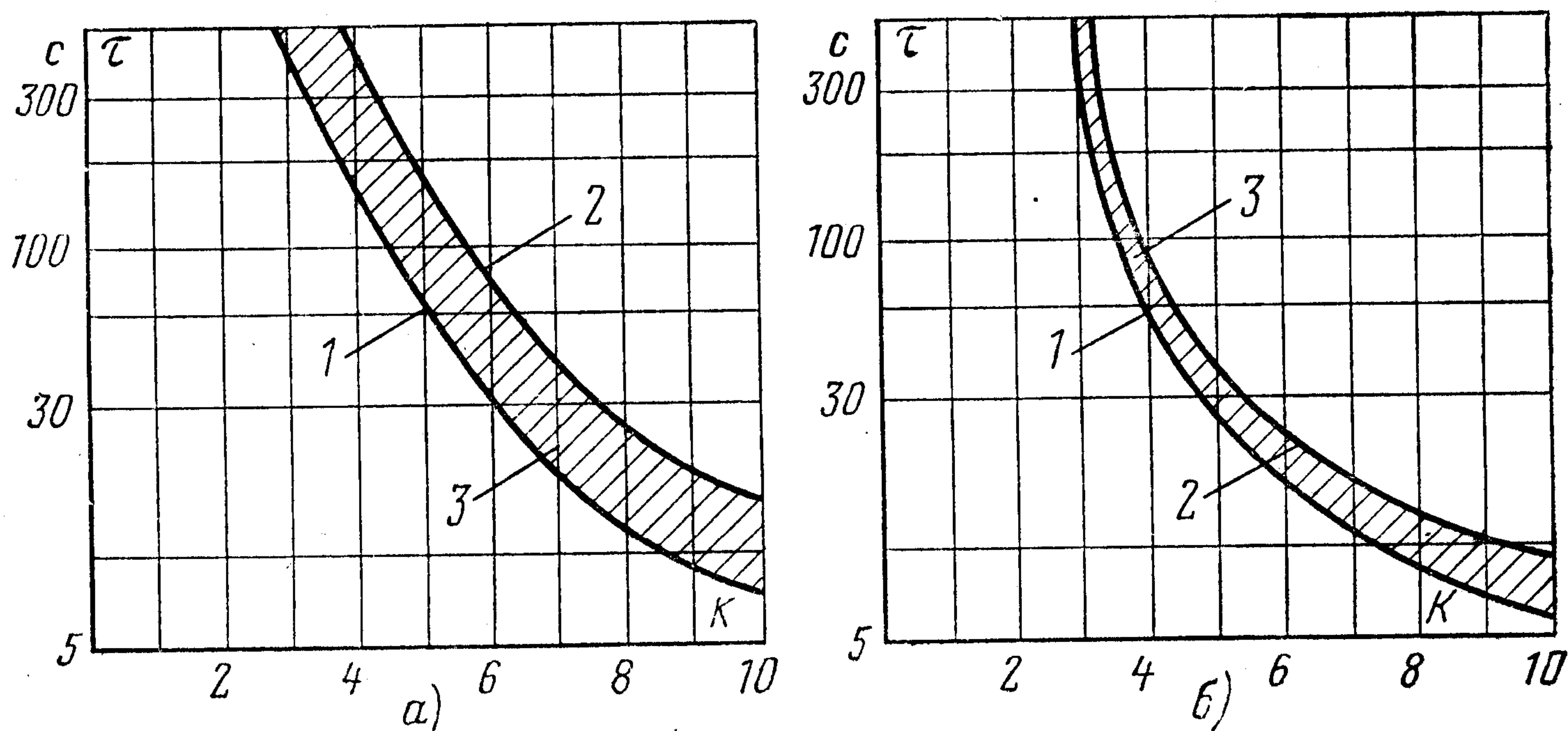


Рис. 28. Зависимости времени появления дыма изоляции и разрушения токоведущих жил τ от кратности тока перегрузки K .

а — провод ПР-2,5; б — провод АПР-2,5; 1 — появление дыма; 2 — разрушение токоведущей жилы; 3 — зона вероятного воспламенения изоляции.

Если температура нагрева проводов в месте скрутки превысит температуру самовоспламенения изоляции, то она воспламенится.

Общий нагрев токоведущих жил проводов происходит при прохождении по ним сквозных токов $K \cdot 3$ или токов перегрузки. Выделяющееся при этом тепло в токоведущих жилах ведет к нагреву изоляции, и при достижении температуры самовоспламенения она воспламенится. На рис. 28 показаны зоны вероятного воспламенения изоляции проводов при перегрузке.

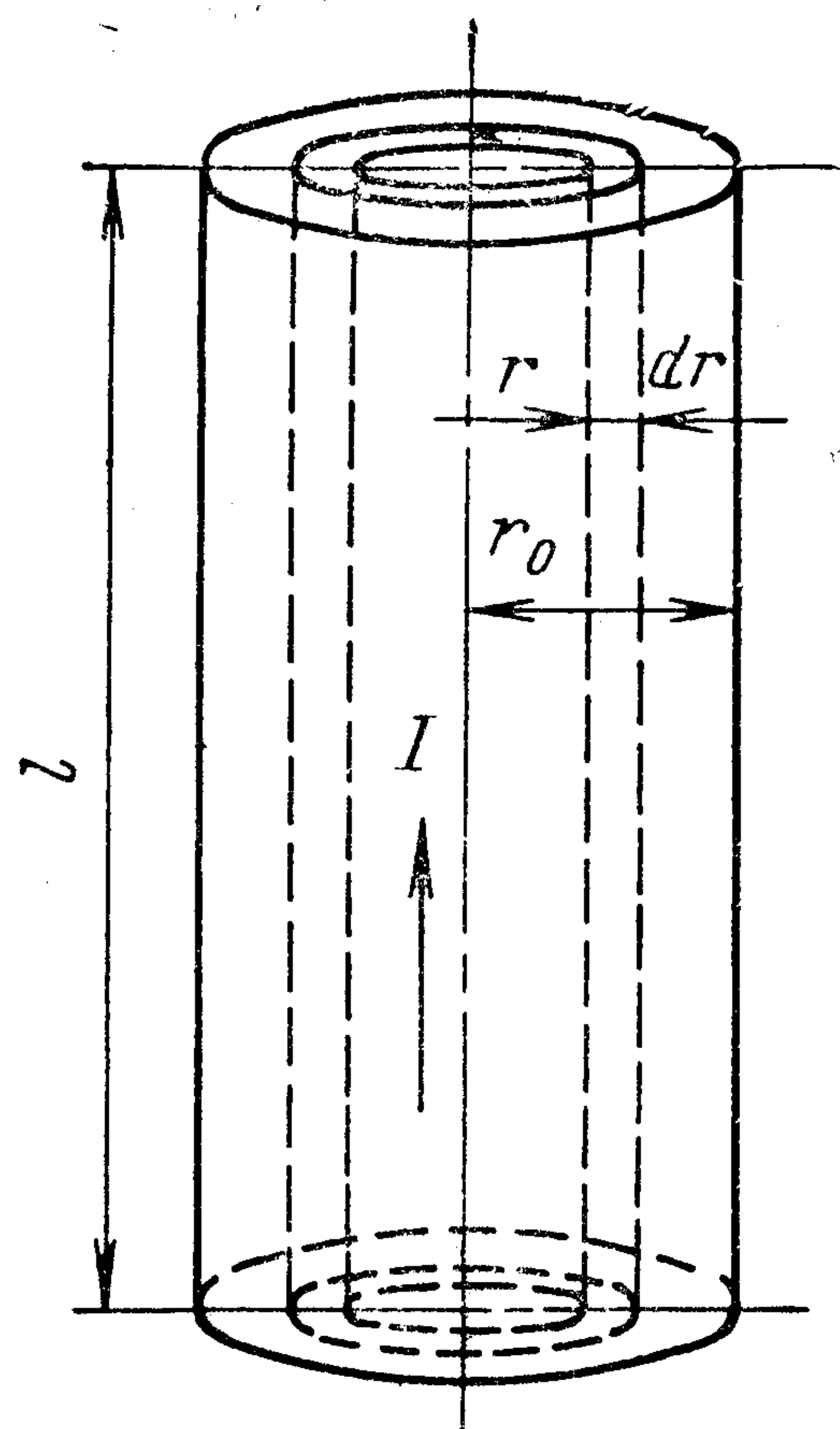


Рис. 29. К вопросу распределения температуры внутри проводника.

Рассмотрим, каким образом происходит распределение температуры нагрева внутри проводника. Для этого возьмем проводник круглого сечения с радиусом токоведущей жилы r_0 (рис. 29). Пусть по проводнику проходит электрический ток плотностью δ . При его прохождении часть электрической энергии в соответствии с законом Ленца — Джоуля превращается в теплоту. Выделим внутри провода вдоль его оси цилиндрический слой с внутренним радиусом r , а внешним $r + dr$. Электрическое сопротивление этого слоя вдоль оси провода будет равно:

$$dR = \frac{\rho l}{\pi [(r + dr)^2 - r^2]}. \quad (73)$$

Количество теплоты выделяемой в данном цилиндрическом слое за 1 с, составит:

$$dQ = \pi l \rho \delta^2 [(r + dr)^2 - r^2], \quad (74)$$

где Q — количество теплоты, Дж; δ — плотность тока, $A \cdot cm^{-2}$.

Количество теплоты, подводимой к цилиндрическому слою через поверхность $2\pi r l$, будет равно:

$$dQ_1' = \lambda 2\pi r l \left(\frac{dT}{dr} \right), \quad (75)$$

а отводимой от элемента через поверхность $2\pi (r + dr) l$,

$$dQ_2 = \lambda 2\pi (r + dr) l \left(\frac{dT}{dr} \right). \quad (76)$$

В установившемся режиме, когда распределение температуры в системе во времени не изменяется, закон сохранения энергии можно выразить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Количество теплоты,} \\ \text{подводимой к выде-} \\ \text{ленному слою} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Количество теплоты,} \\ \text{выделенной внутри} \\ \text{слоя} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Количество теплоты,} \\ \text{отведенной от выде-} \\ \text{ленного слоя} \end{array} \right\} = 0. \quad (77)$$

Поэтому можно составить уравнение теплового баланса:

$$dQ + dQ_1 = dQ_2, \quad (78)$$

а с учетом (74) — (76) можно записать:

$$\begin{aligned} \pi l \rho \delta^2 [(r + dr)^2 - r^2] + 2\pi \lambda r l \left(\frac{dT}{dr} \right) = \\ = 2\pi \lambda l (r + dr) \left(\frac{dT}{dr} \right). \end{aligned} \quad (79)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$T - T_0 = \frac{\delta^2 r_0^2}{4\rho\lambda} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]. \quad (80)$$

Соотношение (80) выражает параболический закон изменения температуры в поперечном сечении проводника, нагреваемого электрическим током. Из него следует, что максимальная температура на оси проводника будет:

$$T_{max} = \frac{\delta^2 r_0^2}{4\rho\lambda} + T_0. \quad (81)$$

Средняя температура внутри проводника

$$T_{cp} = \frac{\delta^2 r_0^2}{8\rho\lambda} + T_0. \quad (82)$$

Найденные соотношения действительны при предположении, что теплоемкость металла проводника и его электрическое сопротивление не изменяются при нагреве. Они позволяют решать ряд практических задач, связанных с расчетом нагрева электрических проводников.

Пожарная опасность электрических проводов в стальных трубах

Одним из традиционных способов предотвращения пожаров от аварийных режимов в электрических проводках является прокладка их в металлических трубах (в газовых трубах) и металлорукавах. При этом считается, что эффект предотвращения пожара достигается изоляцией источников зажигания, образующихся при аварийных режимах, от горючих материалов с помощью металлической стенки. Однако на практике при исследо-

вании причин пожаров на месте их возникновения иногда обнаруживают остатки металлических труб, в которых были проложены электрические проводки, со следами прожогов, свидетельствующих о воздействии токов аварийного режима (рис. 30).

В качестве примера можно привести случай пожара в коровнике, представлявшем собой бревенчатое строение с дощатым чердачным перекрытием, драночной кровлей и деревянными полами. Силовые электроустановки и электронагревательные приборы в нем отсутствовали. Питание сетей освещения осуществлялось воздушной линией от трансформаторной подстанции, расположенной от коровника на расстоянии 250 м. Электрический ввод был выполнен через металлический трубостой проводом ПР-500, который внутри коровника от трубостоя до рубильника ЯРВ-100 был проложен в металлорукаве. От рубильника до осветительного щитка и далее электрическая проводка была выполнена проводом АПВ в поливинилхлоридных трубах.

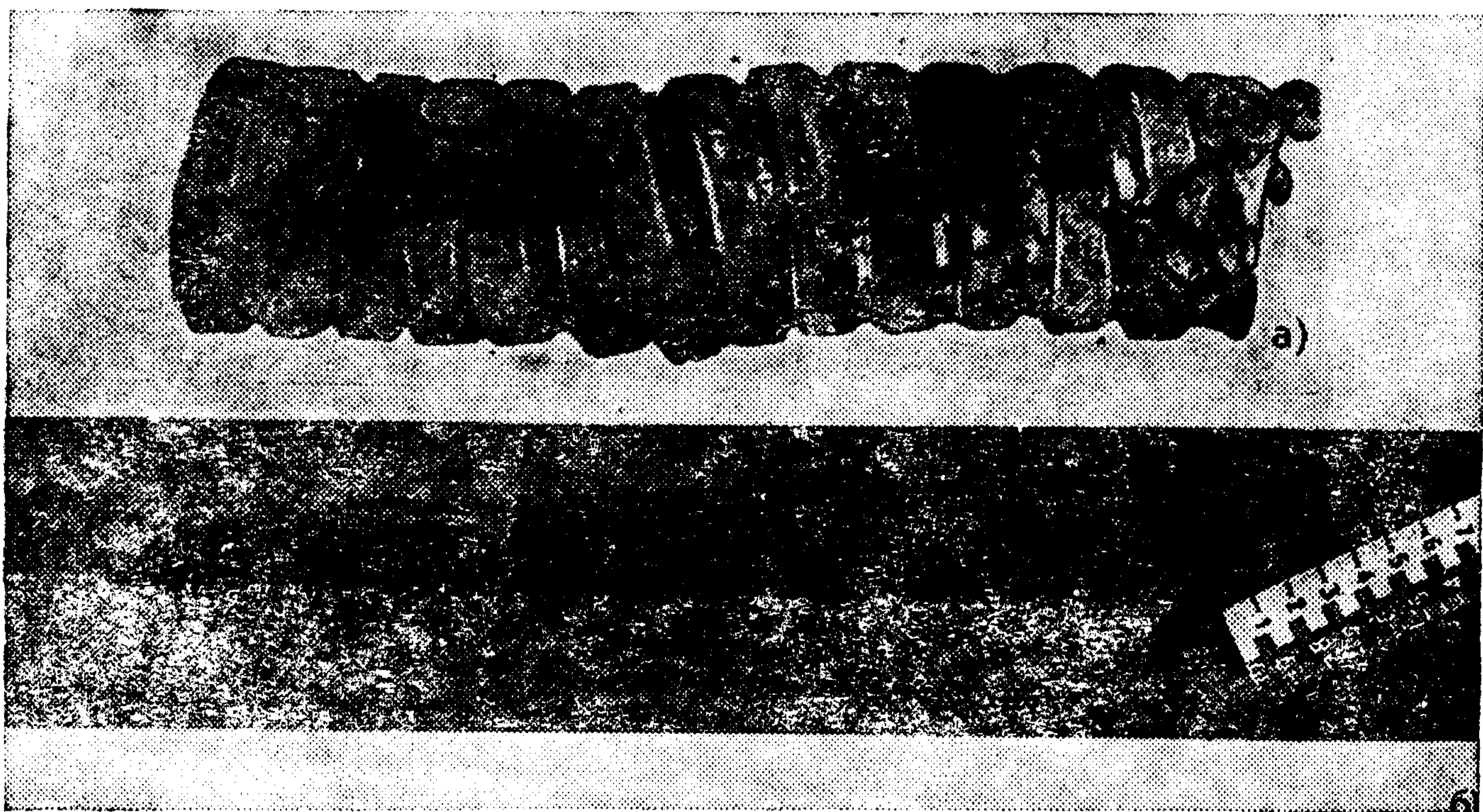


Рис. 30. Следы прожигания током к. з. металлорукава и трубы.
а — прожог металлорукава; б — прожог трубы.

Непосредственно к светильникам проводка была проложена в металлических трубах. Провода, применявшиеся в осветительной сети коровника, были марок АПВ и АППВ с сечением 4 и 2,5 мм². Электрическая сеть коровника находилась в эксплуатации один год. Пожар произошел в первом часу ночи. Осмотр элементов электрооборудования после пожара показал, что металлический корпус рубильника ЯРВ-100 имел на задней стенке сквозной прожог неправильной формы. Характер прожога свидетельствует, что он образовался в результате воздействия электрической дуги. Металлические рукава, найденные в очаге пожара, имели также следы прожогов (рис. 31). Вид прожогов характерен для действия электрической дуги. Внутри металлорукавов имелись оплавленные остатки алюминиевых проводов. На основе анализа материалов дела

о пожаре и показаний свидетелей был сделан вывод, что наиболее вероятной причиной пожара явилось к. з. электрических проводов в металлических трубах.

Определенный интерес представляет механизм образования прожогов в металлических трубах, в которых проложены электрические провода. Образование их, по-видимому, связано с возникновением устойчивой электрической дуги между фазным проводом и металлорукавом. Как будет показано далее, обычная защита в ряде случаев нечувствительна к току замыкания токоведущих частей на заземленные конструкции. Длительное действие электрической дуги приводит к расплавлению стенок металлических труб или металлорукавов. Образуются капли расплавленного металла, зажигающая способность которых очень высока. Причинами

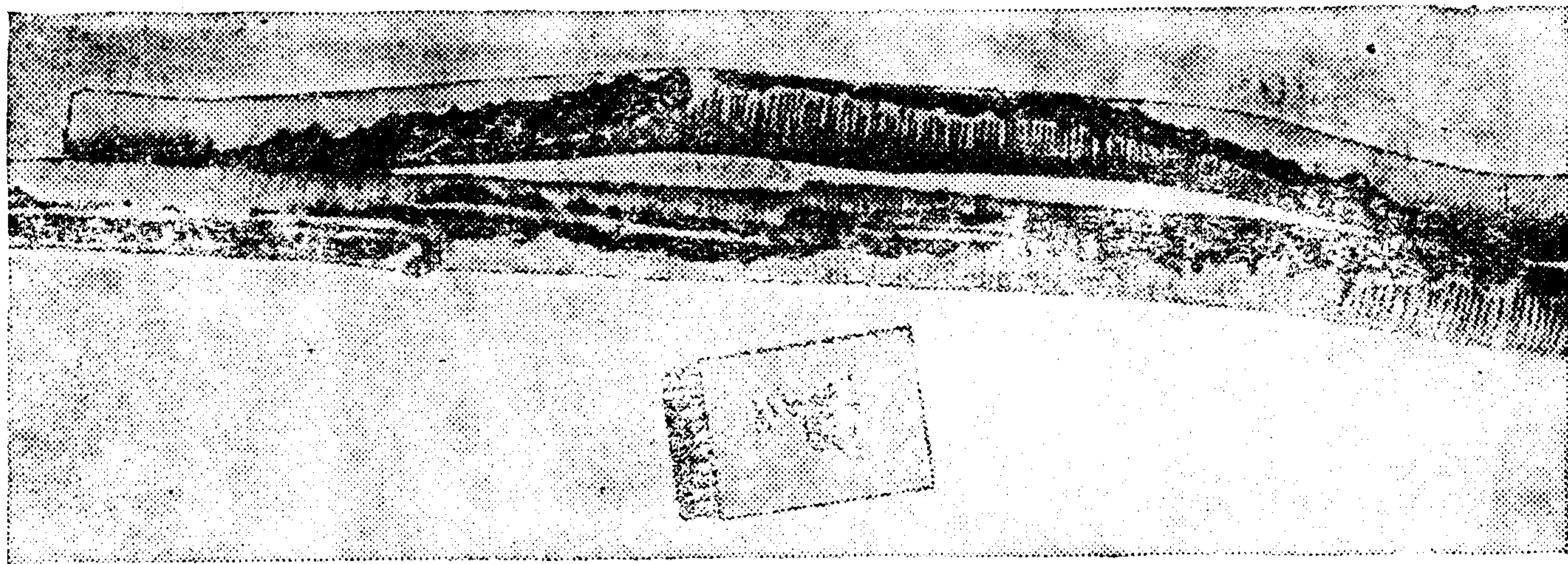


Рис. 31. Следы прожога на металлорукаве, найденном на месте пожара.

возникновения аварийных режимов в металлических трубах и металлорукавах могут быть повреждения изоляции проводов при их протяжке в трубы или металлорукава.

Пожарная опасность электрических кабелей

Электрификация и автоматизация процессов производства сопровождаются интенсивным ростом потребления электрической энергии, для передачи и распределения которой требуется соответствующее развитие электрических сетей. Чаще всего развитие их идет по пути прокладки кабелей в виде пучков или кабельных потоков, сосредоточиваемых в кабельных сооружениях. Однако сосредоточение кабелей снижает надежность систем управления и энергоснабжения в случае пожара и повы-

шает пожарную опасность. Пожары в кабельных сооружениях, как свидетельствует зарубежная практика, сопровождаются большими материальными потерями в виде стоимости сгоревших кабелей и проводов и косвенных убытков из-за остановки производства, вследствие перерыва электроснабжения и из-за недовыработки электрической энергии. Примером может быть пожар, происшедший на одной из строившихся электростанций за рубежом. Он возник от искр сварки, попавших на промасленную ветошь, лежавшую на кабелях, которые были уложены группами в желобах и трубах. Одна часть из них имела полиэтиленовую изоляцию и наружный покров из поливинилхлорида, а другая — изоляцию из бутиловой резины и наружный покров, как и первая, из поливинилхлорида. Горение получило быстрое развитие. За три с половиной часа было уничтожено и приведено в негодность свыше 11 000 силовых кабелей и кабелей цепей управления.

Пожарная опасность кабелей обуславливается их горючестью и способностью распространять горение, а в случае кабельных потоков или пучков проводов — их пожарной нагрузкой. Горючесть кабеля — это способность его воспламеняться и гореть при воздействии внешнего источника зажигания, а распространение горения — это способность кабеля самостоятельно гореть после прекращения действия внешнего источника зажигания. Пожарная нагрузка показывает, какое количество горючих материалов сосредоточивается в единице длины пучка проводов или кабельного потока, а в случае кабельного тоннеля — на единицу площади тоннеля.

В последнее время к числу характеристик пожарной опасности кабелей начали относить и их огнестойкость, которая представляет собой время наступления пробоя изоляции кабеля, находящегося под номинальной нагрузкой, при воздействии стандартного источника тепла [45]. Введение этого показателя позволило более полно характеризовать кабели с точки зрения их пожарной опасности.

Количество запасенной теплоты в горючих материалах наружных покровов и изоляции кабелей находится по выражению

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} q_i m_i l, \quad (83)$$

где q_i — удельная теплота горения i -го материала, кДж ($i=1, 2, \dots, n$); l — длина кабеля, м; m_i — масса i -го материала, кг.

Таблица 7

Теплотворная способность кабельных материалов

Наименование материалов	Теплотворная способность, ккал/кг
Кабельная бумага (непропитанная)	3800
Полупроводящая бумага (непропитанная)	4300
Канифоль	8050
Авиационное масло	11 000
Маслоканифольный состав	10 620
Пропиточный состав МП-5	10 760
Битумный состав МБХ	10 170
Полугудрон	10 360
Крепированная бумага (битуминированная)	6800
Кабельная пряжа (непропитанная)	4240
Стеклопряжа	2170
Грунт ХВ-050	6130
Целлофановая пленка	4000
Полиэтилен	11 140
Полиэтилентерефталатная пленка	4000
Полиэтиленцеллофановая пленка	7100
Поливинилхлоридная лента	5860
Лента ПИЛ	6160
Поливинилхлорид шланговых рецептур	6000

В табл. 7 приведены сведения о теплотворной способности материалов, используемых для изготовления кабелей.

Горючесть кабелей зависит от пожароопасных свойств материалов, используемых в них, и от конструкции кабелей (рис. 32).

Зажигание наружных покровов кабелей возможно как от внешних источников зажигания, так и от теплового проявления электрического

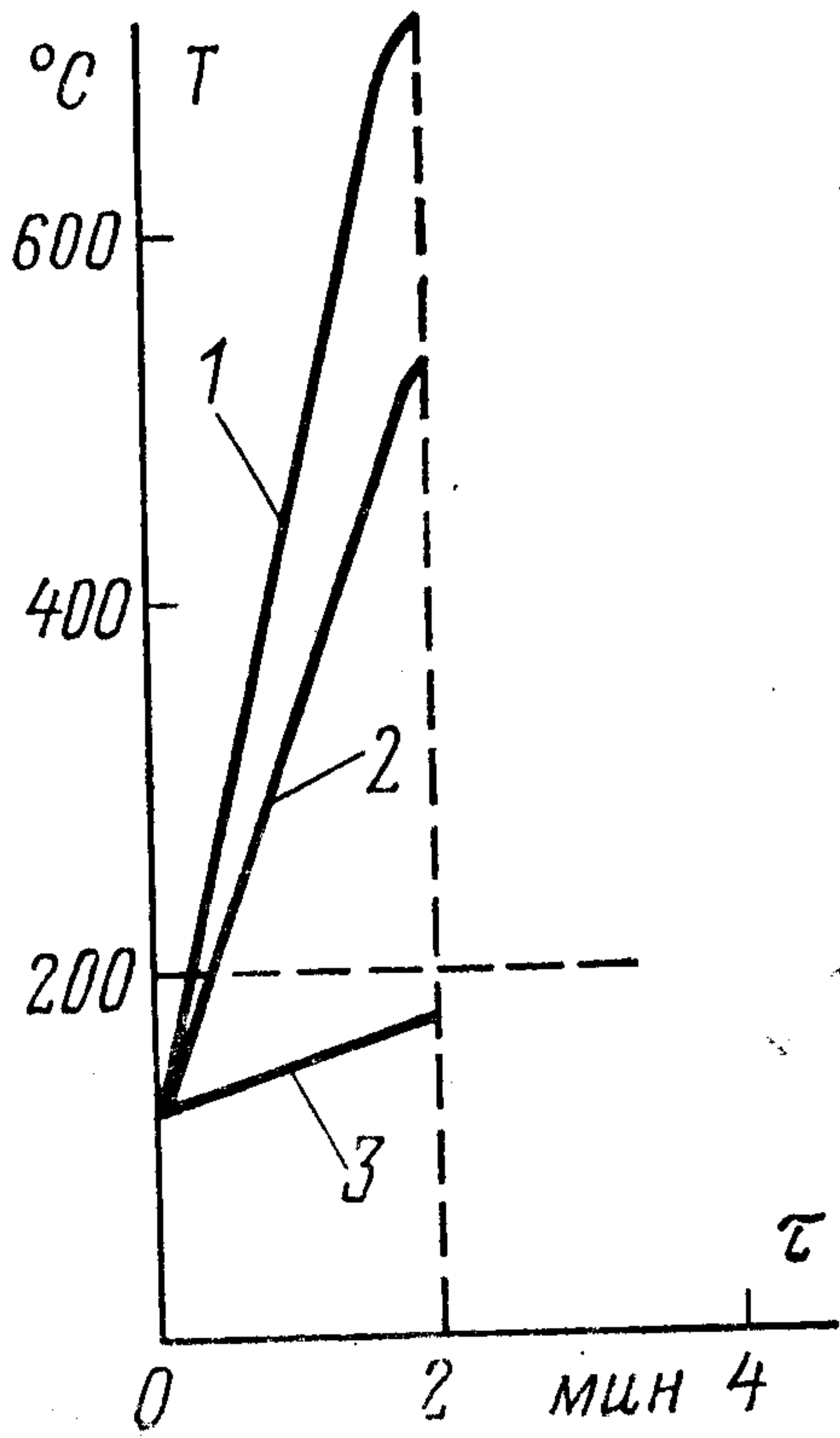


Рис. 32. Температура газов в керамической трубе (ГОСТ 16363-76) при двухминутном воздействии пламени газовой горелки на образцы кабелей.

1 — кабель АПБШ_В—3×120+1×50; 2 — кабель ААШ_В—3×120; 3 — кабель ААБ_{ГЛ}Г—3×120.

тока при аварийных режимах. Тепловой импульс при к. з. определяется значением тока и продолжительностью его протекания. При сквозных к. з. воспламенение наружных покровов и изоляции, как правило, не происходит, поскольку температуры нагрева токоведущих жил кабелей током к. з. не превышает значений, достаточных для их воспламенения. Допустимое значение сквозного тока к. з. определяется [46] из выражения

$$I = A s \tau^{-1/2}, \quad (84)$$

где A — постоянная, $A \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{1/2}$; s — сечение токоведущей жилы, м^2 ; τ — время, с.

Постоянная A зависит от материала жил проводов и кабелей, от начальной и конечной температур кабеля в момент к. з. За начальную температуру необходимо принимать максимально допустимую рабочую температуру жил кабеля. В большинстве случаев в длительном режиме она составляет около 70°C , а кратковременном — в пределах $200\text{—}300^\circ\text{C}$.

Тепловой эффект локальных к. з. включает в себя теплоту, выделяемую в месте к. з. в соответствии с законом Ленца — Джоуля, и теплоту, выделяемую возникающей электрической дугой. Поскольку температура дуги составляет несколько тысяч градусов, то даже при ее кратковременном действии вероятность воспламенения большинства материалов, используемых в изоляции и наружных покровах, весьма велика. Но продолжение горения кабеля после прекращения локального к. з. зависит от горючести кабеля (изоляции и наружных покровов), а также от окружающих условий. Так, одиночный кабель с оболочкой из поливинилхлорида при нормальных условиях не поддерживает и не распространяет горения. Однако сосредоточение таких кабелей или повышение их температуры нагрева, например при перегрузке, может явиться причиной возникновения самоподдерживающегося горения после зажигания их от внешнего источника тепла или теплового проявления электрического тока при аварийных режимах.

Одной из возможных причин зажигания кабелей может быть ток утечки [47], возникающий при локальных повреждениях изоляции.

Сначала в месте повреждения выделяющаяся мощность возрастает, а затем, достигнув какого-то

максимального значения P_{max} , снижается до нуля. Воспламенение изоляции и наружного покрова в месте повреждения произойдет, если $P_{max} \geq P_6$, где P_6 — пожаробезопасное значение мощности, которая определяется свойствами горючих материалов и условиями теплоотдачи в месте повреждения. Поскольку, как правило, ток утечки заканчивается током к. з., то термический эффект усиливается термическим эффектом электрической дуги.

Поскольку используемые в настоящее время материалы для наружных покровов и изоляции кабелей, за исключением лишь некоторых, являются горючими, естественно желание использовать и такие материалы, которые являются трудногорючими или вовсе негорючими. Однако это сопряжено с рядом существенных трудностей.

Пожарная опасность воздушных линий электропередачи

Пожарная опасность воздушных линий электропередачи обуславливается возможным замыканием их проводов при сильном ветре, в результате чего образуются источники зажигания с высокой зажигающей способностью (искры и капли расплавленного металла). Нередки случаи загорания деревянных опор линий электропередачи. Причиной загорания являются токи утечки. Противопожарные мероприятия на линиях электропередачи сводятся к предотвращению недопустимого провисания проводов, защите их от разрядов атмосферного электричества, пропитке деревянных опор и их конструктивных элементов огнестойкими составами. Мероприятия по предотвращению токов утечки особенно необходимы для тех опор, на которых устанавливаются масляные трансформаторы. В этой связи внедрение общесетевых устройств защитного отключения, реагирующих на токи утечки, является важным противопожарным мероприятием.

Пожарная опасность трансформаторов

Трансформаторы — очень надежные устройства и редко выходят из строя. Однако, если учесть, что в эксплуатации их находится огромное количество, то рассмотрение сущности их пожарной опасности имеет особое значение. Размеры пожара в трансформаторах определяются размерами самих трансформаторов.

Пожарная нагрузка трансформатора (рассматриваются только масляные трансформаторы) определяется содержащимся в них изоляционным маслом. Количество этого масла определяется мощностью трансформатора. Температура воспламенения трансформаторного масла составляет 350—400°C, а теплотворная способность — порядка 10^7 ккал/т.

Источники зажигания. Источниками зажигания в масляных трансформаторах могут быть к. з. в обмотках, возникающие в результате пробоя изоляции при перенапряжениях (например, во время грозы) или при старении изоляции, и пробой воздушного промежутка между вводами. Возникающая дуга, имеющая температуру порядка 3000—4000°C, вызывает пиролиз изоляционного масла. При значительной продолжительности аварийного режима количество выделившихся газообразных продуктов пиролиза (водорода, метана, этилена и других углеводородов) может быть таким, что внутри бака происходит резкое увеличение давления, следствием которого, как правило, бывает частичная или полная разгерметизация бака. Продукты пиролиза легко воспламеняются. Источником зажигания может быть и просто открытый огонь, занесенный извне, способный воспламенить газообразные продукты, выделяющиеся из бака в режиме нормальной эксплуатации.

Примером может быть следующий случай пожара на подстанции 110/10 кВ. Электрическая подстанция 110/10 кВ была открытого типа. На ней было установлено два силовых трансформатора мощностью по 10 000 кВ·А каждый. Напряжение первичной обмотки 110 кВ, а вторичной — 10 кВ. Охлаждение радиаторов масляное с индивидуальным воздушным дутьем с помощью вентиляторов, установленных на радиаторах. Общая масса масла составляла 50 т. На расстоянии около 3 м от трансформаторов располагалось комплектное распределительное устройство наружной установки (КРУН) напряжением на 10 кВ с отходящими линиями для потребителей. Комплектное распределительное устройство представляло собой металлический каркас закрытого типа высотой 3 м и длиной 20 м. В нем размещались 18 ячеек отходящих линий. На расстоянии 7 м от силового трансформатора № 1 и комплектного устройства размещалось кирпичное здание, в котором располагался оперативный щит управления автоматикой.

На момент возникновения пожара оба трансформатора работали отдельно, т. е. каждый на свою секцию шин. Ночью на ошиновке ввода 10 кВ трансформатора № 1 произошло к. з. Действием дифференциальной защиты трансформатора без выдержки времени был подан импульс на включение короткозамкателя со стороны 110 кВ. Однако из-за неисправности привода включение не произошло. Отключение защиты со стороны источника электрической энергии, питающего подстанцию, не произошло по следующим причинам:

имеющаяся фильтровая токовая защита обратной последовательности, обладающая необходимой чувствительностью и обеспечивающая резервное действие только при двухфазном к. з., не сработала в результате возникновения трехфазного к. з. до истечения выдержки времени этой защиты;

максимальная токовая защита с уставкой, отстроенной на ток нагрузки, равный суммарной мощности всех подстанций, питающихся от этого источника, не обеспечивала защиту при к. з. на стороне низшего напряжения трансформатора № 1 и № 2.

В результате всего возник длительный аварийный режим на вторичной стороне трансформатора № 1. Произошел разогрев масла. Далее последовал взрыв трансформатора с выбросом горящего масла, что вызвало загорание и трансформатора № 2.

Исследование причины пожара показало, что он возник из-за отказа в работе короткозамыкателя при возникновении к. з. на стороне низшего напряжения трансформатора (попадание кошки). Причина отказа короткозамыкателя — ослабление пружины серповидного рычага. Факторами, способствовавшими развитию пожара, явились отсутствие отбортовки, отгораживающей разлив масла от соседнего оборудования, и отсутствие подземного резервуара для аварийного слива масла.

Развитие пожара в трансформаторах на начальной стадии происходит примерно следующим образом. Вначале возникает очаг горения, пламя которого может достигать высоты 4—5 м. Если на этой стадии пожар не будет потушен, то происходит разогрев масла, количество выделяющихся газообразных продуктов пиролиза возрастает, масло от нагрева расширяется и начинает вытекать из бака через края, интенсивность горения возрастает. Если горение не прекращается, то возможен выброс масла, и размеры пожара определяются количеством выброшенного масла.

Развитию пожара в трансформаторах способствуют высокая теплотворная способность трансформаторного масла и большая теплопроводность материалов, используемых для их изготовления.

Пожарная опасность маломощных трансформаторов, используемых в различных приборах, заключается в возможности их воспламенения в режиме повышенного напряжения и при возникновении в них межвиткового замыкания. Экспериментально удалось установить, что при подаче напряжения 360 В на трансформатор, рассчитанный на 220 В и имеющий в первичной обмотке 1000, а во вторичной 320 витков, выполненных из провода марки ПЭВ-1, не более чем через 3 мин начинает интенсивно дымить, а затем воспламеняется. Продолжительность горения открытым пламенем составляет свыше 2 мин. Предохранитель на 2 А, установленный в первичной

обмотке, не перегорает. Отмеченное свидетельствует о том, что предохранители в виде плавких вставок не обеспечивают пожарную безопасность трансформаторов от повышенного напряжения.

Пожарная опасность радиоэлектронных устройств

Современные радиоэлектронные устройства — вычислительные машины, телевизионные центры, центры управления являются сложными дорогостоящими системами. При этом необходимо отметить, что радиоэлектронные устройства очень чувствительны к повышению температуры, поэтому даже незначительное загорание в помещении, где располагается электронное оборудование, может причинить большой ущерб. К тому же само тушение может быть причиной увеличения этого ущерба. Пожары в хранилищах информации в вычислительных центрах приводят к потери информации, записанной на перфокартах и перфолентах.

Пожарная нагрузка радиоэлектронных устройств определяется:

- горючими электроизоляционными материалами;
- горючими конструктивными элементами помещений и мебелью;
- горючими материалами, используемыми для акустической отделки помещений (например, в вычислительных центрах и центрах управления).

Используемые изоляционные материалы в большинстве своем включают в себя различные горючие смолы, клеи, материалы на основе каучука, лаки, компаунды

Т а б л и ц а 8

Показатели пожарной опасности электроизоляционных материалов [48]

Наименование изоляционного материала	Температура воспламенения, °C	Характер горения
Полистирол	274	Коптящее пламя
Полиэтилен	306	То же
Плексиглас	200	Бездымное пламя
Поливинилхлорид	560	Коптящее пламя
Винипласт	580	То же
Резина	220	" "
Текстолит	358	Самозатухание
Гетинакс	285	То же

Теплостойкость электроизоляционных материалов [48]

Наименование материала	Температура начала раз- ложения, °С	Наименование материала	Температура начала раз- ложения, °С
Воск	65	Озокерит	75
Канифоль	85	Оргстекло	60
Капрон	90	Полистирол	65
Поливинилхлорид	65	Целлулоид	50
Полиэтилен	70	Церезин	75
Резина	50	Эбонит	70

и т. п. В качестве изоляции в монтажных проводах и кабелях электропитания используются поливинилхлорид, полиэтилен и резина. Эти материалы существенно отличаются друг от друга по горючести (табл. 8). Наиболее пожароопасными являются полиэтилен и битумы, которые характеризуются значительной интенсивностью горения и большой скоростью его распространения. Полиэтилен используется для изоляции токоведущих жил кабелей.

Ряд электроизоляционных материалов характеризуется слабой теплостойкостью, что при сравнительно низких температурах нагрева может привести к их разложению с выделением легковоспламеняющихся продуктов (табл. 9).

Массовое скопление горючих материалов в радиоэлектронных устройствах происходит в местах прокладки кабельных линий, а также в местах хранения информации.

Источниками зажигания в радиоэлектронном оборудовании могут быть:

искры, электрические дуги, открытый огонь воспламенившейся изоляции проводов и электродвигателей, нагретые до высокой температуры токоведущие жилы проводов, контактные соединения с большим переходным сопротивлением, токи утечки, перегретые сопротивления и т. п.;

нагревательные электрические приборы (паяльники, электрические плитки, электрокипятильники), а также неосторожное обращение с открытым огнем, в том числе и курение.

Развитию и распространению пожаров в радиоэлектронных устройствах способствуют:

конвективная связь между отдельными помещениями

(системы принудительной вентиляции, кондиционирования);

пустоты между звукопоглощающими и капитальными строительными конструкциями;

прохождение кабельных потоков через несколько помещений.

Эти факторы могут явиться причиной скрытого распространения пожара из одного помещения в другое.

Пожарную опасность в установках кондиционирования представляют тканевые фильтры, изготавливаемые из горючего материала. Вентиляционные системы могут явиться причиной быстрого распространения нагретых газообразных продуктов горения по всему зданию [48].

К пожароопасным факторам также следует отнести и недопустимость в некоторых случаях (например, в случае обнаружения загорания) отключения системы охлаждения радиоэлектронного оборудования.

Пожарная опасность электрических ламп накаливания общего назначения

Электрические лампы накаливания (ЛН) общего назначения как источник света имеют чрезвычайно широкое применение. Принцип получения световой энергии в них основан на преобразовании подводимой к ним электрической энергии в тепловую. Нагреваемое электрическим током тело накала (вольфрамовая спираль) излучает световую энергию. Коэффициент полезного действия ЛН невысок. Большая часть подводимой электрической энергии излучается в окружающую среду в виде тепла.

Пожарная опасность ЛН складывается из двух составляющих:

из опасности зажигания горючих материалов при несоблюдении пожаробезопасного расстояния до их колб;

из опасности появления при аварийных режимах в ЛН источников зажигания с высокой зажигательной способностью.

В первом случае пожарная опасность обуславливается высокими температурами нагрева колб. Температура нагрева колб зависит от мощности ЛН, от положения колбы в пространстве и чистоты поверхности колбы. Так, если поверхность колб чистая, то в зависимости от мощности ЛН температура ее нагрева достигает 80—170°C.

Если колбы ламп загрязнены, например, различной производственной пылью (древесной, мучной, травяной и т. п.), то температура нагрева может существенно повыситься. Если условно колбу ЛН принять за стеклянный шар радиусом r , то температура стекла колбы может быть приближенно определена из выражения

$$(1 - \eta) P = cs \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \tag{85}$$

где c — коэффициент лучеиспускания или постоянная излучения стекла, Вт/(м²·К); η — к. п. д. лампы накаливания; s — наружная поверхность колбы, м²; T_1 — температура стекла колбы, К; T_0 — температура окружающей среды, К; P — мощность лампы, Вт; откуда

$$T_1 = 100 \sqrt[4]{\frac{(1 - \eta) P}{c \cdot s} + \left(\frac{T_0}{100} \right)^4}. \tag{86}$$

Температура нагрева колб в различных ее точках неодинакова и зависит от положения колбы в пространстве (рис. 33), приложенного напряжения (табл. 10) и условий теплообмена.

Т а б л и ц а 10

Температура нагрева колб ЛН в зависимости от напряжения и мощности (рис. 33)

Положе- ние колбы ЛН на рис. 33	Напряже- ние на ЛН, В	Температура нагрева колбы, °С								
		в точке <i>a</i>			в точке <i>b</i>			в точке <i>c</i>		
		40 Вт	150 Вт	200 Вт	40 Вт	150 Вт	200 Вт	40 Вт	150 Вт	200 Вт
<i>I</i>	209	123	164	205	68	104	150	43	44	45
	220	125	176	220	70	112	160	44	45	46
	242	138	192	240	75	121	175	45	46	47
<i>II</i>	209	75	80	125	128	164	230	65	56	60
	220	80	82	130	133	176	240	68	57	62
	242	85	92	140	145	192	265	73	59	64
<i>III</i>	209	72	80	113	68	80	147	74	98	87
	220	74	93	115	71	84	152	78	102	95
	242	80	102	127	78	92	165	84	112	100

Если теплообмен с окружающей средой затруднен, то происходят аккумуляция выделяемого ЛН тепла и, следовательно, повышение температуры нагрева ЛН. Так, по данным Ленинградской пожарно-технической

станции температура колбы ЛН мощностью 100 Вт, обернутой хлопчатобумажной тканью, через 5 мин после подачи на нее напряжения, равного номинальному, со-

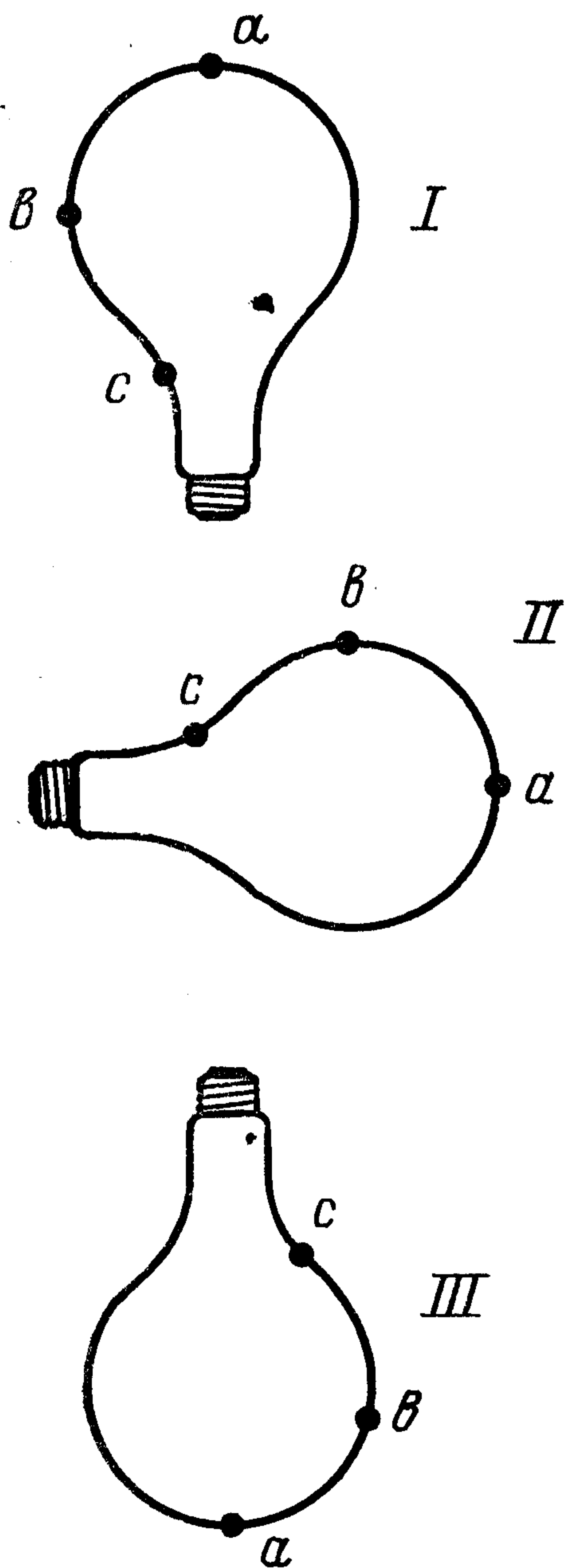


Рис. 33. Нагрев колб ламп накаливания в зависимости от приложенного напряжения и положения их в пространстве.

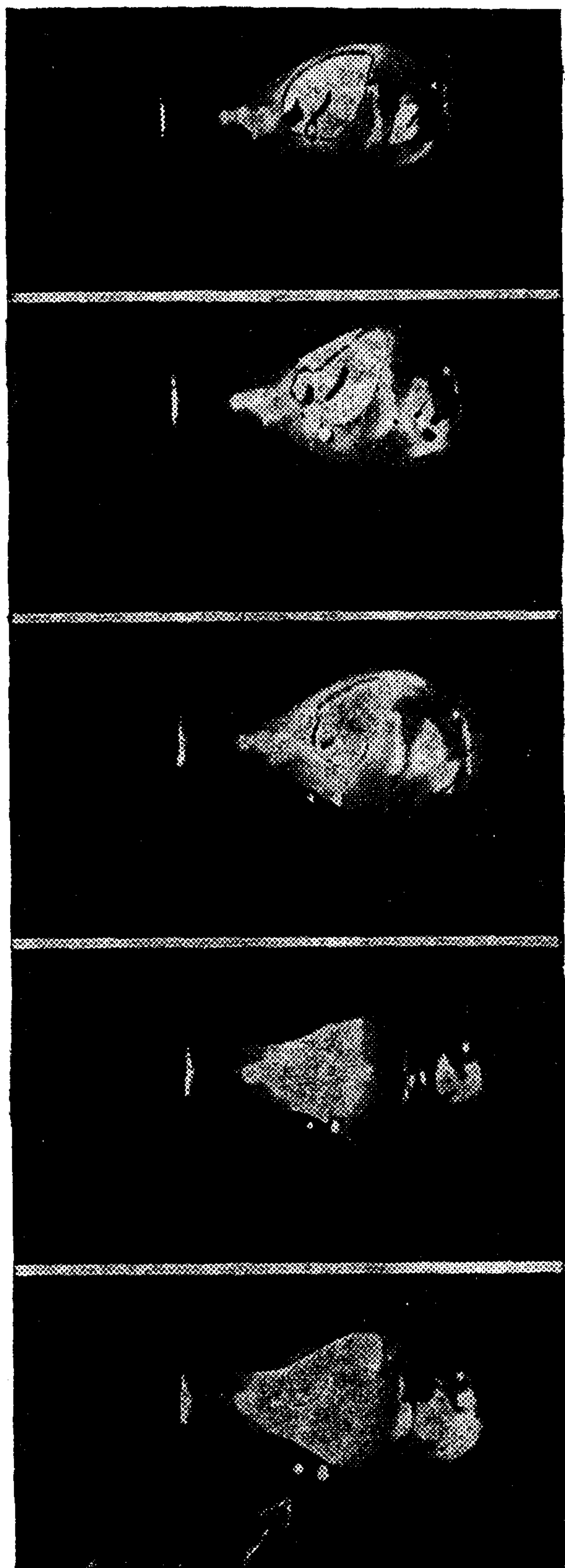


Рис. 34. Фрагмент из кинограммы процесса проплавления частицами никеля колбы лампы накаливания при дуговом разряде между электродами.

ставила 340°C . На практике пожары от ЛН нередко возникают в результате использования ЛН повышенной мощности, поскольку вместо рекомендуемой заводом-изготовителем мощности лампы для светильника исполь-

зуют ЛН большей мощности, так как цоколи ламп накаливания в диапазоне от 15 Вт до 300 Вт одинаковы. Поэтому нередки случаи загорания пластмассовых плафонов. Наиболее высокие температуры нагрева на колбе развиваются в местах соприкосновения ее с материалами с низкой теплопроводностью.

При определенных условиях в ЛН возникают дуговые разряды между электродами. В одном случае дуговой разряд может вызвать взрыв колбы, в другом — проплавление ее частицами никеля, образующимися в результате расплавления дугой электродов. В обоих случаях аварийный режим сопровождается образованием и выбросом источников зажигания (частиц никеля, раскаленной вольфрамовой спирали и конструктивных элементов, нагретых до высоких температур). Наиболее пожароопасными являются частицы никеля.

На рис. 34 показаны фрагменты кинограммы дугового разряда в ЛН мощностью 300 Вт, заканчивающегося проплавлением колбы и выбросом раскаленной частицы никеля.

Процесс проплавления каплями никеля стекла колбы приближенно включает в себя три стадии:

нагрев стекла в точке контакта капли никеля с колбой до температуры, при которой капля под действием силы тяжести начинает двигаться, преодолевая вязкость стекла;

движение капли сквозь толщу стекла;

отрыв капли от колбы.

Представляет определенный интерес расчет температуры частиц в момент их выхода из колбы. В целях упрощения расчетов примем, что:

а) частица никеля расходует запасенную в ней теплоту только на нагрев массы стекла, определяемой выражением

$$m_c = \pi r_k^2 \gamma_c \delta_c, \quad (87)$$

где m_c — масса стекла, нагреваемая каплей, кг; r_k — радиус капли, м; γ_c — плотность стекла, кг/м³; δ_c — толщина стекла колбы в месте проплавления, м;

б) движение частицы при проплавлении колбы происходит с постоянной скоростью;

в) частица имеет форму шара;

г) влияние на скорость проплавления давления газов в колбе несущественно.

Расчет ведем, используя формулу Стокса, согласно которой сопротивление движению частицы никеля в жидком стекле имеет вид [49]:

$$F = \gamma_c u_k^2 r_k^2 f(\text{Re}), \quad (88)$$

где F — сила сопротивления, Н; u_k — скорость движения частицы, м/с; Re — функция Рейнольдса.

Экспериментальные исследования процесса проплавления с помощью кинофотосъемки показали, что скорость движения капель никеля составляет несколько миллиметров в секунду, т. е. очень мала, поэтому функцию Рейнольдса можно считать постоянной и равной 6π, тогда (88) примет вид:

$$F = 6\pi\eta r_k u_k, \quad (89)$$

где η — вязкость стекла, П.

Поскольку скорость движения частицы никеля в процессе проплавления постоянна, то сила сопротивления будет равна силе тяжести частицы (массе частицы):

$$m_k g = 6\pi\eta r_k u_k, \quad (90)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/с²; m_k — масса частицы никеля, кг.

Аппроксимируя графическую зависимость вязкости стекла от температуры нагрева [50], получаем аналитическое выражение для этой зависимости в виде

$$\lg \eta = -0,005T_c + 13, \quad (91)$$

где T_c — температура нагрева стекла колбы в месте ее проплавления, К.

В то же время выражение для вязкости стекла может быть найдено из (90):

$$\eta = m_k g / 6\pi r_k u_k. \quad (92)$$

Прологарифмировав (92) и приравняв его (91), получим:

$$-0,005T_c + 13 = \lg \frac{m_k g}{6\pi r_k u_k}, \quad (93)$$

откуда температура нагрева стекла, чтобы частица под действием силы тяжести смогла, преодолев его вязкость, выйти из колбы, должна быть:

$$T_c = \frac{13 - \lg \frac{m_k g}{6\pi r_k u_k}}{0,005}. \quad (94)$$

Поскольку нагрев стекла происходит за счет тепла частицы, то ее температура в момент выхода из колбы не может быть меньше T_c , а может быть только равна ей или превышать ее, т. е.

$$T_k \geq T_c. \quad (95)$$

На рис. 35 показан след, оставляемый каплей никеля при проплавлении ею колб ЛН. Зажигательная способность каплей никеля, выбрасываемых из колб ЛН при



Рис. 35. След проплавления колбы ЛН мощностью 300 Вт каплей никеля.

дуговых разрядах, очень высока. В экспериментальных условиях возникновение дуговых разрядов в ЛН достигается с помощью повышенного напряжения. На практике, например, такие случаи возможны при несимметрии напряжения.

Предотвращение аварийных режимов с образованием капель в результате расплавления электродов в лампах накаливания общего назначения достигается встроенными в них предохранителями.

17. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ КАСАНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ЗАЗЕМЛЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ)

Практика показывает, что в ряде случаев пожары могут возникать при касании токоведущими элементами электроустановок заземленных конструкций.

Пример 1. Одна из боковых лож театра была оборудована осветительными фонарями для освещения сцены. Фонари крепились на металлической трубе, укрепленной в свою очередь в стене. Стена, связывающая портал сцены с ложей, была деревянная и оштукатурена по сетке «Рабитца». Металлическая труба своими концами имела плотное касание с этой сеткой. Пожар был обнаружен по дыму, выходящему из щелей стены. Вскрытие ее показало, что горит деревянное основание стены. Причиной загорания явилось касание фазного провода у одного из фонарей с металлической трубой. Ток замыкания на землю вызвал сильный нагрев сетки в месте ее касания с трубой. От выделяющегося тепла произошло загорание древесины.

Пример 2. На одном из производственных зданий г. Ленинграда произошло загорание крыши здания. При ликвидации загорания было установлено, что кровля и водосточные трубы находились под напряжением, причем в местах неплотного примыкания друг к другу листов кровельного железа наблюдалось искрение, по своему характеру напоминавшее электрическую сварку. Исследование причины пожара показало, что он возник в результате выноса напряжения на металлические элементы кровли (один из фазных проводов воздушной линии из-за значительного провисания касался крыши). Место выноса напряжения находилось на расстоянии свыше 200 м от места возникновения загорания. Защита, имевшаяся в фазном проводе, не сработала.

Анализ статистики пожаров в результате касания токоведущих частей электроустановок заземленных конструкций показывает, что такие случаи являются следствием нарушения правил выполнения монтажа (крепление проводов гвоздями, использование в качестве нулевого провода металлических элементов конструкций зданий и сооружений и т. п.), а также при сильном провисании или обрыве проводов линий электропередачи.

Причиной зажигания при касании токоведущими элементами электроустановок заземленных конструкций является теплота, выделяющаяся в месте касания или в месте повышенного переходного сопротивления между отдельными элементами цепи заземления. Величина теплового импульса определяется соотношением

$$Q_k = I_z^2 R_{\pi} \tau, \quad (96)$$

где Q_k — выделяемая теплота, Дж; R_{π} — переходное сопротивление в месте касания, Ом; I_z — ток замыкания на землю, А; τ — время, с.

Ток замыкания на заземленную конструкцию (рис. 36) может быть определен выражением

$$I_z = \frac{U}{\Sigma R}; \quad (97)$$

здесь U — фазное напряжение источника питания сети, В;

ΣR — суммарное сопротивление цепи, по которой проходит ток замыкания на землю, Ом:

$$\Sigma R = R_0 + R_{\pi} + R_{\phi}, \quad (98)$$

где R_0 — сопротивление контура заземления электроустановки, Ом; R_{ϕ} — сопротивление фазы, Ом.

В ряде случаев при касании токоведущих элементов электроустановок заземленных конструкций электрическая защита может не реагировать на ток замыкания на землю при его малом значении, но, поскольку в месте касания происходит выделение тепловой энергии, это может привести к пожарам и загораниям.

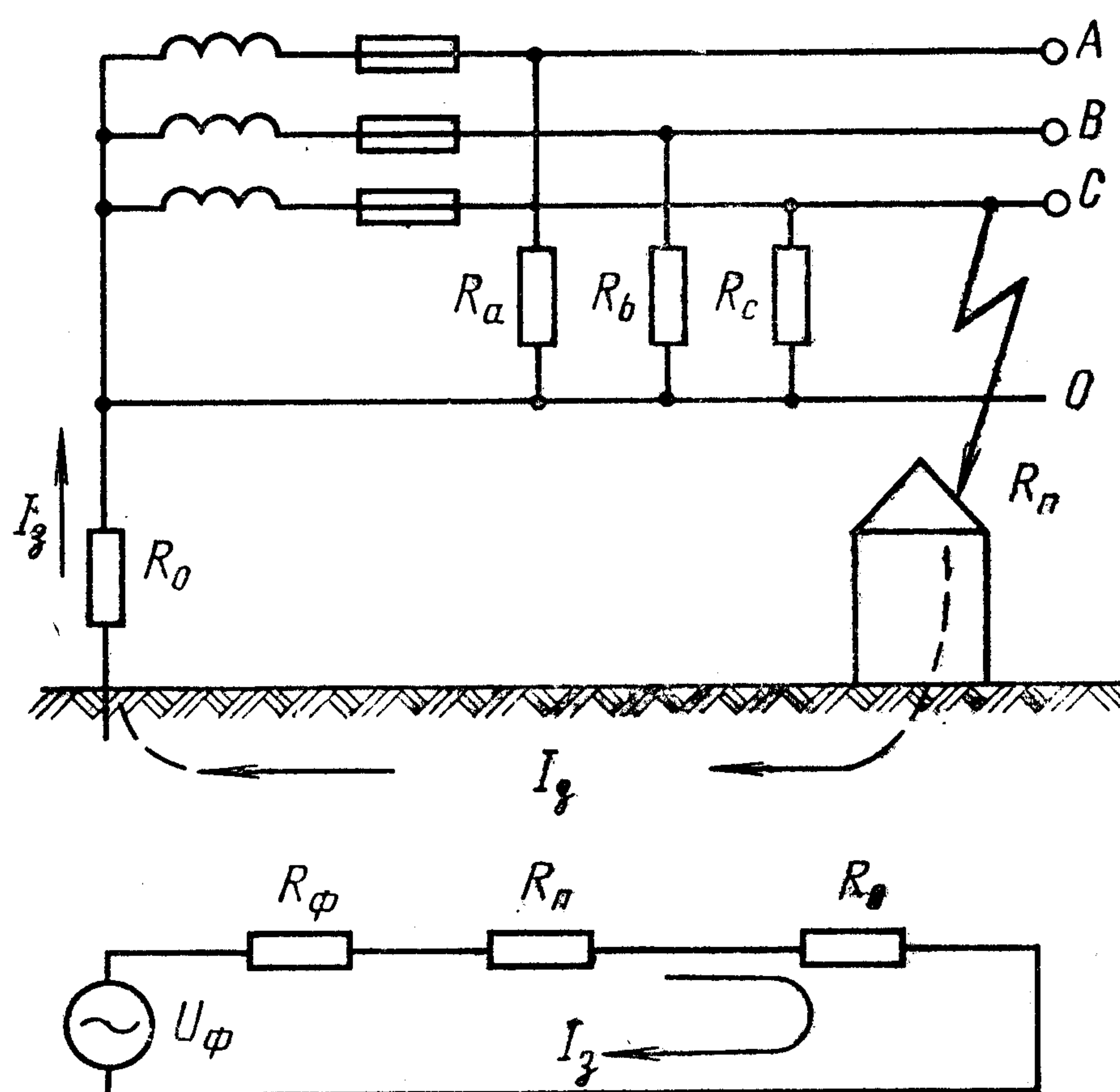


Рис. 36. Принципиальная схема сети при замыкании токоведущих частей электроустановок на заземление конструкции.

Предотвращение пожаров от касания токоведущими элементами заземленных конструкций может быть достигнуто применением защиты от токов утечки (см. гл. 3).

18. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Электрические контакты в электрических сетях, электротехнических устройствах и аппаратах являются их неотъемлемой частью, от правильной работы которых зависит не только нормальное функционирование сетей, устройств и аппаратов, но и состояние пожарной безопасности. Нагрев электрических контактов, который

может быть причиной пожара, обуславливается существованием переходного сопротивления между контактирующими элементами. Рассмотрим физическую сущность причины возникновения переходного сопротивления. Известно, что поверхности любых твердых тел, даже если они тщательно обработаны, отшлифованы и отполированы, никогда не бывают идеально гладкими. Наличие шероховатостей приводит к тому, что площадь соприкосновения определяется несколькими точками. Количество точек соприкосновения зависит от силы прижатия контактов друг с другом, температуры, геометрической формы соприкасающихся поверхностей и т. д. Переходное сопротивление электрических контактов определяется по формуле [51]

$$R_{\pi} = \rho \sqrt{\pi \sigma / (f k)}, \quad (99)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·см, σ — предел прочности на смятие, Па; f — сила сжатия в контактах, Н; k — коэффициент пропорциональности.

Эта зависимость справедлива лишь для одноточечного контакта. В большинстве же случаев соприкосновение контактов происходит в нескольких точках, поэтому

$$R_{\pi} = \rho \sqrt{\pi \sigma / 2 \sqrt{F}}, \quad (100)$$

где F — полное давление в контактах, Н.

Переходное сопротивление при окислении контактов увеличивается. Это объясняется тем, что окисные пленки

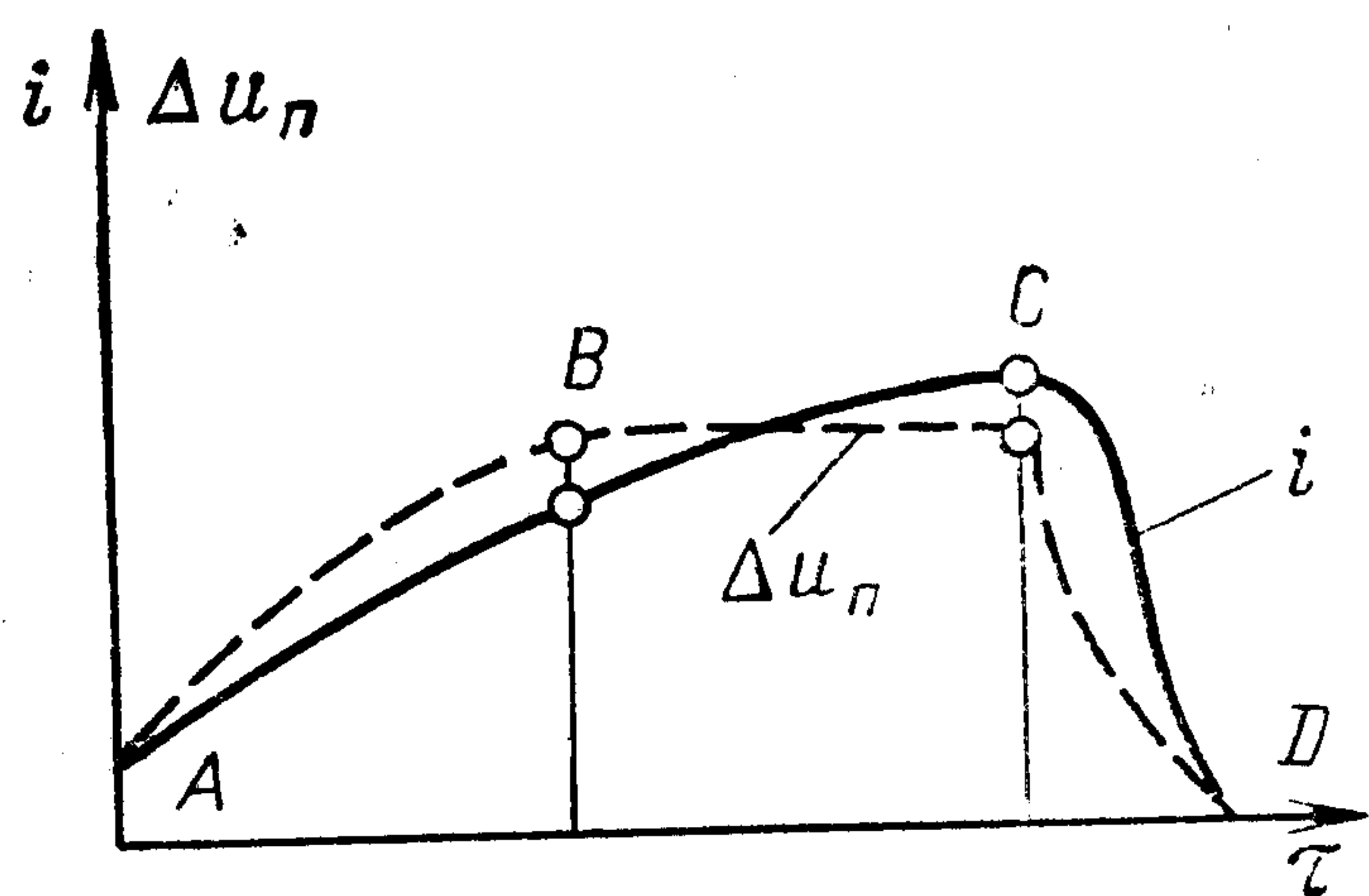


Рис. 37. Зависимости тока и падения напряжения в медных контактах от времени.

имеют очень высокое удельное электрическое сопротивление. Способность электрических контактов к нагреву может быть оценена по осциллограмме (рис. 37), получаемой при кратковременном протекании электрического тока через контакт [51]. На осциллограмме имеются три участка. На участке АВ

ток i и падение напряжения в контактах Δu_{π} растут. Происходит разогревание контактов, поскольку выделяется тепловая мощность

$$P_{\pi} = i \Delta u_{\pi}. \quad (101)$$

На участке *BC* ток растет, а падение напряжения постоянно. В точке *C* ток достигает максимального значения. Если происходит сваривание контактов, то после его завершения начинается остывание контактов.

Количество теплоты, выделяющейся в контактном соединении, зависит от состояния и конструкции его контактирующих элементов, надежности и прочности закрепления контактов. Интенсивное выделение теплоты в контактном соединении ведет к нагреву изоляции и деталей из пластмассы, а при достижении ими температуры самовоспламенения — к их воспламенению. Предотвращение пожаров и загораний от нагрева контактных соединений достигается регламентацией падения напряжения на контактах. В табл. 11 приведены допустимые падения напряжения в контактных соединениях проводов.

Т а б л и ц а 11

Допустимые падения напряжения в контактах
электроустановочных изделий в зависимости от
номинального тока [40]

Номинальный ток установочного изде- лия, А	Сечение присоеди- няемого медного провода, мм ²	Сечение присоеди- няемого алюминиевого провода, мм ²	Допускаемые падения напряжения в контакт- ных соединениях, мВ
1	0,5	—	—
2,5	0,5	2,5	2
6	0,5	2,5	2,5
10	1	2,5	4,1
25	4	6	7

На практике в зажимных устройствах и контактных соединениях (розетках, щитах и т. п.) с алюминиевыми проводами наблюдается увеличение переходного сопротивления, что приводит к увеличению падения напряжения в них за счет роста толщины окисной пленки на поверхности алюминиевых проводов. Увеличение переходного сопротивления происходит также за счет текучести алюминия, в результате чего снижаются прочность и надежность контактного соединения. Для предотвращения увеличения переходного сопротивления в контактных соединениях необходимо применять контактные системы, позволяющие достигать постоянства усилий в контактных зажимах.

19. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Ферромагнитные конструкции, расположенные вблизи токоведущих частей, могут нагреваться за счет поверхностного эффекта, создаваемого в них переменным магнитным полем токоведущих частей.

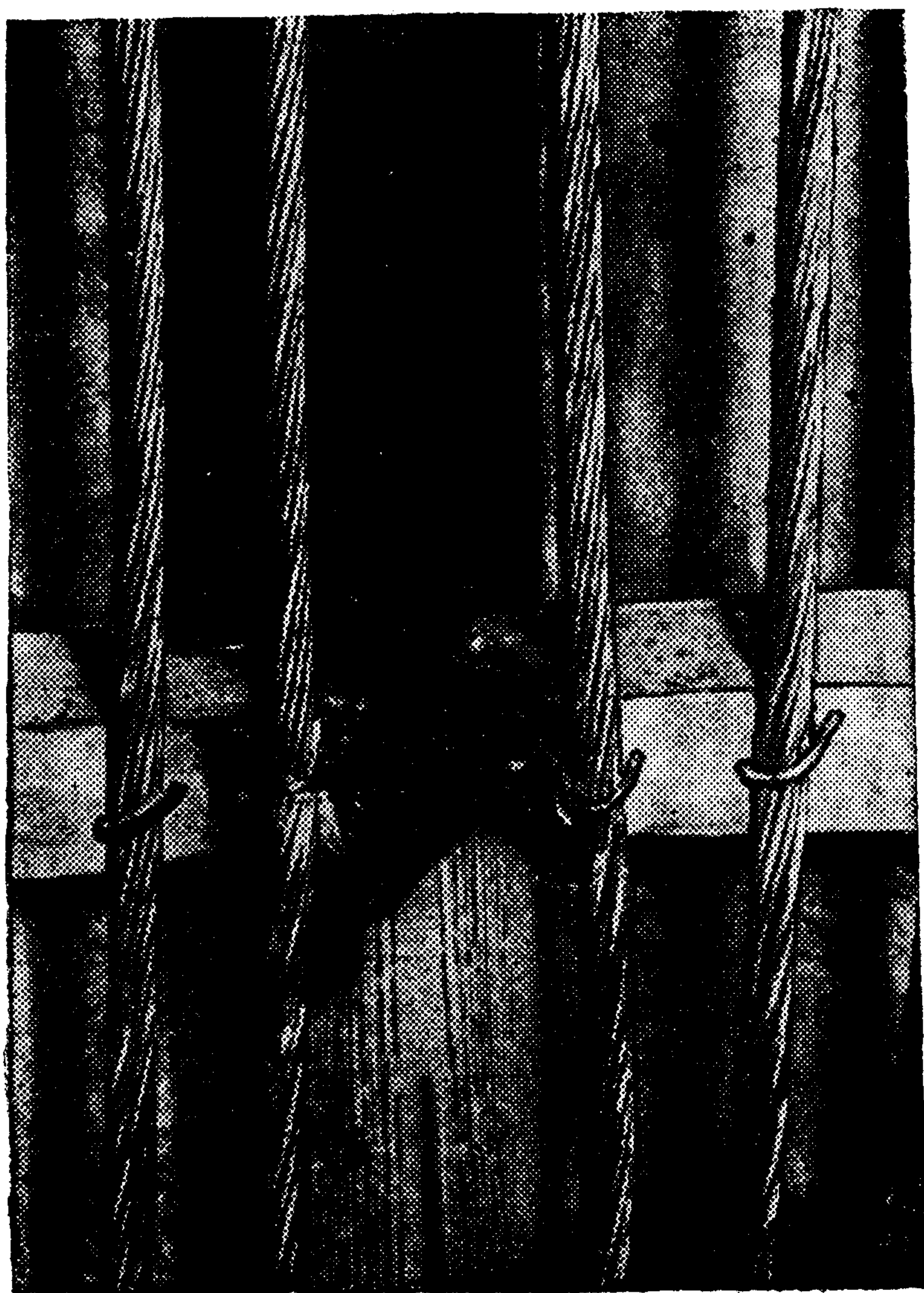


Рис. 38. Следы загорания деревянного бруса в результате нагрева гвоздя вихревыми токами.

В качестве примера можно привести случай загорания в индукционной печи для сушки древесины, представляющей собой замкнутую цилиндрическую камеру, по контуру которой располагаются витки кабеля. Поскольку температура нагрева древесины в печи невысока, то в качестве изоляторов, к которым гвоздями крепятся витки кабеля, используются деревянные брусья. Эти гвозди при определенных условиях могут нагреваться и вызывать загорание древесины возникающими вихревыми токами (рис. 38).

Интенсивность нагрева ферромагнитных тел определяется потерями на гистерезис и вихревые токи. Л. Р. Нейман показал, что мощность потерь в ферромагнитном теле от гистерезиса и вихревых токов при резком проявлении поверхностного эффекта определяется выражением [51]

$$\frac{dP}{dF} \approx H_e^2 \sqrt{\frac{\omega \mu_e}{\rho}}, \quad (102)$$

где H_e — действующее значение касательной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ферромагнитного тела в данной точке поверхности; ω — угловая частота; μ_e — магнитная проницаемость мате-

риала при $H_e = H$ по основной кривой намагничивания; ρ — удельное электрическое сопротивление.

Предотвращение загораний и пожаров от нагрева ферромагнитных конструкций, расположенных вблизи токоведущих частей, по которым проходит переменный ток, достигается применением немагнитных материалов, короткозамкнутых витков, соблюдением безопасного расстояния до токоведущих частей и исключением расположения ферромагнитных конструкций перпендикулярно проводникам с током.

20. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ РАСКАЛЕННЫХ ЧАСТИЦ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСКР

Пожарная опасность раскаленных частиц металла и электрических искр, образующихся при аварийных режимах в электроустановках и выполнении электросварочных работ, заключается в аккумуляции в них тепловой энергии и в высоких температурах нагрева. Теплосодержание раскаленных частиц металла определяется выражением

$$Q_k = cm_k(T - T_0), \quad (103)$$

где Q_k — теплосодержание частиц, Дж; c — удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°С); m_k — масса частицы, кг; T — температура частицы, °С; T_0 — температура окружающей среды, °С.

Теплосодержание частицы в процессе ее свободного падения в воздушной среде приближенно изменяется в соответствии с уравнением

$$-cm_k \frac{dT}{dt} = k_t s (T - T_0) + \varepsilon \sigma s (T^4 - T_0^4), \quad (104)$$

где k_t — коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·°С); s — наружная поверхность частицы, м²; ε — интегральная степень черноты материала частицы; σ — постоянная Стефана—Больцмана, Дж/(м²·°С⁴); T — температура частицы, °С; c — теплоемкость металла, Дж/(кг·°С); m_k — масса частицы, кг.

Частицы алюминия, образующиеся при к. з. алюминиевых проводов, как правило, воспламеняются. Причина их воспламенения — реакция окисления разогретого алюминия, сопровождающаяся интенсивным выделением теплоты. Механизм зажигания горючих материалов расплавленными и раскаленными частицами металла в упрощенной форме можно представить следующим образом: попадая на горючий металл, частица отдает ему путем теплопроводности свою тепловую энергию, которая вызывает разогрев материала, соприкасающегося с поверхностью частицы. Выделяющиеся горючие пары воспламеняются, если их температура воспламенения ниже температуры нагрева частицы. Самоподдерживающееся горение после воспламенения наступит в том случае, если количества выделяющейся теплоты достаточно для поддержания процесса. В противном случае процесс с той или иной скоростью идет к затуханию. В целом это зависит от количества энергии, запасенной в частице, ее температуры, а также природы горючего вещества.

Пожарная опасность искр, образующихся при аварийных режимах, сварке, коммутации электрических цепей, в коллекторных устройствах электрических машин заключена в опасности воспламенения пылегазовоздушных смесей. Зажигательная способность их обуславливается значительной концентрацией энергии в малых объемах, высокой температурой, превышающей температуру воспламенения пылевоздушных смесей в десятки и сотни раз. Она зависит также от типа искр. Искры бывают емкостные, индуктивные и емкостно-индуктивные. Причина неодинаковой воспламеняющей способности их состоит в различии скоростей передачи энергии, запасенной в разрывающейся электрической цепи. Наиболее пожароопасны емкостные искры. Чтобы искра могла воспламенить данную горючую смесь, она должна обладать запасом тепловой энергии не ниже какого-то определенного значения, называемого минимальной энергией зажигания. Минимальная энергия зажигания газа, пара или взвеси данного вещества в воздухе — это наибольшая энергия, запасенная в конденсаторе, при разряде которого через воздушный промежуток возникает искра, зажигающая наиболее легко воспламеняемую смесь данного вещества с воздухом с вероятностью, равной 0,01 [52].

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

21. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004-76 пожарная безопасность электроустановок достигается системами предотвращения пожара и пожарной защиты, которые должны обеспечивать:

предотвращение образования горючей среды (снижение пожарной нагрузки, использование веществ, материалов, оборудования пониженной горючести, разделение пожарной нагрузки на отдельные секции и т. п.);

предотвращение образования в горючей среде или внесения в нее источников зажигания (исключение аварийных режимов; соответствие исполнения, применения и режима эксплуатации электроустановок классу пожаровзрывоопасности помещения или наружной установки, группе и категории взрывоопасной смеси; регламентация максимально допустимой температуры нагрева поверхностей токоведущих и несущих частей электроустановок; соблюдение пожарного режима и т. п.);

предотвращение распространения пожара за пределы очага (устройство противопожарных преград; устройство аварийного отключения, наличие аварийного слива масла; предотвращение разлива и растекания масла при пожаре, применение средств пожаротушения, пожарной сигнализации и извещения о пожаре и т. п.);

предотвращение выхода из строя электроустановок при пожаре (применение конструкций с регламентированными пределами огнестойкости и горючести; система тепловой защиты; использование соответствующих средств пожаротушения и т. п.);

предотвращение гибели людей при пожаре (конструктивно-планировочные решения; система противопожарной защиты; применение средств коллективной и индивидуальной защиты людей; эвакуация людей и т. п.).

Весь этот комплекс организационных и технических мероприятий должен обеспечивать вероятность возникновения пожара в электроустановках, равную не более 0,000001 в год в расчете на отдельную пожароопасную электроустановку или пожароопасный узел электроустановки, а в случае возникновения пожара в электроуста-

новке — вероятность воздействия опасных факторов пожара на людей, равную не более 0,000001 в год в расчете на отдельного человека.

В связи с тем, что электроустановки существенно отличаются друг от друга как по уровню, так и по качественной структуре пожарной опасности, то мероприятия по предотвращению пожаров для каждой электроустановки строго индивидуальны. Например, мероприятия при эксплуатации электрической плитки существенно отличаются от мероприятий по предотвращению пожаров в радиоэлектронных устройствах (ЭВМ, центрах управления и телевизионных центрах).

Ниже рассматриваются лишь отдельные мероприятия по предотвращению пожаров в электроустановках. Некоторые из них приведены в предыдущих главах.

22. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Исключение возникновения аварийных режимов является основным средством предотвращения появления упомянутых ранее источников зажигания. Этого можно достигнуть:

- поддержанием сопротивления изоляции токоведущих частей электроустановок не ниже величин, регламентированных ПУЭ (например, сопротивление изоляции каждого участка в сетях напряжением до 1000 В должно быть не ниже 0,5 МОм на фазу);

- защитой изоляции от механического, теплового и агрессивного воздействий окружающей среды (прокладкой проводов в трубах; созданием теплопреградительных экранов и надежного теплоотвода; исключением повреждения изоляции от вибрации, тряски и при движении);

- исключением попадания на открытые токоведущие части посторонних предметов и ошибочных действий при выполнении работ, связанных с обслуживанием электроустановок (устройством ограждений с механическими и электрическими блокировками);

- симметричной нагрузкой фаз;

- исключением обрыва нулевого провода;

- своевременным увеличением пропускной способности стационарных электрических проводов;

- строгим соблюдением инструкций и правил при эксплуатации электроустановок и т. п.

Однако, поскольку количество пожароопасных электроустановок, находящихся в эксплуатации, велико, а также в связи с тем, что число людей, связанных тем или иным образом с их эксплуатацией и не имеющих необходимой подготовки, также велико, полностью исключить случаи аварийных режимов в электроустановках не представляется возможным. В связи с этим все электроустановки должны оборудоваться электрической и иной защитой, которая снижала бы пожарную опасность аварийных режимов. В общем случае защита от аварийных режимов предполагает регламентацию тока и продолжительности аварийного режима и изоляцию пожароопасных электроустановок и их пожароопасных элементов от горючей среды.

Последнее обеспечивается специальным исполнением и размещением электроустановок.

Для защиты от токов к. з. и перегрузок все электроустановки оборудуются предохранителями и автоматическими выключателями. Предохранители применяются главным образом для защиты электроустановок от токов к. з. Защита от перегрузок с помощью предохранителей возможна при условии, если защищаемые элементы установки будут иметь запас по пропускной способности на 25% больше номинального тока плавких вставок [53]. Например, если речь идет о защите от перегрузки электрической проводки квартиры, то она обеспечивается, когда

$$I_{\text{в}} = 0,75 I_{\text{дл, доп}}, \quad (105)$$

где $I_{\text{в}}$ — номинальный ток плавкой вставки, А; $I_{\text{дл, доп}}$ — длительно допустимый ток через электрическую проводку, А.

Выбор предохранителей производится по следующим трем условиям:

а) номинальный ток плавкой вставки должен быть больше или равным расчетному току нагрузки

$$I_{\text{в}} \geq I_{\text{р}}, \quad (106)$$

где $I_{\text{в}}$ — номинальный ток плавкой вставки, А; $I_{\text{р}}$ — расчетный ток нагрузки, А;

б) предохранитель не должен отключать установку при пусковых токах, свойственных нормальной эксплуатации;

в) при к. з. предохранитель должен отключать аварийную линию за минимальное время и по возможности селективно (см. § 10).

Защита силовых и осветительных сетей от перегрузки и редко возникающих к. з. осуществляется автоматическими выключателями. Выбор номинальных токов тепловых расцепителей или нагревательного элемента теплового реле магнитного пускателя $I_{н,тепл}$, а также номинальных токов электромагнитных расцепителей $I_{н,элм}$ необходимо производить по соотношению

$$I_{н,тепл} \text{ и } I_{н,элм} > I_p. \quad (107)$$

Однако необходимо учитывать, что защита от тока к. з. полностью не исключает появление источников зажигания. Так, электрические искры при локальных к. з. возникают практически всегда, даже при наличии чувствительной защиты.

Ограничение продолжительности аварийных режимов, особенно к. з., является важным фактором противопожарной защиты. Наиболее эффективными для этих целей являются автоматические устройства, которые реагируют не на возросший ток, а на его возрастание. Примером такого устройства может служить универсальная защита электроустановок, подключенных к сети через вентили.

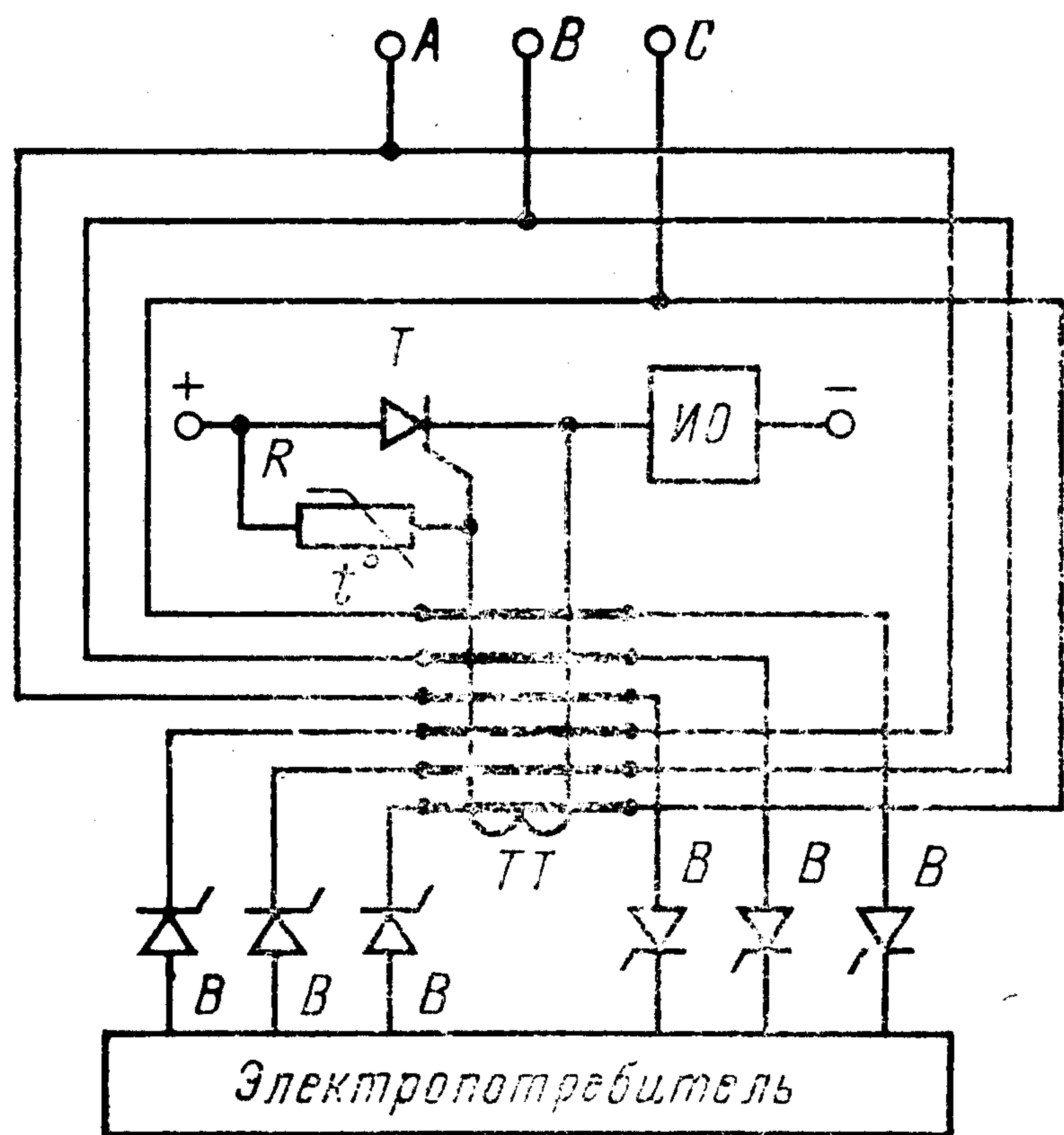


Рис. 39. Принципиальная схема универсальной защиты электроустановок, подключенных к сети через вентили.

электроустановок, подключенных к сети через вентили, принципиальная схема которой приведена на рис. 39 [54].

Датчиком устройства является трансформатор тока $ТТ$. В схему защиты входят терморезистор R , тиристор T , вентили B и исполнительный орган $ИО$. Первичными обмотками $ТТ$ являются фазные провода, включенные так, что ток во всех обмотках проходит относительно магнитопровода в одном направлении. Благодаря такому включению магнитный поток при нормальной работе вентиля и защищаемого потребителя равен практически постоянной величине, а ток во вторичной обмотке — нулю.

Защита срабатывает при всех аварийных режимах, ведущих к изменению магнитного потока в магнитопроводе $ТТ$. Это происходит при к. з. в зоне защиты, при замыканиях на корпус, замыкании на землю, непредусмотренном отключении и включении напряжения, обрыве фазных проводов, выходе из строя вентиля. Изменение магнитного потока вызывает появление во вторичной обмотке $ТТ$ импульса тока и включение тиристора T . Тиристор подает питание на исполнительный орган, и защита срабатывает.

Для тепловой защиты электропотребителя используется дополнительный датчик — терморезистор R . Он размещается в корпусе электропотребителя и включен в цепь управления тиристора. При превышении допустимой температуры корпуса электропотребителя сопротивление терморезистора уменьшается, а ток, проходящий через него, увеличивается и включает тиристор. Защита срабатывает. Таким образом предотвращается возникновение пожара при перегрузке, межвитковых замыканиях и других неисправностях электропотребителя, вызывающих его перегрев.

Данная схема проста, не потребляет энергии в дежурном режиме, отличается высоким быстродействием и может успешно использоваться во многих вентильных схемах (выпрямителях, преобразователях, электроприводах, переключателях на тиристорах и т. д.). Для однофазных электропотребителей подобные схемы приведены в работе [55].

23. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ В КАБЕЛЬНЫХ ПРОВОДКАХ

Как уже ранее отмечалось, причинами пожаров в кабелях являются к. з., перегрузки, неисправности в соединительных муфтах, воспламенение масла от раскаленных частиц и капель металла при выполнении сварочных работ, нарушение правил пожарной безопасности при работе с открытым огнем и различного рода аварии.

Возникновению пожаров в кабелях способствуют нарушения правил их укладки при монтажных работах, что ведет к нарушению теплового режима при эксплуатации (например, при несоблюдении зазоров между отдельными кабелями), а в итоге — к ускоренному старению изоляции. Нередко подпольные устройства, в ко-

торых укладываются кабели, не разделяются на отдельные секции, а если и разделяются, то перегородки выполняются некачественно или из неогнестойких материалов. Оставление незаделанных проемов и отверстий в местах повреждения кабелей через горизонтальные и вертикальные ограждающие конструкции может явиться причиной распространения пожаров (рис. 40). Все это повышает пожарную опасность, поскольку при возникновении горения происходит его распространение через неплотности и проемы.

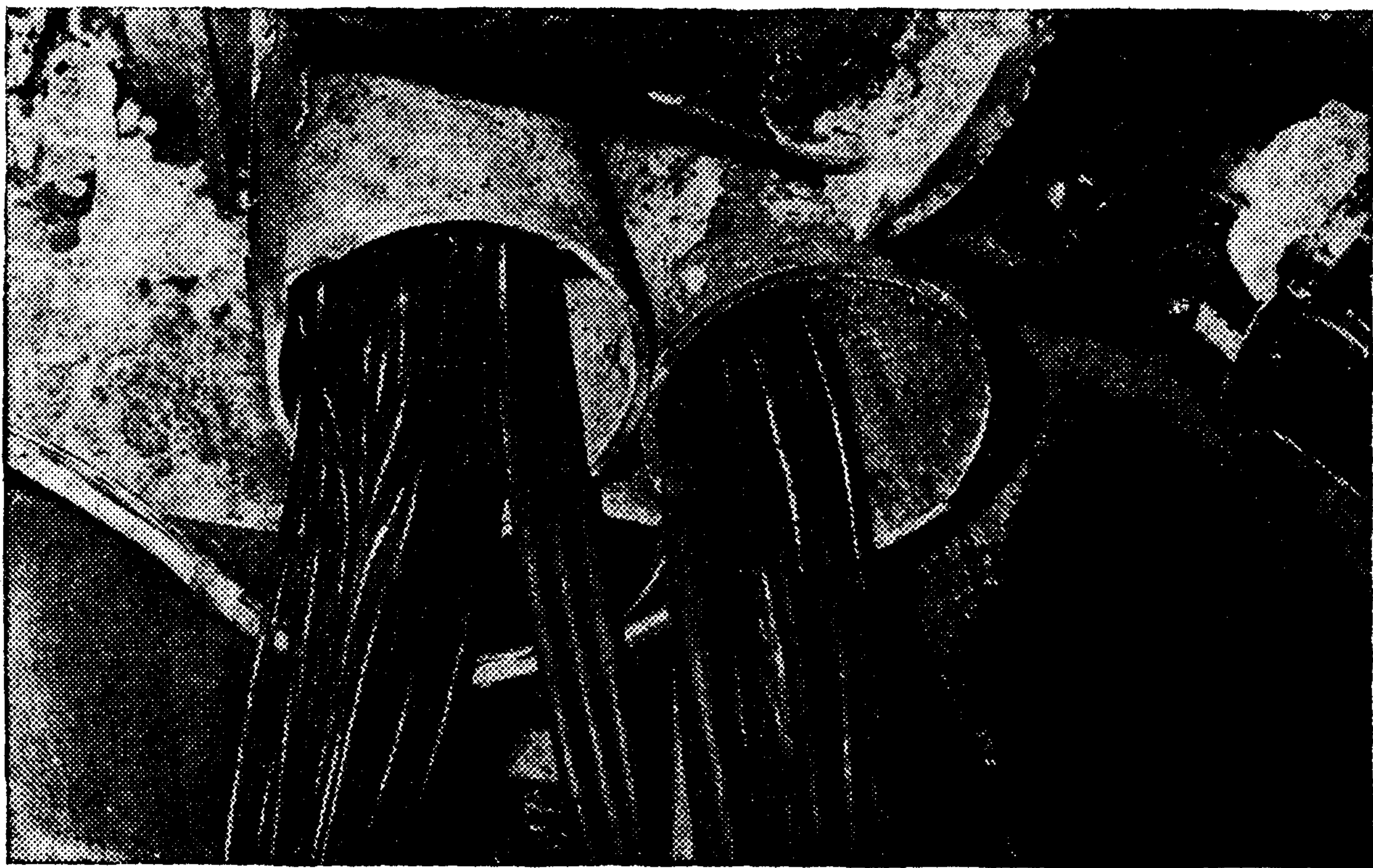


Рис. 40. Характерное нарушение прокладки кабелей в трубах в местах прохода их через перекрытия.

Для предотвращения пожаров в кабельных проводках необходимо исключить случаи появления источников зажигания и содержать кабельное хозяйство в пожаробезопасном состоянии. Однако в настоящее время этого становится недостаточно, поскольку в ряде случаев возникновение пожаров происходит в силу непредвиденных причин. В этих условиях большое значение приобретает направление профилактики пожаров, которое предусматривает внедрение кабелей пониженной горючести. Это позволяет, с одной, стороны, свести к минимуму количество случаев возникновения пожаров, а с другой, делает системы электроснабжения более устойчивыми к воздействию опасных факторов пожара, т. е. делает их более «живучими». В связи с тем, что в эксплуатации по-прежнему находится очень большое количество кабелей, не полностью удовлетворяющих требованиям

пожарной безопасности, одним из путей ее повышения является нанесение на кабели специальных огнезащитных покрытий, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

препятствовать распространению пожара вдоль кабельного потока;

не снижать токонагрузочные характеристики;

задерживать выход из строя кабелей при воздействии на них огня во время пожара, обеспечивая их нормальное функционирование в течение определенного времени;

обладать соответствующими механическими свойствами;

быть негигроскопичными и обладать адгезией;

обладать технологичностью нанесения.

Материалы для таких покрытий делятся на две категории: специально разработанные для кабелей и применяемые для защиты деревянных и металлических конструкций. Последние представляют собой покрытия вспучивающего типа. В целом эти покрытия позволяют в определенной мере удовлетворять перечисленным требованиям, кроме гигроскопичности, поэтому они должны защищаться снаружи дополнительной водостойкой оболочкой, что снижает их огнезащитные свойства. Если использовать вспучивающиеся покрытия на растворителях, то возникают кроме технологических трудностей нанесения ряд других трудностей: во-первых, нанесение их в плохо вентилируемых помещениях опасно для здоровья, а во-вторых, возникает проблема возможного повреждения оболочки кабелей растворителями.

Профилактическая работа по предотвращению пожаров в кабельных прокладках электроустановок должна включать в себя, кроме всего прочего, строгое соблюдение Правил устройства электроустановок и Правил технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок. Особо следует уделять внимание соответствию кабелей номинальным параметрам сети, условиям окружающей среды, температурному режиму и выбору аппаратов защиты. При проведении ремонтных работ в кабельных линиях с применением сварки, пайки или открытого огня необходимо строго соблюдать правила пожарной безопасности. Заделка кабельных переходов огнестойкими материалами позволяет избе-

жать распространения пожара вдоль кабельного канала.

Как уже отмечалось, снижение пожарной опасности наружных покровов кабелей можно достигнуть применением негорючих материалов, которыми в большинстве случаев являются вещества неорганической природы (асбест, слюда, керамика и т. п.). Однако наружные покровы из таких материалов по механическим, электрическим, технологическим и химическим свойствам не отвечают практическим требованиям. Ряд полимерных материалов, которые используются для наружных покровов, имеют еще тот недостаток, что при нагреве выделяют токсичные и химически агрессивные газы. В этой связи следует особо отметить поливинилхлорид, получивший очень широкое распространение в кабельной промышленности. При его нагреве начиная с температуры порядка 100°C происходит выделение хлористого водорода. При нагреве до температуры, близкой к 300°C , выделяется почти весь содержащийся хлористый водород. Сгорание 1 кг поливинилхлорида дает 350 л газообразного хлористого водорода, который при растворении в воде может дать более 2 л 25%-ной соляной кислоты. Выделяющийся хлористый водород оседает в виде мелких капелек соляной кислоты на различных конструктивных элементах, в том числе на металлических конструкциях, что вызывает их коррозию.

24. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ И ПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

Из-за большого разнообразия радиоэлектронного оборудования и установок по типу, мощности, размерам и назначению сформулировать единые для них требования по предотвращению пожаров и пожарной защите чрезвычайно трудно. Поэтому ниже перечислены мероприятия по обеспечению пожарной безопасности вычислительных центров, которые могут быть с некоторыми изменениями и дополнениями распространены и на другие радиоэлектронные устройства и установки.

Требования по противопожарной защите вычислительных центров

1. Вычислительные центры должны располагаться в зданиях не ниже II степени огнестойкости с расположением залов ЭВМ не ниже первого этажа.

2. Комплекс помещений вычислительных центров должен иметь не менее двух самостоятельных эвакуационных выходов [СНИП II-A.5-62, п. 4.6].

3. Двери машинного зала должны быть самозакрывающимися с пределом огнестойкости не менее 0,75 ч.

4. Для звукоизоляции и акустической отделки стен и потолков должны применяться негорючие и трудногорючие материалы.

5. При наличии в машинном зале фальшпола последний должен выполняться из негорючих материалов.

6. Хранилища перфокарт, перфолент и магнитной ленты должны размещаться в обособленных помещениях, оборудованных шкафами (стеллажами) из негорючих материалов.

7. Источники электрической энергии (распределительства, трансформаторы) должны располагаться в обособленных помещениях.

8. Осветительная электрическая сеть должна выполняться в соответствии с требованиями ПУЭ для пожароопасных зон и установок классов II—IIa.

9. Прокладка кабелей через перекрытия, стены и фальшполы должна осуществляться в стальных трубах с уплотнением из негорючих материалов.

10. Аварийные сети освещения, дистанционного и автоматического пуска противопожарных систем и сигнализации должны прокладываться отдельно от силовых и других рабочих электрических сетей, а при совместной прокладке должны разделяться перегородками из негорючих материалов.

11. Система электропитания ЭВМ должна иметь блокировку, обеспечивающую ее отключение в случае остановки системы охлаждения и кондиционирования.

12. Воздуховоды должны выполняться из негорючих материалов.

13. Система вентиляции должна быть оборудована устройством, обеспечивающим автоматическое ее отключение, а также перекрытие воздуховодов машинного зала и ЭВМ автоматическими заслонками в случае возникновения пожара.

14. Кабельные вертикальные шахты должны разделяться поэтажно диафрагмами из негорючих материалов.

15. Кроме машин, размещаемых в одном помещении на 20 м², в помещениях для ЭВМ с характеристиками

по быстродействию центрального процессора от 10^4 операций в секунду и выше должны предусматриваться средства автоматического пожаротушения. В помещениях для ЭВМ с характеристиками по быстродействию центрального процессора до 10^4 операций в секунду, а также для машин, размещаемых в одном помещении не более 20 м², следует предусматривать автоматическую пожарную сигнализацию.

16. При ремонте и техническом обслуживании ЭВМ в машинном зале должно находиться минимальное количество легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), в плотно закрывающейся таре.

Пожарно-технические обследования вычислительных центров

Пожарно-технические обследования являются основной формой работы Государственного пожарного надзора на объектах народного хозяйства [48]. Цель обследования состоит:

- во вскрытии и устранении причин пожара;
- в разработке и осуществлении мероприятий по предотвращению распространения огня и по обеспечению эвакуации людей;

- в инструктировании сотрудников объекта о мерах пожарной безопасности и действиях на случай пожара.

Обследование объекта может быть двоякое: осмотр по наикратчайшему маршруту и осмотр в строгой последовательности технологического процесса. Однако независимо от метода главная цель обследования — найти вероятную причину, своевременно ее устранить и тем самым предотвратить возможность возникновения пожара.

Пожарный режим

Комплекс мер и требований пожарной безопасности, заранее установленных для объекта и подлежащих обязательному выполнению всеми работниками, носит название пожарного режима. Он объявляется приказами и распоряжениями руководителя объекта.

Цель объявления пожарного режима:

- предотвратить возникновение пожара от курения, неосторожного обращения с открытым огнем, небрежного обращения с электронагревательными приборами и других аналогичных причин;

предотвратить загромождение проходов и путей эвакуации;

регламентировать порядок осмотра и закрытия помещений после окончания работы;

поддерживать строгий пожарный режим в период проведения ремонта и профилактики оборудования и т. п.

25. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖЕНИИ ПОЖАРОВ И ЗАГОРАНИЙ

Самая образцовая профилактика и организованное тушение пожаров не принесут желаемого эффекта, если не принять мер для эффективного автоматического обнаружения пожаров в начальной стадии их развития. Для автоматического обнаружения пожара могут быть использованы любые извещатели. Основное требование к ним состоит в том, чтобы они реагировали на определенный параметр среды. К сожалению, на практике чувствительные элементы извещателей реагируют на изменения окружающей среды, вызванные не пожаром, а иными причинами (сваркой, курением). В результате возможны ложные срабатывания. Устранение ложных срабатываний достигается снижением чувствительности извещателей.

Другим важным показателем извещателей является их стойкость к воздействию пожара, т. е. чтобы они были устройствами многократного действия. Однако это вызывает дополнительные затраты. Зарубежная практика свидетельствует, что в системах пожарной сигнализации в вычислительных центрах наиболее целесообразны дымовые (ионизационные) извещатели. При необходимости может быть использована комбинированная система, включающая в себя ионизационные и дымовые датчики. Это позволяет повысить чувствительность пожарной сигнализации, а также скомпенсировать ошибки в выборе мест установки извещателей.

Наиболее пожароопасными местами в вычислительных центрах являются пространства над промежуточными (подвесными) перекрытиями и полости под полом. Установка в них извещателей обязательна.

Количество устанавливаемых извещателей зависит от их вида и размеров защищаемых объектов. Например, за рубежом в вычислительных центрах принято устанавливать при наличии кондиционирования по од-

ному ионизационному извещателю на каждые 15 м² площади помещения, при этом в одной цепи не должно быть более 20 извещателей. В вентиляционных каналах и отчасти в пространстве двойного пола, где скорость потока воздуха может превышать 1 м/с, обычные ионизационные извещатели неприемлемы. Здесь нужны специальные сигнализаторы или извещатели с камерой для отбора проб. В отдельных помещениях вычислительных центров и особенно в помещениях управляющих вычислительных машин промышленных предприятий, как правило, требуется применение извещателей разной чувствительности. Это может иметь место при высокой запыленности воздуха или там, где допускается наличие дыма (например, в стойках управления большой высоты или по периферии вычислительного центра). Но и в этих случаях нельзя отказываться от установки автоматических пожарных извещателей.

Расчетным путем трудно определить места установки извещателей, поэтому только экспериментально можно найти оптимальное размещение. Для этого необходимо после установки электронного оборудования и пожарной сигнализации произвести натурные испытания эффективности системы обнаружения пожара. Так, за рубежом в различных наиболее пожароопасных местах в вычислительных центрах производят пробные сжигания на раскаленных пластинах материалов, дающих продукты горения в виде дыма и пламени (например, буковая древесина). С помощью таких опытов можно экспериментально определить оптимальное размещение извещателей, что будет гарантировать своевременное обнаружение пожара.

Проектирование установки пожарной сигнализации подразумевает обоснование оптимального с точки зрения экономических затрат и пожарной безопасности размещения средств обнаружения возникновения пожара. К критериям проектирования относятся: зона наблюдения и действия извещателя (определяется принципом действия, чувствительностью), концентрация извещателей, функции системы обнаружения пожара.

Зоны наблюдения — это конкретные участки, кабельные каналы, пустотелые перекрытия и основания, каналы для кондиционирования воздуха, находящиеся в зоне эффективного наблюдения извещателя.

Концентрация извещателей — это количество извещателей, устанавливаемых в данном помещении. Она зависит от объема помещения, интенсивности воздухообмена, количества объектов наблюдения, находящихся в помещении, и от способа наблюдения.

Размещение извещателей — характеризует особенности воздухообмена защищаемого помещения или приборов, наличия и особенностей пожароопасных мест, а также учитывает возможный характер воздушных потоков во время пожара.

Как бы ни была спроектирована система автоматического обнаружения пожара в вычислительных центрах, она предназначена для обнаружения и тушения пожара на начальной стадии. Выбор систем обнаружения тушения пожара зависит от характера возможного горения и возможных последствий воздействия огнетушащих средств на защищаемые устройства.

26. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Пожары в трансформаторах довольно редки. Несмотря на это, необходимо предусматривать мероприятия, которые способствовали бы уменьшению ущерба, возможного в случае пожара. Одним из таких средств является оборудование трансформаторов системами пожаротушения. Она экономически оправдана в тех случаях, когда для замены сгоревшего оборудования или установки временного требуется много времени. Проектирование противопожарной системы должно предусматривать вероятность не только самого пожара, но и таких сопутствующих явлений, как взрыв, выбросы масла. Для этого необходимо предусматривать аварийный слив масла, а при наличии нескольких трансформаторов — противопожарные разрывы между ними. Вся площадка, на которой установлен трансформатор, и вся территория вокруг него должны быть выложены щебнем. Чтобы промежутки между камнями не забивались мусором и пылью, целесообразно периодически щебень промывать водой, а сточные воды должны иметь возможность стока, чтобы в случае возникновения пожара горящее масло не могло приблизиться к другим трансформаторам.

Предотвращение пожара маломощных трансформаторов (в телевизорах, радиоприемниках и т. п.) дости-

гается заключением их в металлический кожух, а также электрической защитой от межвитковых замыканий и перегрузки.

Глава шестая

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

27. ДЕЙСТВИЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Электроустановки, особенно крупные, как правило, насыщены элементами из пластмасс, а некоторые имеют большое количество минерального масла или работают с использованием нефти, мазута, природного газа. При возникновении в них пожара выделяющиеся продукты горения могут быть причиной тяжелого травматизма как для обслуживающего персонала, так и для лиц, участвующих в его тушении. Выделяющийся дым содержит в себе самые разнообразные газы, отличающиеся друг от друга степенью вредного воздействия на организм человека. Так, при горении нефти образуется дым, содержащий акролеин и древоацетальдегид. При сгорании 1 кг ПВХ выделяется 0,7 кг (примерно 350 л при обычных условиях) хлора. Среди множества газообразных вредных продуктов горения следует отметить такие, как углекислый газ CO_2 , угарный газ CO , хлористый водород HCl , бензол C_6H_6 , цианистый водород HCN , сероводород H_2S , аммиак NH_3 и др. По физиологическому воздействию они могут быть разбиты на четыре группы:

удушающего действия — CO_2 ; CH_4 ;

удушающего действия с разрушающим воздействием на легкие — CO ; NH_3 ;

действующие на кровь, нервную систему, клетки — CO ; H_2S ; C_6H_6 .

Защитные мероприятия по предотвращению вредного воздействия дыма на организм человека должны осуществляться с учетом содержащихся в нем газов.

Угарный газ CO (моноокись углерода) — газ, не имеющий цвета, запаха и вкуса. Он горюч, несколько легче воздуха. Обычно концентрируется в верхней части помещения. На пожаре CO образуется при горении органических соединений в условиях недостатка кислорода по уравнению



Воздух, который вдыхает человек, состоит в основном из смеси двух газов: азота 79% и кислорода 21%, а выдыхаемый — из азота 79%, кислорода 17% и двуокиси углерода 4% [56]. Часть вдыхаемого кислорода воздуха остается в легких человека и идет на окисление углерода. Если во вдыхаемом воздухе содержится CO , то, несмотря на вполне достаточное для дыхания количество кислорода, возникает внутренняя кислородная недостаточность. При этом достаточно незначительной концентрации CO , чтобы произошло опасное для жизни отравление. Различают несколько степеней отравления: легкую, среднюю, тяжелую и смертельную. При легком отравлении наблюдаются следующие симптомы: прерывистое дыхание, легкая го-

ловная боль; при среднем — головные боли, физическое недомогание и головокружение; при тяжелом — потеря сознания.

Проявление отдельных симптомов отравления при действии определенной концентрации СО в течение конкретного промежутка времени зависит от состояния здоровья. Однако в среднем можно отметить, что при определенном содержании СО в крови человека проявляются вполне определенные симптомы отравления, и наоборот, вполне определенные симптомы отравления соответствуют определенному содержанию СО в крови человека. В табл. 12 приведены характерные симптомы отравления угарным газом в зависимости от содержания его во вдыхаемом воздухе и продолжительности вдыхания.

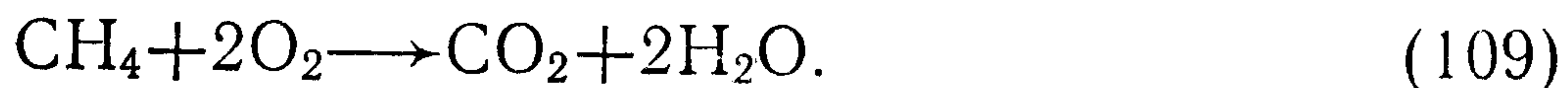
Т а б л и ц а 12

Симптомы отравления СО в зависимости от содержания его в воздухе и продолжительности вдыхания [56]

Содержание СО в воздухе, %	Продолжительность вдыхания, ч	Симптомы
0,0—0,03	5—6	Головная боль, прерывистое дыхание
0,04—0,07	0,5	То же
	2,5	Физическое недомогание, головокружение
	2,5—4	Физическое недомогание, потеря сознания
0,07—0,1	0,5—1	Головная боль, прерывистое дыхание, головокружение
	1,5—2	Головокружение, недомогание
	3—4	Потеря сознания
	4—6	Потеря сознания, смерть
0,1—0,15	0,5	Головная боль
	1,5—2	Физическая слабость, потеря сознания
	4—6	Смерть
0,2—0,3	0,75—1,5	Смерть
0,5—1,0	Несколько минут	Смерть

Необходимо отметить, что интенсивность дыхания человека зависит от ритма его трудовой деятельности. Так, при покое объем вдыхаемого воздуха за 1 мин составляет около 10 л, при легкой работе — 20, средней — 25 и тяжелой — до 40 л. Естественно, быстрота отравления зависит от интенсивности дыхания. На рис. 14 приведены зависимости, позволяющие определить время наступления насыщения крови угарным газом при различной интенсивности трудовой деятельности и различном содержании его во вдыхаемом воздухе.

Двуокись углерода CO_2 — малоактивный газ, не имеющий цвета, образуется при полном сгорании углерода:



При вдыхании воздуха, содержащего до 2% углекислого газа, начинают проявляться признаки его воздействия на организм человека, при содержании от 4 до 5% возбуждаются центры дыхания, при 10% действие носит наркотический характер с возможным смертельным исходом.

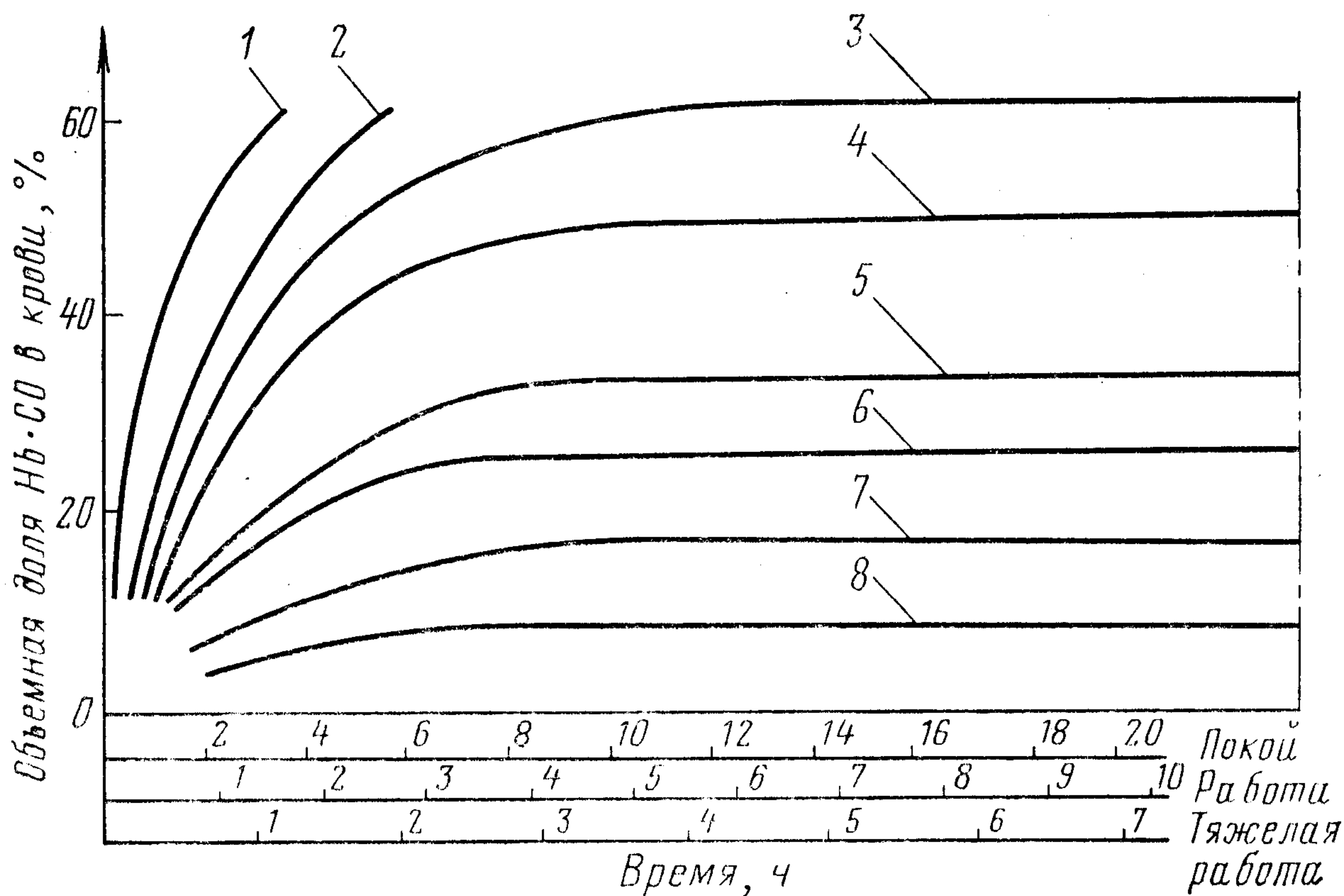


Рис. 41. Насыщение гемоглобина крови окисью углерода в зависимости от продолжительности и характера работы.

1 — 0,2%; 2 — 0,1%; 3 — 0,07%; 4 — 0,05%; 5 — 0,025%; 6 — 0,02%; 7 — 0,01%; 8 — 0,005%.

Зарубежные исследования [57] на живых существах (крысах) показали, что при вдыхании смеси воздуха с малым содержанием двуокиси углерода сначала наблюдается некоторое увеличение частоты дыхания, затем частота дыхания доходит до некоторого стационарного уровня, а в дальнейшем уменьшается. Наступает процесс подавления дыхания. С увеличением содержания окиси углерода во вдыхаемом воздухе частота дыхания подопытных живых существ снижается. Большая опасность вдыхания CO по сравнению с CO_2 состоит в том, что этот газ примерно в 200—300 раз активнее, чем CO_2 . Поэтому гемоглобин крови быстро насыщается CO и превращается в оксигемоглобин ($\text{CO} \cdot \text{Hb}$), который не способен транспортировать кислород, что приводит к гипоксии тканей.

Сероводород (H_2S) — газ с сильным специфическим запахом, который ощущается лишь в течение непродолжительного времени. Содержится в больших количествах в природном газе. Действует на кровь, нервы, легкие, центральную нервную систему, раздражает глаза, слизистые оболочки. При значительных концентрациях наступает быстрая потеря сознания, а затем смерть из-за паралича центров дыхания.

Цианистый водород (HCN) относится к сильно ядовитым газам. Попадание его в организм человека ведет к нарушению обменных

процессов. Кратковременное вдыхание цианистого водорода ведет к параличу центров дыхания и смерти.

Бензол (C_6H_6) — газ, не имеющий цвета. Обладает типичным запахом. Вдыхание паров бензола ведет к возбуждению центральной нервной системы, при длительном вдыхании происходит хроническое отравление, которое может привести к заболеванию крови.

Зарубежные данные свидетельствуют, что одним из основных факторов, определяющих токсичность газов, образующихся на пожарах, являются условия, при которых происходит их генерация (температура, наличие или отсутствие пламени). Например, синтетические материалы становятся опаснее обычных, если их горение происходит при повышенных температурах.

Защита здоровья человека от токсичных газов при тушении пожаров в электроустановках может быть активной и пассивной. Активная защита предусматривает быстрое вентилирование помещений, в которые необходимо проникнуть, чтобы оказать помощь людям или выполнить какие-либо действия.

Активная защита предусматривает применение газососов (вытяжной вентиляции или воздухонагревателей). Этот способ защиты эффективен, если возникающий при этом приток воздуха не способствует усилению горения.

Пассивная, или оборонительная, защита дыхания применяется, когда активная невозможна. Она предполагает использование регенеративных приборов (изолирующих противогазов).

28. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ

При тушении пожаров в электроустановках возникает опасность поражения электрическим током. Существующие в настоящее время инструктивные указания предусматривают отключение напряжения с электроустановок, прежде чем приступить к тушению пожара. В принципе все электроустановки, находящиеся под напряжением выше 65 В, создают опасность поражения электрическим током при тушении пожара. Поражение электрическим током может наступить в результате:

- непосредственного прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением;

- прохождения тока утечки через тело человека;

- попадания под шаговое напряжение.

Наиболее вероятным случаем поражения является тот, при котором в процессе тушения струя воды или иного токопроводящего огнетушащего средства достигнет частей электроустановки, находящейся под напряжением. При этом по телу пожарного в землю потечет ток, значение которого зависит (рис. 42) от сопротивления огнетушащей струи $R_{стр}$, сопротивления тела пожарного R_h , сопротивления между телом пожарного и землей $R_{h,s}$, сопротивления пожарных рукавов R_l и сопротивления между пожарными рукавами и землей $R_{l,s}$.

При всех прочих равных условиях ток утечки $I_{стр}$ зависит прежде всего от сопротивления струи $R_{стр}$. Только при обеспечении соответствующего значения этого сопротивления можно добиться уменьшения тока через тело человека I_h до значения, не опасного для жизни.

Одним из эффективных путей повышения сопротивления струи огнетушащего вещества является распыление ее на отдельные капли. Струя выходит из насадка ствола компактной, а затем дробится. Безопасность тушения повышается с увеличением расстояния между

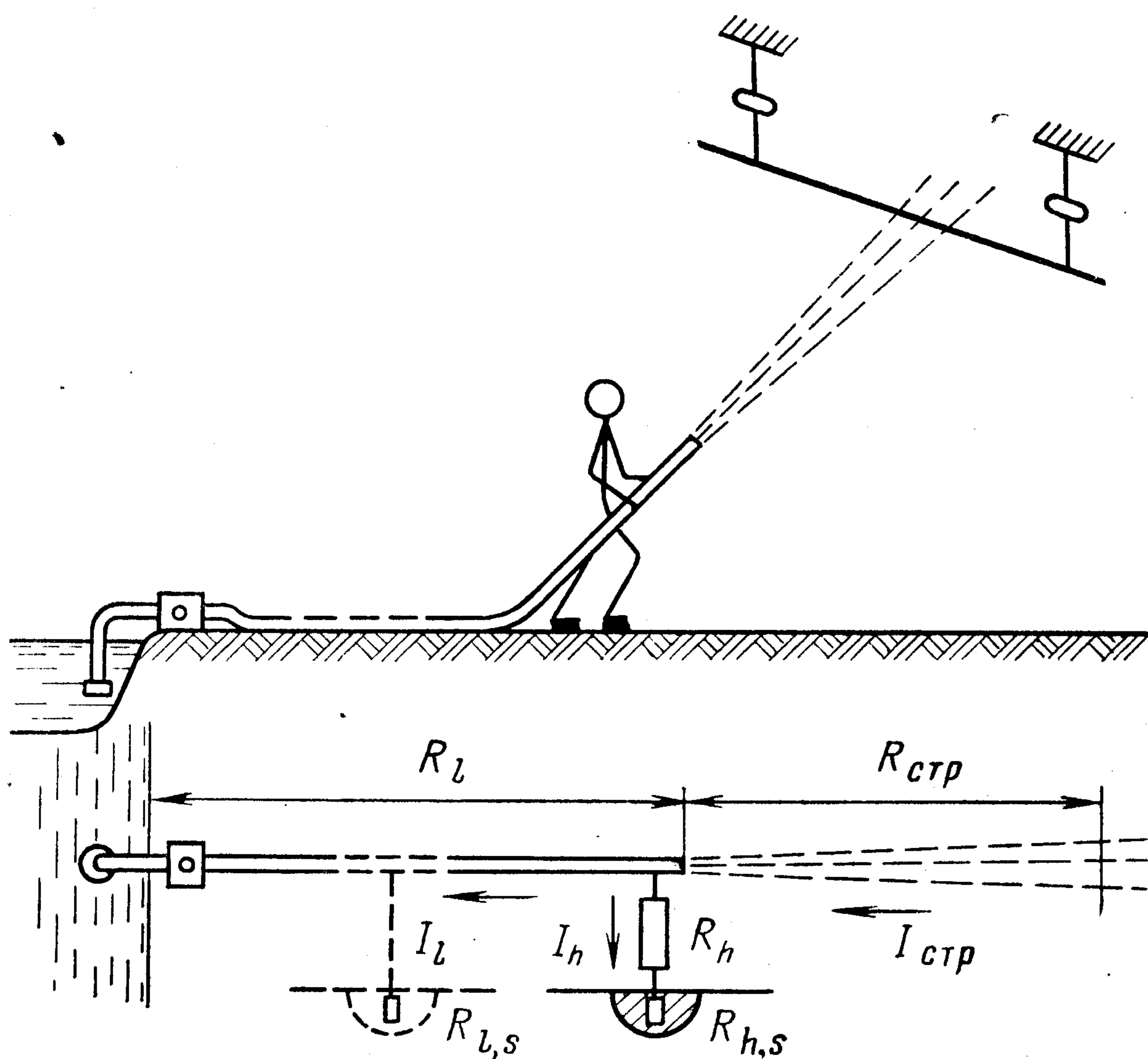


Рис. 42. Принципиальная схема тушения пожара в электроустановке под напряжением.

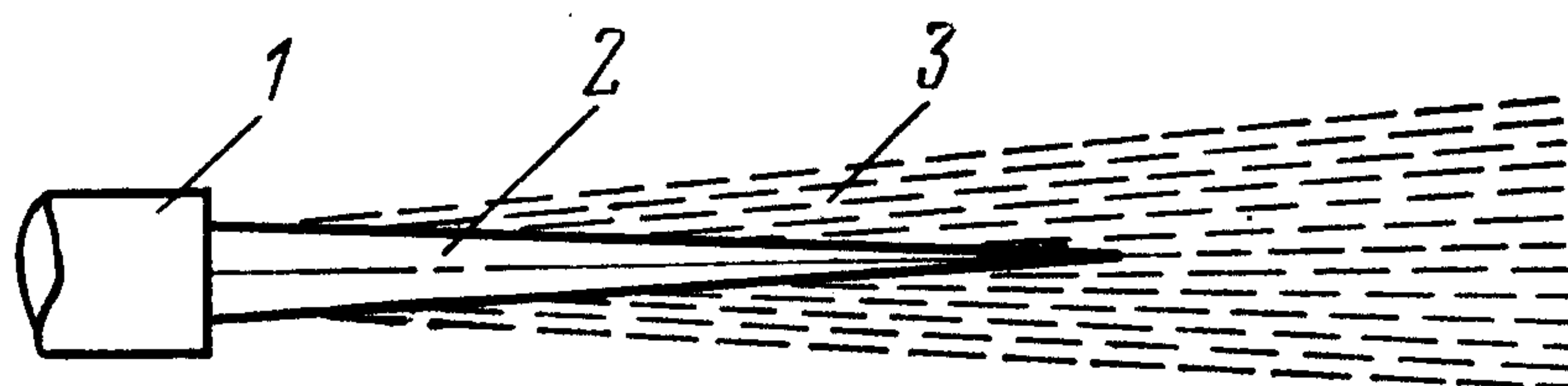


Рис. 43. Принципиальная схема получения распыленной струи.
1 — насадок ствола; 2 — компактная струя; 3 — распыленная струя.

компактным конусом струи и устройством, находящимся под напряжением (рис. 43). В свою очередь длина сплошного конуса зависит от диаметра насадка и рабочего давления, а сопротивление — от электропроводности огнетушащего средства.

В табл. 13 приведены зарубежные данные [58] по минимальным безопасным расстояниям при тушении пожаров в электроустановках, находящихся под напряжением¹.

Электропроводность воды и пены как наиболее распространенных огнетушащих средств увеличивается с повышением содержания

¹ Приведенные в табл. 13 и далее данные имеют информативное значение. (Прим. авт.)

Минимальные безопасные расстояния, м, при тушении водой пожаров в электроустановках под напряжением [58]

Вид водяной струи	Напряжение, кВ			
	до 1	до 110	до 220	до 380
Распыленная	1	3	4	5
Сплошная при диаметре насадка, мм:				
12	3	8	9	10
16	5	10	11	12
20	7	12	13	14
24	9	14	15	16
Пена	3	Отключить напряжение		
Галоидоуглеводороды	1	3	4	5
Углекислый газ	1	3	4	5

в них электролитов и добавок. Ниже для сравнения приведены значения электропроводности воды и ее растворов [59]:

Вода	Электропроводность, См·м ⁻¹
Чистая	0,04
Дистиллированная	50
Питьевая	275—1200
Речная	920—1350
Морская	12 500—62 800

Раствор воды	
20%-ный HCl	$2 \cdot 10^5$
4%-ный пенообразователь в дистиллированной воде	$3 \cdot 10^3$
30%-ный пенообразователь в водопроводной воде . . .	$(24—55) \cdot 10^3$

При добавке в воду кроме пенообразователей еще смачивателей и солей для снижения температуры замерзания и поверхностного натяжения электропроводность воды значительно повышается. В опытах, проведенных в ГДР, по тушению пожаров на электроустановке с напряжением 6 кВ было установлено, что при использовании чистой водопроводной воды электрический ток на расстоянии 1,5 м практически равен нулю, но при добавке 0,5% соды при прочих равных условиях он повышается до 50 мА. Диаметр насадка в опытах был равен 12 мм.

Опыты с пеногенераторами показали, что при одинаковых условиях ток утечки через струю воздушно-механической пены кратностью 100—200 можно принять равной току утечки через водяную струю. Проводимость химической пены по сравнению с воздушно-механической выше, так как первая содержит больше растворенных солей.

По зарубежным данным воздушно-механическую пену разрешается применять при тушении пожаров электрических установок, находящихся под напряжением до 1000 В переменного тока или 150 В постоянного тока, лишь в том случае, если соблюдаются сле-

дующие безопасные расстояния: при орошении электропроводок — 1 м, при орошении линий электропередачи — 3 м.

В электротехнических установках с номинальным напряжением выше 1 кВ воздушно-механическую пену допускается применять лишь после их отключения. Кроме воды и пены в качестве огнетушащих средств при тушении пожаров в электроустановках, в том числе в установках высокого напряжения, могут применяться порошки и галоидоуглеводороды. Электропроводность этих огнетушащих средств незначительна. Ниже приведены зарубежные данные¹ по нормам предельных расстояний до электрических установок при тушении хлорбромметаном:

Напряжение, кВ	До 1	30	110	220	380
Расстояние, м	0,5	2	3	4	5

Глава седьмая

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧАСТНОСТИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОПРОВОДКАХ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ПОЖАРА

29. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫПОЛНЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРИЧИН ПОЖАРОВ

Необходимость проведения пожарной электротехнической экспертизы возникает в тех случаях, когда при осмотре места пожара будут обнаружены следы и выявлены факты, свидетельствующие о существовании аварийных режимов в электрооборудовании объекта, в котором произошел пожар. К ним могут быть отнесены:

- локальные оплавления на токоведущих элементах электрооборудования;
- срабатывание электрической защиты (плавких вставок предохранителей, защитных реле и автоматов и т. п.);
- ненормальное функционирование электроустановок до пожара (мигание света, перенапряжение, ненормальное гудение и т. д.).

Причастность аварийных режимов в электроустановках к случаям возникновения пожара считается обоснованной, если:

- имеются доказательства о существовании аварийного режима;

¹ Приведенные данные имеют информативный характер. (Прим. авт.)

место возникновения пожара пространственно совпадает с местом возникновения аварийного режима;

время возникновения аварийного режима предшествовало времени возникновения пожара;

тепловой импульс аварийного режима был достаточен для зажигания горючей системы.

Комплекс этих условий позволяет с достаточной достоверностью делать вывод о причастности аварийных режимов к возникновению пожара. Однако на практике возникают трудности в решении данной задачи, в частности при несоблюдении одного или нескольких из перечисленных условий. В этом случае задача становится трудноразрешимой или вовсе не поддающейся решению.

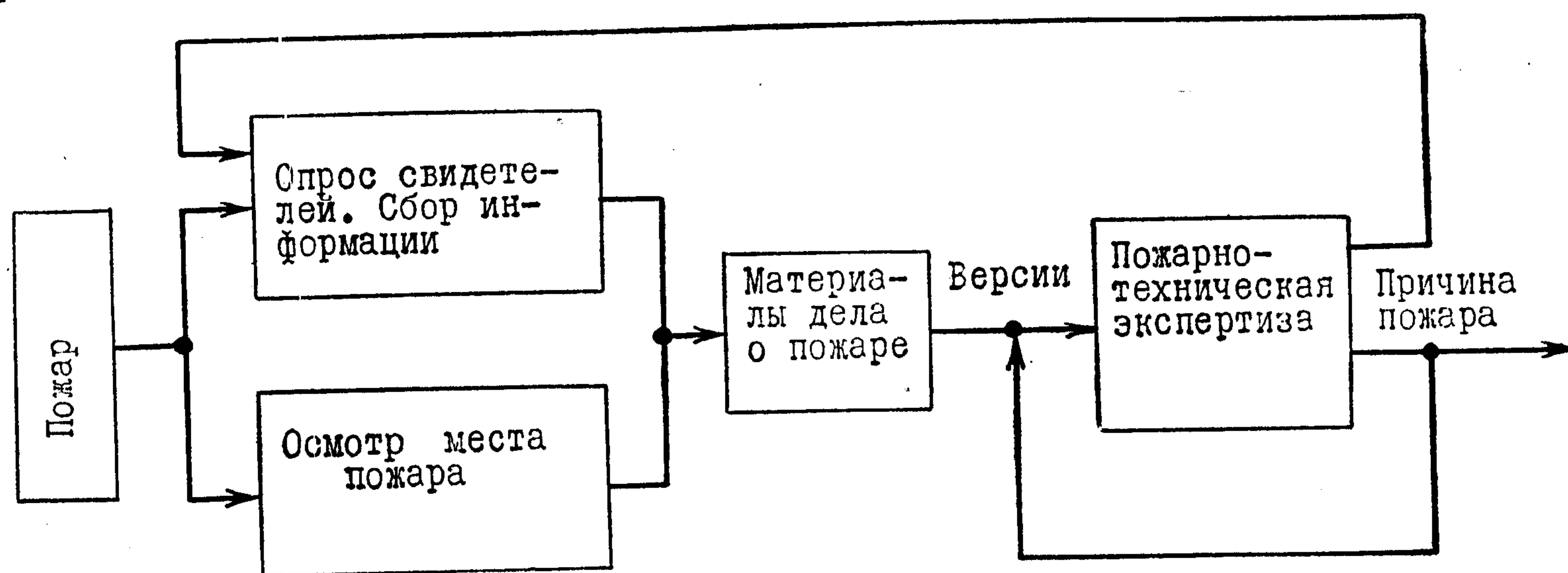


Рис. 44. Последовательность действий при исследовании причины пожара.

Как известно, выдвижение версий о причине пожара начинается со сбора необходимых фактов (рис. 44). Пожар — событие прошлое. Однако воссоздание условий его возникновения возможно, потому что все процессы, происходящие на пожаре, вследствие принципа всеобщей взаимозависимости оставляют следы на материальных предметах. Найти эти следы и установить их в надлежащей процессуальной форме — значит найти объективную истину по делу о пожаре. В целом это сложная задача. Сразу найти необходимые следы трудно, поскольку пожар воздействует на следы, вносит в них искажения, что уменьшает возможности в успешном расследовании причины пожара.

Здесь большую помощь оказывают наши органы чувств, которые имеют особенно большое значение при осмотре места пожара. В процессе осмотра наше мышление небезучастно. Каждый факт подвергается стро-

тому логическому анализу. Здесь большое значение приобретают различные догадки, внезапные идеи, предположения. С их помощью устанавливается, какие следы могут в действительности существовать и где их искать. Все же этот момент не рождает следственных версий. Они появляются, когда логическому анализу подвергнутся результаты осмотра. Следственные версии указывают нам на реально возможные объяснения расследуемого дела о пожаре, пути и средства проверки истинности наших выводов. Какой бы ни был логический анализ, основываясь только на нем, нельзя сказать, какая из следственных версий истинна и какая ложна. Чтобы дать на этот вопрос ответ, необходимы практические действия, поскольку практика является единственным критерием истины наших выводов.

Момент начала логического анализа собранного материала является одновременно началом выдвижения версий. Возникает вопрос: «Какой материал надо собирать для возможности построения следственных версий и когда этого материала достаточно для данной цели?».

Ответ на первую часть вопроса, естественно, следующий: собирать надо те факты, которые могут объяснить определенным образом расследуемое дело о пожаре. При этом подразумевается, что речь идет о тех фактах, которые имеют определенное объективное отношение к расследуемому делу. В момент прибытия на пожар, т. е. в начале расследования, сразу трудно определить, какие факты относятся к делу и какие нет. Несмотря на это, все же всегда имеются как раз те факты, которые нужны. Руководством для возможности установления и сбора фактического материала, который имеет значение для расследуемого дела о пожаре, служит всесторонний анализ конкретной ситуации на основе знания признаков предполагаемой причины пожара и опыта. Главную роль здесь играет прежде всего знание всех признаков предполагаемой причины пожара, как и знание познавательного значения отдельных факторов. При этом выбор факторов не может зависеть от того, подтверждают или исключают они случай пожара, раскрывают они причину пожара или, наоборот, запутывают ее, идет ли речь о «сильных» или «слабых» доказательствах или о разных «мелочах». А в некоторых случаях маленькая деталь может оказаться «сильнейшим» доказательством.

30. АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЕРСИИ О ПРИЧАСТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ПОЖАРА

Рассмотрим ситуацию, часто встречающуюся в экспертной практике. Мы хотим решить, истинно ли сформулированное нами положение A или нет. В принципе у нас может быть какая-то внутренняя уверенность в истинности A , но для следствия этого оказывается недостаточно: необходимо доказать истинность A или отвергнуть.

В процессе решения задачи возможно появление следствия B предположения A . Это B является ясно сформулированным предположением, о котором мы знаем, что оно вытекает из A :

Из A следует B .

Если удастся ответить, что B истинно или ложно, то возникает, естественно, вопрос: какое влияние этот ответ оказывает на истинность A ? Если удастся показать, что B ложно, то мы можем с достоверностью предположить, что и A должно быть ложно. Однако, если B истинно, то доказательного заключения еще нет, хотя следствие B предположения A оказалось истинным; само A может быть ложным. Тем не менее имеется эвристическое умозаключение, так как следствие B оказалось истинным, что A заслуживает большей веры. В процессе исследования следствия B уверенность в B постепенно изменяется, «непрерывно» уменьшаясь или увеличиваясь. Это можно представить, что B становится менее правдоподобным, затем еще менее правдоподобным, затем в него вряд ли можно поверить и, наконец, оно становится ложным. С другой стороны, мы представляем, что B становится все более правдоподобным, затем еще более правдоподобным. Рассмотрим пример.

Пусть выдвигается версия, что причина пожара в магазине — оставление без присмотра электронагревательного прибора. В качестве основания такой версии выступает обнаружение в очаге пожара электроплитки. Это вещественное доказательство очень «сильное». Почему? Выделим главные для этого случая черты. Существенную роль играют два утверждения:

A — пожар произошел от электронагревательного прибора, оставленного без присмотра;

B — в очаге пожара обнаружено вещественное доказательство — электрическая плитка;

Основные доводы, выдвигаемые в поддержку предположения А:

B_1 — рубильник на электрощите в момент возникновения пожара находился во включенном положении;

B_2 — электроплиткой пользовались вечером перед закрытием магазина продавщицы с целью приготовления пищи, это подтверждается ими всеми;

B_3 — то, что плитка находилась во включенном положении, говорит характер прогорания подставки, на которой стояла плитка, и то, что вилка с частью шнура от плитки находилась в розетке;

B_4 — работники магазина, когда были вызваны для дачи показаний, утверждали, что вилку со шнуром после окончания приготовления пищи они вынули из розетки, но конкретно, кто это сделал, никто не помнит;

B_5 — недалеко от места расположения плитки были найдены бутылки из-под водки;

B_6 — полная сохранность запорных устройств на входных дверях в магазине.

То, что рубильник на электрощите находился во включенном положении, само по себе доказывает немногое. Довольно часто автоматы, рубильники и выключатели находятся во включенном положении, но пожары от этого не происходят. Эта улика свидетельствует лишь о том, что напряжение на электропроводке внутри магазина было. Однако, что работники магазина пользовались электроплиткой вечером перед закрытием магазина, не доказывает того, что она была включенной в момент пожара, но дает основание думать, что электроплитку могли оставить в таком положении. Характер выгорания и нахождение в розетке остатков вилки с куском электрического шнура от плитки при отсутствии вблизи других электроприемников говорят о существенном. Во всяком случае, очень трудно объяснить причину характерного выгорания подставки и нахождения в розетке вилки. Утверждение работников магазина о том, что они выключили плитку, можно понять. Они себе ясно представляют важность этого утверждения для следствия. В то же время они упускают тот важный момент в своих показаниях, как отсутствие конкретного лица, сделавшего это. Обнаружение вблизи места расположения плитки бутылок из-под водки мало о чем говорит. Они могли лежать здесь и ранее, хотя эти обстоятельства дают основание считать, что в данном магазине трудо-

вая дисциплина была не на высоте. Сохранность окон и замков на дверях не доказывает, что причина пожара — оставление электроплитки во включенном состоянии, но в то же время позволяет отвергнуть версию проникновения в магазин с целью поджога.

Все рассмотренные подробности легко можно понять, если версия А справедлива. Наличие такого числа подробностей кажется необъяснимым, если версия неправдоподобна: крайне трудно поверить, что столько совпадений произошло только по чистой случайности.

31. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ПРИЧАСТНОСТИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОПРОВОДКАХ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ПОЖАРОВ

Как уже отмечалось выше, на практике факт существования аварийного режима в электрических проводках устанавливается путем регистрации срабатывания защитной аппаратуры (автоматов, плавких вставок предохранителей и др.) или по соответствующим эффектам: электрическим дугам, искрам, оплавлениям и т. п. В тех случаях, когда помимо этого требуется определить еще и время возникновения аварийного режима относительно какого-либо события (пожара, взрыва, наступления смерти и т. д.), необходимы дополнительные исследования косвенных следов или процессов, возникающих или сопутствующих каждому из этих событий, на ход которых в свою очередь оказывают влияние последовательность аварийного режима и события (например, аварийный режим + событие или, наоборот, событие + аварийный режим). Подобные задачи встречаются довольно часто. Так, при расследовании причины пожара, если есть подозрения на причастность аварийного режима в электрической проводке сгоревшего объекта, необходимо ответить на два вопроса:

был ли аварийный режим в электропроводке сгоревшего объекта?

если аварийный режим был, то когда он произошел: до пожара или во время пожара?

Установление факта существования аварийного режима по признакам, отмеченным выше, в ряде случаев довольно затруднительно. Действительно, при к. з. срабатывание защиты может и не произойти, если место к. з. будет расположено на значительном удалении от источника электрической энергии или защита бу-

дет сильно «загрублена». В то же время срабатывание защиты еще не позволяет определить место возникновения аварийного режима. Обычно это место устанавливается путем поиска места оплавления проводников. Оплавление же проводников в свою очередь может быть вызвано двумя причинами: током к. з. или температурой пожара.

Термические процессы в электрических проводниках при аварийных режимах существенно отличаются от термических процессов в них при попадании их в очаг пожара. При протекании по ним токов аварийного режима, например тока к. з., месте к. з. они сопровождаются физико-химическим взаимодействием между атомами и ионами металла проводников. Уровень взаимодействия определяет форму и размер оплавления, а также структуру близлежащего основного металла. К тому же они носят исключительно локальный характер и чрезвычайно скоротечны. Следствием этого, как правило, являются незначительное количество расплавленного металла, высокие температуры нагрева и неизбежность образования зоны резкого перехода от структуры расплавленного металла к исходной.

Тепловые процессы в проводниках при попадании их в зону пожара характеризуются сравнительно низкими скоростями изменения температуры. Область распространения температуры вдоль проводника за счет теплопроводности значительна, поэтому образование существенных структурных градиентов в проводниках в этом случае исключается.

При первичном к. з., т. е. когда оно предшествует пожару, пережог проводников в месте к. з. происходит в среде с нормальной температурой. При этом температура проводника может отличаться от нее на величину, которая считается допустимой по условиям эксплуатации. Нагретый проводник как в зоне к. з., так и по всей своей длине успевает остыть до температуры окружающей среды, прежде чем он будет нагрет теплом пожара, если он возникает в результате к. з.

При вторичном к. з. пережог проводников в месте к. з. происходит в среде с повышенной температурой. Разница между температурами металла в месте расплавления и окружающей среды меньше, чем при первичном к. з. Это неизбежно должно найти свое отражение на скорости остывания металла токоведущих жил

в месте их расплавления током к. з. При оплавлении проводников от тепла пожара темп нагрева и остывания значительно ниже, чем при нагреве токами к. з. Различие в характере протекания термических процессов в проводниках сказывается на ходе структурных процессов в токоведущих жилах.

32. СТРУКТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОВОДНИКАХ ПРИ ИХ НАГРЕВЕ

Известно, что исходная структура токоведущих жил проводников характеризуется наличием аксиальной текстуры [60], которая возникает при действии осесимметричных напряжений во время волочения. Для меди

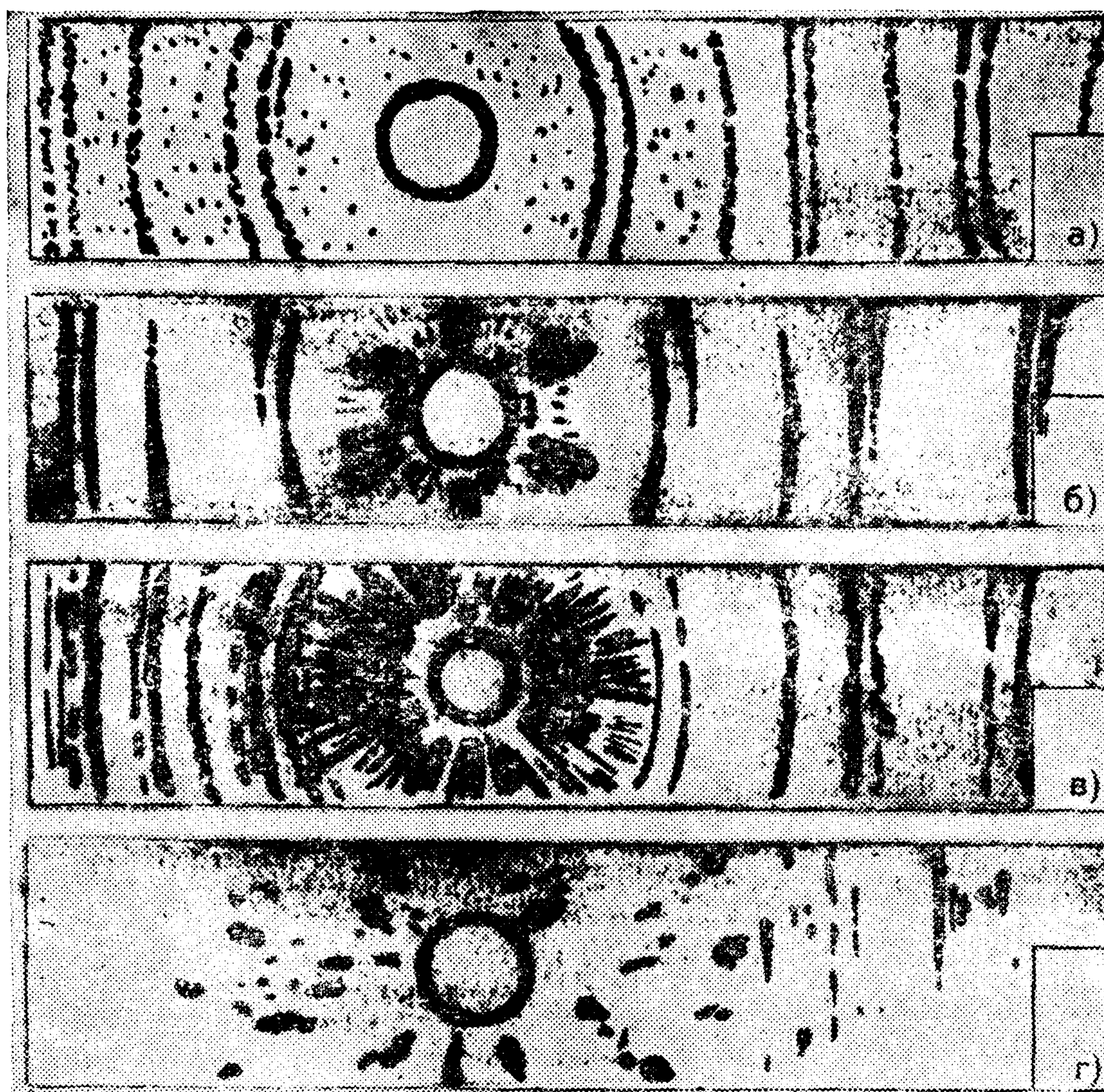


Рис. 45. Рентгенограммы алюминиевых проводников.

а — внешний нагрев $400^{\circ}\text{C} \times 20$ мин; б — внутренний нагрев $3,5/_{\text{дл.доп}} \times 10$ мин; в — оплавление током к. з. ($10/_{\text{дл.доп}}$); г — оплавление в костре.

и алюминия, имеющих гранецентрированную структуру, текстура по ориентации зерен в основном состоит из двух компонент: $\{111\}$ и $\{100\}$. Соотношение этих компонент в меди и алюминии неодинаково. При внешнем

нагреве проводников (нагрев от внешнего источника тепла) процесс рекристаллизации в токоведущих жилах проходит под влиянием исходной текстуры деформации. При нагреве ниже температуры плавления в токоведущих жилах проводников происходит процесс укрупнения зерна (рис. 45,а и 46,а). При нагреве выше температуры плавления и последующем остывании в месте оплавления образуется крупноблочная структура

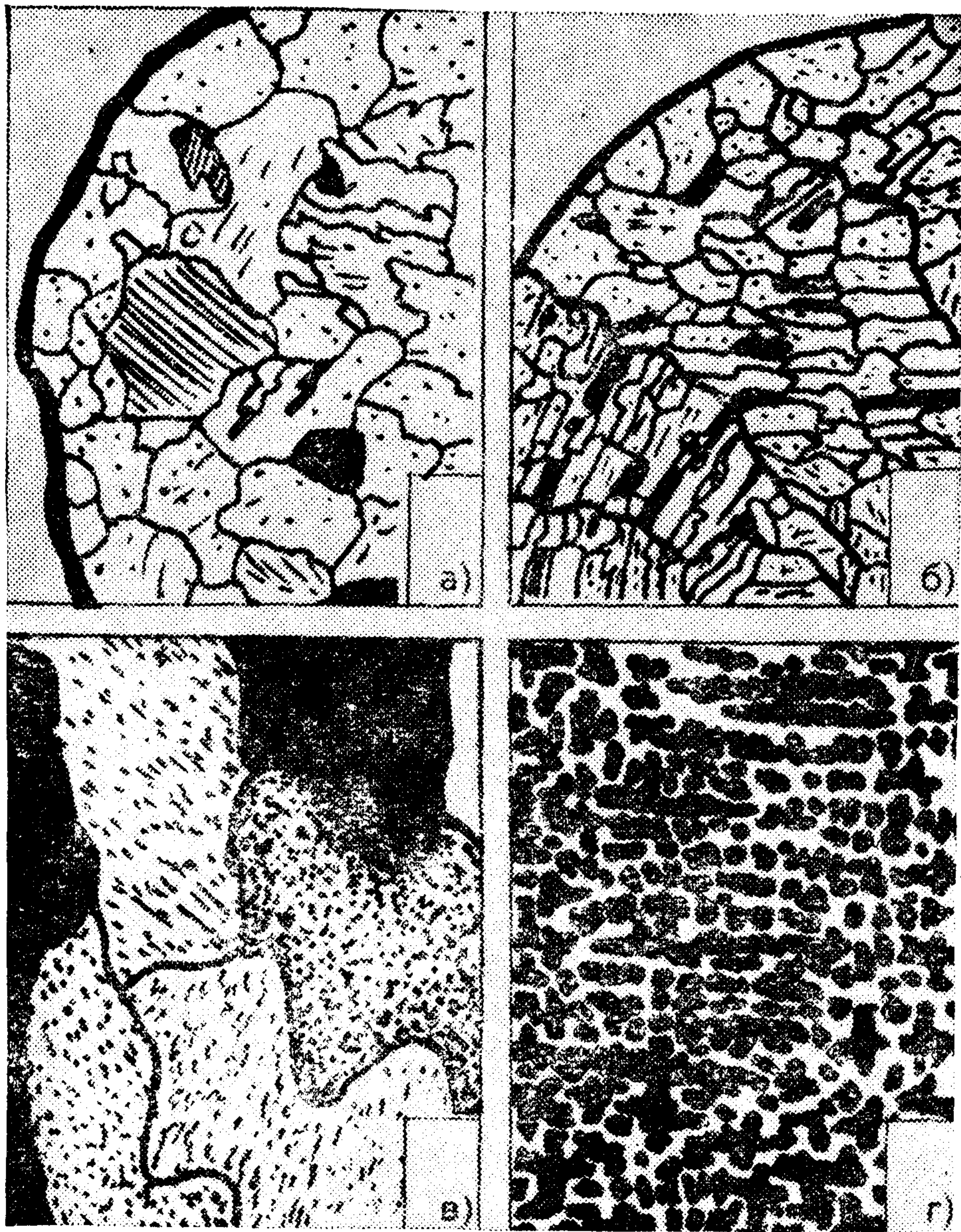


Рис. 46. Микроструктура медных проводников.

а — внешний нагрев $600^{\circ}\text{C} \times 20$ мин; б — внутренний нагрев $3,5 I_{\text{дл.доп}} \times 10$ мин; в — оплавление в костре; г — оплавление током к. з. ($15 I_{\text{дл.доп}}$).

(рис. 45,г и 46,в). На рентгенограммах с оплавленных алюминиевых проводников фиксируется монокристаллическая структура. Дифракционные линии — признак поликристалличности структуры — выражены слабо. Локальность оплавления при внешнем нагреве не характерна. Форма образующегося оплавления зависит от положения проводника в пространстве. Значительная

теплопроводность проводниковых материалов, а также незначительные скорости нарастания и уменьшения температуры, свойственные реальным пожарам, являются причиной того, что проводники прогреваются от места воздействия источника тепла на значительную длину. Поэтому процессы возврата охватывают значительную часть проводников от места оплавления. Это хорошо видно на рис. 47, на котором показана структура проводника, оплавленного от внешнего источника тепла. Она включает в себя как зону кристаллизации, так и зону рекристаллизации.



Рис. 47. Изменение микроструктуры вдоль медного проводника, оплавленного в костре.

1 — зона оплавления; 2 — зона вторичной кристаллизации; 3 — зона первичной кристаллизации.

При нагреве проводников электрическим током, как это показано в гл. 4, распределение температуры в токоведущих жилах происходит по параболическому закону. Одновременно имеет место разница в температурах окружающей среды и нагрева токоведущей жилы. Возникает температурный градиент, который оказывает сильное влияние на ход процесса рекристаллизации и характер образующейся структуры. При нагреве алюминиевых проводников током $3 I_{\text{дл. доп}}$ и более происходит усиление текстуры деформации, сопровождающееся появлением внутренних напряжений. На рентгенограммах алюминиевых проводников наблюдается эффект астеризма (рис. 45,б,в). Нагрев медных проводников ведет к образованию в микроструктуре токоведущих жил большого количества двойников отжига, причем ориентация их в пределах одного блока одинаковая (рис. 46,б). Эффект астеризма на рентгенограммах медных проводников при нагреве их электрическим током не наблюдается, что связано с двоякой ориентацией кристаллитов. Рекристаллизация проходит при более благо-

приятных условиях, в результате чего образуются кристаллы, близкие к равноосным.

Оплавление проводников при аварийном режиме может произойти при их замыкании между собой (локальное к. з.) и прохождении по ним сквозных токов к. з.

Поскольку термические процессы в проводниках при воздействии на них токов к.з. очень скоротечны, то процессы кристаллизации в зоне оплавления регулируются количеством запасенного тепла в месте оплавления и температурой окружающей среды. В свою очередь количество запасенного тепла зависит от температуры нагрева расплавленного металла и размеров оплавления.

Если оплавление проводников происходит при нормальной температуре окружающей среды, что по своей сути характеризует случай первичного к. з., скорость остывания металла в месте оплавления будет очень высокой. При этом следует ожидать проявления признаков, характерных для скоротечной кристаллизации.

На рис. 46,2 и 48 приведены микроструктуры медных проводников, оплавленных током к. з. Как видно из них, в месте оплавления образуются трехмерные дендриты, что отвечает общей закономерности дендритного разветвления металлических фаз, имеющих гранецентрированную решетку. Формирование правильной объемной решетки ветвей дендритов затруднено вследствие неоднородности и ограниченности фронта кристаллизации. Отдельные ветви вскоре после начала роста деформируются вследствие ускоренного роста соседних ветвей. Другие же, напротив, растут быстрее и, развивая ветви высшего порядка, препятствуют росту соседних дендритов. Часто блокирующие ветви срастаются, искривляются при сближении, а то и вовсе разрушаются. Степень разветвленности дендритов увеличивается с ростом тока к. з. Объясняется это, по-видимому, уменьшением времени диффузионного отвода примесей. Быстрое развитие ветвей дендритов при кристаллизации в месте оплавления, вызванного током к. з., может быть связано также с необходимостью быстрого отвода скрытой теплоты кристаллизации, выделяющейся на поверхности растущих кристаллов, так как концы веток дендритов в смысле отвода теплоты и, следовательно, в отношении роста находятся в наиболее благоприятных условиях. Интенсивному росту и развитию столбчатой кристаллизации способствует также наличие значитель-

ного температурного градиента и перегрева металла в месте плавления.

При больших значениях тока к. з. происходит испарение и выбрасывание расплавленного металла, в результате чего в зоне оплавления (в зоне пережога) на-

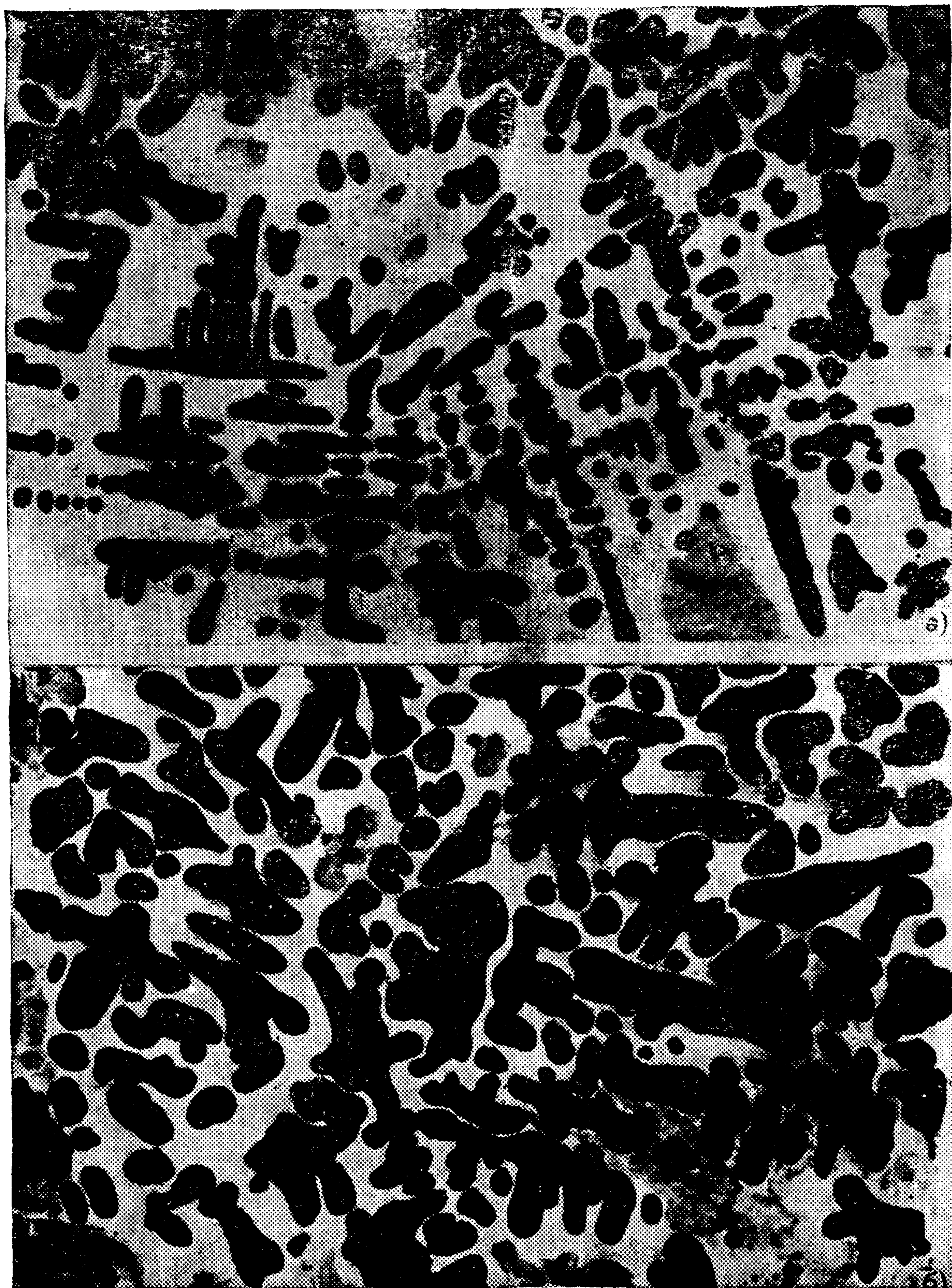


Рис. 48. Микроструктура медных проводников в месте оплавления от воздействия тока к. з.
а — 125 А; б — 75 А.

блюдается лишь незначительное укрупнение зерна. Характерной особенностью структуры в зоне оплавления алюминиевых проводников является появление внутренних напряжений. На рентгенограммах с места оплавления наблюдается эффект астеризма (рис. 45,в) [61].

Выраженность эффекта астеризма (в настоящее время не существует методов количественной оценки выраженности эффекта астеризма) усиливается с ростом тока к. з. При больших кратностях тока к. з. выраженность эффекта астеризма ослабевает, поскольку процессы кристаллизации не возникают из-за испарения расплавленного металла.

При оплавлении проводников током к. з. в среде с повышенной температурой, что по своей сути означает вторичное к. з., проявление признаков, характерных для кристаллизации при нормальной температуре окружающей среды, не наблюдается.

В общем случае независимо от вида источника тепла, воздействующего на проводник, оплавление последнего происходит лишь в той его части, которая попадает в зону действия температуры, равной или превышающей температуру плавления проводника. Определение размеров зоны, имеющей такую температуру, по визуальным признакам возможно, если оплавление проводников не сопровождается нарушением их протяженности. Если от термического воздействия проводник претерпел разрыв, то определить по визуальным признакам причину оплавления проводника становится затруднительно. В этих условиях особое значение приобретает исследование структуры проводника в зоне пережога. Протяженность зоны термического воздействия на проводник при локальном к. з. зависит от значения тока к. з. и его продолжительности. С ростом тока к. з. темп нарастания температуры в месте к. з. еще более увеличивается, но ускорения отдачи тепла вдоль проводника не происходит из-за теплового сопротивления проводниковых материалов. Поэтому вся теплота практически будет расходоваться на нагрев металла в месте к. з. с последующим его испарением и разбрызгиванием в виде отдельных частиц и капель. Рекристаллизационные процессы будут проходить только за счет теплоты, которая аккумулирована вблизи зоны пережога. На рис. 49 показана структура медного проводника в зоне пережога током к. з. Из нее видно, что ширина переходной зоны от структуры в зоне оплавления до исходной структуры незначительна.

Различие в структурах проводников при воздействии на них токов аварийного режима и внешнего источника тепла позволяет в ряде случаев определять причину их

оплавления. Рассмотрим пример. На исследование были представлены провода АПР-2,5 со следами оплавления и провода ПР-1,5 со следами обугливания изоляции изнутри. В постановлении на проведение экспертизы были заданы два вопроса:

1. Какова причина оплавления токоподводящих проводов?

2. Если оплавление проводов произошло от тока к. з., то когда оно произошло: до возникновения пожара или во время пожара?

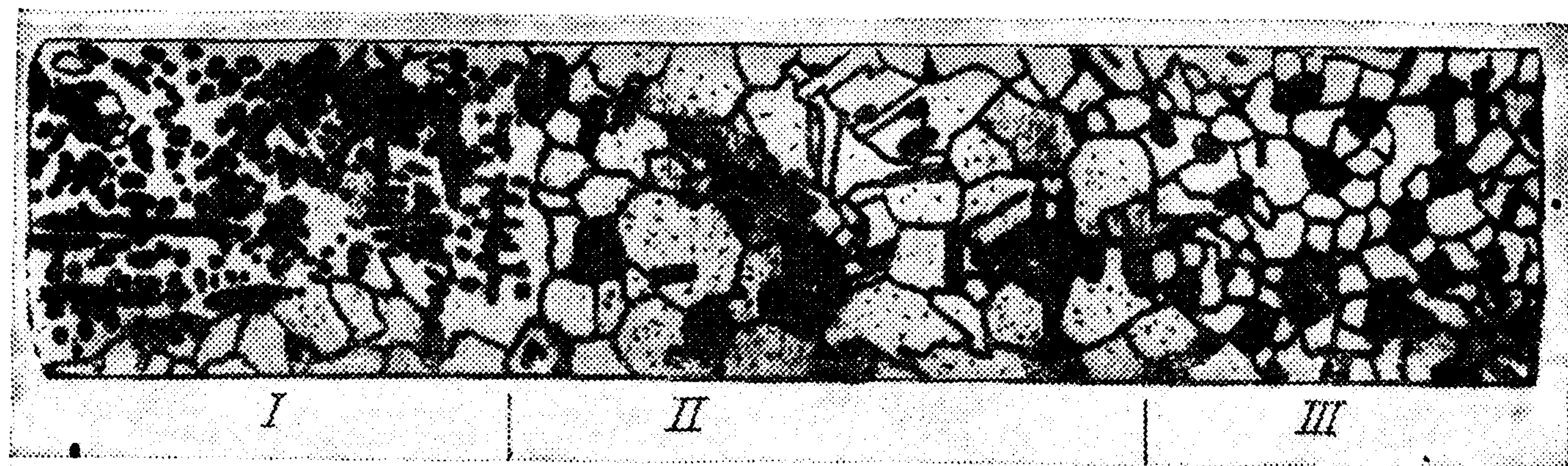


Рис. 49. Изменение микроструктуры вдоль медного проводника, оплавленного током к. з. 100 А.

I — зона оплавления; *II* — зона рекристаллизации; *III* — исходная структура.

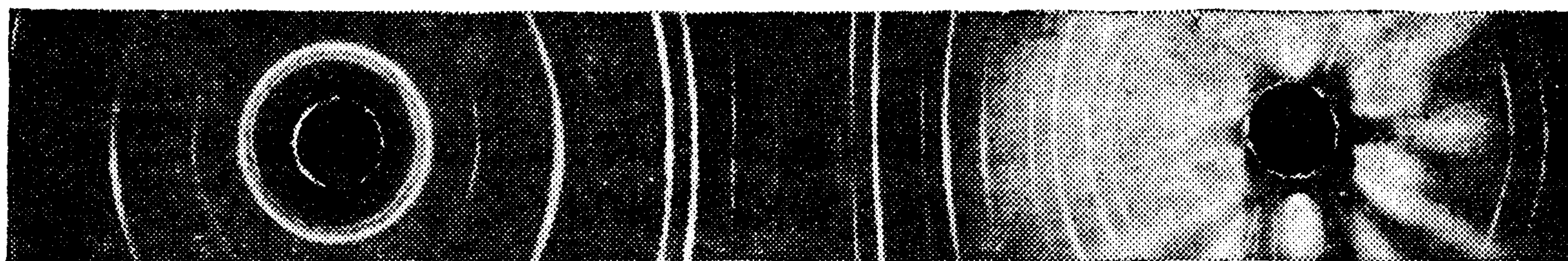


Рис. 50. Рентгенограмма с оплавленного алюминиевого проводника АПР-2,5.

Для определения причины оплавления проводов АПР-2,5 была снята рентгенограмма с места оплавления (рис. 50). Как следует из нее, оплавление вызвано током к. з. (наличие на ней эффекта астеризма). Сплошность дифракционных линий и выраженность астеризма свидетельствуют о том, что температура проводов в момент к. з. была близка к нормальной (следовательно, и температура окружающей среды в момент к. з. также была близка к нормальной). Это подтверждается и сохранившейся резиновой изоляцией в зоне оплавления проводов. Анализ образцов, изъятых из провода ПР-1,5,

показал, что они были нагреты до температуры порядка 700—750°C (по числу и интенсивности линий окисных фаз). Исходя из того, что снаружи изоляция проводов ПР-1,5 не повреждена, а изнутри обуглена (по поверхности прилегания к токоведущей жиле), следует, что через них проходил ток аварийного режима небольшой продолжительности. Все это позволяет сделать следующие выводы: оплавление проводов АПР-2,5 произошло от воздействия тока к. з. и аварийный режим был первичным.

При первичном к. з. структура, сформировавшаяся в зоне пережога, может подвергаться в дальнейшем термическому воздействию пожара. Возникает вопрос, насколько она устойчива к этому воздействию и каковы температурные пределы, чтобы было возможным определение причины оплавления проводников. Исследования показали, что последующий отжиг ликвидирует те особенности в структуре, которые характерны при пережоге проводников током к. з. при нормальной температуре окружающей среды. Так, эффект астеризма на рентгенограммах ослабевает, что свидетельствует о снятии внутренних напряжений в алюминиевых проводниках. Дендритные образования в зоне оплавления в медных проводниках претерпевают качественное изменение, выражающееся в участии их в процессах возврата. Оценка характера термического воздействия токов к. з. на проводник, вызывающих его оплавление, возможна, если последующее тепловое воздействие не вызывает интенсивного процесса рекристаллизации.

ПРИЛОЖЕНИЕ

К ВОПРОСУ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ ОТ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК В ЗДАНИЯХ

Как уже отмечалось, в настоящее время во всех отраслях народного хозяйства ведутся интенсивные работы по развитию и совершенствованию технических и организационных мероприятий, призванных обеспечить надежную защиту народного достояния, жизнь и здоровье граждан от огня пожара. Теоретически можно создать такую систему мер, которая бы полностью обеспечила пожарную безопасность. Однако это может быть сопряжено со значительными материальными затратами, что в целом, возможно, окажется нерациональным для общества по экономическим или другим критериям. В этой связи возникает важная задача: найти метод оптимизации системы пожарной защиты, обеспечивающей максимальный уровень безопасности людей при пожарах, при заданных приведенных затратах. Однако не ясно, как количественно оценивать уровень пожарной безопасности (или сопряженную величину — уровень воздействия опасных факторов пожара на человека) при возникновении пожара в здании, спроектированном в полном соответствии с противопожарными требованиями строительных норм и правил. Рассмотрим один из возможных путей решения этой задачи.

Воздействия опасных факторов пожара (ОФП) на людей являются типичными случайными явлениями (событиями). Поэтому показатели, характеризующие возможную опасность воздействия ОФП, следует давать в рамках теории вероятностей. В частности, условимся уровень опасности воздействия ОФП принимать численно равным вероятности воздействия ОФП (Q_v). Соответственно количественной мерой уровня пожарной безопасности будет вероятность предотвращения воздействия ОФП на человека при пожаре, т. е.

$$P_v = 1 - Q_v. \quad (П1)$$

Рассмотрим здание, имеющее K противопожарных отсеков. В каждом отсеке имеется m помещений, которых размещено по x электроустановок. Кроме того, в каждом помещении может находиться определенное число людей. Примем следующие допущения:

1) конструктивные параметры здания позволяют осуществлять успешную эвакуацию при пожаре всех находящихся в нем людей за расчетное время;

2) численные значения и качественный состав ОФП не зависят от места возникновения пожара в здании;

3) воздействие ОФП на всех людей одинаково;

4) вероятность воздействия ОФП принимается равной нулю, если значения их лежат в области меньших значений, чем расчетные;

5) по мере увеличения численных значений ОФП при одной и той же длительности их действия на человека степень поражения человека непрерывно возрастает, т. е. при любой норме на допустимые наибольшие значения ОФП, превышающей верхнюю границу практически абсолютно безопасных значений, всегда существует некоторая вероятность получить травму, отравление или погибнуть.

Воздействие ОФП на человека при пожаре от электроустановки в отсеке здания может иметь место при трех одновременно протекающих независимых событиях: пожаре от электроустановки в отсеке (ПЭ), попадании человека (Ч) в зону действия ОФП и отказе пожарной защиты (ПЗ). Переходя к вероятностям, имеем:

$$Q_v = Q(ПЭ) \cdot Q(Ч) \cdot Q(ПЗ), \quad (П2)$$

где $Q(ПЭ)$ — вероятность возникновения пожара от электроустановки; $Q(Ч)$ — вероятность попадания человека в зону действия ОФП; $Q(ПЗ)$ — вероятность отказа пожарной защиты.

Формулы определения вероятностей, входящих в (П2), имеют вид:

$$Q(ПЭ) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} \prod_{j=1}^{j=x} [1 - Q(ПЭ)_{i,j}]; \quad (П3)$$

$$Q(Ч) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} \prod_{z=1}^{z=l} [1 - Q(Ч)_{i,z}], \quad (П4)$$

$$Q(ПЗ) = 1 - \prod_{i=1}^{i=m} [1 - Q(ПЗ)_i], \quad (П5)$$

где $Q(ПЭ)_{i,j}$ — вероятность возникновения пожара в i -м помещении от j -й электроустановки; $Q(Ч)_{i,z}$ — вероятность попадания z -го человека i -го помещения под воздействием ОФП; $Q(ПЗ)_i$ — вероятность отказа пожарной защиты в i -м помещении ($i=1, 2, 3, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, x$, $z=1, 2, \dots, l$).

Численные значения этих вероятностей могут быть определены по данным пожарной статистики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон Г. Ю., Филиппов В. И., Яроченко З. А. Электротравматизм на производстве. — Л.: Лениздат, 1973. — 214 с.
2. **Электробезопасность** в горнодобывающей промышленности/ Л. В. Гладилин, В. И. Шуцкий, Ю. Г. Бацежев, Н. И. Чеботаев. — М.: Недра, 1977. — 327 с.
3. **Ревякин А. И., Осинковский А. И.** Методы исследования электрических параметров человека. — Безопасность труда в промышленности, 1977, № 6, с. 47—48.
4. **Охрана труда в электроустановках/ Б. А. Князевский, Т. П. Марусова, Н. А. Чекалин, Н. В. Шипунов.** — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1977. — 320 с.
5. **Долин П. А.** Основы техники безопасности в электрических установках. — М.: Энергия, 1970. — 336 с.
6. **Кузнецов А. И.** Техника безопасности в электрических установках. — М.: Госэнергоиздат, 1952. — 352 с.
7. **Ревякин А. И., Осинковский А. И.** Применение графов в электробезопасности. — Труды МЭИ. Безопасность труда в электроэнергетике, вып. 232, 1975, с. 10—20.
8. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973. — 750 с.
9. **ГОСТ 12.1.009-76.** Электробезопасность. Термины и определения.
10. **Ревякин А. И., Осинковский А. И.** Автоматические меры защиты в электроустановках. — М.: МЭИ, 1976. — 41 с.
11. **Правила устройства электроустановок.** — М.: Энергия, 1966. — 464 с.
12. **Вайнштейн Л. И.** Меры безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. — М.: Энергия, 1977. — 176 с.
13. **Инструкция по устройству сетей заземления и зануления в электроустановках. СН-102-76.** — М.: Стройиздат, 1977. — 63 с.
14. **Шипунов Н. В., Ревякин А. И.** О времени срабатывания защитного отключения. — Промышленная энергетика, 1969, № 2, с. 17—18.
15. **Князевский Б. А., Ревякин А. И.** Некоторые вопросы электробезопасности. — Промышленная энергетика, 1977, № 2, с. 38—40.
16. **Карякин Р. Н.** Исследования и разработки в области повышения электробезопасности. — Промышленная энергетика, 1974, № 9, с. 2—6.
17. **Об изменении норм на заземляющие устройства электроустановок напряжением выше 1000 В с заземленной нейтралью/ В. В. Бургсдорф, А. С. Беляев, С. Г. Королев и др.** — Электрические станции, 1975, № 3, с. 35—39.

18. **Надежность и электробезопасность электрооборудования в районах Крайнего Севера.** — В кн.: Материалы научно-технического совещания. — Норильск: 1977, с. 38—50.

19. **Шипунов Н. В., Ревякин А. И.** Условия эффективности защитного отключения на токе нулевой последовательности. — Промышленная энергетика, 1969, № 3, с. 28—31.

20. **Ревякин А. И., Белюстин О. Н., Маленко А. Ф.** Исследование небаланса в трансформаторах тока нулевой последовательности. — Труды МЭИ. Расчет, конструирование, технология производства и эксплуатация элементов электротехнических устройств, 1976, вып. 296, с. 72—76.

21. **Шипунов Н. В., Ревякин А. И., Щербина В. П.** Некоторые особенности работы трансформаторов тока нулевой последовательности в схемах защитного отключения. — Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1972, № 5, с. 15—18.

22. А. с. 181176 (СССР). Защитно-отключающее устройство/ Н. И. Орлов, Ю. Н. Кареницкий — Оpubл. в Б. И., 1966, № 9.

23. А. с. 335764 (СССР). Устройство для защитного отключения/ А. И. Ревякин. — Оpubл. в Б. И., 1972, № 3.

24. **Князевский Б. И., Ревякин А. И., Новиков С. И.** Влияние высших гармоник в сети на работу УЗО. — Труды МЭИ. Расчет, конструирование, технология производства и эксплуатация элементов электротехнических устройств, 1976, вып. 296, с. 62—65.

25. **Ревякин А. И., Осинковский А. И.** Электрический эквивалент тела человека. — Труды МЭИ. Безопасность труда в электроэнергетике, 1975, вып. 232, с. 38—43.

26. **Шипунов Н. В., Панов Б. П., Ревякин А. И.** Стабилизация чувствительности трансформатора тока нулевой последовательности в схемах защиты. — Электротехника, 1971, № 6, с. 38—39.

27. **Ревякин А. И.** О развитии защитного отключения во Франции. — Труды МЭИ. Безопасность труда в электроэнергетике, 1972, вып. 106, с. 14—17.

28. **Шипунов Н. В., Ревякин А. И.** Методика определения уставки схем защитного отключения на токе нулевой последовательности. — Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1969, № 6, с. 1—4.

29. **Ревякин А. И.** Обоснование предельных уставок унифицированного ряда устройств защитного отключения для сетей с заземленной нейтралью. — Труды МЭИ. Конструирование, технология производства и эксплуатация элементов электромеханических устройств, 1977, вып. 342, с. 87—94.

30. **Панов Б. П., Ревякин А. И., Шипунов Н. В.** Необходимые условия реализации систем с самоконтролем и критерий самоконтроля. — В кн.: Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968—1969 гг. Секция электромеханическая. Подсекция охраны труда. — МЭИ, 1969, с. 41—47.

31. **Ревякин А. И., Осинковский А. И.** Синтез цифровых схем защиты. — Труды МЭИ. Безопасность труда в электроэнергетике, 1975, вып. 232, с. 55—63.

32. **Ревякин А. И.** Бесконтактные аппараты защитного отключения. — Труды МЭИ. Безопасность труда в электроэнергетике, 1972, вып. 106, с. 5—13.

33. **Ревякин А. И.** Схемы бесконтактных аппаратов защитного отключения. — Безопасность труда в промышленности, 1974, № 1, с. 24.

34. А. с. 481381 (СССР). Устройство для ограничения напряжения холостого хода сварочных трансформаторов/ А. И. Ревякин. — Опубл. в Б. И., 1975, № 31.
35. Цапенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. — М.: Энергия, 1972. — 150 с.
36. Кашолкин Б. И., Поединцев И. Ф. Статистика пожаров от электроприборов. — Вопросы экономики в пожарной охране, вып. 3. — М.: изд. ВНИИПО, 1974, с. 68—72.
37. РСФСР в цифрах в 1974 г. Краткий статистический сборник. — М.: Статистика, 1975. — 112 с.
38. Будзко И. А., Якобс А. И. Электрификация сельского хозяйства в девятой пятилетке и перспективы ее дальнейшего развития. — Электричество, 1976, № 4, с. 1—9.
39. ГОСТ 12.1.004-76. Пожарная безопасность. Общие требования.
40. Смелков Г. И., Кашолкин Б. И., Поединцев И. Ф. Справочник по пожарной безопасности электропроводок и электронагревательных приборов. — М.: Стройиздат, 1977. — 193 с.
41. Бабилов М. А. Электрические аппараты. Часть 1. — М.: Госэнергоиздат, 1951. — 414 с.
42. Смелков Г. И., Кашолкин Б. И., Поединцев И. Ф. Пожарная опасность коротких замыканий в открытых электропроводках. — Промышленная энергетика, 1974, № 4, с. 7—9.
43. Кашолкин Б. И. О некоторых результатах анализа материалов пожарно-технических станций по исследованию пожаров от электрических причин. — Труды ВНИИПО. Пожарная профилактика, 1979, вып. 15, с. 82—101.
44. Смелков Г. И., Кашолкин Б. И., Шестаков В. А. Анализ статистических данных по пожарам от электроустановок. — В кн.: Горение и проблемы тушения пожаров. — М.: ВНИИПО, 1977, с. 3—6.
45. Характеристики огнестойких электрических кабелей. Рекомендация МЭК. Публикация 331. Издание 1, 1970. — 10 с.
46. Szabó Z. PVC szigetelésű kábelek iválloságának vizsgálata. — Villamosenergiaipari kut. inter. kozl., 1974, s. 104—114.
47. Пожаробезопасность при однофазных коротких замыканиях на корпус/ В. А. Благинин, Д. В. Вилесов, В. А. Панов, В. В. Терещенко. — Судостроение, 1975, № 11, с. 30—32.
48. Волков О. М. Противопожарная защита вычислительных центров. — М.: Стройиздат, 1973. — 74 с.
49. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. — М.: Наука, 1969. — 400 с.
50. Стекло. Справочник/ Под ред. Н. М. Павлушкина. — М.: Стройиздат, 1973. — 487 с.
51. Залесский А. М. Основы теории электрических аппаратов. — М.: Высшая школа, 1974. — 184 с.
52. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. — М.: Химия, 1972, 414 с.
53. Электроснабжение промышленных предприятий/ Н. А. Казак, Б. А. Князевский, С. С. Лазарев, Д. С. Лившиц. — М.: Энергия, 1966. — 535 с.
54. А. с. 263723 (СССР). Устройство для защиты электроустановок/ Н. В. Шипунов, А. И. Ревякин. — Опубл. в Б. И., 1970, № 8.

55. А. с. 369520 (СССР). Устройство для контроля исправности вентилей/ А. И. Ревякин, Н. В. Шипунов. — Оpubл. в Б. И., 1973, № 10.

56. Ковачек И., Рутковски Е. Охрана труда и пожарная безопасность в газовом хозяйстве. — М.: Стройиздат, 1977. — 191 с.

57. Herpol C., Minne R., Van Outryve E. Biological evaluation of the toxicity of gases produced under fire conditions by synthetic materials «Combust». Sci. and Technol., 1975, 12, № 4—6, p. 8—12.

58. Ziegman L. Technika gaszenia urra, dzen elektrycznych pod napie, ciem. — Przeglada, d pozarniczy, 1974, t. 62, № 12, s. 6—8.

59. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. — М.: Стройиздат, 1975. — 240 с.

60. Вешняков Я. Д. Дефекты упаковки в кристаллической структуре. — М.: Металлургия, 1970. — 215 с.

61. А. с. 421919 (СССР). Способ определения причины оплавления проводников/ Г. И. Смелков, Б. И. Кашолкин, Ю. Я. Томашпольский. — Оpubл. в Б. И., 1974, № 12.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

А. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Глава первая. Действие электрического тока на организм человека	5
1. Электротравмы	5
2. Электрические параметры тела человека	8
3. Первичные критерии электробезопасности	12
Глава вторая. Анализ электробезопасности в электроустановках	14
4. Классификация условий поражения человека в электроустановках и причин их возникновения	14
5. Анализ условий поражения в электроустановках	15
6. Влияние аварийных режимов работы электроустановок на электробезопасность	23
7. Вероятностная характеристика электротравмы	27
8. Классификация электроустановок и помещений	28
Глава третья. Защитные меры в электроустановках	31
9. Классификация защитных мер	31
10. Зануление в электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью	36
11. Заземление в электроустановках напряжением выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью	41
12. Защитное отключение в электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью	45
13. Защитные меры в электроустановках с изолированной нейтралью	69

Б. ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИТА В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Глава четвертая. Пожарная опасность электроустановок	77
14. Статистика пожаров от электроустановок	77
15. Понятие пожарной опасности электроустановок и пути ее снижения	83
16. Пожарная опасность электроустановок	85
17. Пожарная опасность касания токоведущих элементов электроустановок заземленных конструкций (замыкания на землю)	108
18. Пожарная опасность электрических контактов	109
	155

19. Пожарная опасность ферромагнитных конструкций, расположенных вблизи токоведущих частей	112
20. Пожарная опасность раскаленных частиц и электрических искр	113
Глава пятая. Предотвращение пожаров в электроустановках	115
21. Общие положения	115
22. Предотвращение аварийных режимов и их последствий	116
23. Предотвращение пожаров в кабельных проводках	119
24. Предотвращение пожаров и пожарная защита в вычислительных центрах	122
25. Некоторые сведения об автоматическом обнаружении пожаров и загораний	125
26. Предотвращение пожаров в трансформаторах	127
Глава шестая. Техника безопасности при тушении пожаров в электроустановках	128
27. Действие продуктов горения на организм человека	128
28. Предотвращение поражения людей электрическим током при тушении пожаров	131
Глава седьмая. Исследование причастности аварийных режимов в электропроводках к возникновению пожара	134
29. Некоторые сведения о выполнении электротехнических экспертиз при исследовании причин пожаров	134
30. Анализ достоверности версии о причастности электрического тока к возникновению пожара	137
31. Обоснование возможности оценки причастности аварийных режимов в электропроводках к возникновению пожаров	139
32. Структурные процессы в проводниках при их нагреве	141
Приложение	149
Список литературы	151

Ревякин А. И., Кашолкин Б. И.

**Р32 Электробезопасность и противопожарная защита
в электроустановках. — М.: Энергия, 1980. — 160 с.,
ил.**

50 к.

В книге изложены условия возникновения электротравм и пожаров в электроустановках, методы их предотвращения, а также новейшие достижения науки и техники в рассматриваемых вопросах и их практическая реализация в электроустановках.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования, монтажа и эксплуатации электроустановок. Может быть полезна студентам энергетических и электротехнических институтов.

Р $\frac{30312-312}{051(01)-80}$ 111-80. 2302050000

**ББК 31.29
6П2.1.081**

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ РЕВЯКИН
БОРИС ИВАНОВИЧ КАШОЛКИН

**Электробезопасность и противопожарная защита
в электроустановках**

Редактор издательства И. И. Лобышева

Обложка художника В. П. Осипова

Технический редактор Н. Н. Хотулева

Корректор З. Б. Драновская

ИБ № 2261

Сдано в набор 29.07.80

Подписано в печать 07.05.80

Т-09544

Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литературная

Печать высокая Усл. печ. л. 8,4 Уч.-изд. л. 8,86

Тираж Доп. 40 000 экз. Заказ 726 Цена 50 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Издательство «Энергия» в 1981 году выпустит следующие многокрасочные плакаты по технике безопасности в электроустановках сельскохозяйственных предприятий:

ОБЛУЧАТЕЛЬ ДОЛЖЕН БЫТЬ ЗАЗЕМЛЕН.

На плакате изображен свинарник, где свинарка с помощью лампы 220 В с трехштырьковым штепсельным разъемом облучает поросят.

ПРИМЕНЯЙ ГЕРМЕТИЧЕСКУЮ РОЗЕТКУ.

Показана конюшня с установленной на стене розеткой для включения аппарата для чистки лошадей. Крупным планом показан трехштырьковый специального исполнения штепсельный разъем с заземляющим контактом.

ЗАЩИЩАЙ ПОМЕЩЕНИЯ ОТ ГРОЗЫ

Указан способ защиты вводов в производственные помещения от проникновения по электропроводке грозовых перенапряжений путем заземления крюков и штырей изоляторов ВЛ и устройства повторного заземления.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПОДКЛЮЧАТЬ К ОДНОМУ РУБИЛЬНИКУ НЕСКОЛЬКО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.

Плакат напоминает о запрещении подключения к рубильнику нескольких сельскохозяйственных машин.

УДАЛИ ЛЮДЕЙ. ВКЛЮЧАЙ НАПРЯЖЕНИЕ.

Плакат напоминает, что подавать напряжение на электроустановки теплицы парника категории А можно, лишь убедившись в отсутствии людей на участке.

ОБОРУДУЙ ЗВУКОВЫМИ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫМИ СИГНАЛАМИ ТРАНСПОРТЕРЫ И ДРУГИЕ ПРОТЯЖЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ.

На плакате изображены транспортер по раздаче кормов и сигнальное устройство.

ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЕ МАШИНЫ ДОЛЖНЫ ОБСЛУЖИВАТЬСЯ РАБОЧИМИ, ИМЕЮЩИМИ I КВАЛИФИКАЦИОННУЮ ГРУППУ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ.

На плакате изображена одна из электрифицированных машин.

ПРИМЕНЯЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В ИСПОЛНЕНИИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕМ УСЛОВИЯМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

На плакате показаны 5 категорий помещений по условиям окружающей среды.

Плакаты высылаются наложенным платежом по мере выхода их из печати в течение года магазином № 170 Москниги (121096, Москва, 121096, ул. Василисы Кожиной, д. 10. Телефон 145-61-42).

Для удобства рассылки Издательство просит заказывать не менее 10 экземпляров того или иного наименования.

При оформлении заказа на плакаты просим обратить особое внимание на количество заказываемых экземпляров, так как Издательство дополнительных тиражей не изготавливает.

Формат плакатов 45×60 см. Цена 20 коп.

Заказы на плакаты высылайте по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия». Отдел распространения.

Без печати и подписей распорядителя кредитов и главного бухгалтера заказ недействителен.