

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

На правах рукописи

ДОЛИН ПЕТР АЛЕКСЕЕВИЧ

РАБОТЫ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ  
ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ  
БЕЗОПАСНОСТИ

(05.26.01 - техника безопасности и противопожарная  
техника)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

(Диссертация на русском языке)

---

Москва

1973

Работа выполнена в Московском ордена Ленина энергетическом институте.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор Д.В.РАЗЕВИГ  
доктор технических наук, профессор В.Е.МАНОИЛОВ  
доктор технических наук, профессор В.И.ШУЦКИЙ

Ведущее предприятие - Всесоюзный государственный трест по организации и рационализации районных электрических станций и сетей (ОРГРЭС).

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " 1973 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " 1973 г.  
в ауд. \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ час. на заседании Совета электромеханического факультета МЭИ.

Отзывы в двух экземплярах направлять по адресу:  
105835 ГСП, Москва Е-250, Совет МЭИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА МЭИ

Н.А.КОЧЕМАРОВ

В нашей стране вопросам охраны здоровья трудящихся, созданию безопасных и высокопроизводительных условий труда уделяется большое и неослабное внимание.

Успешно решается намеченная программой КПСС одна из важнейших задач дальнейшего подъема народного благосостояния — задача всемерного оздоровления и облегчения условий труда.

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—75 г.г. предусматривается дальнейшее улучшение условий труда, повышение оснащенности предприятий современными средствами техники безопасности и охраны труда.

Намечена и успешно осуществляется комплексная механизация важнейших производственных процессов в промышленности, строительстве, на транспорте, в сельском хозяйстве; в широких масштабах производится механизация ручного труда; повсеместно внедряется научная организация труда и совершенное высокопроизводительное оборудование.

Неустанная забота Коммунистической партии и Советского правительства о дальнейшем совершенствовании методов производства, внедрении новой техники и прогрессивной технологии обуславливает успешное развитие экономики страны и постоянное улучшение условий труда и жизни советских людей.

В связи с этим большое значение имеет выявление и изучение безопасных условий работы при новых методах производства и, в частности, при наиболее прогрессивных способах ремонта воздушных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений — пофазном ремонте и ремонте под напряжением.

## I. Состояние вопроса и задачи исследований

Работы под напряжением на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) — это работы на действующих линиях, когда по линиям передается энергия на рабочем напряжении.

Обычно работы на действующих ВЛ имеют целью производство ремонта или замены отдельных элементов линии — деталей опор, участков провода, изоляторов и т.п. и в зависимости от условий их выполнения делятся на два вида:

- работы на отключенном проводе (фазе) в то время, как два других провода остаются под напряжением. Обычно этот вид работы называют пофазным ремонтом;

- работы на неотключенной линии, когда все три провода находятся под напряжением. Часто эти работы называют работами под напряжением или работами без отключения напряжения.

Работы по ремонту неотключенной линии в свою очередь делятся на два вида:

- работы с опор на определенном расстоянии от проводов линии, включая замену, ревизию или ремонт деталей деревянных опор, покраску металлических опор и т.п.;

- работы на проводе, т.е. с непосредственным прикосновением голыми руками к проводу, находящемуся под рабочим напряжением, по ревизии и ремонту провода, замене гирлянд изоляторов, арматуры и т.п.

Опытом установлено, что из общего объема работ, производимых при ремонте воздушных линий напряжением 35 кВ и выше, до 80-90% их может быть выполнено способами пофазного ремонта и без отключения напряжения.

Эти способы обеспечивают народному хозяйству значительную экономию, основными составляющими которой являются: предотвращение недоотпуска электроэнергии потребителям и уменьшение потерь энергии, неизбежных при отключении ремонтируемой ВЛ и переводе питания потребителей на оставшиеся в работе линии. Эти обстоятельства особенно ярко проявляются при ремонте одиночных (радиальных), а также сильно загруженных линий.

При ремонте без отключения напряжения полностью сохраняется пропускная способность линии и существующий запас устойчивости передачи. При пофазном ремонте обеспечивается передача по линии полной мощности при достаточном запасе устойчивости.

Вместе с тем ремонт действующих линий позволяет:

- не снижать надежность питания энергией потребителей, т.к. при этом схема питания и число питающих линий не меняются;
- иметь меньше резервных линий электропередачи, необходимых для производства ремонта с отключением линий;
- производить работы при участии малого количества персонала, т.к. устранение повреждений на разных фазах или участках линии может вестись в разное время, а не одновременно, как это происходит при ремонте с отключением ВЛ;
- ремонтировать линию по мере выявления дефектов, не накапливая повреждения, что нередко приводит к авариям и неизбежно при обычных ремонтах. При этом полнее используется срок эксплуатации деталей ВЛ, т.к. нет нужды заменять или ремонтировать их раньше предельного срока, что часто имеет место при ремонтах с отключением линии.

Однако методам пофазного ремонта линий и ремонта под напряжением свойственны и недостатки.

Главным из них является повышенная опасность поражения током ремонтного персонала, вследствие чего работы на действующих линиях должны поручаться специально обученным квалифицированным лицам и при этом должны выполняться дополнительные сравнительно трудоемкие операции как при подготовке линии к ремонту, так и в процессе производства работ. Кроме того при этих методах ремонта, особенно при ремонте неотключенных линий, необходимы специальные изолирующие устройства и вспомогательные приспособления, применение которых требует также дополнительных трудовых затрат.

В итоге работы на действующих линиях оказываются, как правило, более трудоемкими и, следовательно, более дорогими. Однако убытки, обусловленные повышенной стоимостью работ под напряжением и при пофазном ремонте, как правило, значительно меньше убытков, возникающих при отключении линий в ремонт, т.е. в результате недоотпуска энергии потребителям или увеличении потерь в линии, а также в результате производства операций по выводу линии в ремонт и вводу ее в работу.

Первые работы на действующих линиях электропередачи относятся к периоду Великой Отечественной войны, когда задача бесперебойного снабжения электроэнергией промышленных предприятий приобрела исключительно важное значение.

Основные принципы пофазного ремонта были разработаны в Кемеровэнерго (инж. Л.В.Небрат, инж. В.Н.Ясников и др.), где впервые в Советском Союзе было осуществлено пофазное управление линиями, которое и обусловило возможность пофазного ремонта.

Метод ремонта линий с непосредственным прикосновением человека к проводу, находящемуся под рабочим напряжением, был предложен работниками ОРГРЭС (инж. Н.Л.Астахов, В.Б.Григорьев,

С.А.Скобелев) и Свердловэнерго (инж. А.И.Понедилко).

В основу этого метода положен принцип изоляции человека от земли и от тел, имеющих иной, чем провод, потенциал.

В итоге многолетней практики и опытных работ, выполненных ОРГРЭС и некоторыми энергосистемами, были разработаны оптимальные приемы работ и Правила по ремонту действующих линий электропередачи.

При разработке Правил были использованы также результаты исследовательских работ соискателя, который является одним из авторов первых "Правил безопасности при работах на линиях без снятия напряжения" (Госэнергоиздат, 1951 г.).

В настоящее время пофазный ремонт ВЛ и ремонт под напряжением регламентируются специальными "Правилами техники безопасности при работах на линии, находящейся под напряжением", которые являются составной частью (главой VI-I) "Правил техники безопасности при эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше".

За рубежом методы ремонта действующих линий также начали привлекать внимание энергетиков. В США, Англии, Франции, Японии, Швеции и других странах в последние годы работы под напряжением начали проводиться на ВЛ практически всех напряжений.

В дальнейшем в связи с вводом в эксплуатацию линий электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжений - 500-1500 кВ следует ожидать более широкого использования методов ремонта действующих линий, поскольку отключение таких линий, в том числе и для ремонтных работ, крайне нежелательно, ибо может привести к нарушению электроснабжения большого числа потребителей и весьма значительным убыткам, обусловленным, в

первую очередь, недоотпуском электроэнергии.

Эти убытки оказываются большими и тогда, когда отключается одна из двух параллельных цепей, т.к. при этом снижается пропускная способность линии за счет уменьшения запаса устойчивости передачи. Вместе с тем имеет место и значительное снижение эксплуатационной надежности линии.

В работе выполнен анализ травматизма на эксплуатационных предприятиях энергетического хозяйства страны в том числе в электрических сетях. При этом было установлено:

- количество несчастных случаев из года в год уменьшается. Так за период 1963-1971 гг. коэффициент частоты несчастных случаев с временной утратой трудоспособности уменьшился более чем вдвое, а тяжелых - почти на 30%. Однако при этом возрос коэффициент тяжести травматизма, что уменьшает ценность снижения коэффициента частоты и требует усиления внимания борьбе с травматизмом;

- основными причинами несчастных случаев с временной утратой трудоспособности являются: падение людей с высоты, наезды и аварии транспорта, неисправность и неправильная эксплуатация станков и инструмента и т.п., сопровождающиеся обычно механическими травмами. Число травм, вызванных электрическим током, включая ожоги электрической дугой, составляют 13-14%, т.е. сравнительно небольшую часть общего числа несчастных случаев;

- основной причиной тяжелых несчастных случаев является поражение электрическим током и дугой, вызывающее до 64% случаев, т.е. больше чем все другие причины вместе взятые. Это обстоятельство требует в работе по изжитию травматизма в энергетическом хозяйстве главное внимание уделять вопросам электробезопасности;

- подавляющая часть (до 93%) тяжелых несчастных случаев в результате поражения током происходит в электрических сетях и является результатом нарушения правил при работах в местах пересечения ВЛ, вблизи действующих ВЛ, при переключениях и т.п.

- чаще всего (69-97%) поражения током происходит в результате так называемого однофазного прикосновения, что соответствует пути тока через человека рука - ноги. Сюда же относятся сравнительно редкие случаи (1-2%) прикосновения человека к корпусу электрооборудования, на котором возникло напряжение. Значительно реже человек включается между двумя проводами, когда ток в теле человека идет по пути рука - рука, и еще более редко (0,8%) имеют место поражения в результате шагового напряжения;

- большая часть несчастных случаев происходит в результате невыполнения организационных мероприятий по технике безопасности и нарушения трудовой дисциплины, т.е. может быть избежана путем хорошей организации труда на производстве.

О п а с н о с т ь   д л я   л ю д е й ,   в ы п о л н я ю щ и х   р а б о т ы   н а   д е й с т в у ю щ и х   В Л ,   э т о   в о з м о ж н о с т ь   п о р а ж е н и я   э л е к т р и ч е с к и м   т о к о м   и   д у г о й ,   а   т а к ж е   о т р и ц а т е л ь н о е   в о з д е й с т в и е   н а   о р г а н и з м   э л е к т р о м а г н и т н о г о   п о л я   л и н и и .

Поражения человека током или дугой могут быть следствием: наличия на отключенном проводе значительного потенциала, обусловленного электростатическим и электромагнитным влиянием оставшихся в работе проводов; приближения человека, работающего на линии, к частям, имеющим иной потенциал, на опасное расстояние; пробоя или перекрытия линейной изоляции или изоляции устройств и приспособлений, при помощи которых выполняются работы.

Анализ условий работ под напряжением и производственный опыт показывают, что эти опасности весьма реальны как при пофазном ремонте, так и при работах на неотключенных воздушных линиях.

Они зависят от многих факторов, в том числе: от уровня изоляции проводов линии на месте работы людей; от электрической прочности изолирующих устройств и приспособлений, применяемых при работах; от режима работы линии; атмосферных условий и в частности от наличия грозовой деятельности в районах местности, прилегающей к трассе ремонтируемой линии; от организации и технологии производства работ вследствие чего от персонала требуется строжайшее выполнение определенного порядка работ, соблюдения определенных расстояний до токоведущих или заземленных частей линии и т.п.

Задачами настоящей работы являются:

- Научное обоснование возможности безопасного производства работ на действующих воздушных линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения - пофазного ремонта с отключением одной из фаз работающей линии и ремонта под напряжением с непосредственным прикосновением человека голыми руками к проводу, находящемуся под рабочим напряжением.

- Выявление, анализ и оценка потенциальных опасностей поражения током и дугой, а также воздействия электромагнитного поля линий на людей, выполняющих работы на действующих ВЛ.

- Определение и обоснование основных условий безопасности при работах на действующих линиях, в том числе:

а) методики определения протяженности безопасной зоны - участка линии, в пределах которого могут выполняться работы

при пофазном ремонте с прикосновением к отключенному проводу;

б) наименьших допустимых по условиям безопасности уровней изоляции линий на месте выполнения работ под напряжением;

в) наименьших допустимых длин по изоляции устройств и приспособлений для работ на действующих линиях;

г) наименьших допустимых длин промежутков безопасности - воздушных промежутков между человеком, работающим с опоры, и проводом линии, а также между человеком, работающим с изолирующего устройства, и заземленными частями линии;

д) способов защиты от электрических полей при работах на ВЛ под напряжением.

## II. Анализ электрических явлений и меры безопасности при пофазном ремонте ВЛ

При пофазном ремонте персонал, выполняющий работы на отключенной фазе, находится в условиях повышенной опасности поражения током вследствие: наличия на отключенном проводе значительного потенциала, обусловленного электростатическим и электромагнитным влиянием остающихся в работе проводов; близости проводов линии, находящихся под рабочим напряжением; возможности возникновения дуги при наложении и снятии временного заземления на отключенную фазу и др.

Эти обстоятельства определяют особенности пофазного ремонта и требуют принятия специальных мер, обеспечивающих безопасные и высокопроизводительные условия работы ремонтному персоналу. Главной из этих мер является снижение до безопасного для человека значения потенциала отключенной фазы на месте производства работ путем соблюдения особых условий ее заземления. Вместе с

тем, должна быть безошибочно определена протяженность участка линии, на котором ремонтному персоналу обеспечена безопасность прикосновения к отключенному проводу. Лица, выполняющие работы, обязаны соблюдать определенные расстояния до проводов линии, находящихся под напряжением. Наложение и снятие переносного заземления с отключенного провода должно осуществляться с помощью специального дугогасящего устройства.

В работе дан анализ электрических явлений, возникающих на отключенном проводе трехфазной воздушной линии электропередачи и определены условия безопасной работы ремонтного персонала.

Вопросы рассмотрены применительно к воздушным линиям электропередачи на унифицированных опорах с горизонтальным расположением проводов, имеющим нормальное выполнение транспозиций.

**Э л е к т р о с т а т и ч е с к и й   п о т е н ц и а л**  
 $\psi_3$ , наведенный на отключенном проводе, равен алгебраической сумме потенциалов, наводимых полями оставшихся в работе фаз линии

$$\dot{\psi}_3 = \dot{\psi}_A + \dot{\psi}_B = \dot{U}_A \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{33}} + \dot{U}_B \frac{C_{23}}{C_{23} + C_{33}}$$

Для линий с горизонтальным расположением проводов и нормальной транспозицией емкости проводов относительно земли и взаимные емкости между проводами можно считать соответственно одинаковыми

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_{\text{BB}} \quad \text{и} \quad C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_{\text{AB}}$$

Эквивалентные частичные емкости, Ф/км

$$C_{\text{BB}} = \beta_{\text{BB}} + 2\beta_{\text{AB}} = \frac{(\alpha_{\text{BB}} - \alpha_{\text{AB}})^2}{\Delta}$$

$$C_{ab} = -\beta_{ab} = \frac{(\alpha_{bb} - \alpha_{ab})\alpha_{ab}}{\Delta}$$

где потенциальные коэффициенты, км/Ф

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{bb} = \alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} &= 18 \cdot 10^6 \ln \frac{2h_{cp}}{r} \\ \alpha_{ab} = \alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} &= 18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

Определитель системы уравнений Максвелла, связывающих потенциалы и заряды проводов, при равенстве потенциальных коэффициентов (2-1) равен

$$\Delta = \alpha_{bb}^2 - 3\alpha_{bb} \cdot \alpha_{ab}^2 + 2\alpha_{ab}^2$$

Тогда

$$\psi_3 = -U_c \frac{C_{ab}}{C_{ab} + C_{bb}} = -U_c \frac{\alpha_{ab}}{\alpha_{bb}} = -U_c \frac{\ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}}}{\ln \frac{2h_{cp}}{r}}$$

или

$$\psi_3 = K U_\varphi \quad (2-2)$$

Для рассматриваемых линий 35-500 кВ значение K находится в пределах 0,18-0,07.

Потенциальная характеристика отключенного и незаземленного провода, подверженного электростатическому влиянию, определяется уравнением (2-2) и является прямой линией, параллельной оси абсцисс (ось провода).

Для заземленного провода потенциальная характеристика обусловлена падением напряжения  $\psi_3$  в сопротивлении заземления  $R_3$  при прохождении через него тока  $I_3$  с провода в землю, а также падением напряжения  $U_n$  в сопротивлении провода при

прохождении по нему емкостных токов, идущих к месту заземления провода и в сумме составляющих ток  $I_z$ .

Потенциал  $\varphi_z = I_z R_z$  одинаков по всей длине провода.  $U_n$  определяется из дифференциального уравнения, выражающего падение напряжения в элементарном участке провода  $dx$ , отстоящем от начала провода на расстоянии  $x$ :

$$dU_n = \frac{I_z x}{l} \cdot Z_n \cdot dx = \frac{\varphi_z Z_n}{l R_z} x \cdot dx,$$

где  $l$  и  $Z_n$  - длина (км) и полное сопротивление (Ом/км) провода.

$$U_n = \int_x^s \frac{\varphi_z Z_n}{l R_z} x \cdot dx = \frac{\varphi_z \cdot Z_n}{l \cdot R_z} \cdot \frac{s^2 - x^2}{2}$$

Здесь  $s$  - длина провода от его начала до места заземления. Тогда уравнение потенциальной характеристики заземленного в одном месте провода будет

$$\varphi_{zz} = \varphi_z \left( 1 + \frac{Z_n}{l \cdot R_z} \cdot \frac{s^2 - x^2}{2} \right), \text{ В} \quad (2-3)$$

Таким образом отключенный и заземленный провод ВЛ вследствие электростатического влияния оставшихся в работе проводов находится под некоторым потенциалом, достигающим иногда сравнительно высоких значений. Так на отключенном проводе ВЛ 110 кВ длиной 100 км, заземленном на расстоянии 50 км от его начала через сопротивление 10 Ом, при  $I_z = 2,2$  А и  $Z_n = 0,77$  Ом/км потенциалы провода в точке его заземления и по концам равны

$$\varphi_z = 22 \text{ В}, \quad \varphi_n = \varphi_k = 43 \text{ В}.$$

При двух и более заземлениях (суммарная проводимость которых равна проводимости одиночного заземления) потенциал  $\varphi_z$  остается без изменения, а  $U_n$  уменьшается за счет уменьшения плотности тока в проводе. Вместе с тем изменяется форма потенциальной кривой.

Опасность прикосновения к проводу, находящемуся под наведенным электростатическим потенциалом, оценивается величиной тока  $I_h$ , проходящего через человека, или напряжением прикосновения  $U_{np} = I_h \cdot R_h$ , где  $R_h$  — сопротивление тела человека.

Для случая прикосновения к незаземленному проводу длиной  $l$  можно написать

$$\frac{\dot{U}_\varphi}{\frac{1}{j\omega C_{aB}l} + \frac{1}{\frac{1}{R_h} + j\omega C_{BB}l}} = \frac{\dot{U}_{np}}{\frac{1}{R_h} + j\omega C_{BB}l}$$

Откуда

$$U_{np} = U_\varphi \frac{\omega C_{aB} R_h l}{\sqrt{[\omega (C_{aB} + C_{BB}) R_h l]^2 + 1}}, \text{ В} \quad (2-4)$$

При  $R_h \leq 1000 \text{ Ом}$  и  $l < 100 \text{ км}$

$$[\omega (C_{aB} + C_{BB}) R_h l]^2 \approx 0$$

Тогда

$$U_{np} = U_\varphi \omega C_{aB} R_h l, \text{ В} \quad (2-5)$$

Прикосновение человека к заземленному проводу через сопротивление  $R_z$  можно рассматривать как повторное заземление про-

вода через сопротивление тела человека. При этом

$$U_{np} = U_{\varphi} \frac{\omega C_{aB} R_h l}{\sqrt{[\omega(C_{aB} + C_{BB})R_h l]^2 + \left(\frac{R_h + R_3}{R_3}\right)^2}}, \text{ В}$$

Поскольку, как правило,  $R_3 \ll R_h$  и  $[\omega(C_{aB} + C_{BB})R_h l] \ll \frac{R_h + R_3}{R_3}$  напряжение прикосновения будет

$$U_{np} = \omega C_{aB} R_h l, \text{ В} \quad (2-6)$$

Зона безопасного прикосновения к проводу

$$l_{dez} = S - \sqrt{S^2 - \frac{U_{np. доп} - \varphi_{3. доп}}{I_3} \cdot \frac{2l}{Z_n}}, \text{ км} \quad (2-7)$$

где  $U_{np. доп}$  - заданное допустимое напряжение прикосновения;

$\varphi_{3. доп}$  - допустимый потенциал провода в месте его заземления

$$\varphi_{3. доп} = U_{np. доп} - (S - 0,5 l_{dez}) \frac{l_{dez}}{l} \cdot Z_n I_3, \text{ В}$$

Продольная эдс, наведенная на отключенном проводе

$$\dot{E} = \dot{E}_A + \dot{E}_B = -j\omega M l (\dot{I}_A + \dot{I}_B), \text{ В}$$

или

$$E = \omega M l I, \text{ В} \quad (2-8)$$

Продольная эдс на единицу длины провода

$$E_0 = \omega M I \quad (2-9)$$

Здесь  $M$  - взаимная индуктивность между рабочим и отключенным проводом, Г/км;  $I$  - суммарный индуктирующий ток, обоих рабочих проводов, А.

С учетом транспозиции проводов их взаимные индуктивности приняты равными между собой. Для условий пофазного ремонта  $M$  можно определять по следующей приближенной формуле (полученной путем дальнейшего упрощения известной формулы проф. Костенко М.В.)

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{113 \sqrt{\rho}}{d}, \text{ Г/км} \quad (2-10)$$

В рабочем режиме ВЛ, когда по оставшимся в работе проводам текут токи нагрузки  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_B$  (которые могут отличаться от токов нагрузки до отключения третьего провода) индуктирующий ток является суммой этих токов:  $\dot{I} = \dot{I}_A + \dot{I}_B$ . Причем угол между векторами  $\bar{I}_A$  и  $\bar{I}_B$ , а следовательно и значение  $I$  зависят от соотношения сопротивлений обратной и нулевой последовательности.

В аварийном режиме, т.е. при замыкании одной из двух оставшихся в работе фаз на землю индуктирующий ток будет равен тску замыкания на землю.

Обычно продольная эдс оказывается весьма значительной. Например, на отключенном проводе ВЛ 110 кВ с горизонтальным расположением проводов длиной 93 км при  $M = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Г/км (что соответствует  $d = 4$  м и  $\rho = 100$  Ом.м), при  $I = 31$  А в рабочем режиме и 870 А при замыкании одной фазы на землю за пределами отключенного провода продольная эдс равна соответственно  $I$  и 29 кВ.

Уравнение потенциальной характеристики незаземленного провода, подверженного магнитному влиянию, можно получить, рассматривая отключенный провод как однопроводную цепь с распределенными параметрами и с возвратом тока через землю. При этом установившийся процесс распространения электрической энергии будет определяться следующими дифференциальными уравнениями:

$$-\frac{d\dot{\psi}_x}{dx} = j\omega M\dot{I} + (r_0 + j\omega L_0)\dot{I}_x$$

$$-\frac{d\dot{I}_x}{dx} = (g_{BB} + j\omega C_{BB})\dot{U}_x$$

После соответствующих преобразований получаем выражения для потенциала и тока в любой точке отключенного и изолированного от земли провода

$$\dot{\psi}_x = \frac{\dot{E}}{rl} \cdot \frac{\text{Sh}\left(\frac{rl}{2} - rx\right)}{\text{ch}\frac{rl}{2}}, \text{ В} \quad (2-11)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{E}}{l(r_0 + j\omega L_0)} \left[ \frac{\text{ch}\left(\frac{rl}{2} - rx\right)}{\text{ch}\frac{rl}{2}} - 1 \right], \text{ А} \quad (2-12)$$

Для проводов воздушных линий даже при больших длинах - до 100-200 км  $\frac{rl}{2} \ll 0,2$ . Поэтому можно считать, что

$$\text{Sh}\frac{rl}{2} \approx \frac{rl}{2} \quad \text{и} \quad \text{ch}\frac{rl}{2} \approx 1$$

При этом условии уравнение потенциальной характеристики

будет

$$\psi_x = -\frac{E}{l}x + \frac{E}{2}, \text{ В} \quad (2-13)$$

Уравнение потенциальной характеристики является уравнением прямой линии, наклон которой к оси абсцисс

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{l} = E_0, \text{ В/км}$$

определяет степень изменения потенциала на проводе от нуля в середине провода до  $+\frac{E}{2}$  и  $-\frac{E}{2}$  на его концах.

При заземлении провода в нескольких местах потенциал его изменяется так же, как и изолированного провода по закону прямой линии

$$\dot{\psi}_x = -\frac{\dot{E}}{l}x + \left(\frac{\dot{E}}{l}l_k + \dot{\psi}_k\right), \text{ В}$$

Эти прямые имеют одинаковый наклон, но сдвинуты одна относительно другой, т.е. их точки нулевого потенциала расположены в разных местах.

Положение этой точки определяется выражением

$$x_0 = \frac{\frac{l_2}{R_2} + \frac{l_3}{R_3} + \dots + \frac{l_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} = \frac{\sum_2^n \frac{l}{R}}{\sum_1^n \frac{1}{R}}, \text{ км}$$

Прикосновение к отключенному проводу можно рассматривать как заземление его через сопротивление тела человека. Если провод незаземлен, то напряжение прикосновения будет

$$\dot{U}_{np} = \frac{\frac{\dot{E}}{l} l_{np} \cdot \frac{1}{Z_H} + \frac{\dot{E}}{l} (l - l_{np}) \frac{1}{Z_K}}{\frac{1}{Z_H} + \frac{1}{Z_K} + \frac{1}{R_h}}, \text{ В}$$

Здесь  $l_{np}$  - длина участка провода от его начала до места прикосновения человека, км;  $Z_H$  и  $Z_K$  - емкостные сопротивления провода относительно земли, сосредоточенные по его концам, Ом.

Или в действительной форме (при  $Z_H = Z_K$ ):

$$U_{np} = \frac{E}{l} (l - 2l_{np}) \frac{R_h}{\sqrt{4R_h^2 + X_H^2}}, \text{ В}$$

Для провода, заземленного в одной точке (А) через сопротивление  $R_z$

$$U_{np} = E_0 l_{AB} \frac{R_h}{R_h + R_z}, \text{ В}$$

(2-17)

Для многократно заземленного провода

$$U_{np} = E_0 (x_0 - l_{np}), \text{ В}$$

Зона безопасного прикосновения к проводу:  
незаземленному

$$l_{bez} = \frac{U_{np. доп}}{E_0 R_h} \sqrt{4R_h^2 + X^2}, \text{ км}$$

заземленному в одной точке

$$l_{bez} = \frac{U_{np. доп}}{E_0 R_h} (R_h + R_z), \text{ км}$$

многokrатно заземленному

$$l_{без} = \frac{U_{пр. доп}}{E_0}, \text{ км}$$

### III. Анализ условий возникновения опасностей поражения током людей, выполняющих работы на неотключенных ВЛ

Опасность поражения током людей, выполняющих работы на ВЛ под напряжением существует как при работе с изолирующего устройства, когда человек находится под потенциалом провода, так и при работе с опоры. Возникновение этой опасности может быть следствием недостаточной электрической прочности:

- а) изоляции устройств, изолирующих человека от земли;
- б) изоляции вспомогательных приспособлений, которыми человек, находясь на опоре, касается проводов линии или которые в процессе работы шунтируют изоляцию линии;
- в) изоляции провода линии относительно земли на месте работы людей, которая может быть понижена против нормального уровня из-за наличия в гирлянде дефектных изоляторов, что часто и является причиной ремонта линии в этом именно месте;
- г) воздушного промежутка между человеком, работающим с изолирующего устройства, и телом опоры или между человеком, работающим с опоры, и проводом.

В каждом из этих случаев может произойти перекрытие изоляции или пробой воздушного промежутка напряжением провода линии относительно земли, существующим в данный момент на месте работы людей.

Вероятные виды поражения при перекрытии изолирующих устройств и вспомогательных приспособлений, а также изоляции линии - это ожоги электрической дугой, которая неизбежно возникает в таких случаях.

Пробой же воздушного промежутка между человеком и частями линии будет сопровождаться протеканием через человека тока и ожогами электрической дугой; такие же виды поражения возможны и при перекрытии вспомогательных изолирующих приспособлений, которыми человек, находясь на опоре, прикасается к проводу линии.

Чтобы устранить возможные причины поражения током людей, работающих под напряжением, необходимо, чтобы изоляция устройств, изолирующих человека от земли, и вспомогательных изолирующих приспособлений, изоляция проводов линии относительно земли на месте работы людей и воздушный промежуток между человеком, работающим с заземленной опоры, и проводом (а также между человеком, находящимся под потенциалом провода, и заземленными частями линии) обладали в период работы разрядными напряжениями, превышающими возможное напряжение проводов линии относительно земли в данном месте.

Напряжение провода относительно земли на месте работы людей может значительно превышать фазное напряжение линии в результате внутренних и атмосферных перенапряжений, величина которых находится в зависимости от номинального напряжения линии и ряда других факторов.

Внутренние перенапряжения, возникающие в результате резкого изменения режима работы электрической системы могут быть вызваны нормальными оперативными переключениями, изменениями нагрузок и повреждениями в системе (краткими замыканиями, замыканиями на землю, обрывами проводов и т.п.)

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, а также опыт эксплуатации линий кратность и форма внутренних перенапряжений зависит от многих факторов, в том числе: от вида коммутации; от параметров сети - мощности системы, длины линий, числа линий, отходящих от подстанций; от начальных условий коммутации - фазы коммутации, величины остаточного напряжения на линии при повторном включении; от характеристики выключателей и устройств, ограничивающих перенапряжения. Поэтому кратность внутренних перенапряжений, а также их форма могут иметь значительный разброс.

Обычно внутренние перенапряжения не превышают  $(2,5-3) U_{ф}$ , достигая в отдельных редких случаях  $4 U_{ф}$ , и имеют форму колебательных затухающих импульсов.

Исходя из условий безопасности наибольшие возможные значения внутренних перенапряжений приняты в работе равными  $4 U_{ф}$  на ВЛ 35-220 кВ и  $3 U_{ф}$  на ВЛ 330 и 500 кВ., т.е. несколько большими чем принятые в СССР для определения нормальных уровней изоляции линий. При этом импульсы перенапряжения полагаем колебательными периодическими синусоидальной формы с частотой 50 Гц.

А т м о с ф е р н ы е п е р е н а п р я ж е н и я обусловлены разрядами молнии непосредственно в линию или вблизи нее.

Для лиц, работающих на ВЛ, опасными являются не только близкие, но и далекие разряды в линию (или вблизи линии), поскольку возникающие при этом волны перенапряжения, распространяясь по проводам на многие километры, могут достичь места работы, сохранив высокую амплитуду. Поэтому Правила техники безопасности запрещают производство работ при грозе на воздушных линиях и требуют при приближении грозы к месту работ, т.е. при возникновении

хотя бы отдаленных молний и грома, прекращения работ, снятия людей с линии и удаления их за край трассы.

Однако атмосферные перенапряжения на линии на месте работы людей могут появиться и при отсутствии признаков грозы, т.е. и при соблюдении указанных требований Правил, за счет блуждающих волн, возникающих на проводах при разряде молнии в линию или вблизи нее за пределами видимости грозы или слышимости грома. В этом случае волна перенапряжения после пробега по проводам от места ее возникновения до места работы людей будет деформирована, а амплитуда ее уменьшится вследствие затухания под влиянием импульсной короны на проводах и тросах, сопротивления земли и проводов и других факторов. Тем не менее в некоторых случаях волна после пробега больших расстояний может иметь высокую амплитуду.

При работах на отключенных линиях, когда провода их заземлены по обе стороны от места работы, что предусмотрено Правилами безопасности, блуждающая волна, как правило, не опасна для работающих, поскольку амплитуда ее при достижении заземленной точки провода падает практически до нуля.

При работах под напряжением, когда провода линии не заземлены, появление блуждающей волны на месте работ связано с реальной опасностью поражения работающих.

В работе рассмотрены различные случаи возникновения волн перенапряжения на линии в результате разрядов молнии и их параметры.

При большом токе молнии и высоком сопротивлении заземления опор и тросов напряжение на линии в месте грозового разряда может значительно превышать импульсную прочность изоляции ли-

нии относительно земли. Такая волна перенапряжения, распространяясь по проводам линии, вызовет перекрытие изоляции на соседних к месту поражения опорах, в результате чего амплитуда ее после пробега нескольких пролетов будет снижена до значения, определяемого импульсным разрядным напряжением изоляции проводов относительно земли. Дальнейшее распространение волны будет сопровождаться затуханием ее амплитуды и деформацией фронта под влиянием импульсной короны, сопротивления земли и других факторов.

В работе принимаем, что первоначальная амплитуда волны перенапряжения  $U_0$  равна импульсной прочности нормальной изоляции проводов линии относительно земли, и, допуская некоторую погрешность (для случаев, когда разряды сопровождаются возникновением весьма высоких напряжений на изоляции линии), считаем, что блуждающая волна возникает на месте разряда молнии в линию.

Фронт волны в месте ее возникновения на проводах линии принимаем прямоугольным, длину волны равной 40 мкс и полярность отрицательной.

З а т у х а н и е   и   д е ф о р м а ц и я   в о л н ы  
атмосферного перенапряжения, распространяющейся по линии, происходит за счет потерь на импульсную корону, возникающую на проводах в результате высоких напряжений волны, а также необратимых тепловых потерь энергии волны в активных сопротивлениях проводов и земли.

На ВЛ 35 кВ и выше основное влияние на деформацию и затухание волны оказывает корона, а потери в земле играют второстепенную роль; еще меньшее значение имеют потери в проводах.

При этом, поскольку отрицательная корона менее интенсивна, чем положительная, затухание волн отрицательной полярности про-

исходит медленнее. Также значительно медленнее затухают под действием потерь на корону амплитуды длинных волн по сравнению с короткими волнами.

Таким образом по условиям безопасности людей целесообразно рассматривать затухание длинных волн отрицательной полярности, что совпадает с ранее принятыми условиями.

В работе получено выражение для определения степени затухания амплитуды волны в зависимости от пройденного ею расстояния из уравнения интересующей нас длинной волны с прямоугольным фронтом и уравнения, учитывающего влияние сопротивления земли на степень затухания амплитуды

$$U = U_0 e^{-\alpha \tau}$$

$$U_z = U e^{-\alpha \Delta \tau_z} = U e^{-\beta t_n}$$

Приняв  $\tau = \Delta \tau_k$  - длина косоугольного фронта волны, деформированной под влиянием короны, мкс и  $U = U$  - амплитуда деформированной короной волны, кВ и решая совместно приведенные уравнения, получим выражение амплитуды волны после пробега ею расстояния с учетом влияния короны и земли:

$$\ln U_t = \ln U_0 - (\alpha \Delta \tau_k + \beta t_n) \quad (3-1)$$

Здесь  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий спад напряжения на хвосте волны (1/мкс); определяется из уравнения длинной волны ( $\tau_B = 40$  мкс) с прямоугольным фронтом;  $\beta$  - коэффициент затухания (1/с) - отношение сопротивления земли  $R_z$  с учетом поверхностного эффекта (приближенное значение которого при частотах до  $10^4$  Гц равно  $3\pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4}$  Ом/км) к удвоенному значению индуктивности фазы линии  $L$  (определяемое как част-

ное от деления волнового сопротивления линии на скорость распространения волны);  $t_n$  - время пробега волны (с), зависящее от длины ( $l$ ) и скорости ( $C$ ) пробега.

Удлинение фронта волны под влиянием импульсной короны можно определить, пользуясь известными выражениями, в том числе рекомендуемыми "Руководящими указаниями по защите от перенапряжений электротехнических установок переменного тока 3-220 кВ" и некоторыми авторами (проф. А.И. Долгинов, М.В. Костенко и Д.В. Разевиг).

В итоге после подстановки в (3-1) значений соответствующих величин и преобразования получены следующие четыре формулы, позволяющие определить амплитуду волны после пробега ее расстояния  $l$  :

$$\ln U_l = \ln U_0 - \left[ 4 + \frac{13,86 U_0}{h_{cp} \cdot 10^3} \right] \frac{l}{100} \quad (3-2)$$

$$\ln U_l = \ln U_0 - \left[ 3,133 + \frac{U_0}{75 \sqrt{1 + \frac{4U_0}{h_{cp} \cdot 10^3}}} \right] \frac{l}{100} \quad (3-3)$$

$$\ln U_l = \ln U_0 - \left[ 3,133 + 5,78 U_0 B \right] \frac{l}{100} \quad (3-4)$$

$$\ln U_l = \ln U_0 - \left[ 4,97 \sqrt{\frac{\ln \frac{2h_{cp}}{r}}{\ln \frac{1,5h_{cp} E_{cp}}{U_0}}} - 2,78 \right] \frac{l}{100} \quad (3-5)$$

Кроме того для оценки затухания волны можно воспользоваться известной формулой Фауста и Менжера

$$U_t = \frac{U_0}{U_0 t K + 1}, \text{ кВ} \quad (3-6)$$

полученной в предположении, что падение напряжения на единицу длины пути пропорционально квадрату напряжения

$$-\frac{dU}{dt} = KU^2$$

где  $K$  — эмпирический коэффициент, I/кВ.км.

Проверка этих формул путем сравнения расчетных данных с результатами опыта на реальной линии 110 кВ по затуханию амплитуды длинной волны отрицательной полярности показала, что более точной является формула (3-5), в основу которой положено выражение для  $\Delta \tau_K$ , предложенное проф. Д.В.Разевигом.

Это обстоятельство не является случайным: при вычислении  $\Delta \tau_K$  по уравнению Д.В.Разевига учитывается влияние радиуса провода и высоты подвеса проводов над землей, в то время как аналогичные уравнения других исследователей учитывают лишь один из этих факторов.

Максимальная амплитуда блуждающей волны, достигшей места работы людей на линии, определяется выражением (3-5). При этом длина пробега волны равна расстоянию, на котором персонал может обнаружить возникновение или приближение грозы, когда он должен прекратить работу на линии.

Первым проявлением далеко происходящей грозы является молния, которая может быть видна за десятки километров. Однако в некоторых случаях молния может быть не замечена с места работ вследствие особенностей рельефа местности и других причин и

поэтому она не всегда может служить сигналом к прекращению работ на ВЛ.

Дальность слышимости грома обычно равна 20 км, а в отдельных случаях может возрастать до 30 и даже до 50 км и снижаться в редких случаях до 10 км. Слышимость грома зависит от интенсивности грозового разряда, состояния погоды, места наблюдения, направления ветра, рельефа местности и других причин.

Принимая за основу наиболее неблагоприятный, но вполне вероятный случай, когда молния не замечена с места производства работ, а дальность слышимости грома равна 20 км, можно считать, что первый гром, который услышат работающие на линии и который явится сигналом к прекращению работ, сопровождает разряды, происходящие не ближе 20 км.

Эта величина и принята за длину пробега волны по проводам ВЛ при подсчете амплитуды волны, достигшей места работы людей.

Вероятность появления на месте работы людей волны с максимально возможной амплитудой оценена в работе по методике, аналогичной методике расчета грозоупорности линий с учетом ряда особенностей, обусловленных иной задачей расчета.

При этом учитывалась полная изоляция проводов линии относительно земли, как определяющая максимальную амплитуду перенапряжения; не учитывалась вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в дугу промышленной частоты, поскольку опасность поражения работающих током может существовать и после отключения линии от источника рабочего напряжения; учитывалась вероятность совпадения моментов работы людей на ВЛ и возникновения перенапряжения на линии; и т.п.

За исходное положение принято, что на линии на месте работы людей блуждающая волна с максимальной амплитудой может появиться в период работы, если одновременно совпадут следующие 2 условия:

а) разряд молнии произойдет в точку линии, отстоящую от места работы на 20 км;

б) ток молнии окажется достаточным для возникновения на линии в точке разряда волны перенапряжения с амплитудой, равной или большей импульсной прочности нормальной изоляции линии относительно земли.

В итоге получено выражение, определяющее период, в течение которого во время работы людей на линии возможен случай появления на месте работы блуждающей волны с максимальной амплитудой

$$T = \frac{52l}{h_{ср.т} (4H_m P_{оп} + l P_a P_{пр})}, \text{ лет}$$

Для бестросовых ВЛ на деревянных опорах период  $T$  определяется следующим выражением:

$$T = \frac{52l}{h_{ср} P_{пр} (4H_n + l)}, \text{ лет}$$

Здесь  $l$  - длина пролета;  $H_m, h_{ср.т}, H_n, h_{ср}$  - высота подвеса на опоре и средняя высота подвеса троса и провода соответственно;  $P_{оп}$  и  $P_{пр}$  - вероятности импульсного перекрытия изоляции ВЛ при ударе молнии в опору (или трос вблизи опоры) и провод соответственно;  $P_a$  - вероятность прорыва молнии через тросовую защиту.

Вероятность  $P_{оп}$  обуславливается сочетанием амплитуды и крутизны тока молнии и может быть определена достаточно точно

для конкретной линии путем графоаналитического расчета по кривым опасных параметров. Однако в настоящем случае, когда исходные данные являются приближенными поскольку они должны удовлетворять большей части линий данного класса, допустимо воспользоваться уравнением для определения вероятности токов молнии, превышающих защитный уровень линии  $I_z$  в равнинной местности:

$$\lg P_{оп} = - \frac{I_z}{60} \quad (3-7)$$

Ток  $I_z$  определяется по уравнению защитного уровня ВЛ с двумя тросами при ударе молнии в опору, после замены  $U$  на  $U_0$

$$I_z = \frac{U_0}{R_n + 0,15 H_m}, \text{ кА}$$

Вероятность  $P_a$  определяется по известному выражению

$$\lg P_a = \alpha \frac{\sqrt{H_m}}{90} - 4$$

где  $\alpha$  - защитный угол троса на опоре, град.

Вероятность  $P_{пр}$  определяется по (3-7), т.е.

$$\lg P_{пр} = - \frac{I_{пр}}{60}$$

При этом наименьшее значение тока молнии  $I_{пр}$ , прорвавшей на провод через тросовую защиту и вызвавшей на проводе перенапряжение с амплитудой, равной или превышающей импульсную прочность изоляцию ВЛ относительно земли  $U_0$ , находится из выражения

$$I_{пр} = \frac{4U_0}{Z_{пр.к}} , \text{кА}$$

где  $Z_{пр.к}$  - волновое сопротивление провода с учетом влияния короны, Ом.

Вычисление показало, что вероятность появления на месте работы людей волны с максимальной амплитудой не велика: один случай возможен в период от 13 до 173 лет. Причем наибольшая вероятность (13-16 лет) соответствует бестросовым линиям 35 и 110 кВ. С повышением класса напряжения ВЛ вероятность уменьшается и тем самым уменьшается опасность для персонала.

IV. Наименьшие допустимые уровни изоляции ВЛ, длины изолирующих устройств и воздушных промежутков по условиям безопасности

Изоляция проводов ВЛ на месте производства работ может быть значительно понижена против нормального уровня, вследствие наличия в гирлянде дефектных изоляторов, что нередко является причиной ремонта линии на этом месте.

Однако электрическая прочность этой пониженной изоляции - импульсная и при промышленной частоте должна быть достаточно высокой, чтобы была исключена возможность перекрытия ее при атмосферных и внутренних перенапряжениях и тем самым устранена одна из возможных причин поражения током людей, работающих на линии.

Дефектные изоляторы в гирлянде нередко несут часть напряжения, приложенного к гирлянде, т.е. они наряду с полноценными

изоляторами обладают некоторой электрической прочностью.

Чтобы выяснить, следует ли учитывать дефектные изоляторы при определении минимально допустимой изоляции линии на месте ремонта были проведены экспериментальные работы по определению зависимости разрядных напряжений гирлянды - импульсного и при 50 Гц от числа и места расположения в ней нулевых и неполноценных изоляторов.

При этом было установлено, что дефектные изоляторы, дополнительно включенные в гирлянду, составленную из полноценных изоляторов, повышают ее разрядные напряжения. Так для 4-х элементной гирлянды наибольшее повышение разрядного напряжения полноценной части ее наблюдается в случае наличия в ней двух дефектных и двух полноценных изоляторов и равно 15-16% при неполноценных и 1-9% при нулевых изоляторах; меньшие цифры соответствуют испытаниям при импульсах, большие - при 50 Гц.

Место расположения дефектного изолятора в гирлянде также влияет на величину ее разрядного напряжения: гирлянда, состоящая из 4-х элементов (1 дефектный и 3 полноценных) имеет наибольшие разрядные напряжения при расположении дефектного изолятора третьим от траверсы. Увеличение разрядного напряжения по отношению к остальным случаям составляет 3-4% при импульсах и 5-6% при 50 Гц.

Вследствие относительно небольшого повышения разрядных напряжений гирлянды за счет дефектных изоляторов, наименьший допустимый уровень изоляции линии был определен с учетом лишь полноценной части гирлянды, полагая, что остальные изоляторы - нулевые или неполноценные - не обладают электрической прочностью. При этом использовались ранее вычисленные наибольшие возможные значения перенапряжений на линии на месте работы людей. На ВЛ с деревянными опорами при определении уровня изоля-

ции по условиям атмосферных перенапряжений учитывалась комбинированная изоляция фарфор-дерево.

В итоге получено следующее наименьшее допустимое количество исправных изоляторов в гирлянде на месте работы людей:

на металлических опорах

- 2 - на ВЛ 35 кВ
- 5 - на ВЛ 110 кВ
- 10 - на ВЛ 220 кВ
- 11 - на ВЛ 330 кВ
- 17 - на ВЛ 500 кВ

на деревянных опорах

- 2 - на ВЛ 35 кВ
- 4 - на ВЛ 110 кВ

Для определения допустимых по условиям безопасности наименьших длин изолирующих устройств и приспособлений были выполнены экспериментальные работы по определению электрических характеристик древесно-слоистого пластика, применяющегося для изготовления изолирующих устройств и приспособлений. При этом для приближения условий опытов к действительным условиям работы на ВЛ испытания проводились при больших значениях испытательных напряжений, а испытуемые образцы выбирались наибольшей длины, исходя из величины располагаемого испытательного напряжения.

В результате этих работ установлены:

I. Зависимости разрядных напряжений по поверхности пластика от длины ( $l$ , см):

при напряжении промышленной частоты

$$U = 6,5 \cdot l^{0,877}, \text{ кВ};$$

при импульсах (полная стандартная волна)

$$U_{50\%} = 20 \cdot t^{0,77}, \text{ кВ} - \text{при отрицательной полярности};$$

$$U_{50\%} = 18,5 \cdot t^{0,77}, \text{ кВ} - \text{при положительной полярности};$$

при постоянном напряжении

$$U = 7,5 \cdot t^{0,938}, \text{ кВ} - \text{при отрицательной полярности};$$

$$U = 7,1 \cdot t^{0,938}, \text{ кВ} - \text{при положительной полярности}.$$

2. Зависимость разрядного напряжения от состояния поверхности образца.

3. Зависимость тока утечки по образцу от градиента напряжения, приложенного к образцу, и длительности приложения напряжения промышленной частоты.

На основании этих зависимостей и значений перенапряжений на месте работ, с учетом конструкции, назначения и схемы включения под напряжение изолирующих устройств и приспособлений и с введением коэффициентов запаса электрической прочности установлено, что изолирующие устройства и приспособления по условиям безопасности должны иметь следующие наименьшие длины по изоляции: лестница, вышка, площадка и т.п. устройство

для ВЛ 35 кВ - 200 см,

для ВЛ 110 кВ - 250 см,

для ВЛ 220 кВ - 300 см,

для ВЛ 330 кВ - 350 см,

для ВЛ 500 кВ - 520 см;

тяга, захват и т.п. приспособление

для ВЛ 35 кВ - 50 см,

для ВЛ 110 кВ - 120 см,

для ВЛ 220 кВ - 200 см,

для ВЛ 330 кВ - 250 см,

для ВЛ 500 кВ - 400 см.

Безопасный воздушный промежуток - допустимое по условиям безопасности расстояние между человеком, работающим с опоры, и проводом линии, а также между человеком, работающим с изолирующего устройства, и заземленными частями линии определен для наиболее неблагоприятного случая - когда работа выполняется на ВЛ с грозозащитными тросами, в том числе на деревянных опорах с заземляющими спусками. Учтена также возможность отклонения поддерживающей гирлянды в сторону опоры под действием ветра и введен коэффициент запаса (безопасности)  $K = 1,2$

$$l_{без} = (S_1 + S_2) K$$

Здесь  $S_1$  - отклонение конца гирлянды;  $S_2$  - промежуток, обусловленный величиной перенапряжения на месте работ.

Значение  $S_1$  определяется выражением

$$S_1 = L \frac{l \cdot P \cdot \pi}{\sqrt{(g \pi l + 0,5 g_2)^2 + l^2 p^2 \pi^2}}, \text{ м}$$

Промежуток  $S_2$  по условиям атмосферных перенапряжений определен по кривым 50%-ных минимально импульсных разрядных напряжений воздушных промежутков стержень-стержень при волне 1,5/40 мкс отрицательной полярности, а по условиям внутренних перенапряжений - по кривым разрядных напряжений промежутков

стержень-плоскость при промышленной частоте.

В итоге в качестве безопасных определены следующие наименьшие воздушные промежутки:

0,7 м	на ВЛ	35 кВ
1,0 м	на ВЛ	110 кВ
2,0 м	на ВЛ	220 кВ
2,5 м	на ВЛ	330 кВ
4,0 м	на ВЛ	500 кВ

У. Анализ явлений при переносе потенциала провода ВЛ на человека, находящегося на рабочей площадке изолирующего устройства

Человек, находящийся на изолирующем устройстве под потенциалом провода линии, подвержен воздействию тока, обусловленного емкостью между телом человека и землей.

Практика показала, что человек начинает ощущать прохождение через него тока на ВЛ 150 кВ; при более высоком напряжении неприятные ощущения усиливаются за счет увеличения тока. Наиболее сильное воздействие тока человек испытывает в момент переноса потенциала провода на рабочую площадку изолирующего устройства, т.е. на себя.

Для определения величины тока, проходящего через человека, в работе выполнен расчет переходного процесса, возникающего при наложении на провод линии шунтирующего проводника.

Значения емкостей в расчетной схеме, соответствующей схеме работы под напряжением, в том числе емкости тела человека и рабочей площадки относительно земли и проводов ВЛ ( $C_n, C_n, C_1, C_2$ ),

вычислены по эмпирическим формулам, предложенным автором, и по выражениям для емкостей уединенной пластины и двух параллельных пластин с расстоянием между ними, значительно превосходящим длину их стороны. Шунтирующий проводник представлен как активное сопротивление  $R_{ш}$ , изменяющееся в пределах от 0 до 20 МОм.

Искомый ток  $\dot{I}_{mh}$  рассматривается как сумма двух токов ( $\dot{I}_{m1}$  и  $\dot{I}_{m2}$ ), идущих по отдельным ветвям схемы: 1) провод - емкость  $C_n$  - человек и 2) провод - сопротивление  $R_{ш}$  - человек, т.е.

$$\dot{I}_{mh}(t) = -C_n \frac{d\dot{U}_{ab}(t)}{dt} + \frac{\dot{U}_{ab}(t)}{R_{ш}},$$

где  $\dot{U}_{ab}$  - напряжение между точками соединения ветвей схемы

$$\dot{U}_{ab}(t) = \dot{U}_m \frac{C_h}{g_э + j\omega(C_h + C_n)} \left( \frac{g_э}{C_h + C_n} \cdot e^{-\frac{g_э}{C_h + C_n} t} + j\omega e^{j\omega t} \right)$$

Получено следующее выражение для комплексной временной функции тока переходного процесса, проходящего через человека:

$$\dot{I}_{mh}(t) = \dot{U}_m \frac{C_h}{g_э + j\omega(C_h + C_n)} \left[ \frac{g_э}{C_h + C_n} \cdot e^{-\frac{g_э}{C_h + C_n} t} \cdot \left( g_э + \frac{g_э C_n}{C_h + C_n} \right) + j\omega e^{j\omega t} \cdot (g_э - j\omega C_n) \right]$$

Принужденная составляющая этого тока равна

$$\dot{I}_{mh.пр}(t) = \dot{U}_m \frac{j\omega C_h}{g_э + j\omega(C_h + C_n)} (g_э - j\omega C_n) e^{j\omega t}$$

Действительное значение принужденного тока (амплитуда)  $I_{mh,пр}$  на ВЛ 35-500 кВ при разных величинах шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$  находится в пределах 0,4-6,1 мА. Так, например, на ВЛ 35 кВ при  $R_{ш} = 0$  (т.е. при  $R_g = R_h = 150 \cdot 10^3$  Ом) ток  $I_{mh,пр} = 0,43$  мА, а при  $R_{ш} = 20 \cdot 10^6$  Ом  $I_{mh,пр} = 0,4$  мА; на ВЛ 500 кВ при  $R_{ш} = 0$   $I_{mh,пр} = 6,1$  мА, а при  $R_{ш} = 20 \cdot 10^6$  Ом  $I_{mh,пр} = 5,7$  мА.

Свободная составляющая (наибольшее значение при  $t_1 = 0_1$  и  $\psi = \chi$ ):

$$I_{mh,св}(0_1) = \dot{U}_m \frac{g_g}{g_g + j\omega(C_h + C_n)} \cdot \frac{C_h}{C_h + C_n} \left(1 + \frac{C_n}{C_h + C_n}\right)$$

Полный ток  $I_{mh}(0_1)$ , проходящий через человека в момент коммутации, достигает значительной величины: 0,2-2,5 А на ВЛ 35-500 кВ (при  $R_{ш} = 0$ ) и, несмотря на кратковременность переходного процесса (около 0,5 мс), ощущается человеком.

Поэтому при переносе потенциала провода линии на рабочую площадку изолирующего устройства рекомендуется применять шунтирующее сопротивление в пределах 15-20 МОм в результате чего полный ток уменьшится примерно в 100 раз (при длительности процесса порядка 1 мс). Как показывает практика, такой ток, неощутим и, очевидно, безвреден для человека.

С целью устранения разности потенциалов между рабочей площадкой и проводом необходимо закортить ограничивающее сопротивление (вторая коммутация), что в свою очередь вызовет переходный процесс, при котором основная часть тока пройдет через человека.

В работе выполнен расчет переходного процесса при второй коммутации, момент которой обозначен через ( $t_2 = 0_2$ ).

Как и при первой коммутации, ток через человека при замыкании  $R_{ш}$  является суммой двух токов  $\dot{I}_{m31}$  и  $\dot{I}_{m32}$  :

$$\dot{I}_{m31}(t) = \dot{U}_m \frac{j\omega C_h g_h}{g_3 + j\omega(C_h + C_n)} \cdot e^{-\frac{g_h}{C_n} t}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{m32}(t) = \dot{U}_m \frac{C_h g_h}{g_h + j\omega C_h} \left( \frac{g_h}{C_h} e^{-\frac{g_h}{C_h} t} + j\omega e^{j\omega t} \right) - \\ - \operatorname{Re} \left[ \dot{U}_m \frac{(g_3 + j\omega C_n) g_h}{g_3 + j\omega(C_h + C_n)} \right] e^{-\frac{g_h}{C_h} t} \end{aligned}$$

Принужденная составляющая полного тока выражается следующей зависимостью

$$\dot{I}_{m3h.np}(t) = \dot{U}_m \frac{j\omega C_h g_h}{g_h + j\omega C_h} \cdot e^{j\omega t}$$

Действующее значение принужденного тока  $I_{3h.np}$  на линиях 35-500 кВ находится в пределах 0,3-4,3 мА. Этот ток проходит через человека в течение всего времени работы с изолирующего устройства с момента закорачивания сопротивления  $R_{ш}$  .

Свободная составляющая полного тока равна

$$\begin{aligned} \dot{I}_{3h.cb}(t) = \dot{U}_m \frac{j\omega C_h \cdot g_h}{g_3 + j\omega(C_h + C_n)} \cdot e^{-\frac{g_h}{C_n} t} + \\ + \left[ \frac{\dot{U}_m g_h^2}{g_h + j\omega C_h} - \operatorname{Re} \frac{\dot{U}_m g_h (g_3 + j\omega C_n)}{g_3 + j\omega(C_h + C_n)} \right] e^{-\frac{g_h}{C_h} t} \end{aligned}$$

Наибольшее значение эта составляющая имеет в момент коммутации при большой величине ограничивающего сопротивления  $R_{ш}$ . Так при замыкании  $R_{ш} = 20$  МОм свободная составляющая  $I_{zh.cв}(O_2)$  достигает 0,1-1,5 А на ВЛ 35-500 кВ соответственно. Однако она очень быстро затухает: примерно через  $10^{-7} - 10^{-5}$  с.

Чтобы уменьшить импульс тока  $I_{zh.cв}(O_2)$ , в момент второй коммутации, ограничивающее сопротивление должно иметь минимальную величину. Однако это приводит к росту импульса тока во время первой коммутации, что недопустимо.

Поэтому величину  $R_{ш}$  следует выбирать из условий безопасности при переносе потенциала провода линии на человека (15-20 МОм); для уменьшения же амплитуды импульса тока при второй коммутации закорачивание ограничивающего сопротивления следует производить не сразу, а отдельными его участками. С этой целью ограничивающее сопротивление должно быть выполнено в виде цепочки последовательно соединенных сопротивлений, а закорачивающее устройство должно замыкать эти сопротивления одно за другим, не прерывая образующуюся при этом цепь, параллельную ограничивающему сопротивлению.

В работе рекомендовано число ступеней последовательно включенных сопротивлений и величина каждого из них, исходя из наибольшего значения ограничивающего сопротивления 20 МОм и наибольшего допустимого тока переходного процесса, протекающего через человека, 0,33 А (соответствующего свободной составляющей полного тока переходного процесса при второй коммутации на линии 110 кВ, воздействие которой человеком не ощущается).

После замыкания ограничивающего сопротивления через человека в течение всего времени работы под напряжением будет протекать принужденный ток переходного процесса, действительное значение которого может достигать:

0,3 мА на ВЛ 35 кВ,

0,9 мА на ВЛ 110 кВ,

1,9 мА на ВЛ 220 кВ,

2,9 мА на ВЛ 330 кВ,

4,3 мА на ВЛ 500 кВ.

Эти токи не могут вызвать поражения человека и в этом смысле являются безопасными. Однако длительное воздействие их на человека, очевидно, отрицательно сказывается на здоровье и поэтому недопустимо. Кроме того, при работах на ВЛ выше 110 кВ установившийся ток превышает пороговое значение ощутимого тока при 50 Гц (1 мА), вызывая у человека неприятные и даже болезненные ощущения, и может явиться косвенной причиной несчастного случая.

Чтобы исключить эти явления, необходимо уменьшить токи, постоянно протекающие через человека, до 50–70 мкА. Это может быть достигнуто экранированием тела человека с помощью экранирующего костюма или металлического сетчатого ограждения рабочей площадки изолирующего устройства, на которой находится человек.

#### VI. Защита от воздействия электромагнитного поля промышленной частоты при работах на ВЛ под напряжением

В процессе эксплуатации электроэнергетических установок – ОРУ и линий электропередачи сверхвысокого напряжения, и в первую очередь 500 кВ, было установлено ухудшение здоровья персонала, обслуживающего эти установки. Субъективно это выражалось в ухудшении самочувствия работающих, которые жаловались на повышенную утомляемость, вялость, плохой сон, головные боли, боли в сердце и т.п.

Специальные наблюдения и исследования, проводимые в Советском Союзе и за рубежом, подтвердили обоснованность этих жалоб и установили, что фактором, влияющим на здоровье обслуживающего персонала, является интенсивное электромагнитное поле, существующее вокруг токоведущих частей действующих электроустановок.

Электромагнитное поле промышленной частоты вызывает у работающих нарушение функционального состояния центральной нервной системы, сердечно-сосудистой системы и периферической крови. При этом наблюдается повышенная утомляемость, снижение точности рабочих движений, изменение кровяного давления и пульса, возникновение болей в сердце, сопровождающихся сердцебиением и аритмией и др.

Механизм биологического действия электромагнитного поля на живой организм изучен недостаточно. Предполагается, что нарушение регуляции физиологических функций обусловлено воздействием поля на различные отделы нервной системы. При этом повышение возбудимости центральной нервной системы происходит за счет рефлекторного действия поля, а тормозной эффект вызывается прямым воздействием поля на структуры головного и спинного мозга. Считается, что кора головного мозга, а также промежуточный мозг особенно чувствительны к воздействию поля.

Степень воздействия электромагнитного поля на биологический объект принято оценивать количеством электромагнитной энергии, поглощаемой этим объектом при нахождении его в поле.

Подсчет количества поглощаемой телом человека энергии отдельно для электрической и магнитной составляющих поля показал, что в любой точке электромагнитного поля промышленной частоты

поглощенная телом энергия магнитного поля примерно в 50 раз меньше поглощенной энергии электрического поля. Вместе с тем было установлено, что напряженность магнитного поля в рабочих зонах ОРУ и линий электропередачи напряжением вплоть до 750 кВ в несколько раз меньше напряженности, при которой проявляется вредное действие магнитного поля на живой организм. На основании этого был сделан вывод, что отрицательное действие электромагнитного поля промышленной частоты на живой организм обусловлено электрическим полем; магнитное же поле оказывает незначительное биологическое действие и в практических условиях им можно пренебречь.

В настоящее время введенными в действие Правилами за критерий безопасности принята напряженность электрического поля в месте нахождения человека. При этом установлено, что при напряженности до 5 кВ/м включительно время пребывания человека в поле не ограничивается, при напряженности 10 кВ/м время пребывания не должно превышать 3 час, при 15 кВ/м - 1,5 час, при 20 кВ/м - 10 мин и при 25 кВ/м - 5 мин. При больших напряженностях должны применяться защитные меры - экраны или экранирующие костюмы.

В работе даны выражения для потенциала и напряженности электрического поля вблизи ВЛ

$$\dot{\psi}_D = \frac{CU_{\Phi}}{8\pi \epsilon_0} \left( \ln \frac{n_A^4 \cdot m_B^2 \cdot m_C^2}{m_A^4 \cdot n_B^2 \cdot n_C^2} - j\sqrt{3} \ln \frac{n_B^2 \cdot m_C^2}{m_B^2 \cdot n_C} \right), B$$

$$E_p = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_p}{\partial h_p}\right)^2} = \frac{cU\varphi}{4\pi \epsilon_0} \sqrt{4(A_1^2 + A_2^2) + 3(A_3^2 + A_4^2)}, \text{ В/м}$$

Приведены кривые, характеризующие изменение  $\varphi_p$  и  $E_p$  вблизи линий 35-500 кВ и их значения на разных расстояниях от оси линии и на разных высотах над землей, что соответствует работе человека с земли, с опоры и с изолирующего устройства.

Для оценки воздействия поля на человека и защитных мер получены аналитические зависимости для тока, проходящего через человека, от потенциала и напряженности поля, а также для емкости тела человека от высоты размещения его над землей.

Выражение для тока, проходящего в землю через человека, находящегося в электрическом поле ВЛ и стоящего на земле в проводящей обуви, получено при условии замены тела человека равной ему по высоте и объему половиной вытянутого эллипсоида вращения ( $a = 1,7 \text{ м}$ ,  $b = 0,14 \text{ м}$ ,  $U = 0,068 \text{ м}^3$ ) и направления вектора электрического поля  $\vec{E}$  вдоль-большой оси полуэллипсоида.

При этих условиях напряженность поля  $E_i$  внутри эллипсоида, выполненного из непроводящего материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_i$ , равна

$$E_i = E - p_a \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{E}{1 + p_a(\epsilon_i - 1)}, \text{ В/м} \quad (6-1)$$

где  $\rho$  - поляризованность диэлектрика

$$p = \epsilon_0 (\epsilon_i - 1) E_i, \text{ Кл/м}^2 \quad (6-2)$$

$p_a$  - коэффициент деполаризации эллипсоида вращения вдоль полуоси  $a$ .

Электрическое смещение с учетом (6-1) и (6-2) равно

$$D_i = \frac{E \cdot \epsilon_0}{\frac{1}{\epsilon_i} + n_a (1 - \frac{1}{\epsilon_i})}, \text{ Кл/м}^2$$

Заряд эллипсоида из проводящего материала (полагая  $\epsilon_i \rightarrow \infty$ )

$$Q = \oint \frac{E \cdot \epsilon_0}{\frac{1}{\epsilon_i} + n_a (1 - \frac{1}{\epsilon_i})} \cdot dS = \frac{\pi b^2 \epsilon_0 E}{n_a}, \text{ Кл}$$

Мгновенное и действующее значения тока через человека

$$i_n = \frac{dq}{dt} = Q_m \omega \sin \omega t, \text{ А}$$

$$I_h = \frac{\pi b^2 \omega \epsilon_0}{n_a} E = \frac{\pi b^2 \omega \epsilon_0}{r_a \cdot a} \cdot \psi_h, \text{ А}$$

или после подстановки численных значений букв

$$I_h = 11,1 E = 6,55 \psi_h, \text{ мкА}$$

где  $E$  и  $\psi_h$  -- напряженность (кВ/м) и потенциал (кВ) поля на высоте роста человека.

Для случая, когда человек находится над землей и изолирован от нее и в частности для наиболее неблагоприятного случая, когда человек находится под крайним проводом ВЛ в середине пролета (поднимается по изолирующему устройству или находится на его рабочей площадке), приближенное значение тока, проходящего через человека, можно определить из выражения

$$I_h = \psi_h' \omega C_h, \text{ А}$$

где  $\psi_h'$  - потенциал тела человека, В;  $C_h$  - емкость тела человека относительно земли, Ф.

Емкость человек - земля  $C_h$  определена как емкость цилиндра из проводящего материала, имеющего длину и объем, равные соответственно высоте и объему тела человека, и размещенного над землей на соответствующей высоте  $H$

$$C_h = C_{\theta} + C_{oc}$$

$C_{\theta}$  определяются по известной формуле для емкости между вертикальным проводом и землей

$$C_{\theta} = \frac{2 \cdot 27,84 \ell_h}{\lg \frac{2\ell_h}{d_h} - 2,303D}, \text{ пФ}$$

где  $D$  - коэффициент, зависящий от соотношения  $\ell_h$  и  $H$  и определяемый уравнениями:

при  $H \leq \ell_h$

$$D = 0,434 + \frac{H}{\ell_h} \lg \frac{4H}{\ell_h} + \left(1 + \frac{H}{\ell_h}\right) \cdot \lg \left(1 + \frac{H}{\ell_h}\right) - \\ - \left(1 + \frac{2H}{\ell_h}\right) \lg \left(1 + \frac{2H}{\ell_h}\right);$$

при  $H \geq \ell_h$

$$D = 0,133 + \frac{H}{\ell_h} \left(1 + \frac{\ell_h}{H}\right) \lg \left(1 + \frac{\ell_h}{H}\right) - \\ - \frac{2H}{\ell_h} \left(1 + \frac{\ell_h}{2H}\right) \lg \left(1 + \frac{\ell_h}{2H}\right)$$

$C_{oc}$  - принимается равной удвоенной емкости ( $C_n$ ) между двумя параллельными пластинами  $d_h = 0,226$  м, отстоящими друг от друга на  $2H$ . Правомочность этого положения легко объясняется с помощью метода зеркальных изображений.

Для случаев, когда  $2H < l$   $C_n$  определяется по формуле Киргофа, учитывающей краевой эффект

$$C_n = 0,5 \varepsilon \varepsilon_0 \left[ \frac{\pi d_h^2}{4H} + d_h \left( \ln \frac{4\pi d_h}{H} - 1 \right) \right] \cdot 10^{12}, \text{ пФ}$$

а при больших расстояниях

$$C_n = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{2d_h \cdot 10^{12}}{1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arccctg} \frac{4H}{d_h}}, \text{ пФ}$$

Для приближенных расчетов предложена эмпирическая формула

$$C_h = \frac{1,5}{H + 5 \cdot 10^{-4}} + 48, \text{ пФ}$$

Экранирующий костюм является индивидуальным защитным средством от воздействия электрических полей. Он изготавливается из специальной токопроводящей ткани в виде комбинезона или куртки с брюками. В комплект костюма входят также: экранирующий головной убор - металлическая либо пластмассовая металлизированная каска, применяемая в теплое время года, или шапка-ушанка с подкладкой из металлизированной ткани, применяемая зимой, и специальная обувь, сопротивление подошв которой не должно превышать 50 кОм.

Конструкции экранирующих костюмов разработаны трестом ОРГРЭС и Центральной высоковольтной лабораторией Мосэнерго.

В работе предложена методика оценки защитной способности экранирующего костюма по величине тока, стекающего с костюма в землю, минуя тело человека.

Поскольку костюм закрывает не все тело человека, заряды наводятся не только на костюме, но и на незакрытых костюмом участках тела. Соответственно возникают и два тока, стекающие в землю:

1) ток  $\dot{I}_K$ , обусловленный наводками на костюме и идущий двумя путями - через сопротивление  $Z_1$  (ток  $\dot{I}_{K.3}$ ) и через сопротивления  $Z_2, R_h, Z_3$ , т.е. через человека (ток  $\dot{I}'_h$ ) и

2) ток  $\dot{I}_h^n$ , обусловленный наводками на незащищенных участках тела человека и идущий через него в землю, т.е. через сопротивления  $R_h$  и  $Z_3$ .

Здесь

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + j\omega C_1}, \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}, \text{ Ом}$$

$$Z_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_3}, \text{ Ом}$$

$R_1$  - сопротивление заземления костюма, Ом;

$R_2$  - сопротивление изоляции между костюмом и телом человека, Ом;

$R_3$  - сопротивление заземления металлического предмета, которого касается человек голсой рукой, Ом;

- $R_4$  - сопротивление растеканию ног человека, Ом;  
 $C_1$  - емкость костюма относительно земли, Ф;  
 $C_2$  - емкость между костюмом и телом человека, Ф;  
 $C_3$  - емкость незащищенных костюмом участков тела человека относительно земли, Ф.

Эти токи в сумме равны общему зарядному току

$$\dot{I}_E = \dot{I}_K + \dot{I}_h'' = \dot{I}_{K-3} + \dot{I}_h' + \dot{I}_h'' \quad (6-3)$$

Ток через человека

$$\dot{I}_h = \dot{I}_h' + \dot{I}_h'' = \dot{I}_E - \dot{I}_{K-3} \quad (6-4)$$

Если принять, что ток  $\dot{I}_h''$  пропорционален объему незащищенных участков тела, т.е.

$$\dot{I}_h'' = (1-B)\dot{I}_E$$

получим

$$\dot{I}_K = B\dot{I}_E \quad (6-5)$$

$$\dot{I}_h' = B\dot{I}_E - \dot{I}_{K-3} \quad (6-6)$$

Здесь  $B$  - коэффициент, характеризующий степень укрытия тела человека экранирующим костюмом

$$B = \frac{U_h - U_H}{U_h}$$

(  $U_h$  - объем тела человека;  $U_H$  - объем участков тела, незакрытых костюмом).

При этих условиях отношение тока  $\dot{I}_{к-з}$ , стекающего с костюма в землю, минуя тело человека, к общему току  $\dot{I}_E$  может характеризовать экранирующую способность костюма

$$K_3 = \frac{\dot{I}_{к-з}}{\dot{I}_E}$$

Из выражения

$$\dot{I}_{к-з} Z_1 = \dot{I}'_h Z_2 + (\dot{I}'_h + \dot{I}''_h)(Z_3 + R_h)$$

с учетом (6-4) и (6-6) коэффициент экранирования будет

$$K_3 = \frac{BZ_2 + Z_3 + R_h}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + R_h} \quad (6-7)$$

По (6-7) произведено определение  $K_3$  для нескольких характерных случаев, в том числе при работах с опоры ВЛ, с изолирующего устройства и стоя на земле.

#### ВЫВОДЫ

В диссертации проведено исследование совокупности вопросов теоретического и прикладного характера с целью научного обоснования возможности безопасного производства работ на действующих воздушных линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений — пофазных работ с отключением одной из фаз работающей линии и работ без снятия напряжения с линии с непосредственным прикосновением человека голыми руками к проводу, находящемуся под рабочим напряжением.

- Показано важное значение для народного хозяйства методов работ под напряжением на воздушных линиях электропередачи. Описаны возникновение и принципы работы под напряжением, приспособления и порядок выполнения отдельных работ. Рассмотрены потенциальные опасности поражения электрическим током и дугой, а также воздействия электрического поля на людей, выполняющих работы на действующих линиях.

- Выполнен анализ электрических явлений на отключенном проводе при пофазных работах. Получены уравнения, определяющие значения наведенных электростатического потенциала и продольной эдс, а также потенциальные характеристики отключенного провода. Произведена оценка степени опасности поражения человека током при прикосновении к изолированному от земли и заземленному проводу. Определены меры, исключающие эту опасность, главными из которых являются: заземление провода в одном месте через определенное сопротивление и ограничение участка работ пределами безопасной зоны, протяженность которой определяется полученным в работе уравнением.

- Выполнен анализ условий возникновения опасностей поражения током и дугой людей, выполняющих работы на неотключенных линиях. Рассмотрены возможности возникновения и определены максимальные значения внутренних и атмосферных перенапряжений на линии во время производства работ, обуславливающие уровни изоляции линий на месте работы людей, изолирующих устройств и приспособлений, а также промежутков безопасности. Для определения амплитуд блуждающих волн атмосферного перенапряжения, достигших места работы людей, получено аналитическое выражение, учитывающее затухание волны под влиянием импульсной короны и сопротивления земли при пробеге по проводам от места ее возникновения до места работы людей. Предложена методика оценки вероятности появления волны с

максимально возможной амплитудой на месте работы людей во время производства работы.

- В результате экспериментальных работ и выполненных расчетов с учетом возможных перенапряжений установлены наименьшие допустимые уровни изоляции линий на месте работы людей, длины по изоляции устройств и приспособлений, с помощью которых производятся работы под напряжением, и длины промежутков безопасности.

- Исследованы переходные процессы при переносе потенциала провода линии на человека, находящегося на рабочей площадке изолирующего устройства, и при шунтировании ограничивающего сопротивления. Это позволило:

а) определить значения токов, проходящих через человека в переходный период при переносе на него потенциала провода, длительность переходного процесса, что в свою очередь позволило оценить опасность этих токов для человека. В момент переноса потенциала проходящий через человека ток достигает значительной величины: 178-2556 мА на ВЛ 35-500 кВ, а длительность переходного процесса составляет доли миллисекунды;

б) определить необходимую величину ограничивающего сопротивления, встраиваемого в проводник, соединяющий рабочую площадку изолирующего устройства с проводом линии, при которой ток через человека в переходный период уменьшается до допустимых пределов;

в) рекомендовать поступенчатый метод шунтирования ограничивающего сопротивления в целях уменьшения проходящих через человека токов переходного процесса, возникающего при шунтировании сопротивления. При этом указаны условия выбора числа ступеней и значений сопротивления каждой ступени;

г) оценить опасность принужденных токов переходного процесса, постоянно протекающих через человека, находящегося под потенциа-

лом провода, которые превышают длительно допустимые токи через человека, и рекомендовать способы ограничения этих токов.

- Рассмотрен вопрос о воздействии электрического поля линии электропередачи на человека, выполняющего работы на линии. Получены аналитические выражения для напряженности и потенциала поля вблизи линии. Приведены данные измерений и расчетов об изменении напряженности и потенциала электрического поля ВЛ 35-500 кВ на унифицированных опорах в зависимости от расстояния до оси линии и от высоты над землей, характеризующие пространство, в котором могут находиться люди при выполнении работ на действующих линиях.

- Получены выражения для емкости тела человека относительно земли и для тока, стекающего в землю с человека, находящегося в электрическом поле линии, которые использовались для оценки воздействия поля на человека и могут найти применение при решении других задач в области электробезопасности.

- Разработана методика оценки защитной способности экранирующего костюма от воздействия электрического поля промышленной частоты. Предложено понятие коэффициента экранирования, величина которого в долях единицы, являясь отношением тока, стекающего в землю с костюма, минуя тело человека, к суммарному току, стекающему в землю с костюма и человека, характеризует защитную способность костюма. Получено аналитическое выражение коэффициента экранирования и вычислены его значения для существующего типа костюма при характерных случаях работы на действующих линиях электропередачи.

- Основные результаты исследований, выполненных в диссертации, в том числе методики определения и оценки условий безопасного производства работ под напряжением могут быть при соответствующей

корректировке распространены и на линии электропередачи иных классов напряжения, не рассматриваемых в диссертации, в том числе на линии ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока.

- Выполненные исследования показали, что при работах под напряжением на воздушных линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений - при пофазных работах с отключением одной из фаз работающей линии и работах на неотключенных линиях с непосредственным прикосновением человека голыми руками к проводу, находящемуся под рабочим напряжением, можно обеспечить практически абсолютную безопасность персоналу от поражения током и воздействия электрического поля и, как следствие, высокую производительность труда и качество работ путем строгого выполнения определенных технических и организационных мер безопасности, основные из которых сформулированы в итоге настоящей работы и приведены ниже.

1. Прикосновение к отключенному проводу при пофазном ремонте ВЛ разрешается лишь после заземления провода и только в пределах безопасной зоны, где напряжение прикосновения не превышает допустимого.

2. Отключенный провод при пофазном ремонте должен быть заземлен только в одной точке вблизи места работ.

3. При необходимости одновременного производства работ на проводе в нескольких местах, стоящих друг от друга на значительные расстояния, провод должен быть разрезан (разъединен в петлях у анкерных опор) на отдельные участки, каждый из которых должен быть заземлен только в одной точке - вблизи места работ.

4. Работы на проводе при пофазном ремонте могут производиться по обе стороны от точки его заземления в пределах безопасной зоны, протяженность которой (по одну сторону от точки заземления)

определяется расчетом по выражению:

$$l_{без} = \frac{U_{пр. доп} - \varphi_3}{1,5 \cdot \omega M I} \quad , \text{ км}$$

Протяженность безопасной зоны должна быть определена для аварийного режима - при замыкании рабочей фазы на землю, а затем проверена для нормального режима - при работе линии на 2-х фазах.

5. Допустимое напряжение прикосновения  $U_{пр. доп}$  - при фазном ремонте не должно превышать:

$50/t$  , В для аварийного режима при длительности замыкания фазы на землю  $t \leq 1$  с;

36 В - для аварийного режима при  $t$  больше 1 с до 3 с включительно;

6 В - для нормального режима.

6. В целях увеличения протяженности безопасной зоны рекомендуется при возможности снизить до предела длительность короткого замыкания путем уменьшения выдержки времени релейной защиты от замыкания на землю ремонтируемой линии и уменьшить ток замыкания на землю путем изменения схемы сети, разземления нулевых точек у части трансформаторов, выделения отдельных трансформаторов для питания ремонтируемой линии и т.п.

7. При заземлении провода должен быть измерен с помощью вольтметра его потенциал  $\varphi_3$  в месте заземления, который не должен превышать принятого значения; в противном случае сопротивление заземления должно быть уменьшено путем увеличения числа электродов, их большего заглубления и т.п. Снижение  $\varphi_3$  может быть обеспечено сокращением длины заземляемого участка провода путем разрезания его, благодаря чему уменьшится ток, стекающий в землю через заземление.

8. Наложение заземления на провод и снятие его с провода должны производиться с помощью изолирующей штанги, снабженной дугогасительным устройством, исключающим возникновение дуги между проводом и зажимом заземления.

9. Прикосновение непосредственно руками к проводу и другим элементам линии, находящимся под рабочим напряжением, разрешается лицам, находящимся на металлической рабочей площадке изолирующего устройства, после переноса потенциала провода на рабочую площадку.

10. Шунтирующий проводник, с помощью которого осуществляется перенос потенциала провода ВЛ на рабочую площадку изолирующего устройства, должен иметь встроенное сопротивление величиной 15-20 МОм с целью уменьшения до допустимого предела импульса тока, проходящего через человека в момент переноса потенциала провода ВЛ на рабочую площадку.

11. После соединения провода линии с рабочей площадкой изолирующего устройства в целях устранения неприятных ощущений от действия тока при касании к проводу, ограничивающее сопротивление должно быть выведено из цепи путем поочередного замыкания отдельных его участков. Для этого ограничивающее сопротивление должно быть выполнено в виде цепочки последовательно соединенных сопротивлений, а закорачивающее устройство должно замыкать эти сопротивления одно за другим, не прерывая образуемую при этом цепь, параллельную ограничивающему сопротивлению.

При величине ограничивающего сопротивления 20 МОм число ступеней последовательно включенных сопротивлений и величина каждого из них должны быть:

на ВЛ 35-110 кВ	-	1 x 20 МОм;
на ВЛ 220 кВ	-	2 x 10 МОм;
на ВЛ 330 кВ	-	3 x 6,7 МОм;

на ВЛ 500 кВ - 4 x 5,0 МОм.

12. При работах под напряжением на линиях электропередачи количество исправных изоляторов в поддерживающей гирлянде на месте работы должно быть не менее:

2 - на ВЛ 35 кВ;

4 и 5 - на ВЛ 110 кВ на деревянных и металлических  
опорах соответственно;

10 - на ВЛ 220 кВ;

11 - на ВЛ 330 кВ;

17 - на ВЛ 500 кВ.

13. Изолирующие устройства и приспособления, предназначенные для работ под напряжением, должны иметь длины по изоляции не менее следующих значений:

лестница, вышка, площадка и т.п. устройства

200 см для ВЛ 35 кВ;

250 см для ВЛ 110 кВ;

300 см для ВЛ 220 кВ;

350 см для ВЛ 330 кВ;

520 см для ВЛ 500 кВ;

тяга, захват и т.п. приспособления

50 см для ВЛ 35 кВ;

120 см для ВЛ 110 кВ;

200 см для ВЛ 220 кВ;

250 см для ВЛ 330 кВ;

400 см для ВЛ 500 кВ.

14. Расстояние по воздуху между человеком, работающим с опоры, и проводом линии, а также между человеком, работающим с изолирующего устройства и находящегося под потенциалом провода, и

взаемными частями опоры должно быть не менее:

0,7 м на ВЛ 35 кВ;

1,0 м на ВЛ 110 кВ;

2,0 м на ВЛ 220 кВ;

2,5 м на ВЛ 330 кВ;

4,0 м на ВЛ 500 кВ.

15. При работах под напряжением на ВЛ с деревянными опорами применение стальных канатов должно быть запрещено.

16. Человек, выполняющий работы на ВЛ с изолирующего устройства и находящийся под потенциалом провода, должен быть защищен от воздействия электрического поля с помощью экранирующего костюма или путем ограждения рабочей площадки металлической сеткой либо другими средствами с целью уменьшения токов, постоянно протекающих через человека и достигающих на ВЛ 35-500 кВ 0,3 - 4,3 мА до длительно допустимых значений - 50-70 мкА.

17. Оценка экранирующей способности защитных средств от воздействия электрического поля ВЛ (экранирующих костюмов, сетчатых ограждений и т.п.) для случаев, когда человек находится над землей и изолирован от земли, должна производиться по величине тока, проходящего через человека.

18. Работы на действующих линиях могут производиться лишь в сухую безветренную погоду в светлое время суток.

19. Перед началом работ на действующих линиях рекомендуется ознакомиться с прогнозом погоды и в случае вероятности возникновения грозы в радиусе 50 км от места работы производство работ должно быть запрещено.

При возникновении во время работы на действующей линии грозовой ситуации, в том числе при первых раскатах грома, разрядах

молнии и других признаках возникновения грозы, все работы на линии должны быть немедленно прекращены и люди удалены за край трассы линии.

20. На время производства работ на действующей ВЛ автоматы повторного включения ремонтируемой линии должны быть выведены из работы.

21. В период работы на действующей линии производство оперативных переключений на этой линии должно быть запрещено.

Основное содержание диссертации опубликовано автором в следующих книгах и статьях:

1. Книга. П.А. Долин "Правила безопасности при работах на линиях электропередачи без снятия напряжения (с пояснениями)", Госэнергоиздат, 1954, 5,4 п.л.

2. Книга. П.А. Долин "Работы под напряжением на воздушных линиях электропередачи", Госэнергоиздат, 1962, 9 п.л.

3. Книга. П.А. Долин "Основы техники безопасности в электрических установках", "Энергия", 1970, 18 п.л.

4. Книга. П.А. Долин "Электротехнические защитные средства и предохранительные приспособления", "Энергия", 1966, 20 п.л.

5. Книга-учебник для вузов. Б.А. Князевский, П.А. Долин, Т.П. Марусова, Н.В. Шипунов "Охрана труда", "Высшая школа", 1972, 21 п.л. (главы П, Ш, У).

6. Брошюра. Н.П. Астахов, П.А. Долин и др. "Правила безопасности при работах на линиях без снятия напряжения", Госэнергоиздат, 1951, 1 п.л.

7. Книга. П.А. Долин "Справочник по технике безопасности" Изд. 4-е, "Энергия", 1973, 25 п.л. (разделы П и IX).

8. Брошюра. П.А.Долин, Н.З.Хавин "Правила пользования и испытания защитных средств, применяемых в электротехнических установках", Госэнергоиздат, 1952, 3,5 п.л.

9. Статья. П.А.Долин "Безопасность при работах под напряжением на воздушных линиях электропередачи", Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 гг. Секция электромеханическая, МЭИ, 1969 (стр.65-73).

10. Статья. П.А.Долин "Емкость тела человека относительно земли", "Промышленная энергетика", 1972, № 3, стр.36, 37.

11. Статья. П.А.Долин "Вероятность появления на линии на месте работы людей волны атмосферного перенапряжения с максимально возможной амплитудой". Труды Московского ордена Ленина энергетического института. Безопасность труда в электроэнергетике. Выпуск 106, М., 1972 (стр.51-60).

12. Статья. П.А.Долин, И.А.Серебренников "Особенности производства работ вблизи действующих линий 110-750 кВ". Научно-техническая конференция "Электробезопасность в народном хозяйстве" 10-11 декабря 1969 г. (тезисы докладов) под общей редакцией Р.Н.Карякина, М., 1969 (стр.7-11).

13. Статья. П.А.Долин, И.А.Серебренников "Меры защиты от воздействия электрических полей воздушных линий электропередачи 110-750 кВ". Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-69 гг. Секция электромеханическая, МЭИ, 1969 (стр.74-80).

14. Статья. П.А.Долин, И.А.Серебренников "Меры защиты от воздействия полей воздушных линий электропередачи 110-750 кВ". Всесоюзная межвузовская конференция по проблемам охраны труда (тезисы докладов), Иваново, 1969 (стр.83-84).