



Филиал Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«Приволжский государственный
университет путей сообщения»



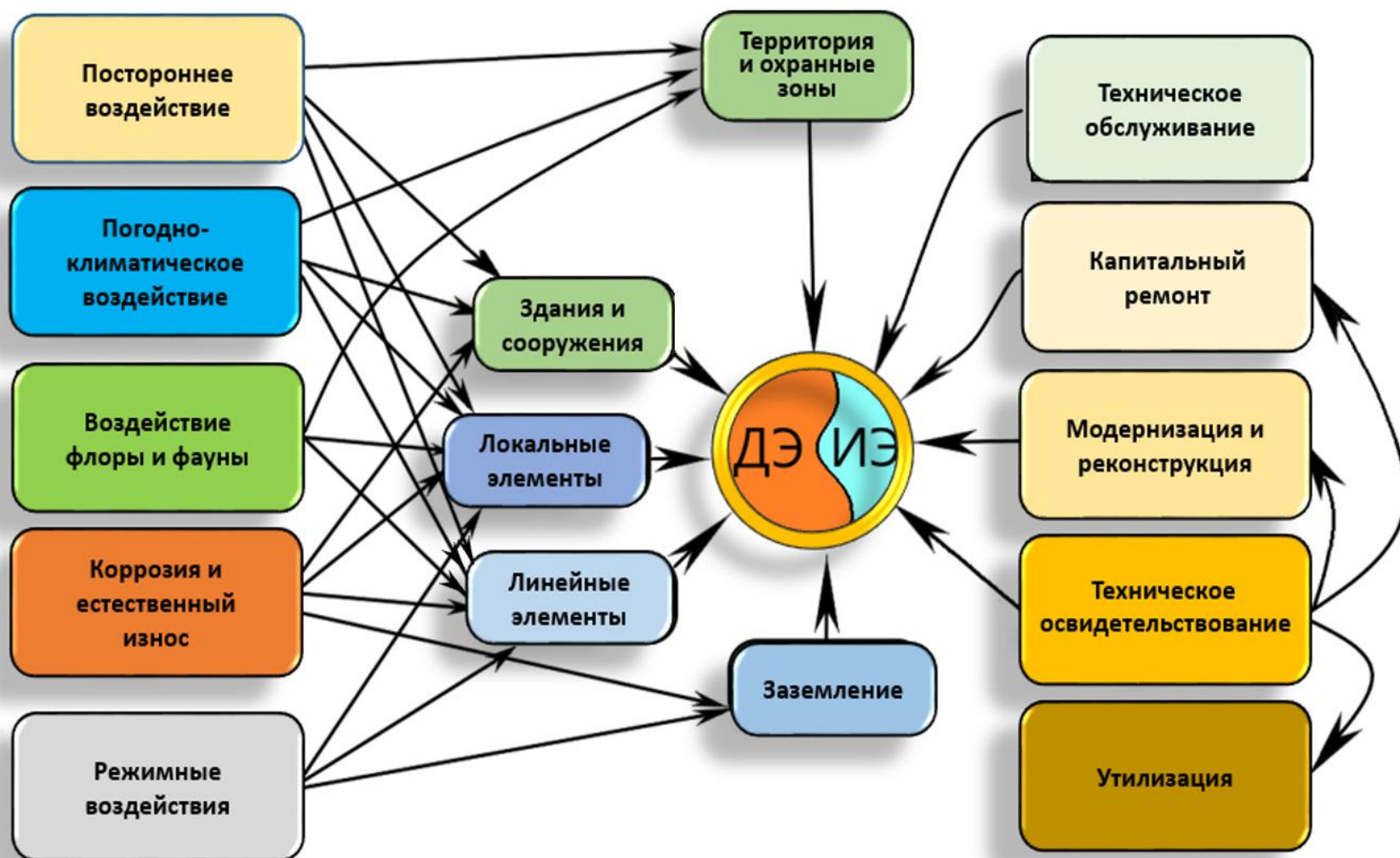
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Мирзаабдуллаев Акрамжан Одилович

Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта»

г. Нижний Новгород
2025

29.10.2025 г.



1. Проблемы обеспечения безопасности эксплуатации ВЛ
2. Обеспечение надежности элементов ВЛ
3. Способы технического воздействия и реальное техническое состояние ВЛ
4. Вопросы диагностики технического состояния ВЛ
5. Организационно-технические вопросы эксплуатации ВЛ
6. Декларируемые стратегии и реальное состояние эксплуатации ВЛ



НИПС
НИЖЕГОРОДСКИЙ
ИНСТИТУТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Проблемы обеспечения безопасности эксплуатации
воздушных линий электропередачи

1. Общие принципы обеспечения электробезопасности

Задача обеспечения электробезопасности должна решаться:

- **конструктивно** – при проектировании и строительстве ВЛ;
- **технологически** – при организации и осуществлении эксплуатации с разработкой ремонтных схем, технологических карт (ТК) и проектов производства работ (ППР);
- **нормативно** – разработкой нормативно-технической документации и стандартов безопасности;
- **организационно-технически** – подготовкой, обучением и аттестацией персонала, наряд-допускной системой, оснащением его средствами защиты и созданием системы охраны труда.

Комплекс организационно-технических мероприятий по ограничению воздействия:

- **рабочего напряжения** – при ошибочном или самопроизвольном включении коммутационного аппарата, подающего напряжение на ремонтируемую ВЛ, или падении провода действующей ВЛ на месте пересечения с ремонтируемой линией;
 - **наведенного напряжения** – при электромагнитном воздействии смежных действующих ВЛ или контактных сетей переменного тока электрифицированных железных дорог на провода и грозозащитный трос (ГТ) ремонтируемой ВЛ.
- Опасный фактор - **напряжение прикосновения** на рабочем месте.

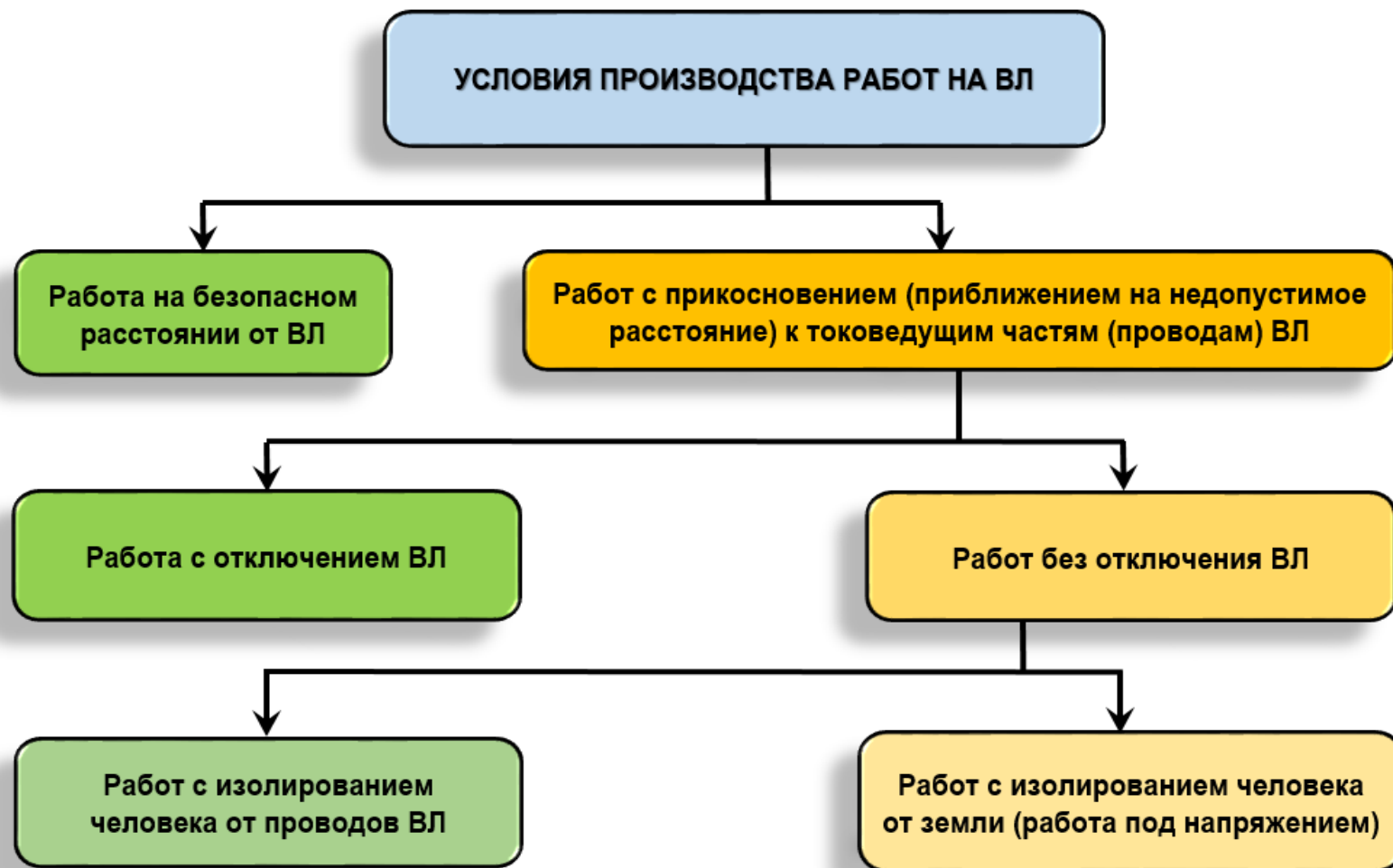


Рис. 1.1. Условия производства работ на ВЛ

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

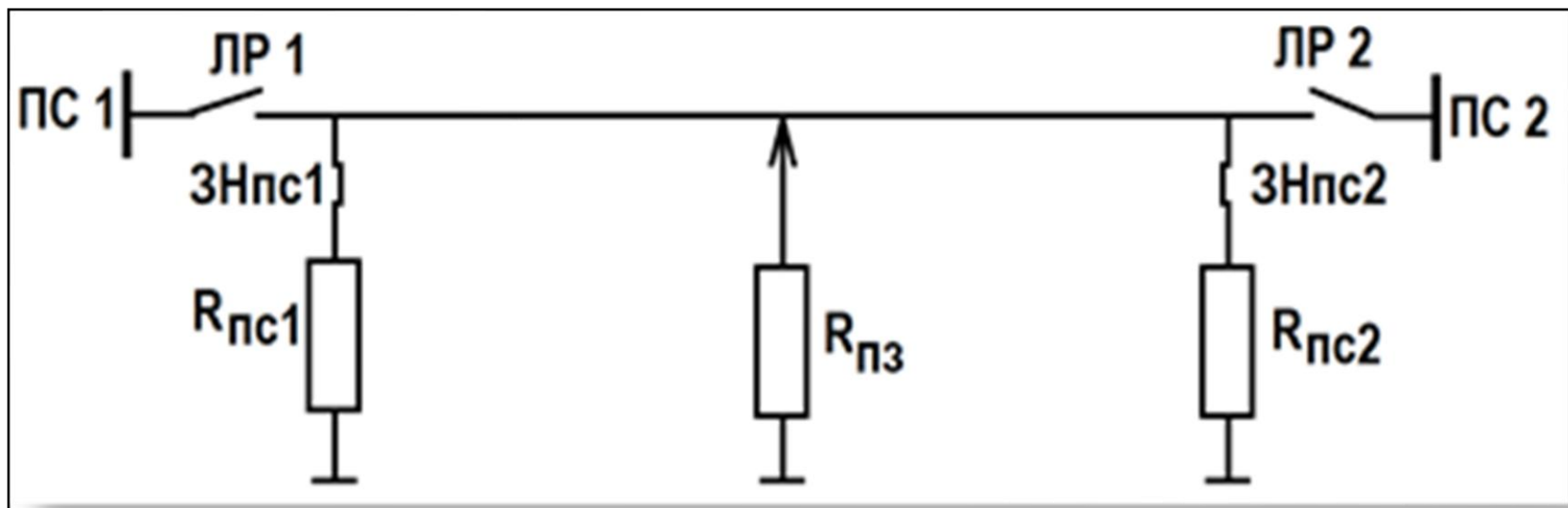


Рис.1.2. Классическая схема вывода ВЛ в ремонт. ЛР1–ЛР2 – линейные разъединители; ЗНпс1–ЗНпс2 – заземляющие ножи; $R_{пз}$ – сопротивление заземляющего устройства опоры; $R_{пс1}$ – $R_{пс2}$ – сопротивления заземляющих устройств подстанций ПС1, ПС2.

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

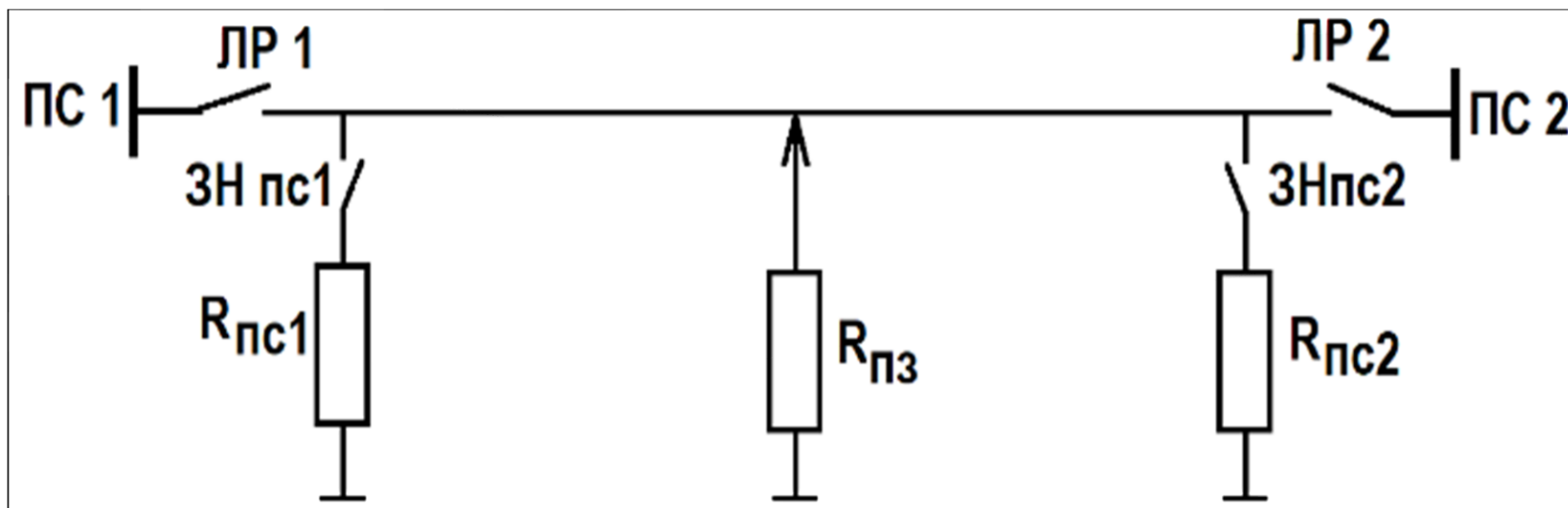


Рис.1.3. Схема вывода ВЛ в ремонт при наличии опасного наведенного напряжения на отключенной ВЛ

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

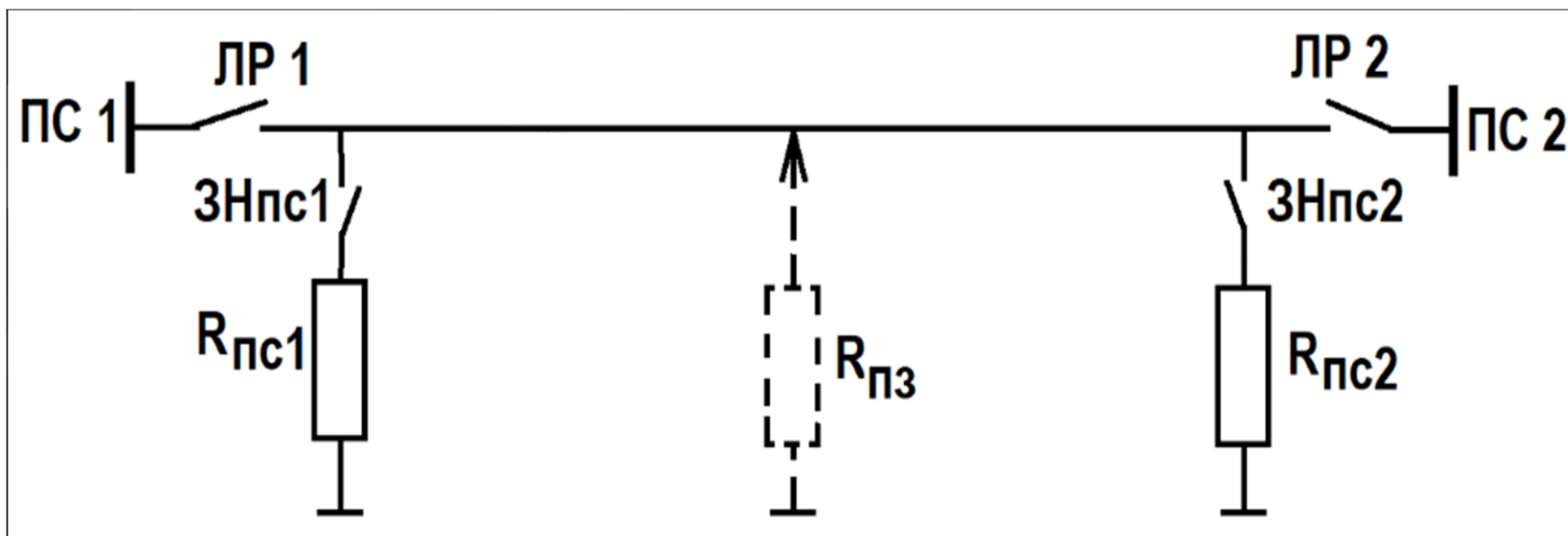


Рис.1.4. Промежуточная схема при выводе ВЛ в ремонт при наличии опасного наведенного напряжения на ВЛ

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

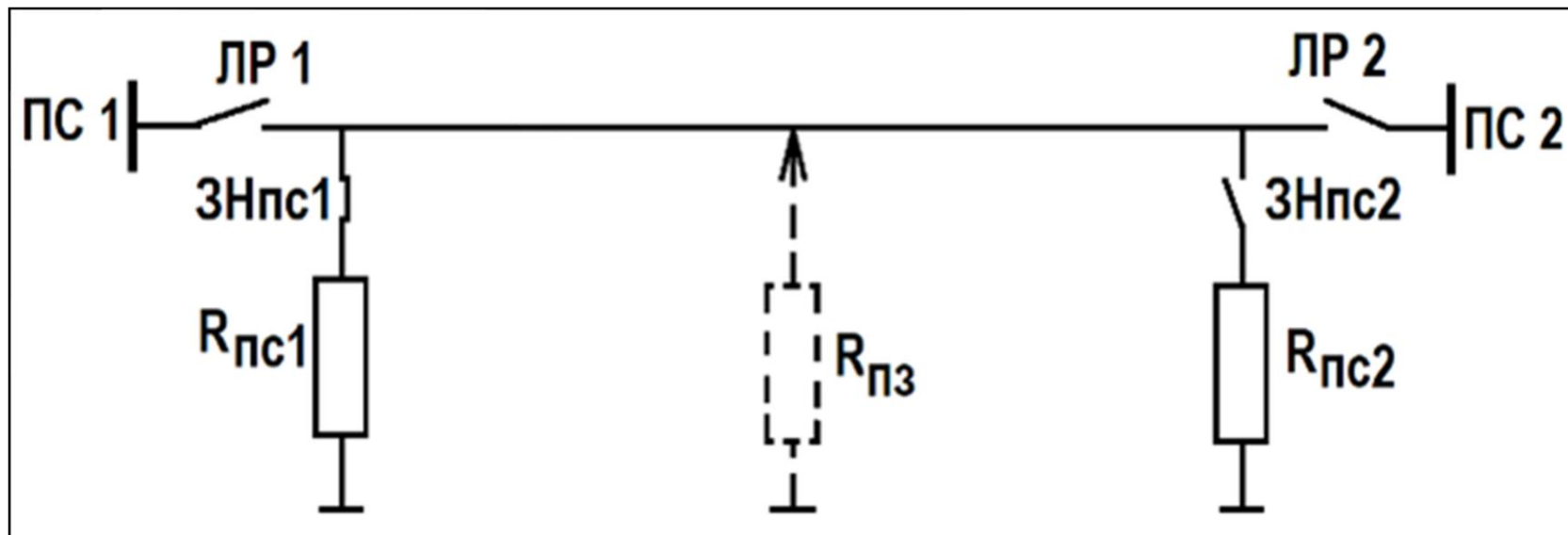


Рис.1.5. Промежуточная схема вывода в ремонт ВЛ с заземлением только на одной ПС

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

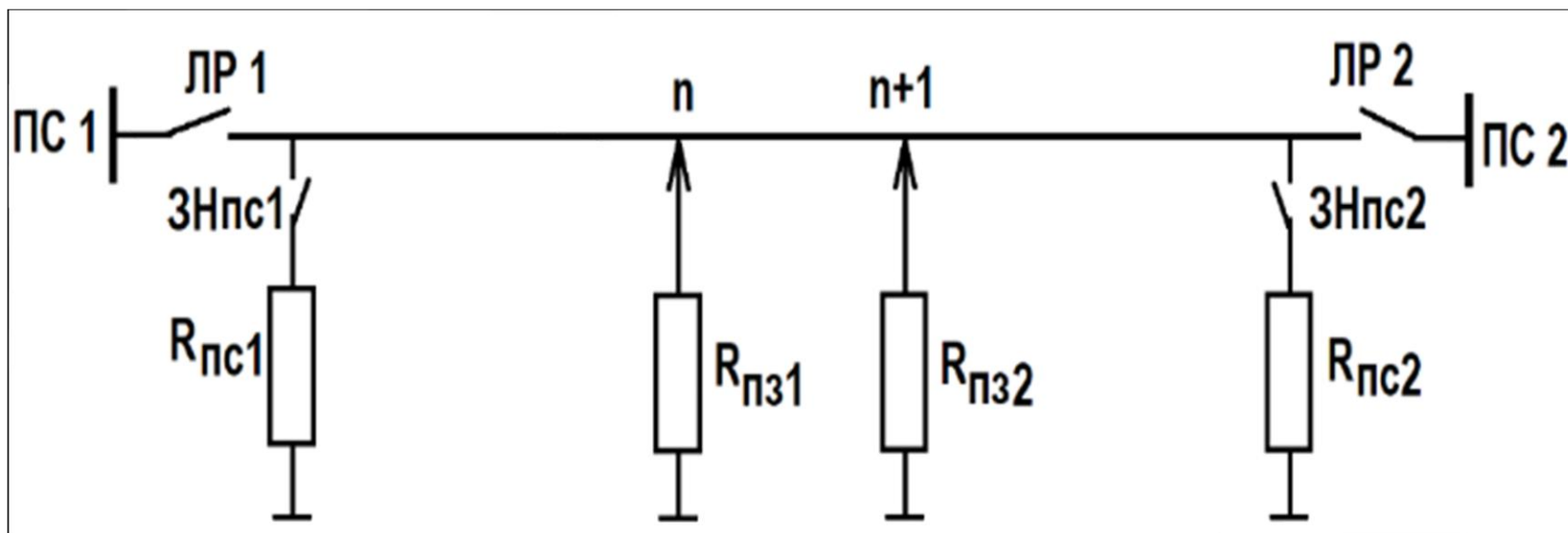


Рис. 1.6. Схема вывода ВЛ в ремонт при наличии опасного наведенного напряжения с заземлением на двух смежных опорах

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

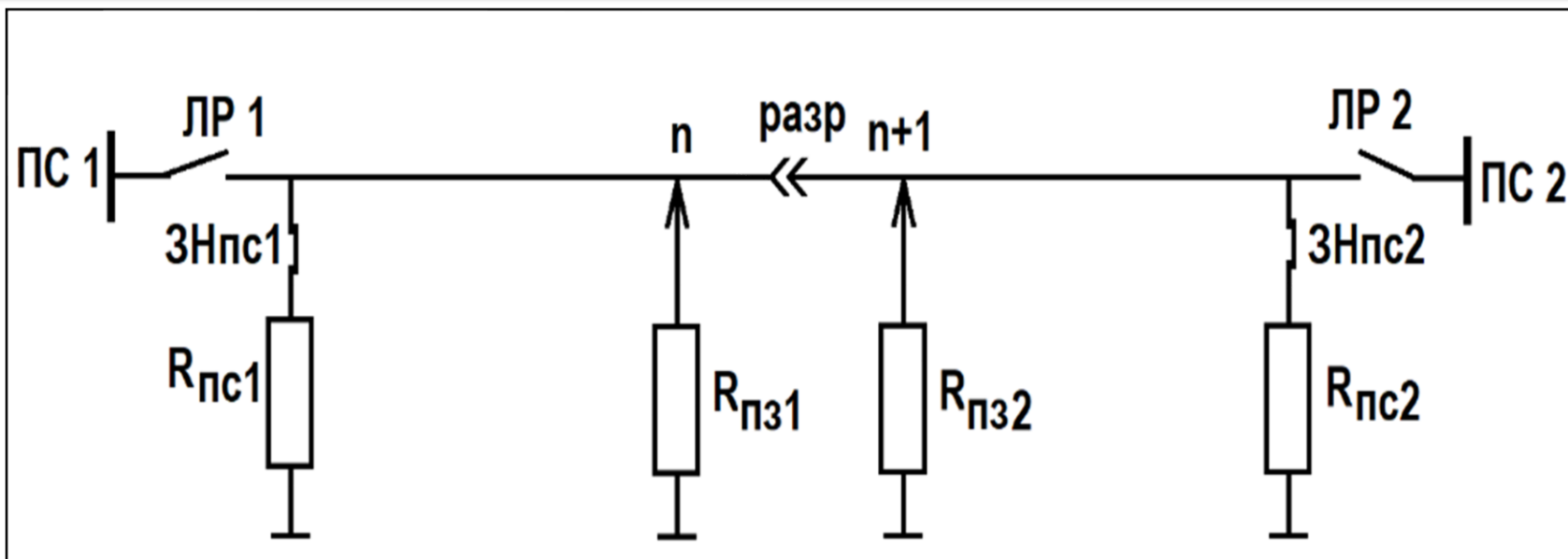


Рис.1.7. Схема вывода ВЛ в ремонт при наличии наведенного напряжения с разделением линии на две части и заземлением их на двух смежных опорах и ПС

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

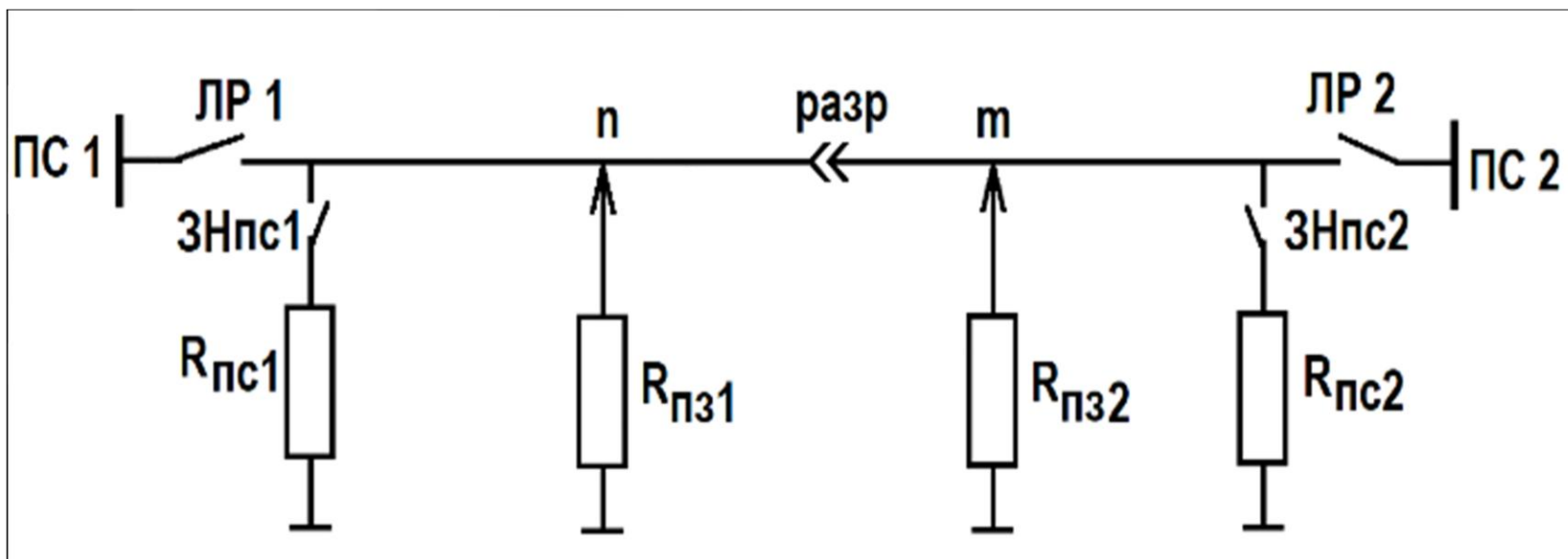


Рис.1.8. Схема вывода ВЛ в ремонт при наличии опасного наведенного напряжения с разделением ее на две части и заземлением их только на рабочих местах

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

Выбор указанных схем обусловлен только тем, что источниками опасного напряжения на рабочем месте ВЛ в действующих Правилах, как уже отмечено выше, признаются:

- 1) **рабочее напряжение** основной сети при случайной или ошибочной подаче рабочего напряжения со стороны питающих электростанций (подстанций) или обрыв и падение провода на пересекающихся ВЛ (последнее маловероятно);
- 2) **наведенное напряжение** при электромагнитном взаимодействии ремонтируемой ВЛ с действующими ВЛ и с контактной сетью переменного тока электрифицированных железных дорог;
- 3) **набегающие волны перенапряжения** из дальних участков длинных линий при грозовой деятельности.

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

Заземление, с точки зрения электробезопасности, должно выполнять **две функции**:

- 1) **шунтирующую функцию** (уравнивание потенциала), которая должна обеспечить снижение напряжения прикосновения до допустимого уровня значения (по Правилам, до 25 В [2]; по ГОСТ у для электроустановок с переменным током промышленной частоты: со временем действия до 0,1 с – 500 В, до 1,0 с – 100 В; в пределах 1,0–5,0 с – до 65 В [7]);
- 2) **сокращение времени действия** аварийного режима путем замыкания цепи тока (короткое замыкание) и приведение в действие релейной защиты на отключение оборудования от источника питания

1. Схемы заземления ремонтируемых линий электропередачи

Какие возможные опасности при работах на ВЛ в действующих Правилах **не учитываются?**

Прежде всего, это наличие гальванической (кондуктивной) связи между рабочим местом на ВЛ и точкой сети, где в аварийных ситуациях возможно появление высокого потенциала.

Не учитывается опасность выноса этого потенциала на заземленные токоведущие и токопроводящие элементы ВЛ. **Таких точек достаточно много**, но в данном докладе они объединены в две группы:

- 1) **первая группа** – заземляющие устройства электростанций и подстанций, куда заземлены (и заземляются) концы грозозащитных тросов и проводов ремонтируемой ВЛ;
- 2) **вторая группа** – все опоры двухцепной (многоцепной) ВЛ с неизолированным грозозащитным тросом или с грозозащитным тросом со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ), который также не изолирован от опоры.

2. Опасность напряжения косвенного прикосновения на ВЛ 6-10-35-110 кВ



Рис. 2.1. Источники опасного напряжения прикосновения на рабочем месте ВЛ

2. Опасность напряжения косвенного прикосновения на ВЛ 6-110 кВ

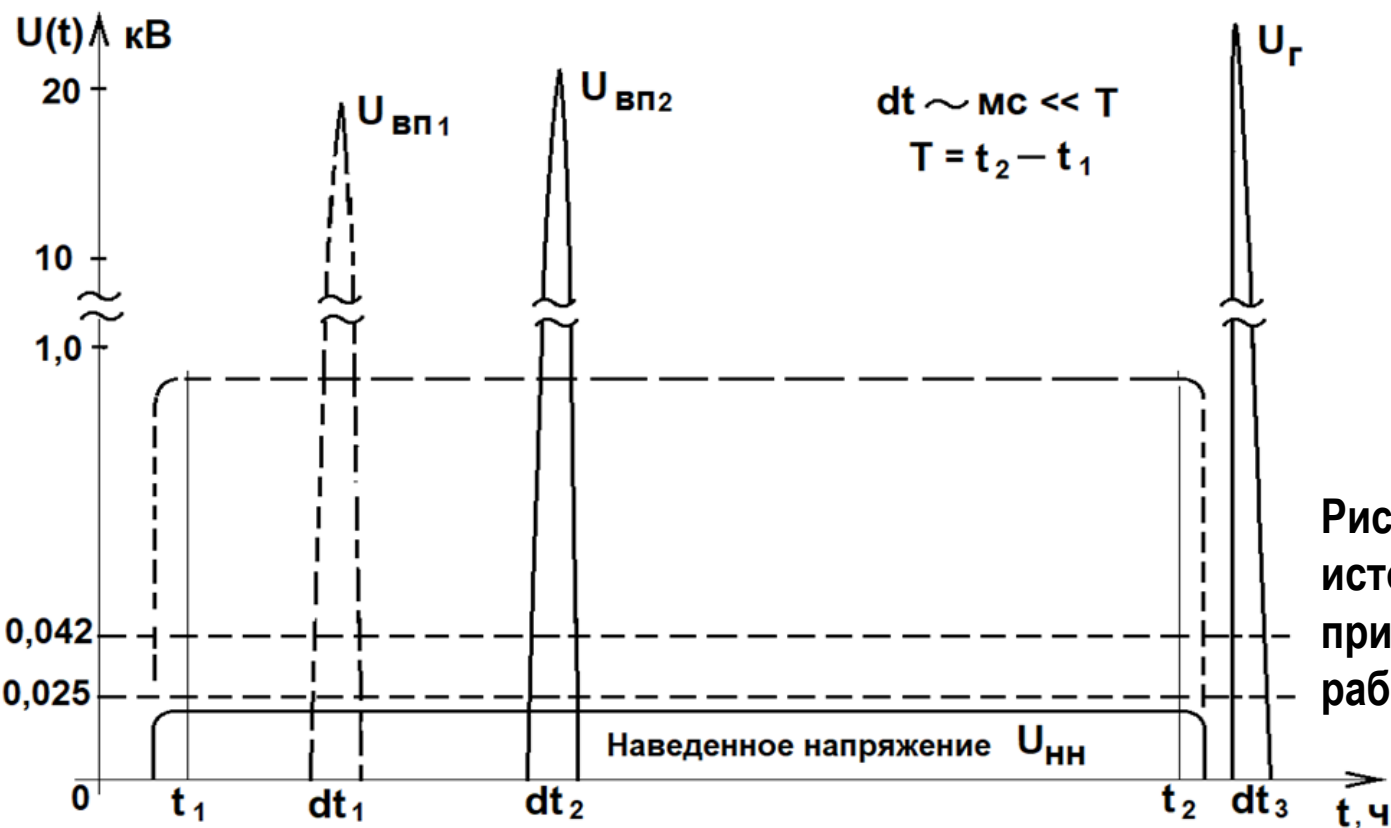


Рис. 1.9. Основные источники напряжения прикосновения на рабочем месте на ВЛ

2. Опасность напряжения косвенного прикосновения на ВЛ 6-110 кВ

Присоединенный к заземляющему устройству электрических станций и ПС, грозозащитный трос создает **первый, не учитываемый** в нормативах, **источник** опасного напряжения прикосновения на рабочем месте на ВЛ.

При классической схеме заземления, ремонтируемой ВЛ (рис. 1.2.) провода также присоединяются к заземляющему устройству ПС, что создает **второй неучитываемый источник** опасного напряжения прикосновения на рабочем месте на ВЛ.

Когда ремонтируется одна из цепей двухцепной (многоцепной) ВЛ с неизолированным грозозащитным тросом или с грозозащитным тросом со встроенным оптическим кабелем (далее – ОКГТ), любое короткое замыкание на, оставшейся в работе, цепи с перекрытием изоляции ВЛ создает опасность выноса потенциала на рабочее место на ВЛ по общему грозозащитному тросу. Это **третий неучтенный источник** опасного напряжения на рабочем месте ВЛ.

2. Опасность напряжения косвенного прикосновения на ВЛ 6-110 кВ

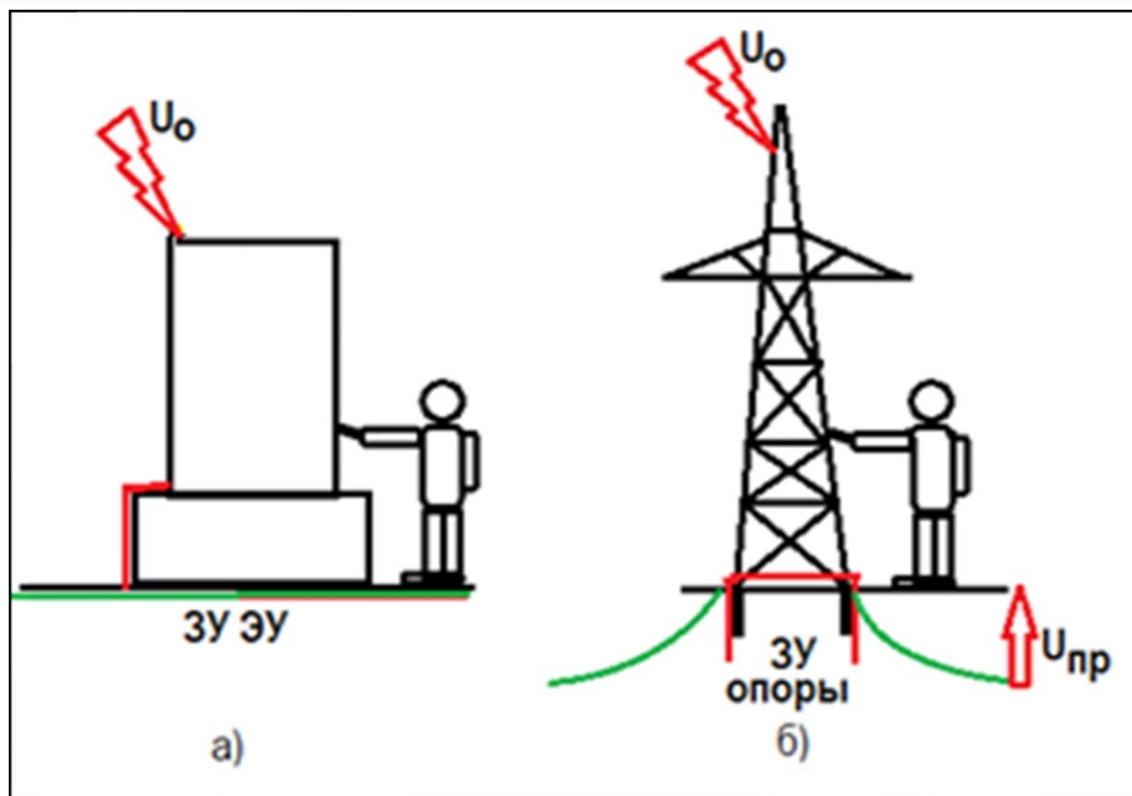


Рис. 2.2. Напряжение прикосновения к заземленным частям: а) электроустановки; б) опоры ВЛ

2. Опасность напряжения косвенного прикосновения на ВЛ 6-110 кВ

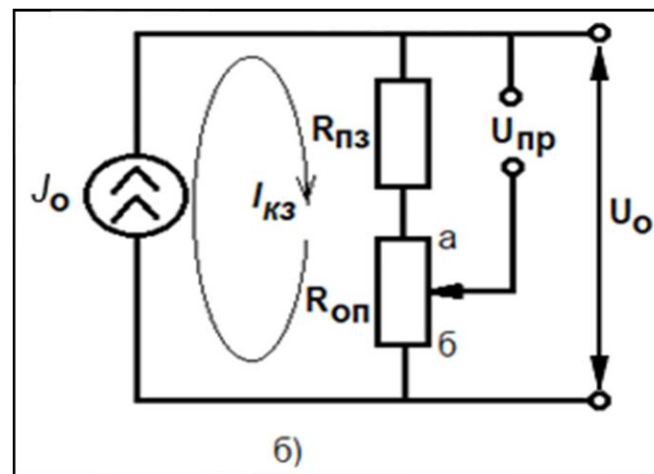
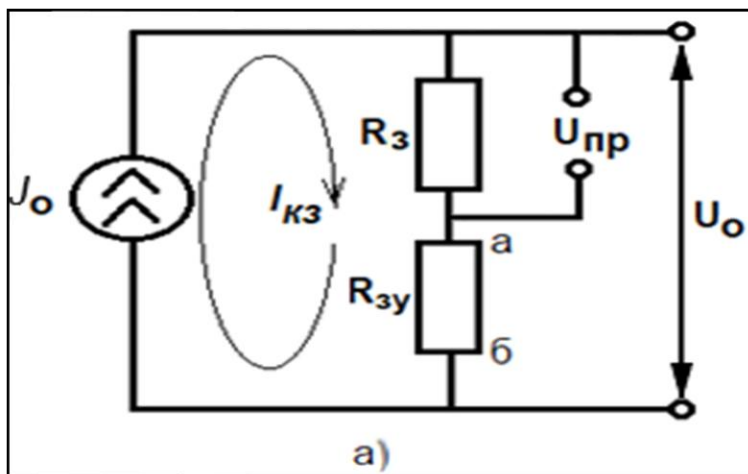
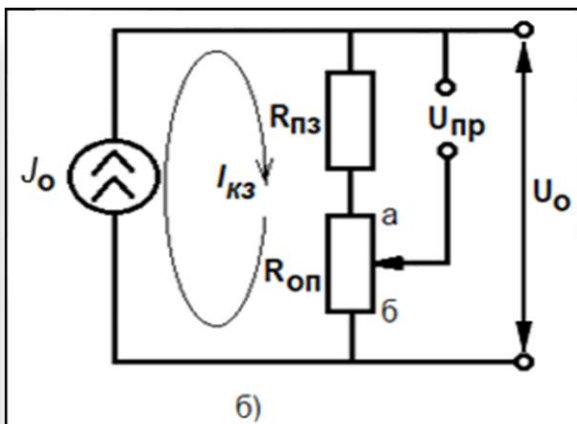
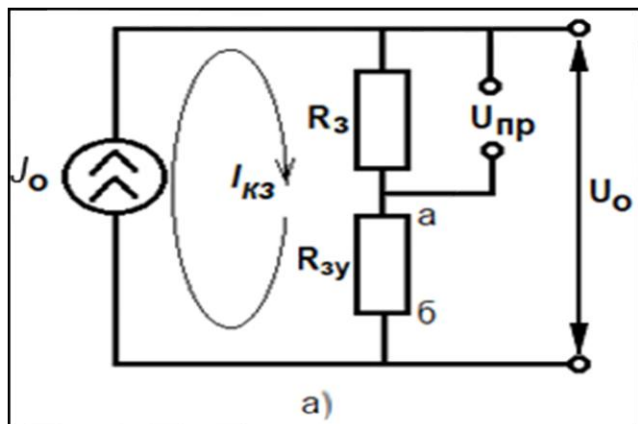


Рис. 2.3. Эквивалентные схемы для определения ожидаемого напряжения прикосновения:
а) при прикосновении к заземленным частям ЭУ; б) при прикосновении к опоре ВЛ.

Здесь: U_0 – величина вынесенного потенциала на заземленную часть электроустановок или опор ВЛ; $U_{пр}$ – ожидаемое напряжение прикосновения; $R_{пз}$ – сопротивление переносного заземления на ВЛ (не более 0,05 Ом); R_3 – сопротивление заземляющего проводника (не более 0,05 Ом); R_{3y} – сопротивление заземляющего устройства электроустановок (0,5 Ом); $R_{оп}$ – сопротивление заземляющего устройства опор ВЛ (10–30 Ом – нормированное значение).

2. Опасность напряжения косвенного прикосновения на ВЛ 6-110 кВ



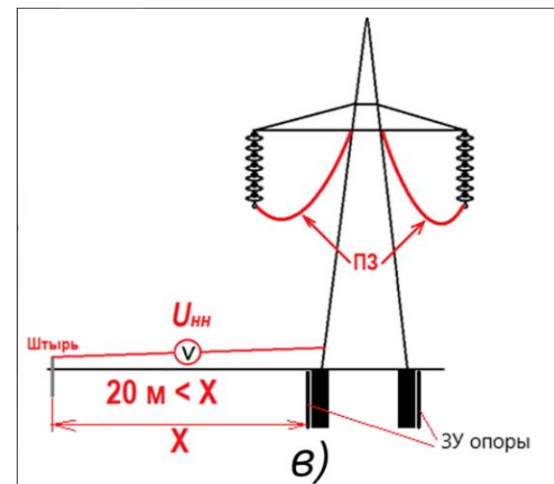
$$\text{а) } U_{\text{пр}} = U_0 \frac{R_3}{(R_{3y} + R_3)};$$

$$\text{б) } U_{\text{пр}} = U_0 \frac{(R_3 + kR_{\text{оп}})}{(R_3 + R_{\text{оп}})};$$

$$U_{\text{пр}} = \lim_{k \rightarrow 1} U_0 \frac{(R_3 + kR_{\text{оп}})}{(R_3 + R_{\text{оп}})} = U_0.$$

В зоне растекания заземляющего устройства опоры и в зоне нулевого потенциала **напряжение прикосновения** к заземленным проводам и другим частям опоры будет недопустимо велико и может равняться величине вынесенного потенциала на опоре – U_0 .

Необходимо учитывать все потенциальные источники напряжения, которые могут создавать опасные напряжения прикосновения на рабочем месте на ВЛ, в том числе: заземляющие устройства ПС по гальваническим (кондуктивным) связям; все опоры ВЛ, связанных по общему грозозащитному тросу. Следовательно, границы рабочих мест необходимо определять с обязательным учетом зоны выравнивания потенциала заземляющего устройства на месте производства работ на ВЛ



- фазными проводами отключенной линии (рис.3.1. а);
- проводящими частями (проводами) и заземленными элементами (опорами, заземляющим устройством) ВЛ (рис.3.1.а);
- свободными концами разъединенного шлейфа (рис.3.1. б);
- заземленными частями (в том числе заземленными проводами и тросами) и отдаленной точкой земли (относительный ноль) (рис.3.1. в).

3. Оценка и учет наведенного напряжения при производстве работ на ВЛ

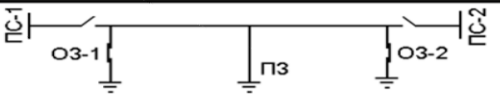
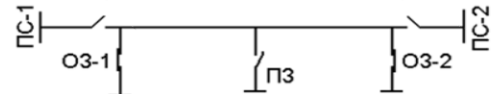
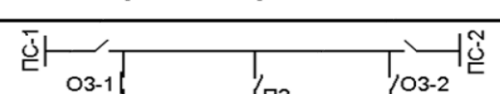
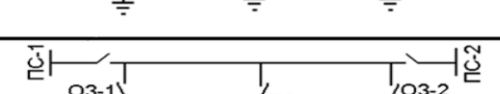
Поскольку не определено само понятие «наведенное напряжение», то определение ВЛ, находящихся под наведенным напряжением, приведенное в двух последних редакциях Правил охраны труда как **«ВЛ, которые проходят по всей длине или на отдельных участках вблизи действующих ВЛ или вблизи контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока и на отключенных проводах которых при различных схемах их заземления (а также при отсутствии заземлений) и наибольшем рабочем токе действующих ВЛ, (контактной сети) наводится напряжение более 25 В»**, выглядит не вполне корректным.

Анализ обзоров несчастных случаев, произошедших за период более чем 50 лет, в электроэнергетике РФ (с учетом периода существования СССР) показывает, что подавляющее большинство несчастных случаев происходило именно при изменении параметров ремонтной схемы: изменении схемы заземления ВЛ и прикосновения к незаземленному проводу, нарушении целостности провода, при ошибочном или случайном отсоединении заземляющего проводника, при ухудшении параметров заземляющего устройства и т. д. Самое главное, во всех случаях происходило **скачкообразное изменение напряжения прикосновения** на месте нахождения пострадавшего работника.

4. Классификация уровней наведенного напряжения на ВЛ

В зависимости от схемы заземления, любая ремонтируемая ВЛ может находиться в различных состояниях, определяемых положением коммутационных аппаратов на ПС, целостностью проводов и наличием или отсутствием переносного заземления на рабочем месте.

Таблица 4.1

Схемы заземления отключенной ВЛ		
№ схемы	Схема заземления ВЛ	Характеристика
1		ВЛ отключена и заземлена по концам и на месте работы
2		ВЛ отключена и заземлена только по концам
3		ВЛ отключена и заземлена только на рабочем месте
4		ВЛ отключена и заземлена только с одной стороны (на ПС-1)
5		ВЛ отключена со всех сторон, но нигде не заземлена (горячий и холодный резерв)

4. Классификация уровней наведенного напряжения на ВЛ

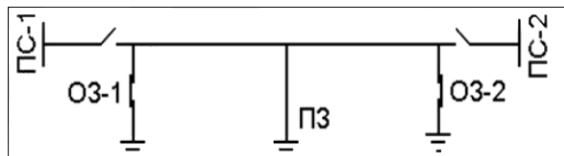
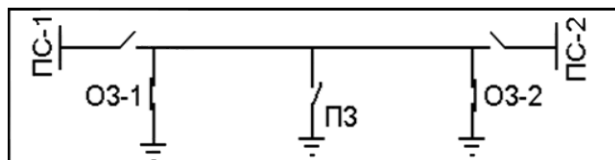


Схема 1 – это традиционная схема заземления ВЛ 6–110 кВ при отсутствии наведенного напряжения (классическая схема вывода ВЛ в ремонт).

1) Остаточный уровень – $U_{\text{ост}}$, проявляется как падение напряжения на сопротивлении заземляющего устройства при совместном прохождении через него электростатического (емкостного) и некомпенсированной части электромагнитного токов, и имеет место, когда ВЛ заземлена по концам и на месте работ (п.1, таблица 4.2). Для ВЛ, протяженностью до 100 км, идущих параллельно и имеющих от начала до конца одинаковые удельные параметры, а также заземленные по концам на контуры заземления электрических станций и ПС сопротивлением не более 0,5 Ом, значение остаточного уровня совершенно безопасно. К таким можно отнести все двухцепные ВЛ, идущие на однотипных опорах от начала до конца, и одноцепные ВЛ 35–750 кВ, идущие в неизменном коридоре и не имеющие транспозиции цепей и фаз.

4. Классификация уровней наведенного напряжения на ВЛ



Схемы 2 – имеет место в процессе вывода ВЛ в ремонт, при подготовке рабочего места на ВЛ и при подготовке её к вводу в работу, а также при аварийных и непредвиденных ситуациях, когда нарушаются целостность и исправность заземляющих устройств.

2) Промежуточный уровень $U_{пр}$ – значение наведенного напряжения, когда ВЛ выведена в ремонт – отключена и заземлена только по концам, а на месте работ заземление не установлено (п.2., таблица 4.2). Значение этого уровня всегда больше остаточного, но меньше электромагнитной ЭДС. Опасность этого уровня проявляется при одновременном прикосновении к, незаземленному на месте работ, проводу и к заземленным конструкциям (на земле, опоре, траверсе и т. д.). Для персонала, эксплуатирующего ВЛ 6-110 кВ, опасность этого уровня может возникать при установке или снятии переносного заземления на ВЛ, а также в процессе работы, при случайном отсоединении от провода переносного заземления.

4. Классификация уровней наведенного напряжения на ВЛ

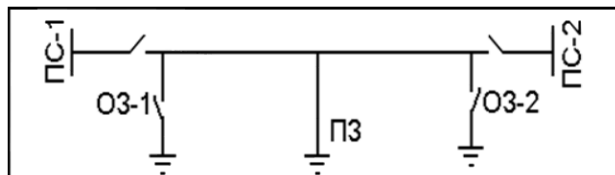


Схема 3 – схема заземления ВЛ при пофазном ремонте ВЛ, в соответствии с п. 28.45. Правил, когда не удастся снизить наведенное напряжение до 25 В

3) Уровень, определяемый емкостным током $U_{эс.ост}$ – потенциал, заземленных только на рабочем месте проводов (грозозащитных тросов) ВЛ, которая отключена, но не заземлена по концам на ПС (п.3, таблица 4.2). Значение электростатического тока зависит от взаимных емкостей проводов (грозозащитных тросов), напряжения и степени асимметрии, сопротивления заземляющего устройства, а также от протяженности взаимодействующих ВЛ. Этот ток не зависит от тока на влияющих ВЛ и является достаточно стабильным параметром для данной конфигурации сетей. Он одинаков для любой точки изолированного провода, и его можно измерить в любой точке провода (грозозащитного троса), в том числе на любом конце, и при односторонне заземленной ВЛ.

4. Классификация уровней наведенного напряжения на ВЛ

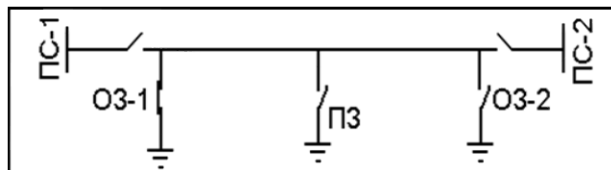


Схема 4 - имеет место в процессе вывода ВЛ в ремонт, при подготовке рабочего места на ВЛ и при подготовке её к вводу в работу, а также при аварийных и непредвиденных ситуациях, когда нарушаются целостность проводов (тросов) и исправность заземляющих устройств

4) Уровень электромагнитной ЭДС $U_{эм}$ – наибольшее значение электромагнитной составляющей наведенного напряжения при заданных значениях токов на влияющих ВЛ. Этот уровень многократно превосходит остаточный и промежуточный уровни, и может появиться на любом конце отключенной и заземленной по концам ВЛ, когда увеличивается сопротивление заземляющих устройств или нарушается контакт с ними. Кроме того, это же значение может появиться в любом месте разрыва провода, когда на концах сохраняются заземления. Поэтому уровень электромагнитной ЭДС целесообразно измерять на незаземленном конце при одностороннем заземлении ВЛ (п.4, таблица 4.2).

4. Классификация уровней наведенного напряжения на ВЛ

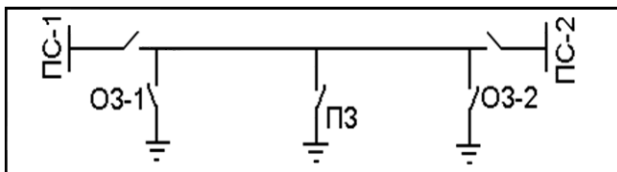


Схема 5 является самой опасной с точки зрения электробезопасности. Она специально не создается, однако, мгновенно возникает при появлении дефекта в заземляющем устройстве, при заземлении ВЛ, в соответствии со схемами 3 и 4

5) Уровень электростатической ЭДС $U_{эс}$ – потенциал незаземленных проводов и грозозащитных тросов отключенной ВЛ (п.5, таблица 4.2). Во многих случаях это достаточно опасный уровень, практически всегда превышающий 25 В, и по степени опасности превосходящий все остальные уровни. Уровень электростатической ЭДС зависит от напряжения на влияющих ВЛ, степени асимметрии (пространственной или электрической) и значений собственных и взаимных емкостей взаимодействующих проводов (грозозащитных тросов) и не зависит от токов на влияющих ВЛ. Этот уровень имеет наибольшую вероятность возникновения, если работа на ВЛ организована с заземлением проводов только в одной точке и когда резко возрастает сопротивление заземления или нарушается контакт между проводом и заземляющим устройством

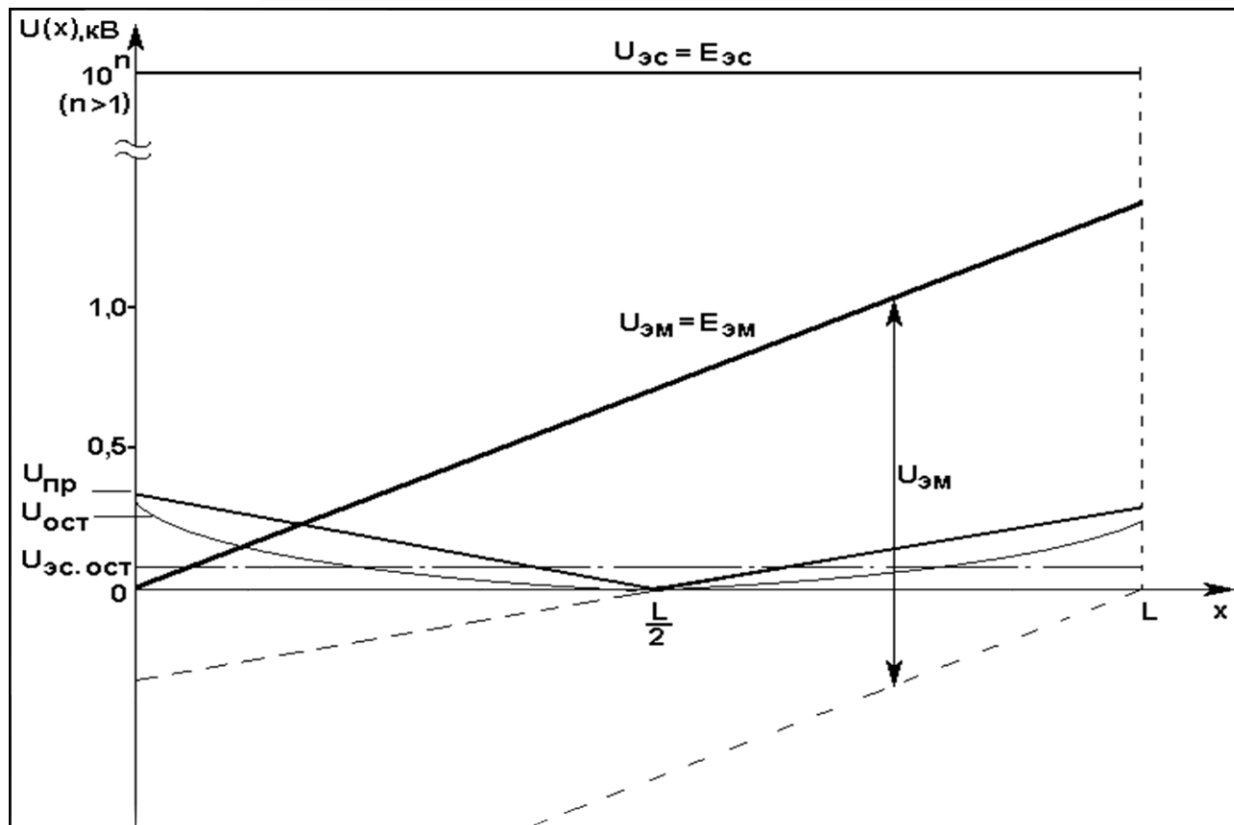


Рис. 4.2. Графики изменения уровней наведенного напряжения:

$U_{\text{Эс}}$ – уровень электростатической ЭДС; $U_{\text{Эм}}$ – уровень электромагнитной ЭДС, при одностороннем заземлении ВЛ; $U_{\text{ост}}$ – остаточный уровень; $U_{\text{пр}}$ – промежуточный уровень; $U_{\text{Эс.ост}}$ – уровень, определяемый емкостным током и сопротивлением заземляющих устройств; L – длина совместного следования взаимодействующих ВЛ

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

В основу большинства существующих методов расчета наведенного напряжения, независимо от того, какими методами и подходами пользуются авторы, заложены основные положения, позволяющие приблизить положение систем уравнений Максвелла к реальным техническим устройствам и упрощающие расчеты, которые предложил в своих работах М.В. Костенко [26].

Идеализация доминирующих свойств среды и пренебрежение их второстепенными свойствами

Учитывая огромные значения удельного сопротивления воздуха $\rho_v \gg 1$, проводимости проводов и земли (соотношение 5.1), в расчетах пренебрегают токами проводимости воздуха, токами смещения в земле и в проводах. За основу берут следующие соотношения:

$$\frac{1}{\rho_v} E_v \ll \frac{d}{dt} D_v; \quad \frac{1}{\rho_z} E_z \gg \frac{d}{dt} D_z; \quad \frac{1}{\rho_{\Pi}} E_{\Pi} \gg \frac{d}{dt} D_{\Pi}, \quad (5.1)$$

где $\rho_v, \rho_z, \rho_{\Pi}$ – удельное сопротивление воздуха, земли и проводов соответственно, не зависящее от координат и времени; E_v, E_z, E_{Π} – напряженность электрического поля в соответствующих средах; D_v, D_z, D_{Π} – электрическая индукция в соответствующих средах.

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

Идеализация рассматриваемых систем

Для простоты и удобства расчета все провода считаются параллельными между собой и относительно поверхности земли. Не параллельные приближения проводов заменяются параллельными эквивалентами. Все провода считаются с круглым сечением и цилиндрической формы, все компоненты поля внутри проводов и их поверхности – осесимметричными.

Квазистационарность режима

Все компоненты поля являются гармоническими функциями времени:

$$E(t) = E_m e^{-i\omega t}; H(t) = H_m e^{-i\omega t}. \quad (5.2)$$

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

Пренебрежение обратным влиянием процессов в отключенной линии на процессы в линии влияющей

Это допущение позволяет ввести понятие продольной ЭДС взаимоиндукции, возникающей в отключенной линии от всех внешних электрических полей, и упростить решение задачи. Значение ЭДС взаимоиндукции при параллельном сближении находится по формуле:

$$\dot{E}_2(t) = \dot{I}_1 Z_{12} k_{зд} , \quad (5.3)$$

где $\dot{E}_2$ – ЭДС взаимной индукции провода 2 отключенной линии; $\dot{I}_1$ – ток в проводе 1 влияющей линии; Z_{12} – взаимное сопротивление между однопроводными линиями 1 и 2 с учетом влияния земли; $k_{зд}$ – коэффициент защитного действия других заземленных проводов.

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

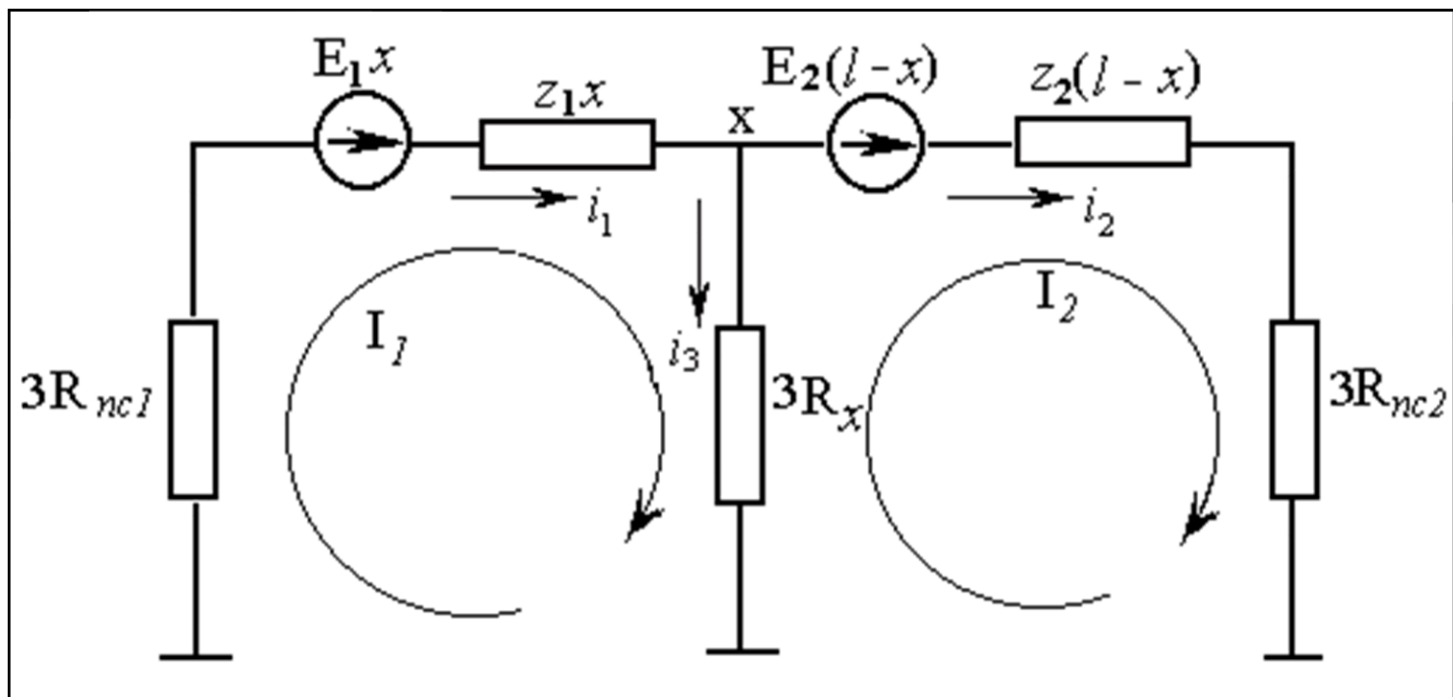


Рис. 5.2. Схема замещения нулевой последовательности ВЛ, отключенной и заземленной по концам на ПС и на месте работ

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

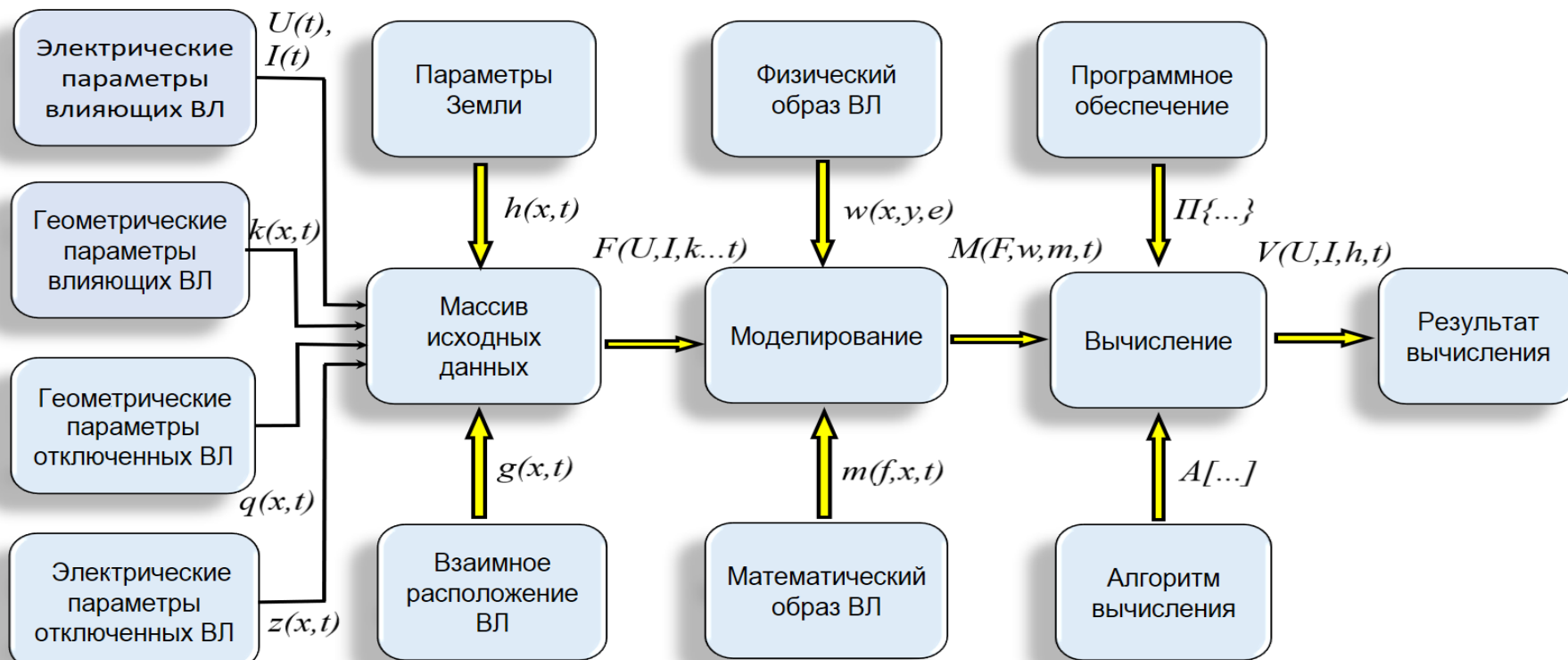


Рис. 5.3. О точности и достоверности результатов расчета наведенного напряжения на ВЛ

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

Анализируя, рассмотренные ранее, методы расчета наведенного напряжения, принимаемые математические и физические модели объекта, алгоритмы и программное обеспечение, можно сделать следующие обобщенные выводы (рис.5.3):

- для расчета требуется огромный массив данных, параметры и значения которых являются функцией времени;
- образ объекта подвергается неизбежной корректировке в процессе физического и математического моделирования;
- в результатах расчета наведенного напряжения присутствуют методические и случайные ошибки;
- результаты расчета зависят от исходных параметров и являются функцией времени, потому и не могут быть приняты как стабильные свойства объекта даже в пределах конкретного рабочего времени

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

Однако, проблема оценки наведенного напряжения на этом не завершается.

Во-первых, значение наведенного напряжения зависит от многих факторов, большинство из которых могут меняться даже в течение рабочего времени, в том числе:

- погодно-климатические условия и, как результат, проводимость поверхности земли, удельное сопротивление грунта и сопротивление заземляющих устройств ВЛ;
- конфигурации сетей – количество, схемы взаимного расположения и длина участка совместного следования действующих (влияющих) и отключенных ВЛ;
- величина и направление перетока мощности, взаимная ориентация при влиянии нескольких ВЛ;
- режим нагрузки на влияющих ВЛ (холостой ход, нормальный, перегруженный, неполнофазный, короткое замыкание);
- схемы заземления и целостность проводов (тросов) отключенной ВЛ;
- состояние и сопротивление заземляющих устройств.

В результате, то безопасное значение наведенного напряжения, которое установлено измерениями или расчетами, в одно мгновение может оказаться опасным при изменении любого, из перечисленного выше, параметра на элементах ВЛ.

5. О МЕТОДАХ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЛ

Из анализа обзоров несчастных случаев за последние 50 лет следует, что изменение режима работы влияющих ВЛ, за исключением режима короткого замыкания, не приводило к несчастным случаям, связанным с наведенным напряжением. Практически все несчастные случаи происходили при изменении **схемы заземления отключенной ВЛ**. Поэтому целесообразно рассмотреть зависимость значений наведенного напряжения от схем заземления отключенной ВЛ.

Опасность наведенного напряжения на ВЛ в Правилах рассматривается только в двух из пяти возможных наименьших уровней [8–10]:

- 1) **остаточный уровень**, соответствующий классической схеме вывода ВЛ в ремонт (рис. 1.2);
- 2) **падение напряжения на заземляющем устройстве опоры** при воздействии тока, вызванного действием электростатической ЭДС, когда заземляющее устройство является единственным на ремонтируемой ВЛ (рис. 1.4).

Остаются неучтенными еще **три уровня** наведенного напряжения, величина которых многократно превышает упомянутые выше уровни..

6. АСИММЕТРИЯ НА ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

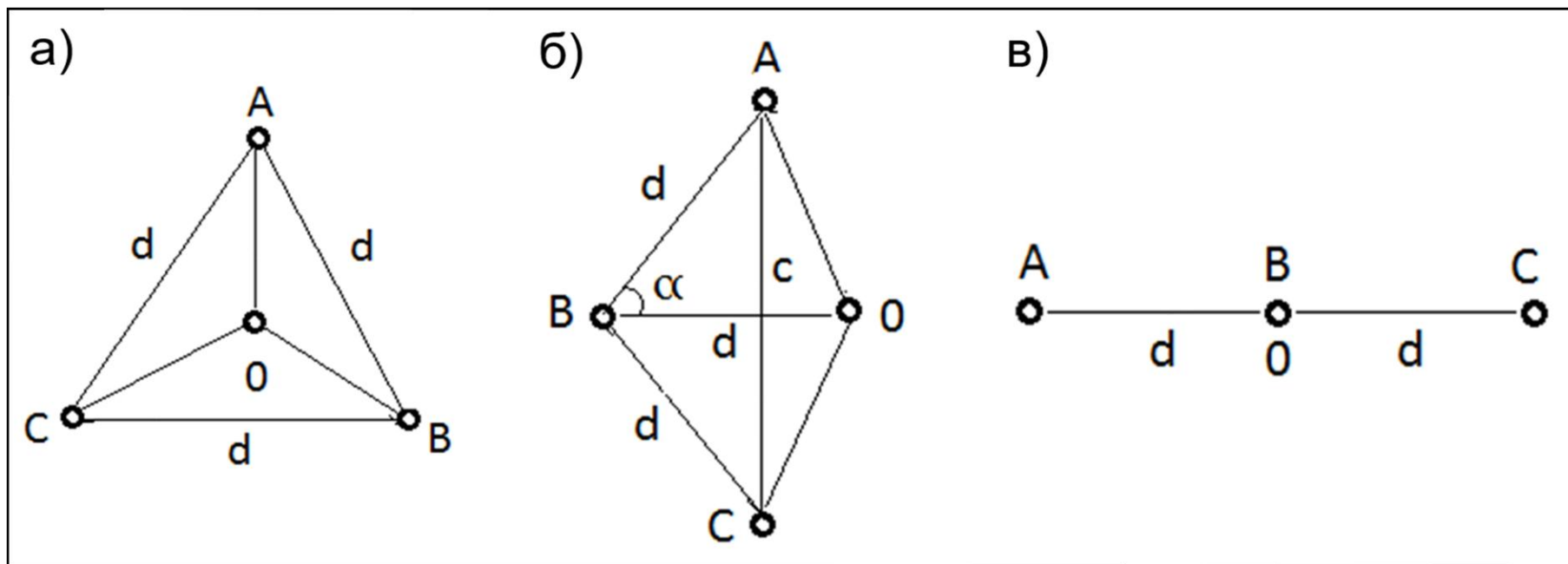
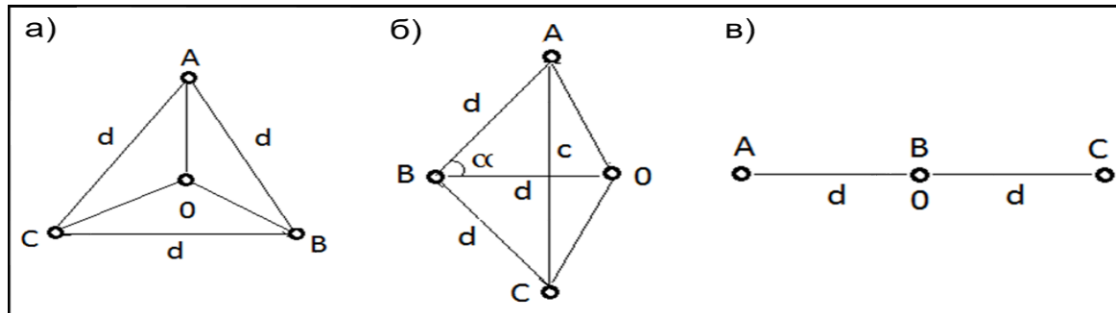


Рис. 6.1. Центры симметрии «0» трехфазных проводов воздушных линий при их различном расположении: а) по вершинам равностороннего треугольника, б) при расположении по схеме «бочка», в) при горизонтальном расположении проводов

6. АСИММЕТРИЯ НА ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ



Уровень несимметрии при перемещении точки наблюдения от центра симметрии «O» сначала растет, а при удалении убывает. Если принять за параметр для симметричной системы среднегеометрическое расстояние между фазными проводами h , то, в зависимости от расположения проводов на опорах ВЛ (рис.6.1.), возможны следующие значения параметра h :

$$\text{а) } h_{\text{тр}} = \sqrt[3]{d \times d \times d} = d; \quad (6.1)$$

$$\text{б) } h_{\text{боч}} = \sqrt[3]{d \times d \times c} = \sqrt[3]{d \times d \times 2d \sin \alpha} = d \sqrt[3]{2 \sin \alpha} \quad (6.2)$$

$$\text{в) } h_{\text{гор}} = \sqrt[3]{d \times d \times 2d} = d \sqrt[3]{2}. \quad (6.3)$$

На участке перемещения $x \in \{0; h\}$ асимметрия существует и максимально проявляется при приближении к одной из трех фаз, а при удалении $x \gg h$ значение асимметрии убывает.

6. АСИММЕТРИЯ НА ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

На участке перемещения $x \in \{0; h\}$ асимметрия существует и максимально проявляется при приближении к одной из трех фаз, а при удалении $x \gg h$ значение асимметрии убывает.

Указанному явлению способствуют два обстоятельства:

- 1) При удалении точки наблюдения k от центра симметрии «0» и приближении к одной из фаз нарушается взаимная компенсация полей, что приводит к возникновению некомпенсированной индукции переменного магнитного поля.
- 2) Дальнейшее перемещение точки k на расстояние x , более чем на значение параметра системы h ($x \gg h$), приведет к постепенному восстановлению взаимной компенсации индукции магнитных полей фаз

Зависимость наводимой ЭДС E на проводе длиной l отключенной ВЛ с взаимной индуктивностью M от тока I промышленной частоты, протекающего в одиночном параллельном влияющем проводе, имеет логарифмическую зависимость от расстояния x между ними:

$$E(x, t) = \frac{\omega}{2\pi} \mu_0 M I \left(\ln \frac{2l}{x} - 1 \right) \cos(\omega t) \quad (6.4)$$

Зависимость наводимой ЭДС от симметричного трехфазного переменного тока I промышленной частоты на рассматриваемом параллельном проводе длиной l с взаимной индуктивностью M и расположенном на расстоянии x от влияющей трехфазной ВЛ имеет вид:

$$E(x, t) = \frac{h}{xT} \mu_0 M I \left(\ln \frac{2l}{x} - 1 \right) \cos(\omega t). \quad (6.5)$$

В отличие от (6.4) наводимая ЭДС между взаимодействующими проводами ВЛ при влиянии трехфазного тока (6.5) убывает быстрее при возрастании x , чем при воздействии однофазного тока

6. АСИММЕТРИЯ НА ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

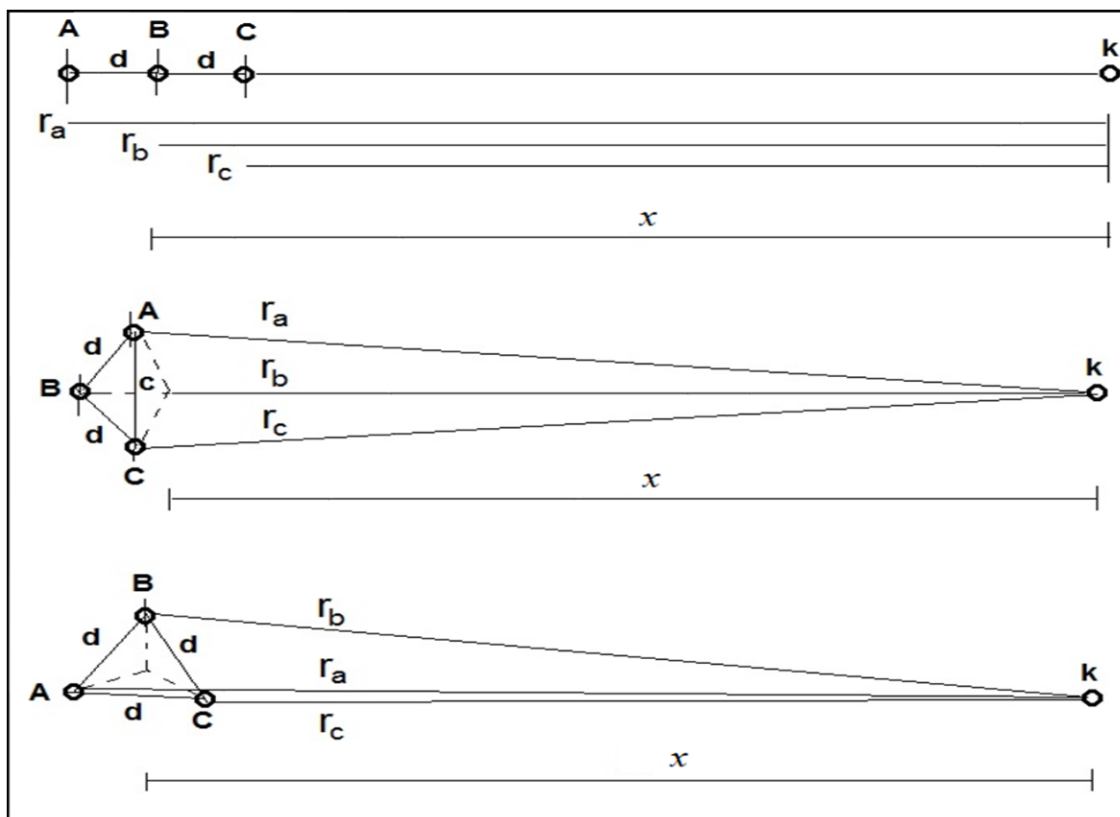


Рис. 6.2. Зависимость степени асимметрии от расстояния между взаимодействующими проводами ВЛ

7. ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛ

Расстояние (км)	№ опор	Ток КЗ от ТЭЦ ГАЗ (кА)	Ток КЗ со стороны ПС Заречная (кА)	Суммарный ток КЗ (кА)
0,030	1	20,647	2,116	22,763
1,000	5	17,065	2,918	19,983
2,000	10	14,512	3,611	18,123
3,000	15	12,598	4,255	16,853
4,000	20	11,081	4,903	15,984
5,000	25	9,838	5,588	15,426
6,000	30	8,816	6,327	15,143
7,000	35	7,956	7,151	15,107
8,000	40	7,216	8,100	15,316
9,000	45	6,563	9,244	15,807
10,000	50	5,972	10,601	16,573
11,000	55	5,381	12,401	17,782
12,000	60	4,785	14,807	19,592
13,000	65	4,152	18,188	22,340
14,000	70	3,408	23,326	26,734
14,860	74	2,556	30,523	33,079
15,610	78	1,436	41,336	42,772

Таблица 7.1. Распределение тока короткого замыкания при перемещении точки вдоль ВЛ при двухстороннем питании

7. ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛ

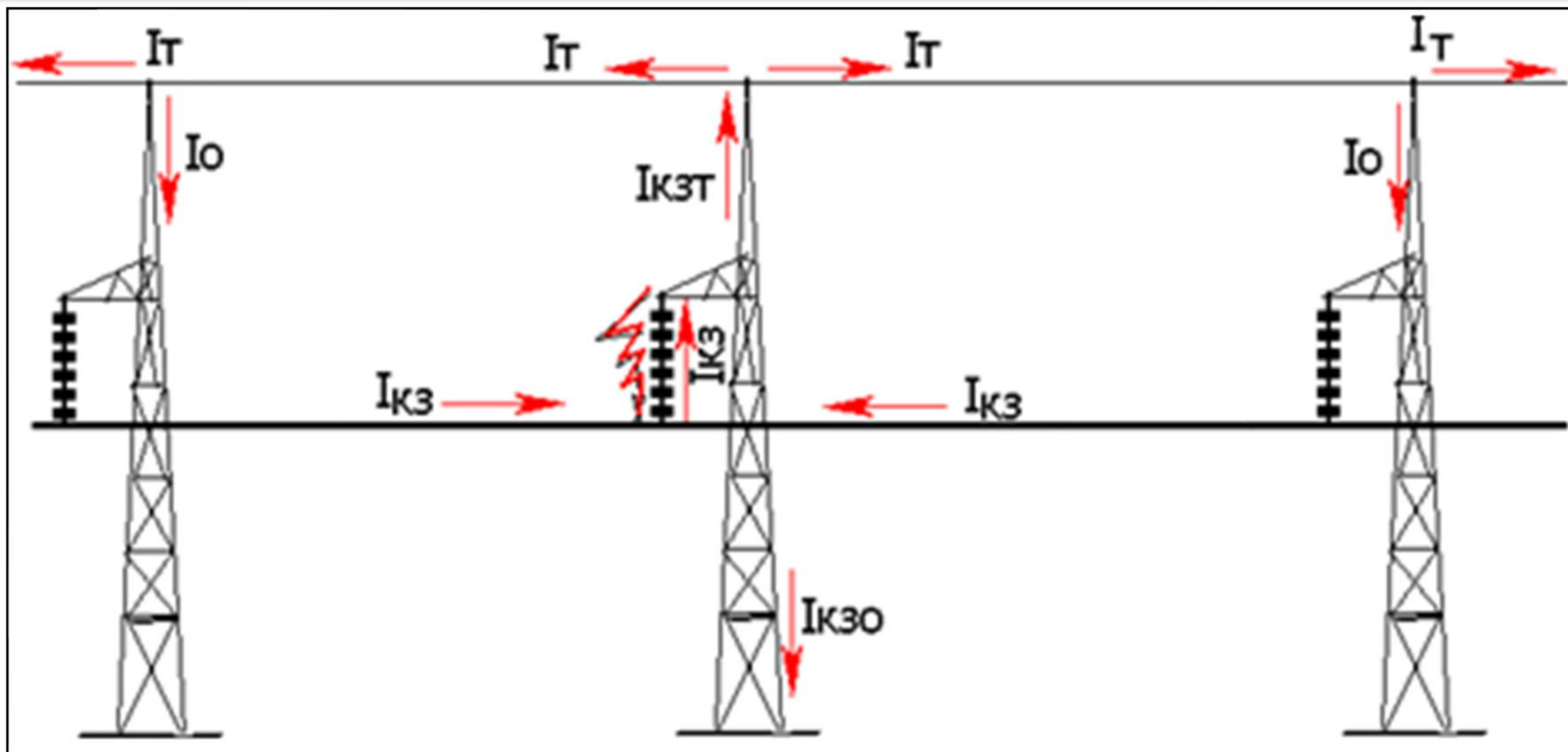


Рис. 7.1. Однофазное короткое замыкание с выносом потенциала на заземленные конструкции опоры

7. ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛ

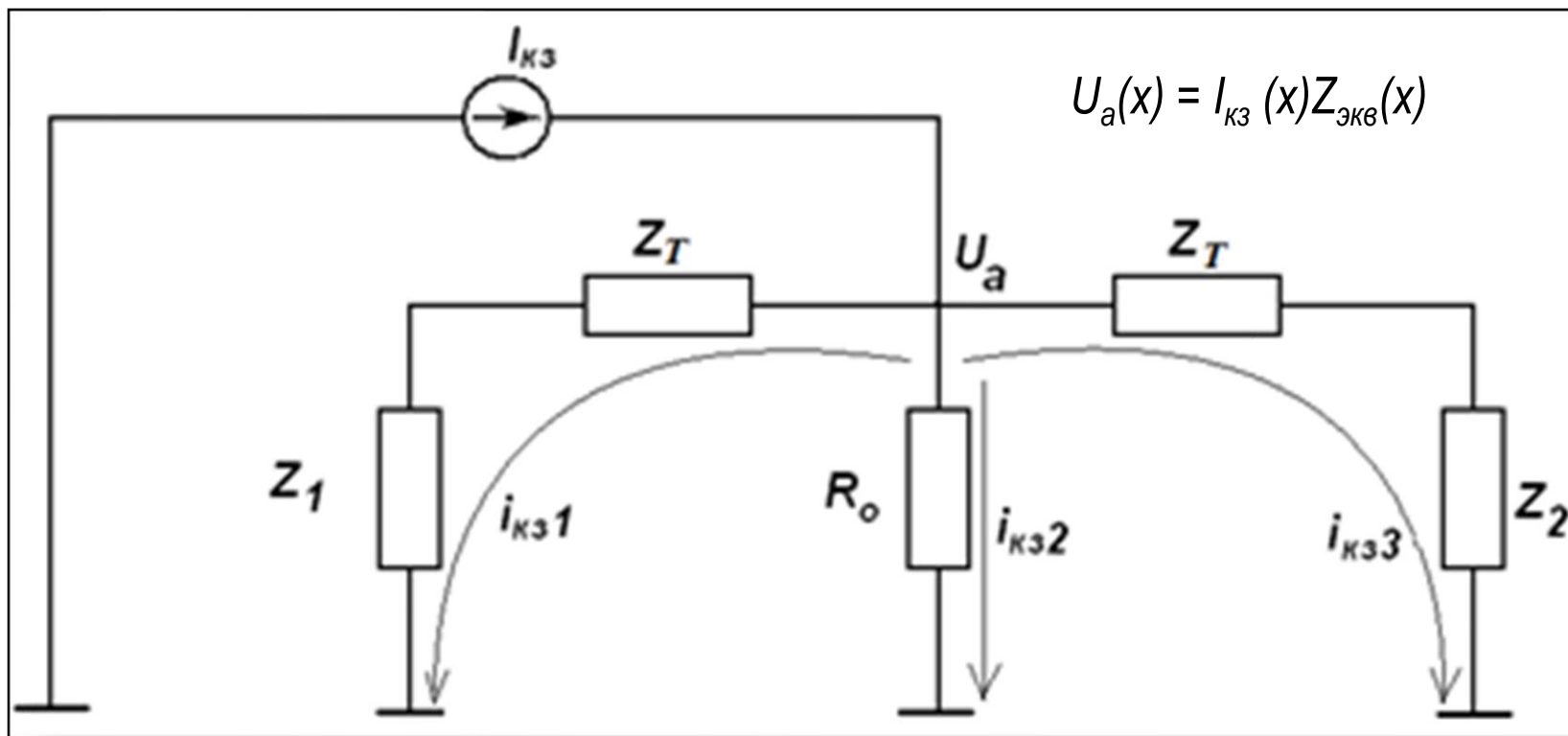


Рис. 7.2. Расчетная схема для определения эквивалентного сопротивления системы: грозозащитный трос и опоры при однофазном коротком замыкании

7. ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛ

Таблица 7.2

Расчетные значения вынесенного потенциала на опорах ВЛ

Параметры	Номера опор								
	1	5	10	15	35	50	65	74	78
$Z_{\text{экв}}$ (Ом)	0,42	1,47	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,44	0,42
$U_{\text{оп}}$ (кВ)	9,5	29,38	27,00	25,1	22,53	23,9	33,3	47,63	17,96

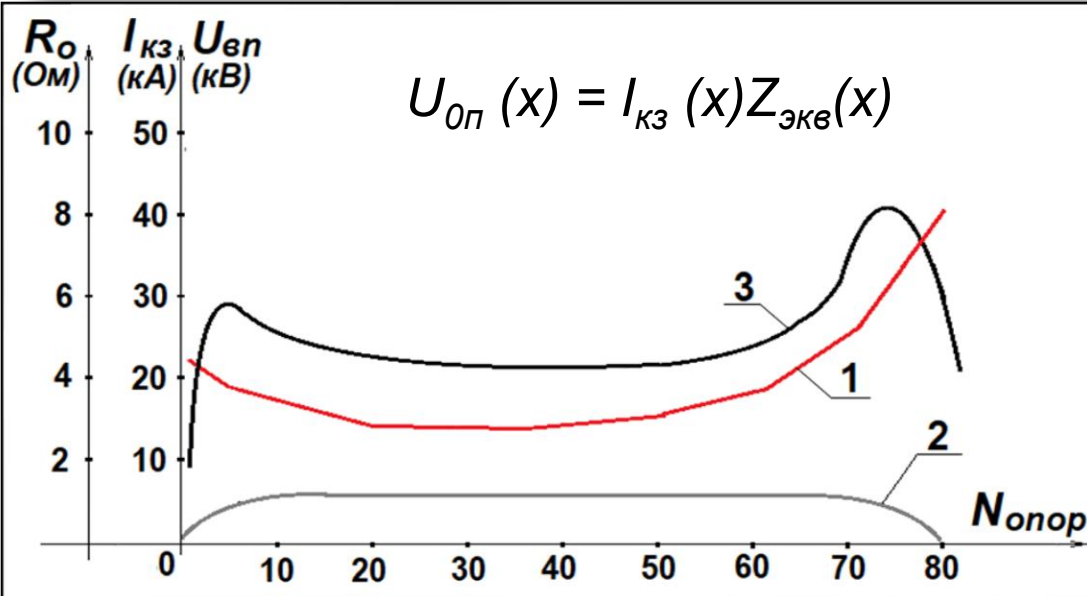


Рис. 7.3. Графики распределения вдоль линии значений:

1 – ток короткого замыкания (кА); 2 – результирующее сопротивление системы «ГТ-опора-ЗУ» (Ом); 3 – уровень потенциала на заземленных элементах опор ВЛ 110 кВ «Заречная-ТЭЦ ГАЗ» при однофазном КЗ на каждой рассматриваемой точке (опоре)

7. ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛ

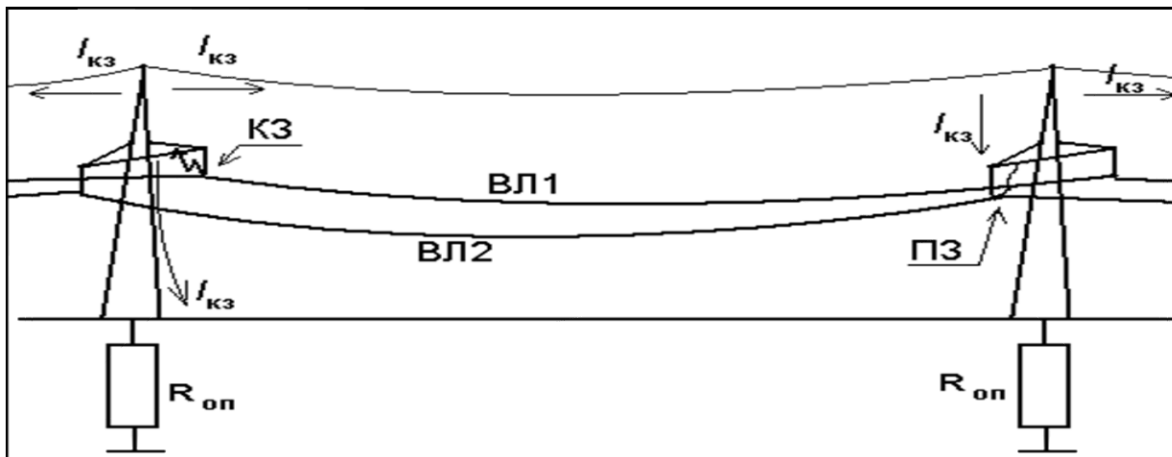
Таблица 7.3

Количество опасных опор от места КЗ в обе стороны

Номера опор	Величина вынесенного потенциала U_o (кВ)	Количество опор с опасным потенциалом	
		При КЗ 0,1с	При КЗ 1,0 с
1	9,5	12	22
15	25,1	16	26
65	33,9	17	27
78	17,96	15	25

Как видно из таблицы 7.3, неизолированный ГТ при однофазных КЗ на ВЛ способствует выносу опасного потенциала с места КЗ на другие опоры, связанные с данной опорой по ГТ и находящиеся на достаточном удалении, достигающем при принятых параметрах ВЛ и длительности КЗ до 10 км.

8. Источники выноса высокого потенциала на рабочие места на ВЛ



$$U_0(x) = I_{KЗ}(x) Z_{экв}(x),$$

Рис. 8.2. Вынесенный потенциал на проводах и тросах отключенной цепи при несимметричном КЗ на действующей цепи двухцепной ВЛ с неизолированным ГТ.

Распределенный источник вынесенного потенциала, который обусловлен наличием кондуктивной связи между каждой опорой ВЛ по неизолированному ГТ. Эта связь способствует распространению потенциала аварийной опоры, где возник ток КЗ, и падения напряжения на сопротивление системы «ГТ–опора–заземляющее устройство» (или систем заземления всех опор, связанных по заземленному ГТ) на все другие опоры. Этот потенциал может создавать опасность и на других опорах этой ВЛ, если его величина достаточна для пробоя искровых промежутков на изолированном ГТ или ГТ заземлен на каждой опоре

8. Источники выноса высокого потенциала на рабочие места на ВЛ

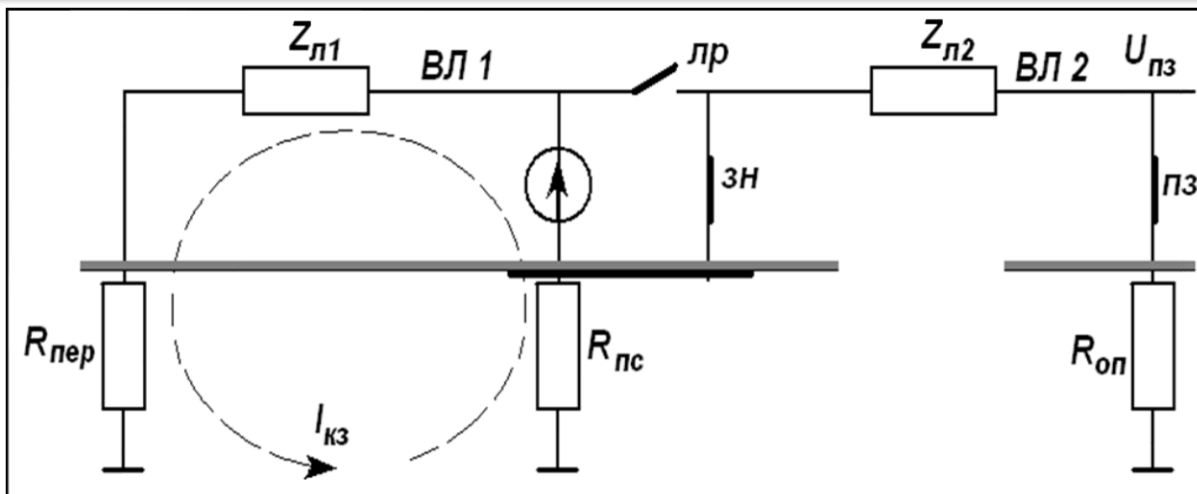


Рис. 8.3. Заземляющее устройство ПС как локальный источник напряжения

Локальный источник вынесенного потенциала, который обусловлен наличием эквипотенциальной связи рабочего места на ВЛ с заземляющим устройством ПС, посредством заземленного на этой ПС грозозащитного троса и/или проводов ВЛ при выводе в ремонт, где возможно появление высокого потенциала при протекании сквозных токов несимметричных КЗ. Этот потенциал окажется на проводах (тросах) отключенной ВЛ через заземляющие устройства электрической станции и подстанции, где ВЛ отключена и заземлена, и когда через контур заземления этих локальных электроустановок протекает полностью или частично ток несимметричного (одно или двухфазного) КЗ, возникшего в пределах или за пределами этих электроустановок или на любой из отходящих ВЛ (рис. 8.3).

8. Источники выноса высокого потенциала на рабочие места на ВЛ

Таким образом, несмотря на высокую вероятность, такие случаи официально не фиксировались и не рассматривались комиссиями по расследованию причин несчастных случаев на ВЛ. Они также не появлялись и в обзорах несчастных случаев, однако в данных обзорах они могут фигурировать под другим определением, например, как **«сердечная недостаточность»**.

Когда пострадавший подвергается кратковременному воздействию высокого напряжения прикосновения, источник которого далеко от рабочего места на ВЛ, даже ближайший сосед по работе может не понять того, что он получил электротравму. Когда работник теряет сознание, первоочередные реанимационные процедуры, предпринимаемые членами бригады, могут оказаться безрезультатными, а приехавший медицинский работник может только констатировать смерть от сердечной недостаточности. Причина в том, что кратковременное воздействие высокого напряжения может вызвать фибрилляцию сердца и его остановку, что проявляется так же, как **сердечная недостаточность**

9. ОЦЕНКА ЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИЙ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ



В локальных электроустановках, как правило, заземляющий провод (стационарное или переносное заземление) обеспечивает соединение токопроводящей (токоведущей) части электроустановки с общим заземляющим устройством, которое, в свою очередь, должно обеспечивать в пределах данной электроустановки уравнивание и выравнивание потенциала. При производстве работ в локальных электроустановках рабочее место (безопасная зона) ограждается от остальной (опасной зоны) действующей части электроустановки, а ремонтируемое оборудование заземляется. Поэтому в локальных электроустановках рабочее место практически всегда находится в пределах **зоны выравнивания потенциалов заземляющего устройства**.

На ВЛ рабочее место не указывается так конкретно и не ограждается, а определяется для каждого случая приблизительно, например, в пределах одной опоры, в пролете между двумя опорами или же в пределах участка ВЛ протяженностью до 2-х км и др.

9. ОЦЕНКА ЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИЙ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

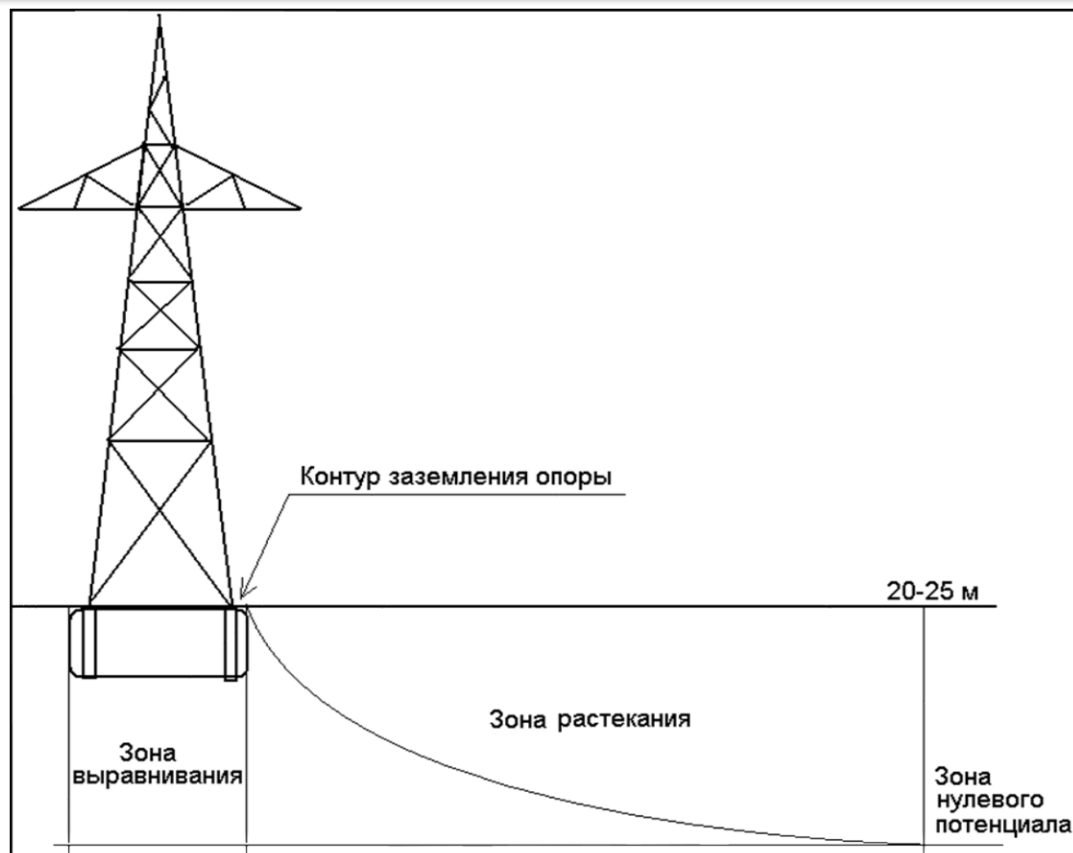
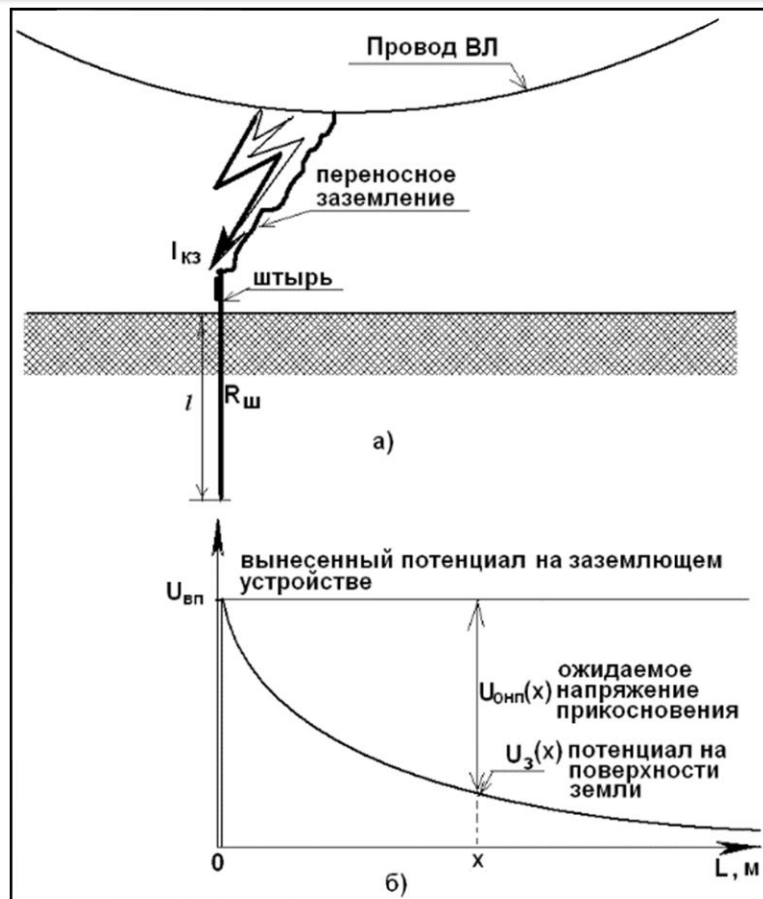


Рис. 9.3. Характерные зоны заземляющего устройства опор ВЛ

На ВЛ, где для заземления проводов (тросов), как правило, используется заземляющее устройство отдельной опоры (рис. 9.2), у которой зона выравнивания потенциала ограничена площадью, связанной контуром заземления только конкретной опоры, возможные границы рабочего места практически всегда выходят за пределы зоны выравнивания потенциалов заземляющего устройства этой опоры. Поскольку заземляющее устройство опоры в данном случае не может обеспечить одновременного выравнивания и уравнивания потенциалов, то оно не может обеспечить и установленного в [7] предельно допустимого напряжения прикосновения.

Это обусловлено тем, что сопротивление заземляющего устройства опор ВЛ нормируется по критериям грозозащиты и работы релейной защиты и автоматики.

9. ОЦЕНКА ЗАЩИТНЫХ ФУНКЦИЙ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛЬНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ



При известных параметрах штыря и удельного сопротивления земли значение вынесенного потенциала $U_{вп}$ (В) определяется из следующего выражения:

$$U_{вп} = I_{кз} R_z = \frac{I_{кз} \rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (9.1)$$

где $I_{кз}$ – ток КЗ (А); ρ – удельное сопротивление грунта (Ом·м); $\pi = 3,14...$; l – глубина погружения штыря в землю (м); d – диаметр штыря (м).

На поверхности земли от стекающего со штыря тока КЗ возникнет потенциал $U_z(x)$, величина которого зависит от координаты x относительно штыря:

$$U_z(x) = \frac{I_{кз} \rho}{2\pi l} \ln \frac{2(\sqrt{(x-r)^2 + l^2} + l)}{d + 2(x-r)}, \quad (9.2)$$

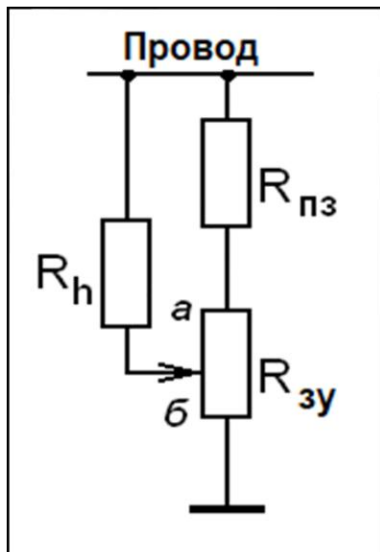
где $x \geq r$ – расстояние от штыря до точки наблюдения (м); r – радиус штыря (м).

$$U_{онп}(x) = \frac{I_{кз} \rho}{2\pi l} \ln \frac{2l(d + 2(x-r))}{d(\sqrt{(x-r)^2 + l^2} + l)} \quad (9.3)$$

Если человек находится за пределами зоны растекания, в зоне нулевого потенциала, то приняв $x \gg l$, $x \gg r$, из (9.3) получим (9.1)

Рис. 9.3. Характерные зоны заземляющего устройства опор ВЛ

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ВЛ



Таким образом, установленные на токоведущей части электроустановок защитные заземления должны выполнять **две задачи**.

Во-первых, сократить время существования аварийного режима путем приведения в действие быстродействующей (релейной) защиты и автоматики на отключение коммутационного аппарата.

Во-вторых, шунтирующим действием уменьшить напряжение прикосновения, то есть разность потенциалов в точках одновременного прикосновения человека к токоведущим и токопроводящим частям электроустановок.

Однако, когда опасное напряжение подается без коммутационного аппарата (наведенное напряжение, вынесенный потенциал, индуцированные или набегающие атмосферные перенапряжения и прочее) или, когда отсутствует или неисправна быстродействующая защита, то **защитное заземление не способствует сокращению времени действия опасного напряжения**. В таком случае, у защитного заземления остается одна задача – **снизить напряжения прикосновения**.

Защитное заземление может уменьшить напряжение прикосновения только в пределах своей зоны уравнивания и выравнивания потенциала.

$$U_{hб} = I_{кз} \frac{R_h(R_{пз} + R_{зy})}{(R_h + R_{пз} + R_{зy})}. \quad (10.2)$$

Учитывая $R_h \gg R_{зy}$, $R_h \gg R_{пз}$, из (10.2) получим,

$$\lim_{R_h \rightarrow \infty} U_h = \lim_{R_h \rightarrow \infty} \left\{ I_{кз} \frac{R_h(R_{пз} + kR_{зy})}{(R_h + R_{пз} + kR_{зy})} \right\} = I_{кз} (R_{пз} + kR_{зy}); \quad (10.3) \quad \text{При } k = 0 \quad U_{ha} \rightarrow 0, \text{ при } k = 1 \quad U_{hб} \rightarrow U_{оп}$$

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ВЛ

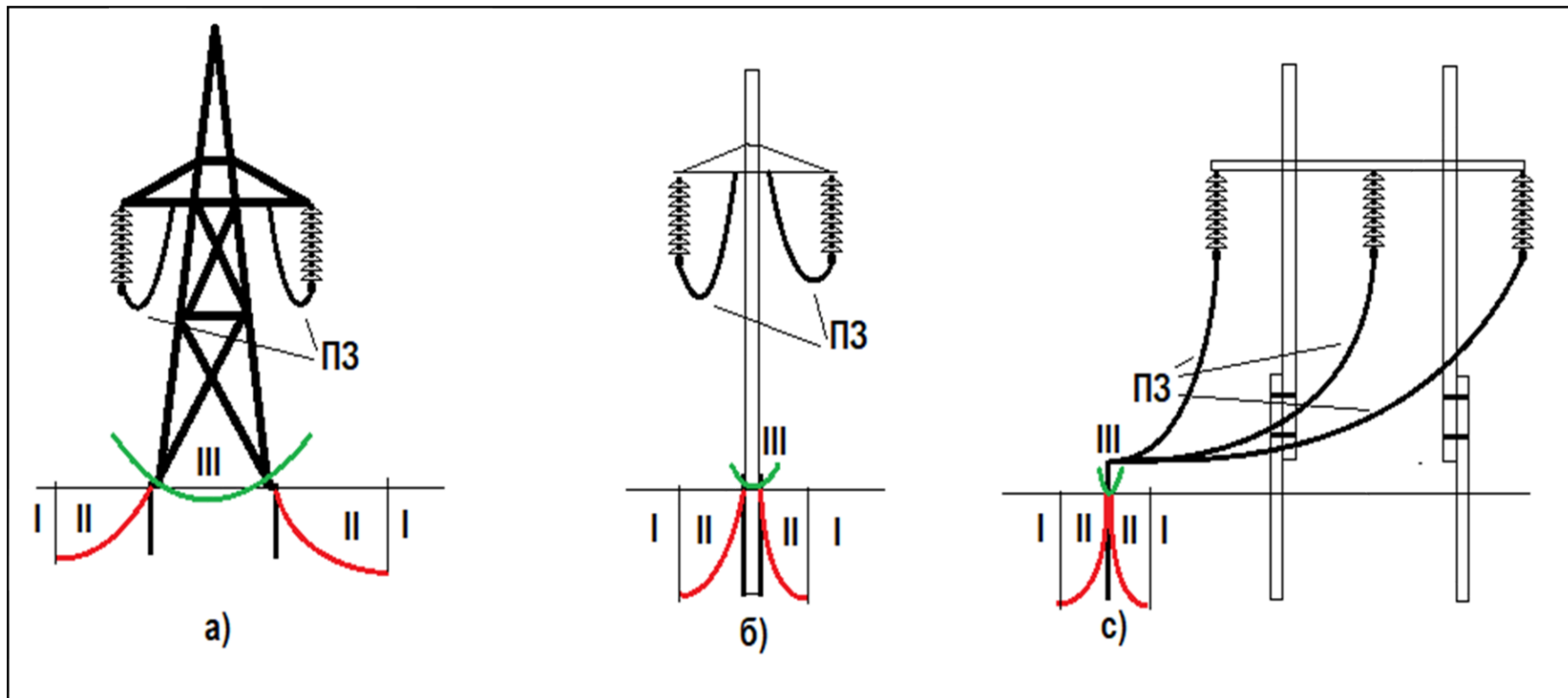


Рис. 10.2. Характерные зоны заземляющих устройств опор

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ВЛ

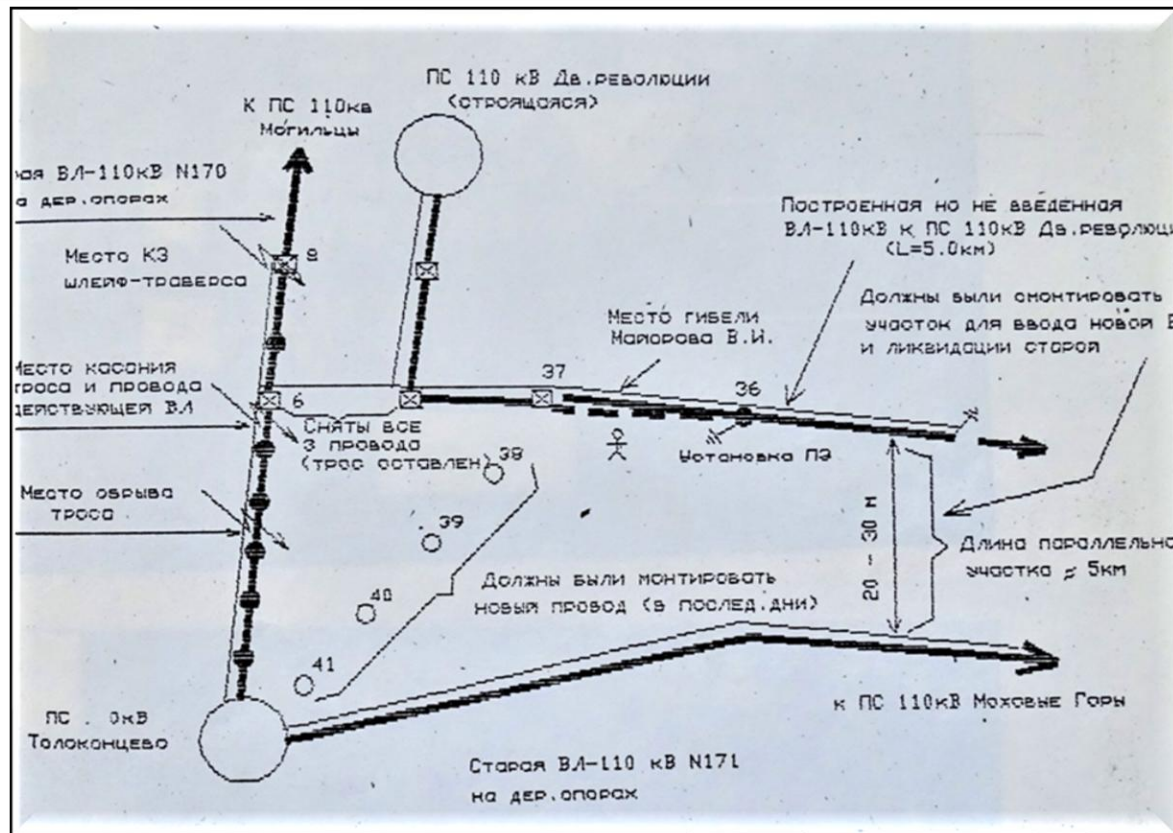
На рис. 10.2. показаны характерные зоны различных заземляющих устройств: I – **зона нулевого потенциала (условная земля)**; II – **зона растекания тока**; III – **зона выравнивания потенциала (зона эффективной защиты заземляющего устройства для различных типов опор ВЛ)**:

- а) заземляющее устройство металлических решетчатых опор;
- б) заземляющее устройство одностоечных железобетонных опор;
- с) искусственное заземляющее устройство – одиночный штырь.

Красной линией показано изменение потенциала на поверхности земли вблизи заземляющего устройства при протекании тока КЗ, которое характеризует уровень **напряжения прикосновения и шагового напряжения** в зоне растекания тока.

На рис. 10.2, в видно, что у искусственного заземляющего устройства в виде одиночного штыря зона выравнивания потенциала **ничтожно мала**, поэтому работник не может находиться в этой зоне. Следовательно, **одиночный штырь не может быть допущено в качестве защитного средства при работах на ВЛ**

11. АНАЛИЗ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ И ПРИЧИН НЕСЧАСТНОГО СЛУЧАЯ НА ВЛ 110 КВ



Параметры действующей и строящейся ВЛ 110 кВ: длина участка совместного расположения 5 км; расстояние между осями ВЛ 20-30 м; Результирующее сопротивление тросового подхода к ПС Толоконцево 5,3 Ом; Сопротивление тросовой системы новой линии вместо с установленным на опоре №37 ПС 3,2 Ом; Ток однофазного КЗ 3,8 кА, длительность 1,2 с; Расчетное значение наведенной продольной ЭДС 4,4 кВ; Значение вынесенного потенциала на место КЗ 3,44 кВ.

Рис. 11.1. Фрагмент плана участка ВЛ 110 кВ на месте несчастного случая

11. АНАЛИЗ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ И ПРИЧИН НЕСЧАСТНОГО СЛУЧАЯ НА ВЛ 110 кВ

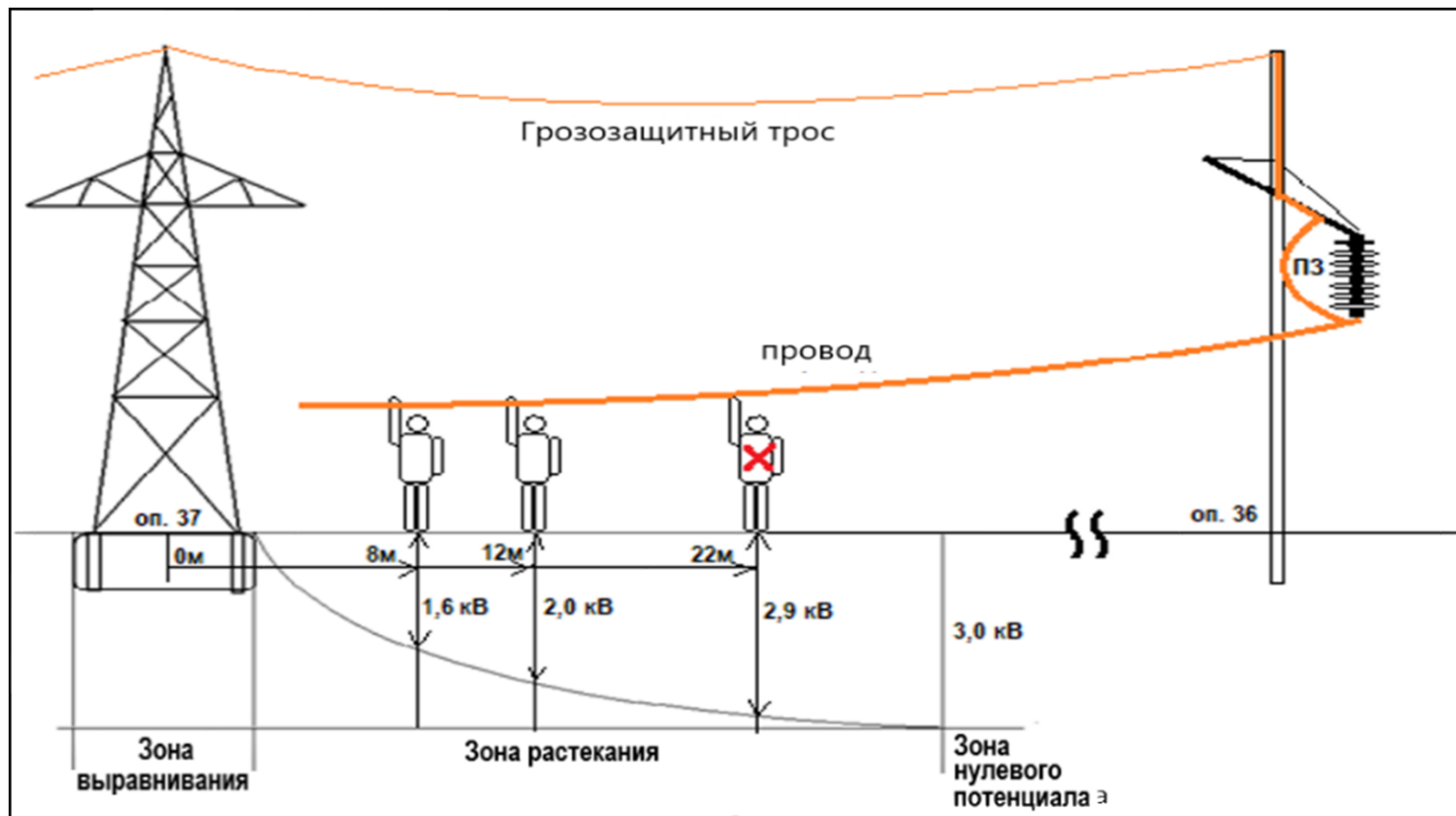


Рис. 11.2. Напряжение прикосновения на месте несчастного случая на ВЛ 110 кВ

11. АНАЛИЗ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ И ПРИЧИН НЕСЧАСТНОГО СЛУЧАЯ НА ВЛ 110 КВ

Данный несчастный случай был групповым случаем и при этом, двое, из трех пострадавших работников, остались живы. Именно поэтому стало известно, что **случилась электротравма**. По всем признакам данная строящаяся ВЛ 110 кВ не относилась к ВЛ 110 кВ находящейся под опасным наведенным напряжением, т.к. измерения, проведенные ранее, не давали значений более 42 В, и в соответствии с действовавшими тогда Правилами техники безопасности специальных схем для его снижения не требовалась. А истинную причину выяснили только в процессе расследования причин, с изучением место несчастного случая, и участка ВЛ 110 кВ. А параметры тока КЗ, значения продольной наведенной ЭДС и величину вынесенного потенциала получили при проведении специального эксперимента с созданием реального однофазного КЗ на этом участке ВЛ.

Если в момент данного короткого замыкания на соседней действующей линии за провод держался бы один работник, причина его смерти так бы осталась невыясненным и был бы отнесен к случаю «сердечной недостаточности». Потому что никаких признаков о КЗ на соседней линии и, появлении опасного напряжения прикосновения на месте работы, не были, а прибывшая медицинская служба у пострадавшего работника констатировала именно такой диагноз.

12. ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Для объективной оценки реальной обстановки и принятия эффективных мер электробезопасности на рабочем месте на ВЛ **необходимо**:
 - в качестве опасного фактора принимать **напряжения прикосновения** на местах нахождения линейного персонала в процессе работы;
 - учитывать все возможные источники опасного напряжения прикосновения (рабочее напряжение, наведенное напряжение, вынесенный потенциал от смежных источников, грозовое перенапряжение и т.д.).
2. Заземляющее устройство на ВЛ может проявить защитные свойства только в пределах своей зоны выравнивания потенциала – зоне, в пределах которой величины напряжения прикосновения и шаговое напряжения, возникающие при протекании максимально возможного тока через это заземляющее устройство, будут в пределах, допускаемых техническими регламентами (ГОСТ, Правила).

12. ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

3. При выборе технических мероприятий и схемы заземления ремонтируемой ВЛ рабочее место определить в пределах эффективной зоны защиты заземляющего устройства на ВЛ, т.е. в **зоне выравнивания потенциала ЗУ**: рабочее места ограничить пределами этой зоны; если рабочее место шире этой зоны, то расширить зону выравнивания потенциала ЗУ до границы рабочего места путем одновременного применения средств уравнивания и выравнивания потенциала

4. По результатам проведенных исследований и экспериментов на ВЛ 6-110 кВ выявлен ряд характерных особенностей проявления наведенного напряжения, в том числе:

- зависимость уровня наведенного напряжения от схемы заземления ремонтируемой ВЛ: выявлены пять характерных уровней: **остаточный, промежуточный, уровень зависящий от емкостного тока, уровень продольной (индуктивной) ЭДС, уровень поперечной (емкостной) ЭДС**;
- зависимость наведенного напряжения от степени асимметрии фаз на влияющей ВЛ;
- зависимость тангенса угла наклона на графике распределения потенциала проводов ремонтируемой линии от количества, места установки переносных заземлений и сопротивления заземляющих устройств опор и подстанций.

**БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ!**