



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

МСЭ-Т

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

K.57

(09/2003)

СЕРИЯ К: ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ

**Меры защиты базовых радиостанций,
размещаемых на опорах линий
электропередачи**

Рекомендация МСЭ-Т К.57

Рекомендация МСЭ-Т К.57

Меры защиты базовых радиостанций, размещаемых на опорах линий электропередачи

Резюме

В настоящей Рекомендации излагаются меры, которые надлежит принимать в целях безопасности и снижения риска повреждения оборудования из-за повышения потенциала Земли в случаях, когда опоры линий электропередачи (ЛЭП) используются для размещения базовых радиостанций. В ней также рассматривается специальная схема защиты от грозových разрядов, необходимая для такого типа установок.

Особое внимание уделяется наиболее частым случаям, когда электропитание подается от низковольтной сети. Описываются различные варианты.

Имеются три добавления:

Добавление I, озаглавленное "Указания относительно согласования уровня изоляции, необходимого для цепи электропитания, и повышения потенциала опор ЛЭП", содержит информацию о том, как определять необходимый уровень изолирующего напряжения при повышении потенциала Земли (EPR) из-за короткого замыкания на землю в опоре.

В Добавлении II, озаглавленном "Указания относительно системы подачи низковольтного (LV) питания", даются дополнительные подробности о вариантах подачи низковольтного питания.

И, наконец, Добавление III, озаглавленное "Описание характеристик и контроль зоны EPR заземления опоры и расчет минимальной длины соединительного участка (junction section)", представляет простые вычисления для оценки EPR с целью определения длины так называемого соединительного кабеля (junction cable).

В нем также представлены графики EPR и напряжений прикосновения в случае установки вокруг шкафа оборудования рамочных конструкций заземления для выравнивания потенциала.

Источник

Рекомендация МСЭ-Т К.57 утверждена 6 сентября 2003 года 5-й Исследовательской комиссией МСЭ-Т (2001–2004 гг.) согласно процедуре, изложенной в Рекомендации МСЭ-Т А.8.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи. Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним с целью стандартизации электросвязи на всемирной основе.

Всемирная ассамблея по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяет темы для изучения Исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые, в свою очередь, вырабатывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соответствие положениям данной Рекомендации является добровольным делом. Однако в Рекомендации могут содержаться определенные обязательные положения (для обеспечения, например, возможности взаимодействия или применимости), и тогда соответствие данной Рекомендации достигается в том случае, если выполняются все эти обязательные положения. Для выражения требований используются слова "shall" ("должен", "обязан") или некоторые другие обязывающие термины, такие как "must" ("должен"), а также их отрицательные эквиваленты. Использование таких слов не предполагает, что соответствие данной Рекомендации требуется от каждой стороны.

ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на то, что практическое применение или реализация этой Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, обоснованности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, отстаиваются ли они членами МСЭ или другими сторонами вне процесса подготовки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещения об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для реализации этой Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что это может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ.

© ITU 2004

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких-либо средств без письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 Область применения	1
2 Ссылки	1
3 Определения и сокращения.....	1
3.1 Определения.....	1
3.2 Сокращения.....	2
4 Общие положения.....	2
4.1 Описание характеристик систем электропитания с прямым заземлением при замыкании на землю.....	3
4.2 Характеристика систем электропитания с непрямым заземлением при замыкании на землю.....	3
4.3 Повышение потенциала Земли (EPR).....	3
5 Электропитание.....	4
5.1 Питание от LV сети	4
5.2 Питание от MV сети	8
5.3 Подача питания от высоковольтной HV линии.....	8
6 Требования к антенной системе	8
7 Кабели электросвязи.....	9
8 Схемы заземления.....	9
9 Установка и техническое обслуживание	9
10 Примеры установок	10
Добавление I – Указания по согласованию уровня изоляции, необходимого для цепи подачи электропитания и при повышении потенциала опор ЛЭП	12
I.1 Область исследований.....	12
I.2 Исследованные варианты, параметры	12
I.3 Анализ результатов	15
I.4 Расчет требуемого уровня изоляции.....	29
Добавление II – Указания относительно схемы подачи LV питания.....	33
II.1 Схема подачи LV питания	33
II.2 Принципы защиты.....	34
II.3 Выбор расчетных значений для защиты	36
II.4 Варианты подачи питания на несколько станций RBS.....	37
Добавление III – Определение характеристик регулирования зоны EPR заземления опоры и расчет минимальной длины соединительного участка	40
III.1 Определение характеристик зоны EPR заземления опоры.....	40
III.2 Регулирование напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения с помощью потенциала PGE	44
III.3 Расчет минимальных значений длины	54

Рекомендация МСЭ-Т К.57

Меры защиты базовых радиостанций, размещаемых на опорах линий электропередачи

1 Область применения

В настоящей Рекомендации излагаются меры, которые надлежит принимать в целях безопасности и снижения риска повреждения оборудования из-за повышения потенциала Земли в случаях, когда опоры линий электропередачи (ЛЭП) используются для размещения базовых радиостанций.

Уделяется внимание также специальным мероприятиям по защите этих установок от грозовых разрядов.

В ней рассматриваются вопросы как подачи электропитания, так и соединения с сетью электросвязи.

В ней также упоминается риск возникновения помех для передающей антенны.

Защита базовых радиостанций от грозовых разрядов обсуждается в Рекомендации МСЭ-Т К.56.

2 Ссылки

Нижеследующие Рекомендации МСЭ-Т и другие справочные материалы содержат положения, которые путем ссылок на них в данном тексте образуют положения настоящей Рекомендации. На момент публикации указанные издания были действующими. Все Рекомендации и другие источники являются предметом пересмотра; поэтому пользователям данной Рекомендации предлагается рассмотреть возможность применения последнего издания Рекомендаций и других ссылок, перечисленных ниже. Перечень действующих на текущий момент Рекомендаций МСЭ-Т публикуется регулярно. Ссылка на документ, приведенный в настоящей Рекомендации, не придает ему как отдельному документу статус Рекомендации.

- ITU-T Recommendation K.8 (1988), Separation in the soil between telecommunication cables and earthing system of power facilities.
- ITU-T Recommendation K.33 (1996), Limits for people safety related to coupling into telecommunications system from a.c. electric power and a.c. electrified railway installations in fault conditions.
- ITU-T Recommendation K.52 (2000), Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields.
- ITU-T Recommendation K.56 (2003), Protection of radio base stations against lightning discharges.
- IEC 61643-1 (2002-01), Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Part 1: Performance requirements and testing methods.
- IEC 61643-12 (2002-02), Low-voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Selection and application principles.

3 Определения и сокращения

3.1 Определения

В настоящей Рекомендации определяются следующие термины:

3.1.1 заземление, выравнивающее потенциал (PGE): Система электродов, уложенных на небольшой глубине вокруг шкафа (шкафов) оборудования для контролирования ступенчатого напряжения и напряжения прикосновения. Она соединена с заземлением как опоры ЛЭП, так и шкафа (шкафов) оборудования.

3.1.2 система электропитания с прямым заземлением: Системы электропитания высокого (HV) и среднего (MV) напряжения, нейтраль которых соединена с землей через малое сопротивление или напрямую.

3.1.3 система электропитания с непрямым заземлением: HV и MV системы электропитания, нейтраль которых соединена с землей через большое сопротивление (резистор или индуктор), дугогасящую катушку (Петерсена) или заизолирована.

3.2 Сокращения

В настоящей Рекомендации используются следующие сокращения:

EPR	Earth Potential Rise	Повышение потенциала земли
HV	High Voltage (Voltage levels exceeding 100 kV a.c.)	Высокое напряжение (уровни напряжения, превышающие 100 кВ переменного тока)
LV	Low Voltage (Voltage levels not exceeding 1000 V a.c.)	Низкое напряжение (уровни напряжения, не превышающие 1000 В переменного тока)
MOV	Metal Oxide Varistor	Металло-окисный варистор
MV	Medium Voltage (Voltage levels lying between LV and HV)	Среднее напряжение (уровни напряжения между LV и HV)
RBS	Radio Base Station	Базовая радиостанция
SPD	Surge Protective Device	Устройство защиты от импульсных напряжений
T-ERP	Tower-earthing potential rise	Повышение потенциала заземления опоры ЛЭП
Z-ERP	Zone of the earth potential rise	Зона повышения потенциала Земли

4 Общие положения

Размещение антенн базовых радиостанций на опорах линий электропередачи представляет интерес, главным образом в сельских районах, где нет высоких зданий, на которых можно было бы установить антенны. В то же время должны приниматься определенные меры предосторожности, чтобы такая установка была безопасной и не привела к повреждению оборудования.

У каждой опоры линии электропередачи с антенной базовой радиостанции находится шкаф, размещаемый неподалеку от опоры или между ее стойками. Этот шкаф иногда, при возможности, устанавливается на некоторой высоте. Местоположение шкафа оборудования не связано с безопасностью – это, скорее, вопрос возможности доступа к опоре.

В этом шкафу размещается передающее и приемное оборудование, а также кабельные соединения для подачи питания и передачи сигналов.

Имеется также трансформаторный шкаф для электропитания, расположенный рядом со шкафом оборудования или в специально выделенном отсеке.

Антенна может устанавливаться ниже или выше фазовых проводов или даже выше подвесного провода (проводов) заземления, если таковой имеется.

Линия электропередачи может принадлежать к системе электропитания с прямым или непрямым заземлением.

Необходимо учитывать следующие два явления:

- Повышение потенциала Земли при замыкании опоры на землю – Эта проблема решается путем изоляции той части оборудования RBS, которая имеет внешнее металлическое соединение, от шкафа и оборудования, которые связаны с опорой.
- Удар молнии в опору – Эта проблема решается путем связывания вышеупомянутых частей оборудования RBS через соответствующие SPD, чтобы не подвергать риску целостность изоляции при EPR.

Более подробную информацию см. в пункте II.2.

4.1 Описание характеристик систем электропитания с прямым заземлением при замыкании на землю

В случае замыкания на землю системы электропитания с прямым заземлением нейтрали будет иметь место повышение потенциала Земли (EPR) на подающих подстанциях, а также в месте замыкания, которым может быть опора с установленной на ней базовой радиостанцией. В большинстве случаев EPR будет намного выше в месте замыкания, поскольку эквивалентное сопротивление по отношению к земле в этой точке намного выше, чем на подстанциях.

Более подробную информацию см. в Добавлении I.

4.2 Характеристика систем электропитания с непрямым заземлением при замыкании на землю

В случае замыкания на землю системы электропитания с непрямым заземлением нейтрали EPR будет весьма небольшим в силу малой амплитуды тока замыкания. Однако могут иметь место и двойные замыкания на землю. В таком случае ток замыкания будет гораздо большим и приведет к значительному EPR в обеих точках замыкания.

4.3 Повышение потенциала Земли (EPR)

В случае единичного замыкания на землю линии электропередачи сети с прямым заземлением нейтрали или двойного замыкания линии(й) электропередачи сети с непрямым заземлением нейтрали на опоре возникнет большое EPR, возможно, в десятки киловольт. EPR, как общий термин, включает два вида повышения потенциала, как будет пояснено ниже.

4.3.1 Повышение потенциала заземления опоры (T-EPR)

Повышение потенциала опоры – это потенциал заземления (фундамента) опоры по отношению к удаленной земле, возникающий при замыкании на землю.

Амплитуда T-EPR зависит от целого ряда факторов, таких как:

- a) амплитуда тока замыкания на землю;
- b) сопротивление земли у стойки опоры;
- c) воздушные и подземные провода заземления в случае их применения;
- d) расстояние до подающих питание станций;
- e) расстояние между соседними опорами.

Факторы, приведенные в d) и e), имеют второстепенную важность.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В случае, когда линия электропередачи оснащена воздушными или подземными проводами заземления, значительная часть тока замыкания возвращается через эти провода, и лишь малая доля тока при замыкании на землю проходит через основание опоры. T-EPR может быть охарактеризовано произведением этой доли ($3I_0E$) составляющей нулевой последовательности ($3I_0$) тока при замыкании на землю, который проходит через основание опоры, и сопротивления заземления (R) опоры, т. е. $3I_0ER$.

T-EPR может быть вычислено или же, что более предпочтительно, измерено, чтобы определить, имеется ли необходимость в специальных устройствах, которые применяются весьма редко; см. Добавление I.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В случае, когда линия электропередачи не оснащена проводами заземления, весь ток замыкания на землю проходит через основание опоры. T-EPR может быть вычислено как произведение составляющей нулевой последовательности ($3I_0$) тока замыкания на землю и сопротивления заземления (R) опоры, т. е. $3I_0R$.

T-EPR вычисляется для каждого конкретного случая с учетом фактических условий опоры, несущей базовую радиостанцию.

4.3.2 Зона повышения потенциала Земли (Z-EPR)

Зона повышения потенциала Земли (Z-EPR) – это зона вокруг опоры линии электропередачи, где возникает потенциал относительно удаленной земли в случае замыкания на землю единичной фазы или – в случае непрямого заземления сети – двойного замыкания на землю. Этот потенциал более или менее быстро снижается в земле ("воронка потенциала") по мере увеличения расстояния от основания опоры. Степень и форма снижения потенциала зависят от следующих факторов:

- величины T-EPR, вызывающего появление Z-EPR;
- геометрии (размера и структуры) системы заземления;
- характера почвы (геологическое происхождение, напластование и т. д.).

Более подробно характеристики Z-EPR излагаются в Добавлении III.

5 Электропитание

Оборудование RBS может получать электропитание следующими способами:

- От сети низкого напряжения (LV) через развязывающий трансформатор, чтобы отделить зону EPR от остального окружения: Это наиболее широко применяемый способ.
- От электросети среднего напряжения (MV). В этом случае может использоваться MV/LV трансформатор в качестве изоляции между зоной EPR и остальным окружением.
- От самой линии электропередачи высокого напряжения (HV), например, через емкостный делитель напряжения или индуктивно связанный контур: Это дорогостоящий и редко применяемый способ.

Более подробную информацию см. в Добавлении II.

5.1 Питание от LV сети

На рисунке 1 показана схема подачи питания на шкаф оборудования от LV сети.

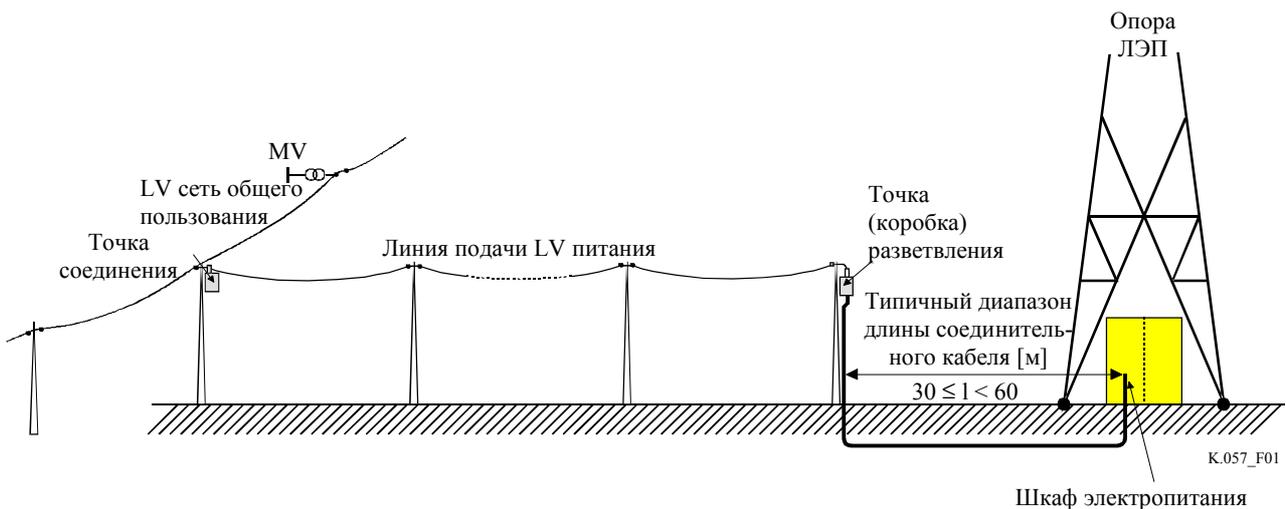


Рисунок 1/К.57 – Типовая схема подачи LV питания

Помимо различных вариантов, описываемых ниже, соблюдаются следующие условия:

- Кабель не прикрепляется к заземленным частям внутри трансформаторного отсека.
- Кабель подводится к шкафу перпендикулярно к линии электропередачи во избежание возникновения индуцированного напряжения.
- Если грунт не позволяет осуществить подземную прокладку, может использоваться воздушный кабель.
- Для защиты LV сети должны выполняться другие меры, на необходимость которых может указать оператор LV сети.
- Вместо LV кабеля, заключенного в пластиковую трубку, для подвода питания может использоваться MV кабель с необходимой степенью изоляции. Он укладывается на удалении как минимум 50 м от опоры. MV кабель не должен содержать экрана, т. е. для этих целей необходим MV кабель, изготавливаемый без экрана.

Применяемая на практике защита, как, например, способ соединения и отбора устройств защиты от импульсных напряжений (SPD), в значительной степени зависит от схемы подачи питания, особенно структуры соединительного кабеля, который вместе с развязывающим трансформатором обычно защищается устройствами SPD, применяемыми в шкафу подачи питания RBS.

5.1.1 Варианты структуры соединительного кабеля

Соединительный кабель можно классифицировать по двум основным категориям применительно к наличию или отсутствию экрана. Предпочтительна подземная прокладка кабеля, но он может быть и подвесным.

5.1.1.1 Соединительный кабель без металлического экрана и нейтрали

В этом случае металлические части кабеля представлены только тремя фазовыми проводами. Напряжения (грозовой импульс и повышение потенциала 50 Гц) возникают между фазовыми проводами и землей. Что касается способов обеспечения надлежащей изоляции относительно земли, предлагаются следующие варианты:

- a) LV трехжильный кабель с дополнительным повышением степени изоляции относительно земли: Дополнительная изоляция достигается за счет заключения соединительного кабеля в изолирующую оболочку или водонепроницаемую трубу.
- b) MV кабель без металлического экрана: В этом случае необходимая изоляция относительно земли достигается по существу за счет изоляции самой жилы, которая еще более повышается при заключении кабеля в пластиковую оболочку.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – MV кабели для необходимого уровня напряжения (10 кВ или выше) обычно выпускаются с металлическими экранированными жилами. Поэтому изготовление кабеля без экрана может осуществляться по специальному заказу.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Необходимый MV кабель может состоять из трех одножильных кабелей (обычно для уровней напряжения 20 кВ и более).

5.1.1.2 Соединительный кабель с металлическим экраном или нейтралью

В этом случае типичным является LV трехжильный кабель с концентрическим экраном из медной проволоки вокруг пучка жил. При использовании четырехжильного LV кабеля нейтральный провод соединяется с экраном на клеммах соединительного кабеля. В соответствии с принципом защиты экран заземляется в точке разветвления (за пределами зоны EPR), и таким образом импульсы напряжения (грозовой импульс и повышение потенциала 50 Гц) возникают между экраном и землей особенно вблизи опоры. Требуемая изоляция относительно земли достигается при заключении кабеля в дополнительную изолирующую оболочку или водонепроницаемую трубу.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Экран переносит ток импульсов напряжения, отводимый устройством MV SPD; поэтому его общая площадь поперечного сечения составляет не менее 35 мм².

5.1.2 Варианты схем защиты внутри шкафа питания и в точке разветвления

Рекомендуются три варианта, соответствующие различным схемам подачи питания.

5.1.2.1 Схема для соединительного кабеля без металлического экрана и нейтрали

Тип и способы соединения устройств SPD для случая, когда соединительный кабель не имеет металлического экрана и нейтрали, следующие (см. рисунок 2, вариант 1):

- 1) Внутри шкафа питания устройство MV SPD (например, варистор MOV) подключается между каждым фазовым проводом и заземлением опоры.
- 2) В точке ответвления устройство LV SPD подключается между каждым фазовым проводом и землей.

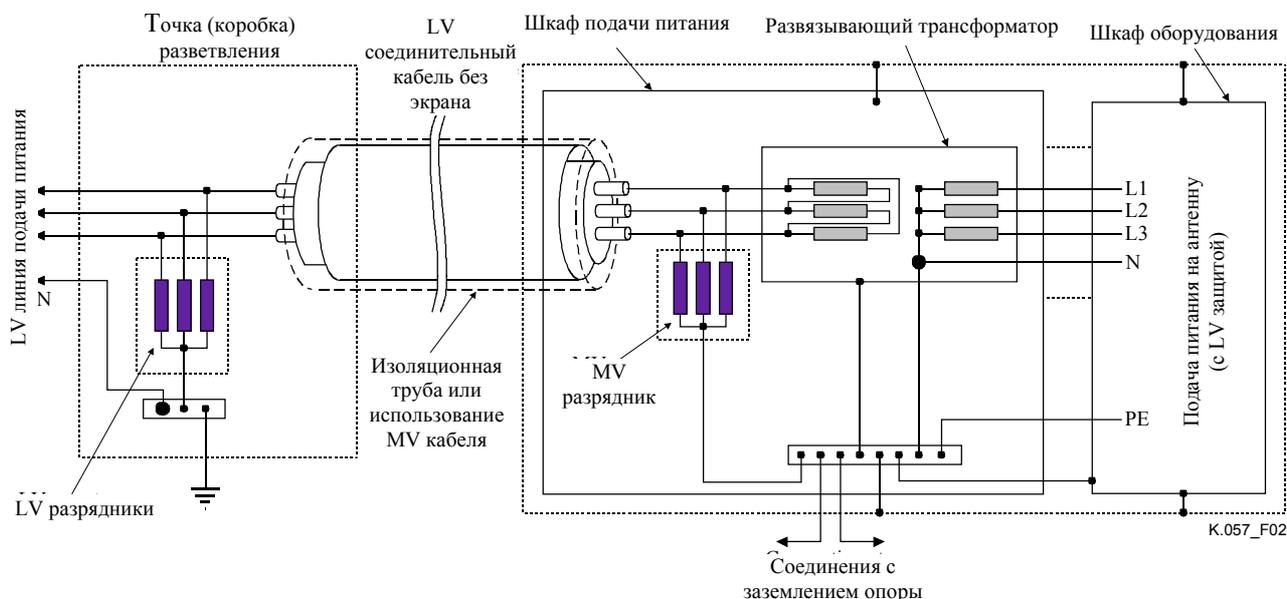


Рисунок 2/К.57 – Соединительный кабель без экрана, защищенный MV разрядниками в шкафу подачи питания и LV защитными устройствами SPD в распределительной коробке, подключенной между каждым фазовым проводом и землей: Вариант 1

5.1.2.2 Схема для соединительного кабеля с металлическим экраном или нейтралью

Для соединительного кабеля с металлическим экраном, с нейтралью или без нее, тип и способы подключения защитных устройств SPD классифицируются в виде следующих двух вариантов:

a) *Подключение разрядника MV SPD только к экрану*

Согласно этой схеме защиты тип и способы подключения устройств SPD следующие (см. рисунок 3, вариант 2):

- 1) В шкафу подачи питания единственный разрядник MV SPD подключается между экраном и заземлением опоры.
- 2) В точке разветвления экран заземляется напрямую и никакое устройство LV SPD не применяется.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В случае применения такой схемы защиты предполагается, что величины напряжения фазовых проводов практически уравниваются с напряжением экрана в силу сильной индуктивной и емкостной связи между экраном и фазовыми проводами.

b) *Применение сочетания разрядника MV SPD и устройств LV SPD*

Согласно этой схеме защиты тип и способы подсоединения устройств SPD следующие (см. рисунок 4, вариант 3):

- 1) В шкафу подачи питания единственный разрядник MV SPD подключается между экраном и заземлением опоры, а устройства LV SPD подключаются между каждым фазовым проводом и экраном.
- 2) В точке разветвления экран заземляется напрямую и устройство SPD типа LV подключается между каждым фазовым проводом и экраном.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В случае применения такой схемы защиты выравнивание напряжения между экраном и фазовыми проводами обеспечивается устройствами LV SPD.

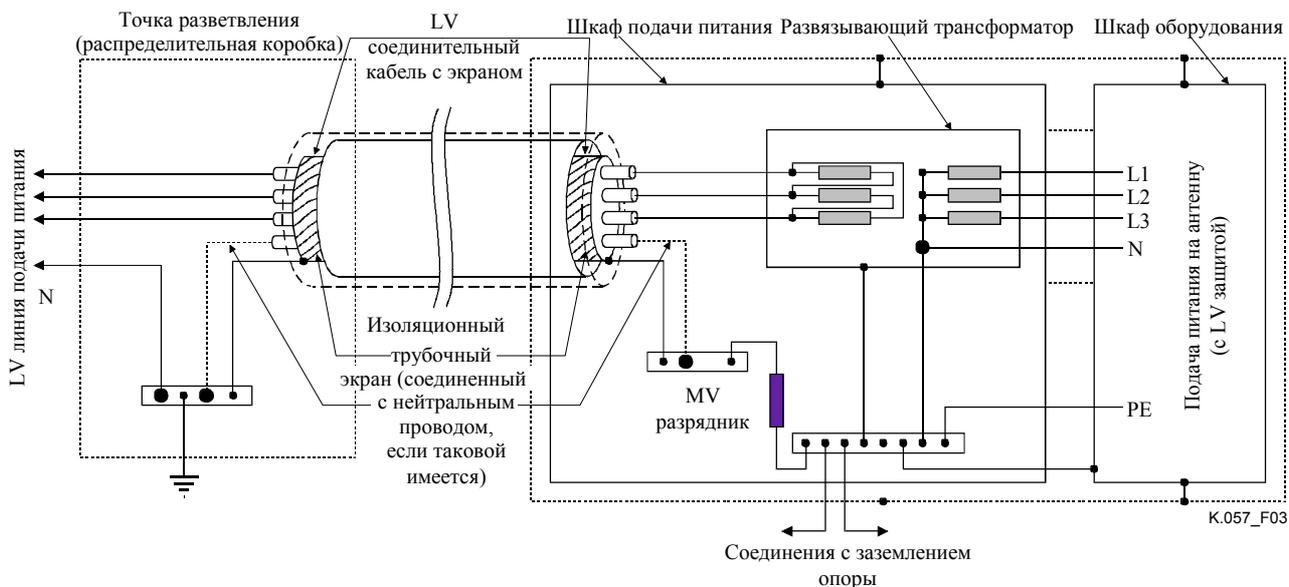


Рисунок 3/К.57 – Соединительный кабель с экраном, защищенный единичным MV разрядником, подключенным между экраном и заземлением опоры в шкафу подачи питания, а экран заземлен напрямую в точке разветвления: Вариант 2

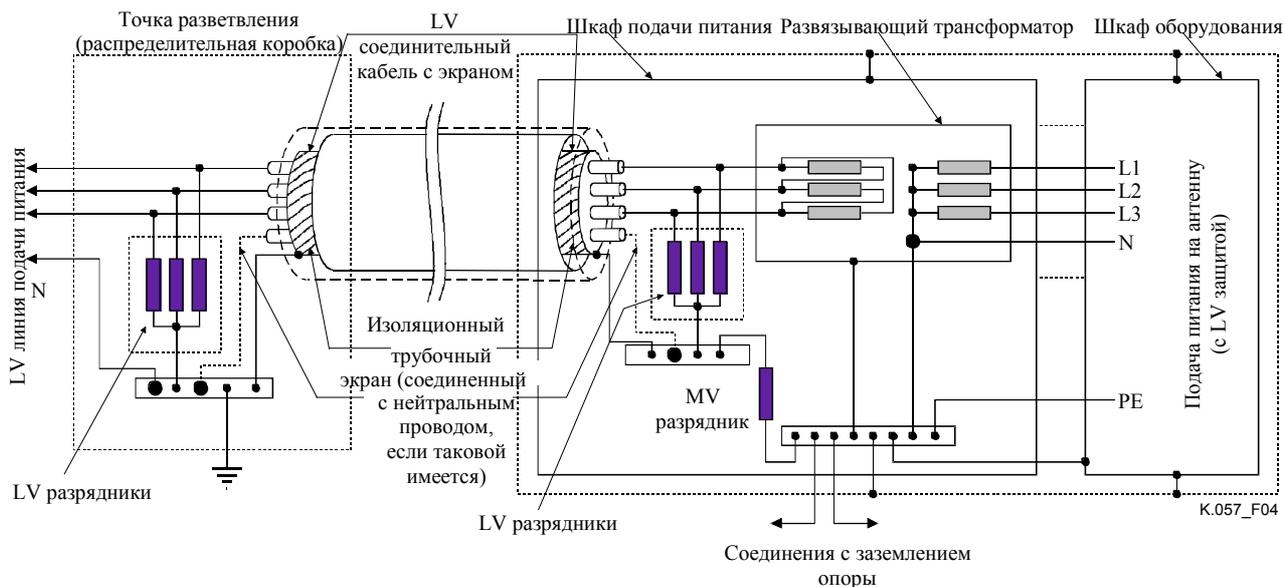


Рисунок 4/К.57 – Соединительный кабель с экраном, защищенный единичным MV разрядником, подключенным между экраном и заземлением опоры в шкафу подачи питания, а экран заземлен напрямую в точке разветвления; кроме того, LV разрядники подключены между каждым фазовым проводом и экраном, как в шкафу подачи питания, так и в точке разветвления: Вариант 3

5.1.3 Защита линии подачи питания, включая точку соединения

Необходимо, чтобы связующая линия между точками разветвления и соединения, включая саму точку соединения, была защищена в соответствии с требованиями к системам распределения электропитания низкого напряжения, изложенными в документах МЭК 61643-1 и МЭК 61643-12. Схема защиты, особенно условия соединения и заземления, также подчиняются требованиям к помещениям абонента, содержащимся в Рекомендации МСЭ-Т К.31.

5.1.4 Защита MV/LV трансформатора, расположенного в зоне EPR

В случае, когда станция RBS получает питание от трансформатора, расположенного в зоне EPR, применяются следующие средства защиты:

- a) Выравнивание через медный провод сечением не менее 35 мм² между заземлением HV опоры и шиной заземления в трансформаторе;
- b) Разрядник MV SPD (например, варистор MOV или аналогичный), подключенный между каждым фазовым проводом на стороне MV и шиной заземления в трансформаторе;

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Это устройство обычно применяется для защиты трансформатора от грозовых перенапряжений, поступающих из линии MV.

- c) Защитное устройство SPD LV типа подключается между каждым фазовым проводом и заземлением опоры в шкафу подачи питания RBS.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Такое устройство SPD LV типа применяется для защиты оборудования базовой радиостанции.

5.1.5 Защита при подаче питания от MV/LV трансформатора, расположенного вне зоны EPR и обслуживающего только RBS

В случае, когда RBS получает питание от MV/LV трансформатора, расположенного вне зоны EPR, но на очень небольшом удалении (менее 50–60 м), применяется следующая схема защиты:

- a) В шкафу подачи питания устанавливается LV/LV развязывающий трансформатор.
- b) Линия подачи LV питания рассматривается в качестве соединительного участка; следовательно, она защищается согласно пункту 5.1.2 с выбором того варианта, который соответствует фактической установке.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Схема защиты, приводимая в пункте 5.1.2.2 а), не рекомендуется к использованию, особенно в случае, когда в месте расположения MV/LV трансформатора установлено электроизмерительное оборудование.

- c) Устройство MV SPD подключается между каждой фазой на стороне MV и заземлением MV/LV трансформатора.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Это устройство обычно применяется для защиты трансформатора от грозовых перенапряжений, поступающих из линии MV. Возможно, в устройстве MV SPD не будет необходимости, если на трансформатор будет подаваться питание по хорошо экранированному MV кабелю.

5.2 Подача питания от MV сети

В качестве альтернативы питание к шкафу оборудования может подаваться от распределительной сети напряжением обычно от 10 до 20 кВ. В этом случае автоматически достигается более высокий уровень изоляции кабелей и трансформатора. Тогда развязывающий трансформатор заменяется на распределительный (см. рисунок 5). Однако экран MV кабеля должен быть заизолирован и защищен устройством SPD MV типа от заземления опоры согласно пункту 5.1.2.2 и рисунку 3. Необходимая изоляция экран–земля обеспечивается за счет дополнительной изоляционной оболочки на MV кабеле или путем заключения кабеля в водонепроницаемую изоляционную трубу вдоль соединительного участка (см. таблицу III.2).

5.3 Подача питания от высоковольтной HV линии

В настоящее время не существует метода, который был бы технически и экономически оправдан. Поэтому такой метод подачи питания на RBS применять не рекомендуется.

6 Требования к антенной системе

Ниже следуют требования к установке RBS.

- Коаксиальные кабели между шкафом оборудования и антенной (антеннами) надлежащим образом укладываются в специальные кабельные каналы или прикрепляются к структуре опоры, с тем чтобы не усложнять проведение операций по техническому обслуживанию и ремонту оборудования и опор.
- Подземные кабели между шкафом оборудования и опорой укладываются внутри изолированных труб.

- Связное оборудование, антенны и аксессуары должны быть утверждены по типовому образцу согласно государственным правилам и требованиям.
- Антенны будут находиться в сильных электрических полях, где они могут подвергаться воздействию коронных и искровых разрядов. Владелец антенн должен быть осведомлен об этом, чтобы после принятия соответствующих мер избежать ухудшения работы антенн.
- В зависимости от типа опоры и местоположения антенны (антенн) уровни напряженности электрического и магнитного полей от линии электропередачи могут быть получены от электрической компании.
- Если антенны размещены выше подвесных проводов заземления, они оснащаются молниезащитой (см. Рекомендацию МСЭ-Т К.56).

7 Кабели электросвязи

Во избежание проблем, связанных с индукцией и EPR при замыканиях на землю, для нужд электросвязи следует применять волоконно-оптические неметаллические кабели или радиолинии (см. рисунки 6 и 7).

Если для нужд электросвязи используются металлические кабели, они прокладываются и подключаются с соблюдением тех же условий, что и для источников LV электропитания. Это означает, что они должны:

- обладать достаточным уровнем изоляции;
- укладываться внутри изолирующей водонепроницаемой пластиковой трубы;
- подключаться к оконечным клеммам через трансформатор;
- оснащаться соответствующими разрядниками для защиты от перенапряжений.

Точка перехода должна располагаться не ближе, чем точка, где ожидаемое EPR может составить 650 В. Этот уровень напряжения является предельным для кратковременного перенапряжения с длительностью $\leq 0,5$ с. Могут быть выбраны другие уровни со ссылкой на Рекомендацию МСЭ-Т К.33. См. также Рекомендацию МСЭ-Т К.8.

8 Схемы заземления

Схемы заземления являются важным элементом для обеспечения безопасности и защиты оборудования. При этом должны применяться следующие меры:

- Металлические части антенны соединяются с коаксиальным экраном и заземляются на металлическую структуру опоры.
- Противоположный конец экрана подсоединяется к заземлению шкафа оборудования.
- Система PGE укладывается на глубине около 0,3 м вокруг шкафа оборудования для регулирования напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения. Это может осуществляться в виде как однорамочной, так и двухрамочной системы, соответствующей фактическому регулируемому уровню потенциала. Выравнивающие электроды подсоединяются как к заземлению шкафа, так и к стойкам опорам не менее чем в двух углах (см. рисунок III.14). Соединение осуществляется по диагонали в случае, когда шкаф располагается между стойками (см. связующие жирные линии на рисунке III.15). В Добавлении III содержатся указания относительно предположительного размещения выравнивающих рамок (см. пункт III.2.2 b) и вышеупомянутые рисунки).
- Система заземления шкафов оборудования и трансформатора соединяется с заземлением мачты посредством медного провода сечением не менее 35 мм². Следует отметить, что это может вызвать необходимость катодной защиты в случае использования в сети заземления различных металлов.

9 Установка и техническое обслуживание

Установка и техническое обслуживание антенного и кабельного оборудования, размещаемого на мачте, осуществляется только специально обученными людьми, обладающими знаниями в области электрических и магнитных полей, создаваемых линиями электропередач, как правило, линейными

монтерами электрической компании. Тем не менее необходимо соблюдать особую осторожность в отношении риска оказаться под воздействием электромагнитных полей от антенны (антенн) RBS. Инструктивные указания см. в Рекомендации МСЭ-Т К.52.

Наземные установки обычно осуществляются специально инструктированным персоналом RBS.

По этому виду работ национальными правилами могут предусматриваться дополнительные ограничения.

10 Примеры установок

Примеры установок приводятся на рисунках 5–7.

На рисунке 8 показана установка, на которую запрещен несанкционированный доступ.

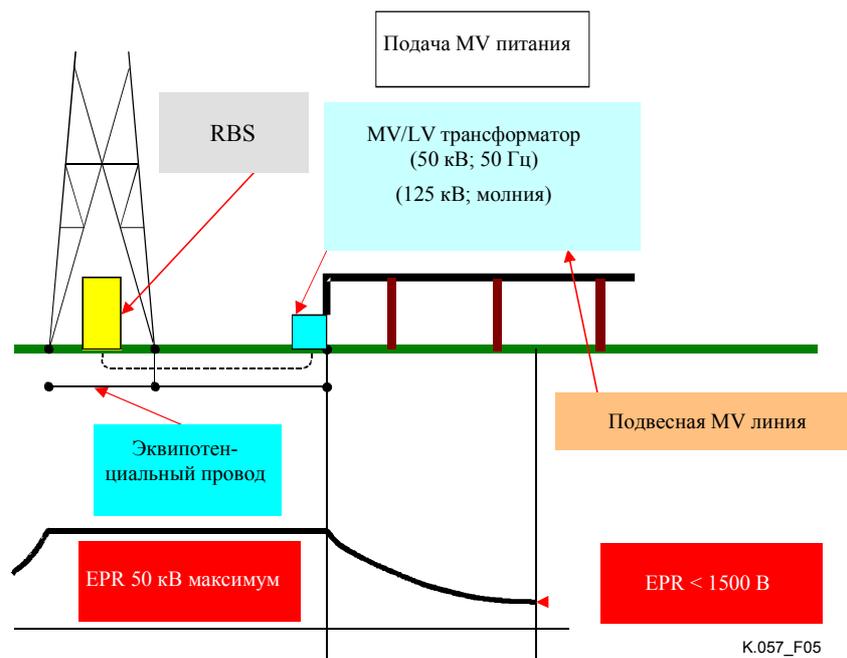


Рисунок 5/К.57 – Поддача MV питания на RBS

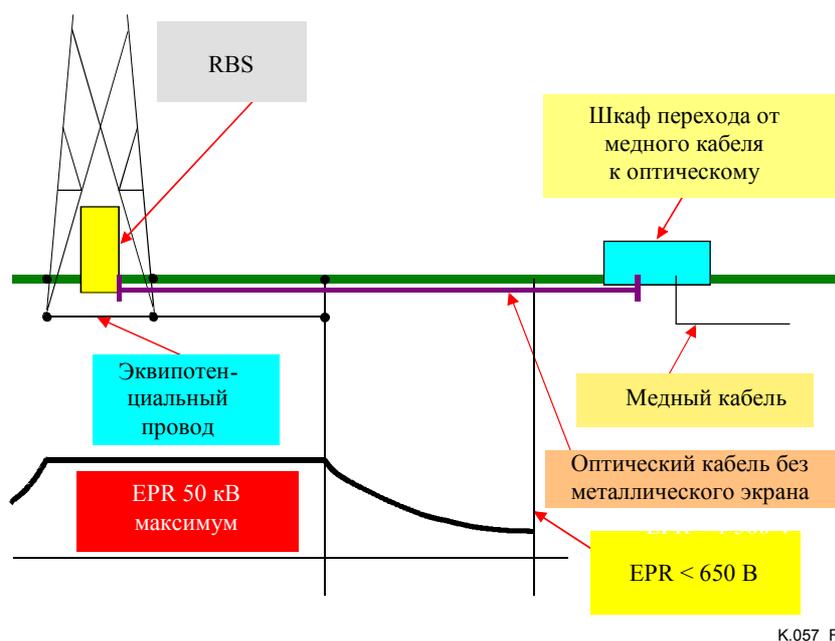


Рисунок 6/К.57 – Соединение с сетью электросвязи посредством волоконной оптики

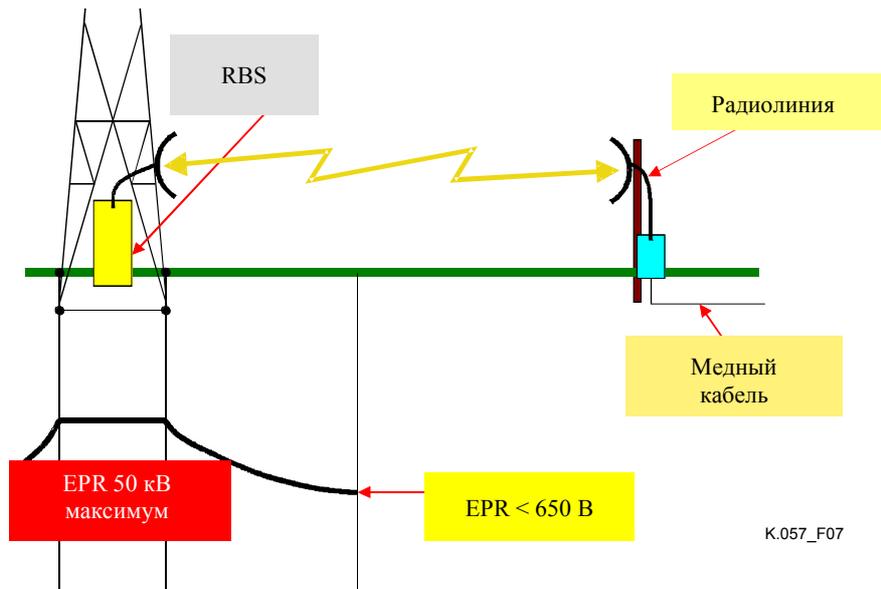


Рисунок 7/К.57 – Соединение с сетью электросвязи посредством радиолинии

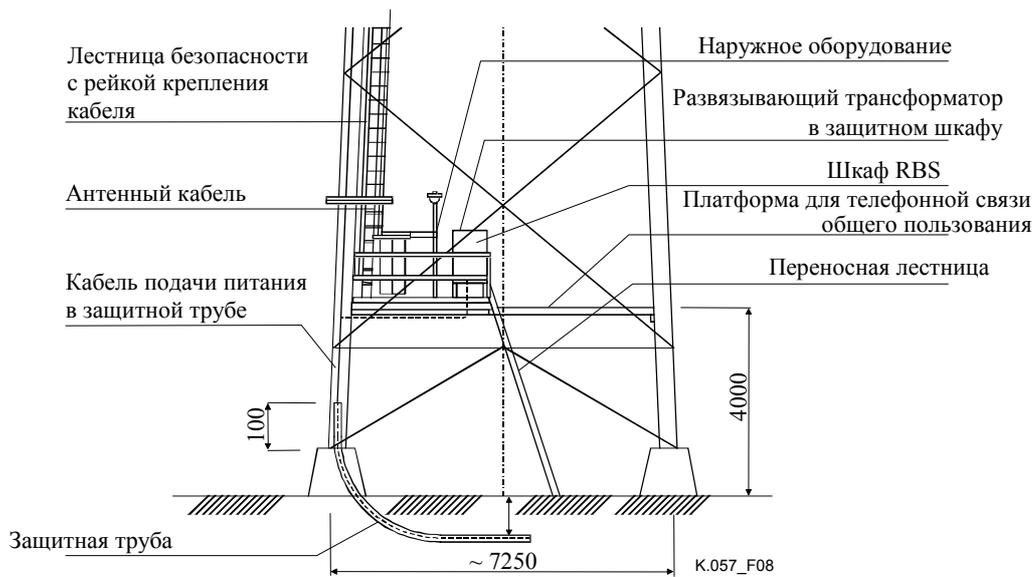


Рисунок 8/К.57 – Надземное размещение RBS на опоре ЛЭП

Добавление I

Указания по согласованию уровня изоляции, необходимого для цепи подачи электропитания и при повышении потенциала опор ЛЭП

I.1 Область исследований

Представленные в данном добавлении исследования повышения потенциала заземления опоры (Т-EPR) имеют целью проведение анализа чувствительности с помощью метода многопроводного решения [I.1] для предоставления руководства по определению потенциала применительно к заданным на практике условиям.

Проведенный анализ охватывает следующие возможные условия:

- 1) Длина (L) линии электропередачи (км): 15 или 60;
- 2) Место замыкания: поблизости от начала (км 1), середины (км L/2) или конца (км L – 1) линии, а также ступенчатые изменения;
- 3) Сопротивление заземления подстанций в местах начала/конца линий (Ом): 0,1/0,1 или 0,1/1;
- 4) Способ подачи питания: с одного конца (1 × 10 кА) или с обоих концов (2 × 5 кА);
- 5) Варианты с экранированным проводом (sw) и с противовесом (cp): два sw, только один sw или sw + cp;
- 6) Сопротивление заземления опоры (Ом)/удельное сопротивление почвы (Ом·м): 8/50, 25/500 или 50/2500;
- 7) Среднее расстояние между опорами.

Результаты соотносятся с током замыкания фазы на землю величиной 10 кА, что рассматривается в качестве базовой величины. Учитывая, что исследуемое явление носит практически линейный характер, полученные значения Т-EPR могут быть пересчитаны в любой фактический ток замыкания на землю пропорционально соотношению между этим током замыкания на землю и базовым током 10 кА.

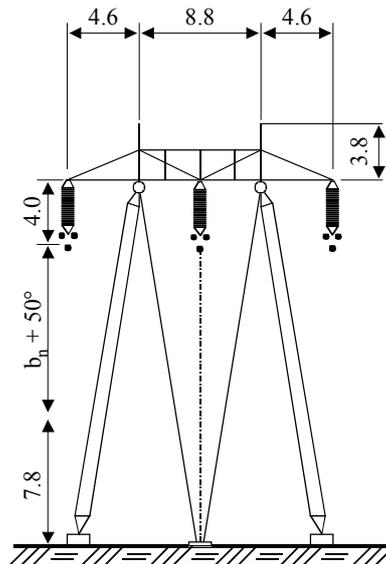
I.2 Исследованные варианты, параметры

I.2.1 Варианты структуры линии

Расположение проводов в изучавшихся линиях электропередачи на 400 кВ приведено на рисунке I.1. Конструкции из двух линий исследуются согласно следующим трем вариантам:

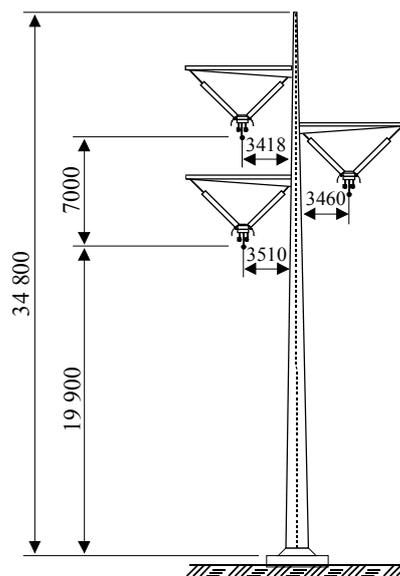
- A Горизонтальная фазопроводная схема с *двумя экранированными проводами (sw)* (рисунок I.1 a);
- B Компактная треугольная фазопроводная схема с *одним экранированным проводом (sw)* (рисунок I.1 b);
- C То же, что и в пункте B, но с *одним экранированным проводом и одним противовесом (cp)*.

Противовес представляет собой неизолированный медный провод сечением 35 мм², проложенный вдоль линии на глубине около 0,5 м. Опоры не имеют металлического соединения с противовесом. Однако искровые разрядники, установленные между заземлением опоры и противовесом, обеспечивают проскакивание искры и соединение опоры с противовесом в случае превышения Т-EPR примерно 3 кВ. Таким образом, при этом условии предполагается, что между заземлением опоры и противовесом нет соединения, за исключением случаев дефектной опоры.



Структура системы фазовых проводов: $3 \times (3 \times 593) \text{ мм}^2$
 Структура системы экранированных (заземленных) проводов: $2 \times 142 \text{ мм}^2$
 $b_n + 50^\circ = 12,72 \text{ м}$.

а) Конструкция линии с двойными экранированными проводами (случай А)



Структура системы фазовых проводов: $3 \times (3 \times 593) \text{ мм}^2$
 Структура системы экранированных (заземленных) проводов: $1 \times 241 \text{ мм}^2$
 Дополнительно может применяться противовес на глубине 50 см.

б) Конструкция линии с единичным экранированным проводом (случай В), которая может также оснащаться противовесом (случай С)

Рисунок I.1/К.57 – Структуры линий, предполагаемые при исследованиях (нормальный разнос: 333 м)

Предполагаемый средний разнос между опорами составляет 333 м (1/3 км). Проводились также исследования при средних разносах 200 м и 500 м с целью проверки влияния величины разноса.

Были проведены имитационные вычисления для длины линий:

- Код L15: "короткая линия" длиной 15 км;
- Код L60: "длинная линия" длиной 60 км.

1.2.2 Варианты параметров

1.2.2.1 Заземление подстанций

Моделируются следующие два варианта в отношении сопротивления заземления подстанций на концах линии:

- Код случая S1: малое сопротивление на обоих концах, например 0,1 Ом/0,1 Ом;
- Код случая S2: малое сопротивление в начале (конец S при 0 км) и более высокое полное сопротивление на другом (R при L км) конце, например 0,1 Ом/1 Ом.

1.2.2.2 Сопротивление заземления опоры и удельное сопротивление почвы

Удельное сопротивление почвы влияет на два вида параметров, используемых при моделировании. Удельное сопротивление поверхностного слоя почвы существенно влияет на сопротивление заземления опоры. Сопротивление заземления – принимая данную структуру электродов заземления – в принципе пропорционально удельному сопротивлению почвы, в которую заделана система электродов.

Удельное сопротивление более глубокого слоя земли оказывает определенное влияние на последовательные собственные и взаимные полные сопротивления линии, в обоих случаях с возвратом тока через землю. Это влияние достаточно невелико со стороны собственного полного сопротивления, а также со стороны взаимного полного сопротивления в случае, когда разнос между проводами невелик, как, например, разнос между фазовыми и экранированными проводами.

Отсюда следует, что должна предполагаться определенная, хотя и не жесткая, корреляция между сопротивлением заземления опоры и удельным сопротивлением земли. Следовательно, при моделированном исследовании учитываются следующие варианты:

Код случая	Сопротивление	
	Заземление опоры [Ом]	Удельное сопротивление [Ом·м]
R1	8	50
R2	25	500
R3	50	2500

1.2.2.3 Места замыкания

Выполнялись вычисления по каждому моделируемому варианту местонахождения замыкания в середине ($L/2$ км) линии.

В случае одностороннего (1×10 кА) инжектирования тока исследовались также следующие места замыкания:

- на удалении 1 км от каждого конца линии;
- с переменным шагом, равным 1 км на линии длиной 15 км и 2 км на линии 60 км.

1.2.2.4 Величина и способ инжектирования тока замыкания

Повышение потенциала связывается с составляющей тока нулевой последовательности I_0 . В случае замыкания фазы на землю ток нулевой последовательности $3I_0$ равен току в точке замыкания. В исследованиях предполагается ток $3I_0 = 10$ кА величины тока замыкания в точке замыкания. Вдоль линии ток I_0 предполагается в каждой фазе, таким образом, влияние составляющих тока положительной и отрицательной последовательности не принимается во внимание. Практически это означает учет "среднего" влияния между фазовыми и экранированными проводами или, другими словами, пренебрежение небольшими расхождениями из-за возникновения замыкания в разных фазах.

В отношении распределения тока между секциями линии по обе стороны от точки замыкания моделируются следующие два экстремальных условия:

- ток 1×10 кА только в одном направлении, т. е. между 0 км и точкой замыкания;
- ток 2×5 кА половинными долями, т. е. $3I_0 = 5$ кА как между 0 км и точкой замыкания, так и между точкой замыкания и L-километровыми секциями линии.

В реальности на распределение тока влияет относительное расположение точки замыкания, но в основном оно определяется полными сопротивлениями нулевой последовательности на подстанциях, на что в значительной степени влияют трансформаторы с заземленной нейтралью, расположенные на подстанциях в концах линии. Однако односторонний ток возникает, по крайней мере временно, в процессе размыкания из-за неодновременного отключения на обоих концах поврежденной линии.

I.3 Анализ результатов

I.3.1 Качественный анализ

Прежде всего, качественный анализ результатов по повышению потенциала опоры был сделан для того, чтобы отметить относительную важность различных условий, перечисленных в пункте I.1. Ключевым результатом является потенциал экранированного провода (проводов), потому что вследствие металлического соединения между опорой и экранированными проводами повышение потенциала конкретной опоры идентично потенциалу экранированного провода на месте рассматриваемой опоры.

Данный качественный анализ выполнен главным образом путем использования графиков, содержащих наиболее характерные результаты моделирования.

Самое большое повышение потенциала возникает, конечно же, на поврежденной опоре (см. рисунки I.2, I.3 и I.4). Потенциал экранированного провода уменьшается с увеличением расстояния от точки замыкания. Потенциал экранированного провода имеет тенденцию падать до нулевого значения на той стороне линии, от которой в точку замыкания не поступает ток нулевой последовательности (см. правую сторону графиков на рисунках I.2 и I.3). И напротив, потенциал экранированного провода имеет тенденцию вначале падать до нуля, а после этой секции он возрастает с приближением к подстанции, которая подает в точку замыкания ток нулевой последовательности (см. левую сторону графиков на рисунках I.2 и I.3, а также обе стороны графика на рисунке I.4).

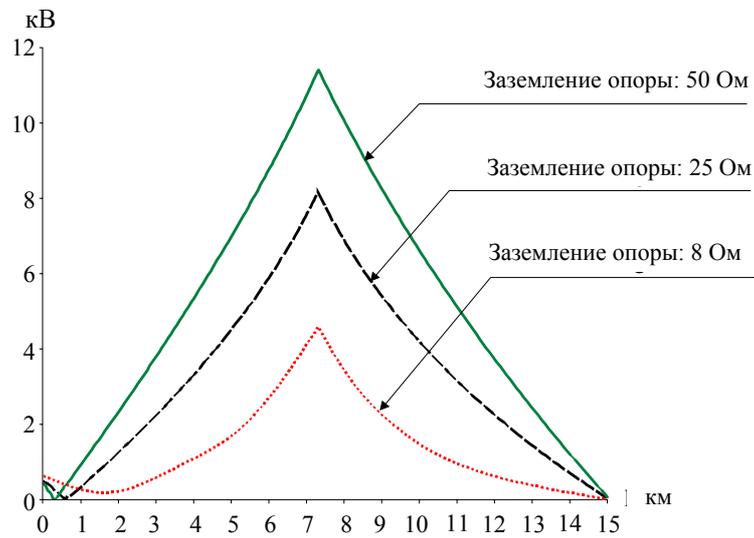
В отношении влияния местоположения точки замыкания можно констатировать, что повышение потенциала дефектной опоры практически не изменяется, кроме как вблизи от концов линии (в зонах окончания влияния), где потенциал уменьшается до величины, близкой к повышению потенциала, соответствующему заземлению подстанции (см. рисунок I.5). Стоит заметить, что такая тенденция к понижению является безусловно действительной только при допущении, что величина тока замыкания на землю постоянна. На практике величина тока замыкания на землю повышается, когда замыкание происходит ближе к подстанции. В практических случаях такие обратные эффекты могут большей частью компенсировать друг друга.

Влияние среднего расстояния между опорами на повышение потенциала дефектной опоры в зависимости от места замыкания показано в отношении структуры линии, имеющей только один экранированный провод (на рисунке I.6). Видно, что повышение потенциала опоры нарастает с увеличением среднего разноса.

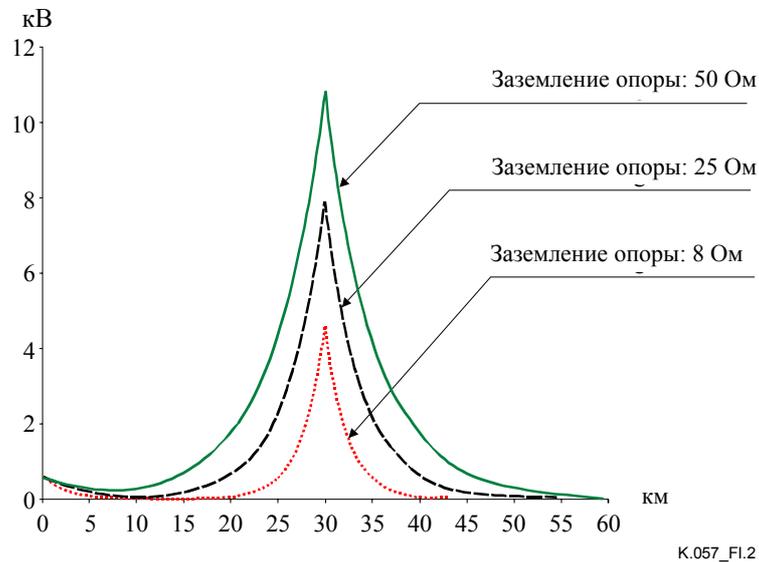
В довершение картины на рисунке I.7 дается в виде графика профиль тока в экранированном проводе. Можно заметить следующие тенденции в случае, когда ток нулевой последовательности ($3I_0 = 10$ кА) поступает только с одной (левой) стороны:

- Ток экранированного провода идет в обоих направлениях, но значительно больший со стороны подачи электропитания.
- Ток экранированного провода имеет тенденцию падать до нуля на той стороне линии, откуда к точке замыкания не поступает ток нулевой последовательности.

Ток экранированного провода вначале понижается до своего индуцированного установившегося значения, а затем, как правило, повышается в зоне окончания воздействия вблизи подстанции, которая подает ток нулевой последовательности к точке замыкания.



а) Длина линии: $L = 15$ км



б) Длина линии: $L = 60$ км

В 400-кВ линия с 1 экранированным проводом без противовеса
 S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом
 F2 Место замыкания: $L/2$ км (F2)
 Ток 1×10 кА, идущий только с левой стороны от точки замыкания

Рисунок I.2/К.57 – Профиль потенциала экранированного провода в зависимости от длины линии, параметр: сопротивление заземления опоры

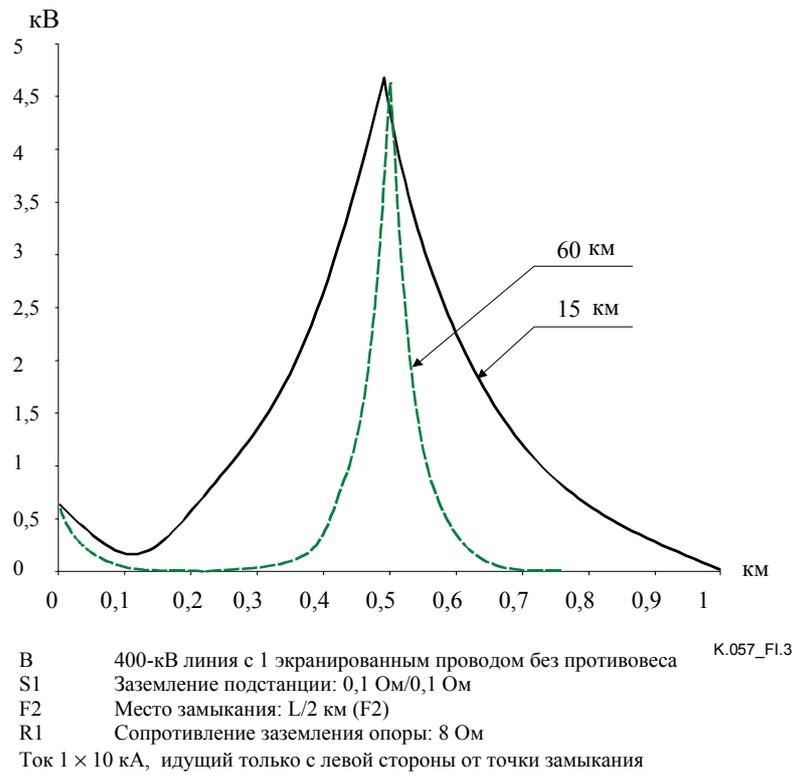
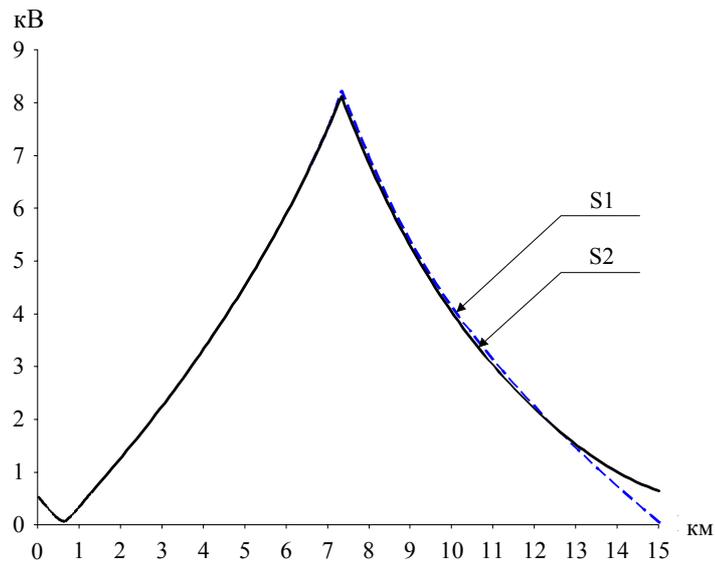
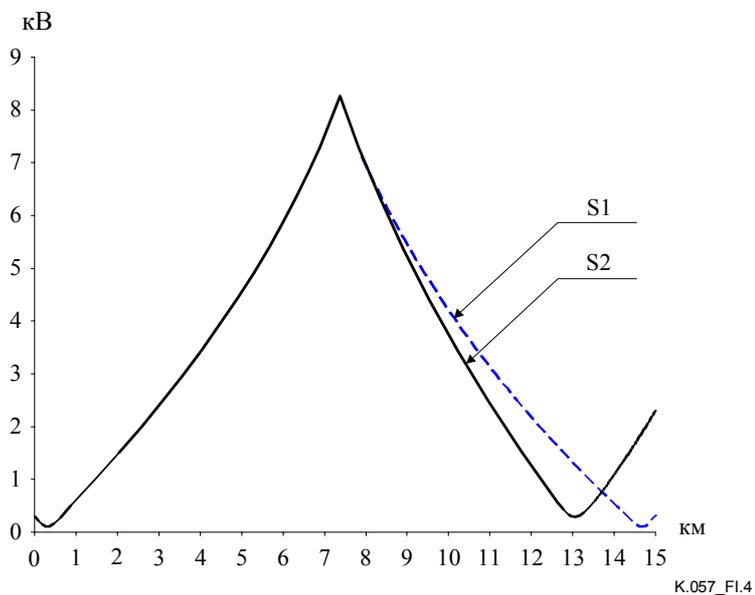


Рисунок I.3/К.57 – Профиль потенциала экранированного провода в зависимости от длины линии, с параметром нормализованного масштаба длины: длина линии



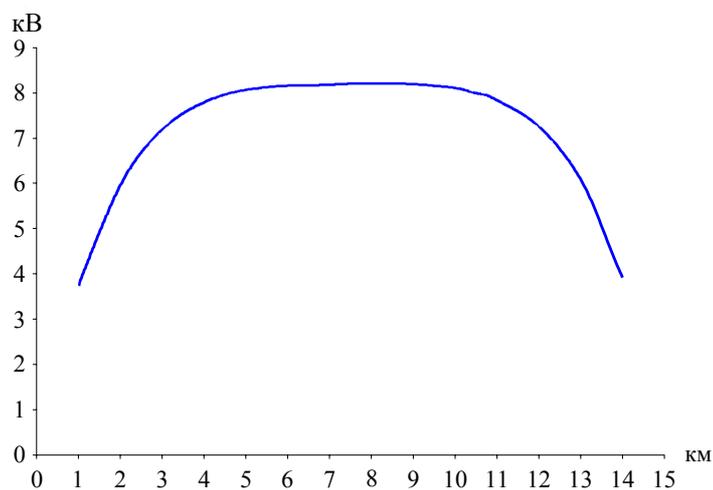
а) Ток 1×10 кА, идущий только в левую сторону от точки замыкания



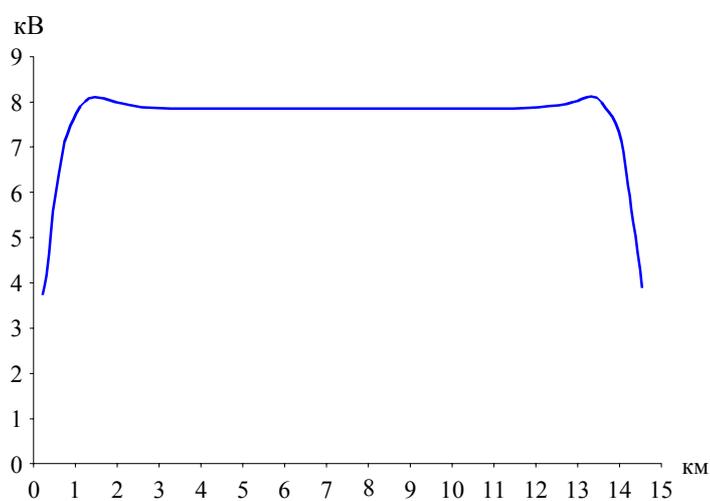
б) Ток 2×5 кА, идущий по обеим сторонам от точки замыкания

В 400-кВ линия с 1 экранированным проводом без противовеса
 F2 Место замыкания: $L/2$ км (F2)
 R2 Сопротивление заземления опоры: 25 Ом

**Рисунок I.4/К.57 – Профиль потенциала экранированного провода в зависимости от длины линии, параметр: сопротивления заземления подстанций
 $S1 = 0,1$ Ом/ $0,1$ Ом, $S2 = 0,1$ Ом/ 1 Ом**



а) Длина линии: L = 15 км

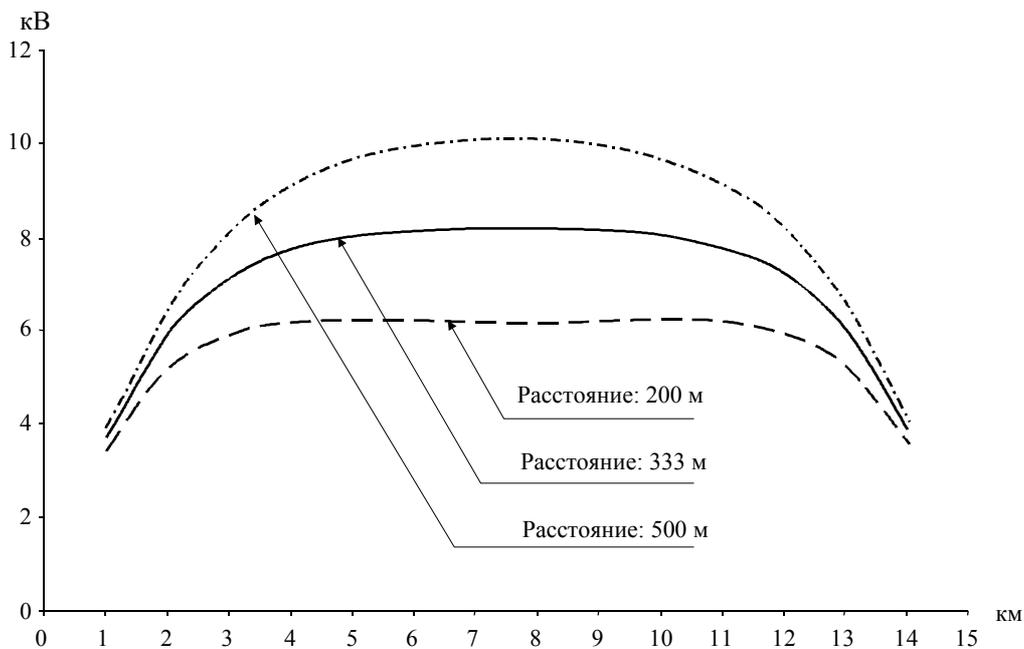


б) Длина линии: L = 60 км

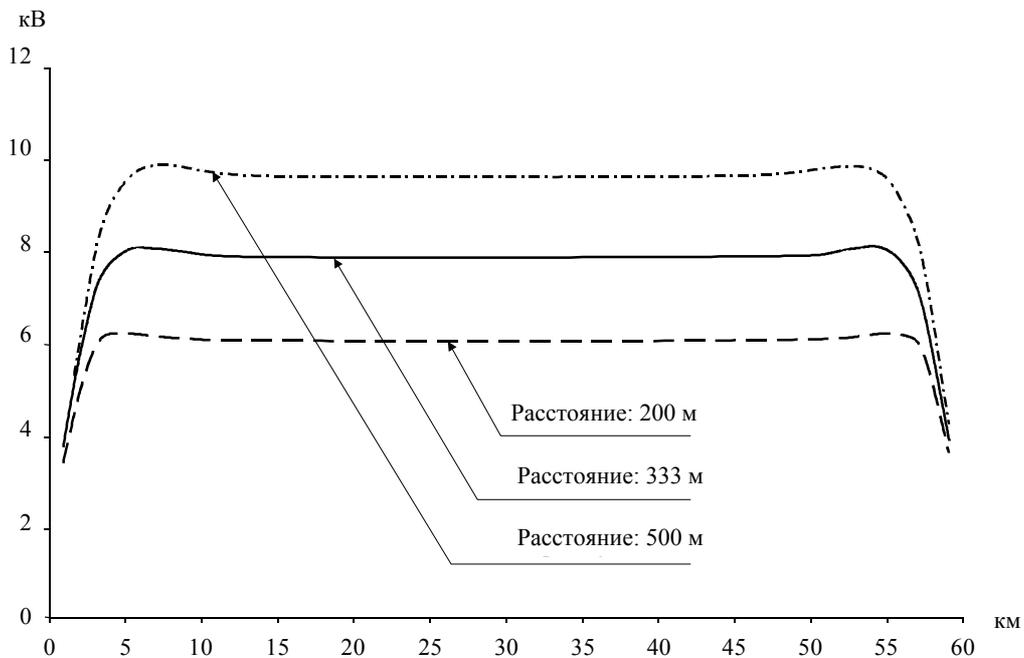
K.057_F1.5

В 400-кВ линия с 1 экранированным проводом без противовеса
 S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом
 R2 Сопротивление заземления опоры: 25 Ом
 Ток 1×10 кА, идущий только с левой стороны от точки замыкания

Рисунок I.5/К.57 – Повышение потенциала дефектной опоры в зависимости от места замыкания



а) Длина линии: L = 15 км

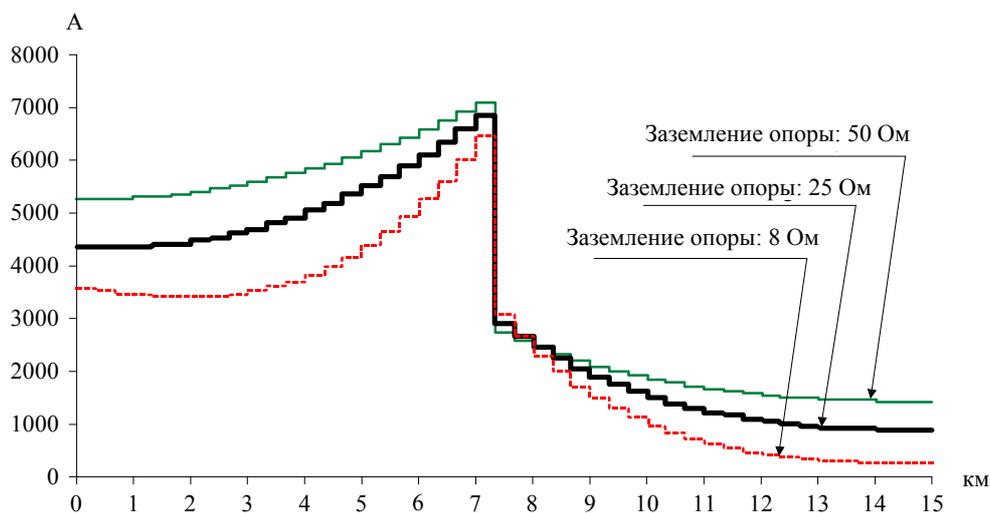


б) Длина линии: L = 60 км

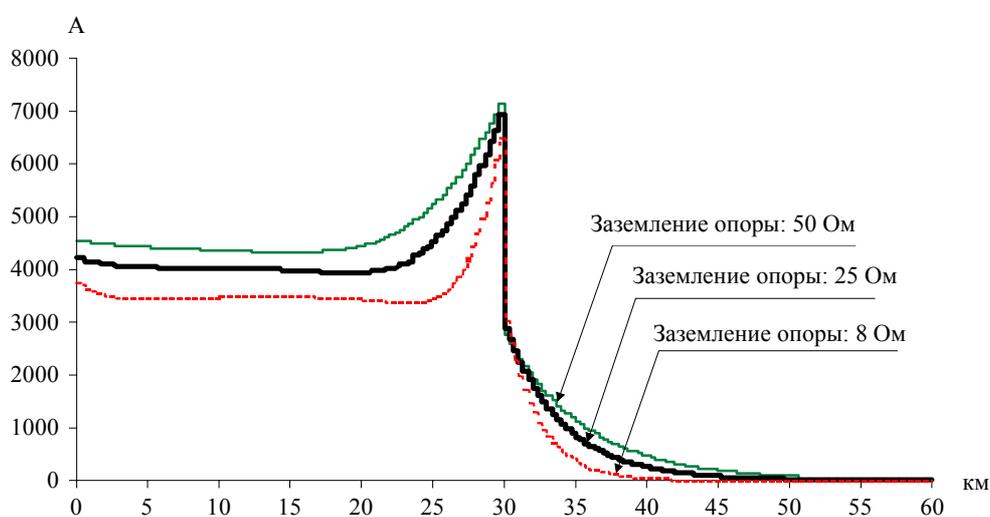
K.057_Fl.6

В 400-кВ линия с 1 экранированным проводом без противовеса
 S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом
 R2 Сопротивление заземления опоры: 25 Ом
 Ток 1×10 кА, идущий только с левой стороны от точки замыкания

Рисунок I.6/К.57 – Влияние среднего расстояния между опорами (параметр кривых) на повышение потенциала дефектной опоры в зависимости от места замыкания



а) Длина линии: $L = 15$ км



б) Длина линии: $L = 60$ км

В 400-кВ линия с 1 экранированным проводом без противовеса
 S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом
 F2 Место замыкания: $L/2$ км (F2)
 Ток 1×10 кА, идущий только с левой стороны от точки замыкания

Рисунок I.7/К.57 – Профиль тока экранированного провода в зависимости от длины линии

I.3.2 Количественный анализ

Исследуемые условия и параметры могут подразделяться в соответствии с их относительной значимостью для величин повышения потенциала опоры на следующие три класса:

- а) Не принимаемые в расчет условия и параметры:
- Длина линии;
(См. рисунки I.3 и I.8, на которых указывается совсем небольшое увеличение T-EPR при более короткой линии.)
 - Сопротивление заземления подстанций;
(См. рисунки I.4 и I.9.)
 - Ток (нулевая последовательность) одностороннего (1×10 кА) или двустороннего (2×5 кА) замыкания.
(См. рисунок I.10.)

б) Определяющие условия и параметры:

- Сопротивление заземления опор (среднее);
(См. рисунки I.2 и I.8.)
- Число экранированных проводов (один или два) и использование противовеса.
(См. рисунок I.8.)

Следует отметить, что величина тока замыкания также относится к числу определяющих параметров. Однако этот параметр является конструктивным параметром, которому надлежит соответствовать фактическому значению (диапазону) при подсчете T-EPR, имеющему отношение к данному случаю.

с) Корректирующим условием является расстояние между опорами. Его относительная важность показана на рисунках I.11 и I.12 применительно к длине линии 15 км и 60 км, соответственно. Значения корректирующего коэффициента для вычислений потенциала опор ЛЭП с различными расстояниями между ними приводятся в таблице I.2.

Следует упомянуть, что поправки, необходимые в случае повышения потенциала опоры вследствие различного расстояния между опорами, составляют менее $\pm 5\%$ для линий, оснащенных экранированным проводом (проводами) и противовесом, и менее $\pm 25\%$ для линий, имеющих только экранированный провод (провода).

Величины повышения потенциала опор, полученные при моделировании, приведены применительно к определяющим условиям в таблице I.1. Эти величины соотносятся с током замыкания на землю 10 кА и расстоянием 333 м в качестве эталонных условий. Они могут быть пересчитаны для токов, иных чем 10 кА, пропорционально величине тока. Аналогично, повышение потенциала опоры может быть пересчитано для величин разноса между опорами, отличающихся от среднего разноса 333 м, путем умножения на корректирующие коэффициенты, приведенные в таблице I.2.

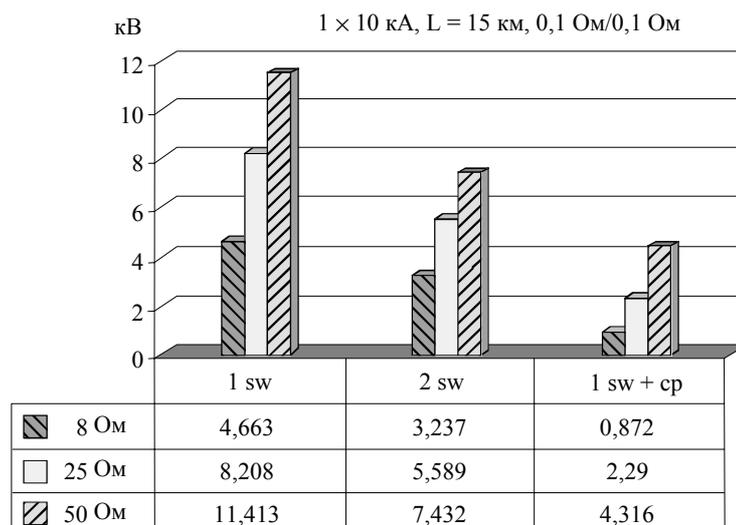
Таблица I.1/К.57 – Повышение потенциала дефектной опоры при соблюдении определяющих условий и параметров для тока замыкания на землю 10 кА

Сопротивление заземления [Ом]	Конфигурация экранированного провода					
	1 sw		2 sw		1 sw + cp	
	[кВ]	[град.]	[кВ]	[град.]	[кВ]	[град.]
8	4,663	31,40	3,237	22,62	0,872	19,68
25	8,208	32,45	5,589	25,13	2,290	20,08
50	11,413	37,70	7,432	31,32	4,316	22,63
sw	экранированный провод					
cp	противовес					

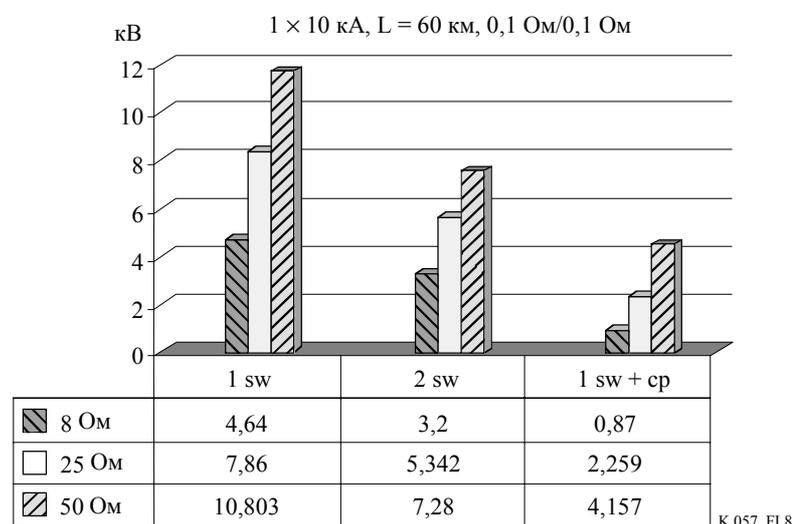
**Таблица I.2/К.57 – Поправочные коэффициенты при повышении потенциала
опор ЛЭП с разными расстояниями между ними (Базовые условия:
напряжение опоры при разносе 333 м)**

Структура провода заземления	Разнос [м]	Длина линии [км]					
		15			60		
		Сопротивление заземления опоры [Ом]			Сопротивление заземления опоры [Ом]		
		8	25	50	8	25	50
1 sw	200	0,77	0,76	0,77	0,78	0,77	0,77
	333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	500	1,23	1,24	1,18	1,22	1,22	1,22
2 sw	200	0,77	0,76	0,80	0,77	0,77	0,77
	333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	500	1,24	1,21	1,14	1,22	1,22	1,22
1 sw + 1 ср	200	0,95	0,92	0,89	0,95	0,92	0,89
	333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	500	1,03	1,06	1,08	1,03	1,05	1,08

ПРИМЕЧАНИЕ. – 1) Конфигурация 400-кВ линии.
2) Место замыкания: L/2 км.
3) Ток 2×5 кА, проходящий с левой стороны от точки замыкания.
4) Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом.



а) Длина линии: L = 15 км



б) Длина линии: L = 60 км

S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом

F2 Место замыкания: L/2 км (F2)

Ток 1 × 10 кА, идущий только с левой стороны от точки замыкания

Рисунок I.8/К.57 – Повышение потенциала дефектной опоры при различных значениях сопротивления заземления опоры и вариантах "экранированный провод/противовес"



а) Место замыкания на удалении 1 км



б) Место замыкания в середине линии

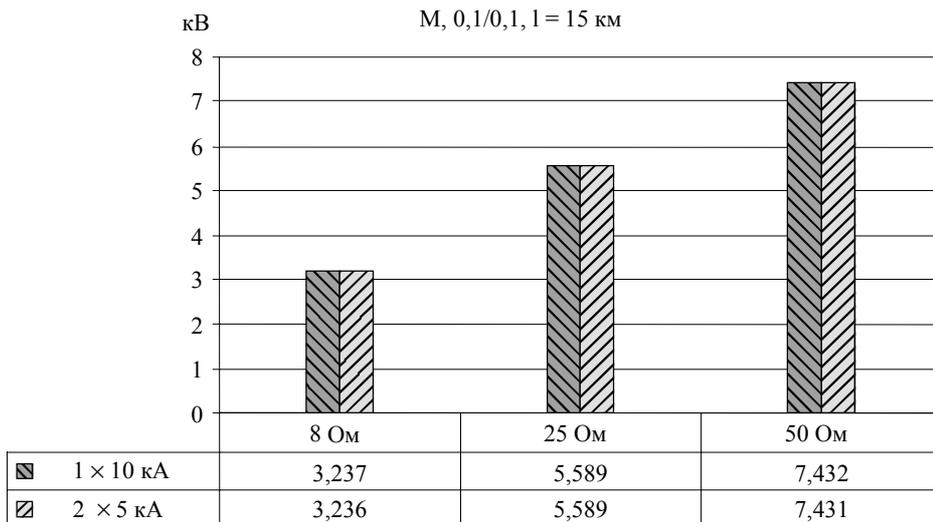


K.057_FL9

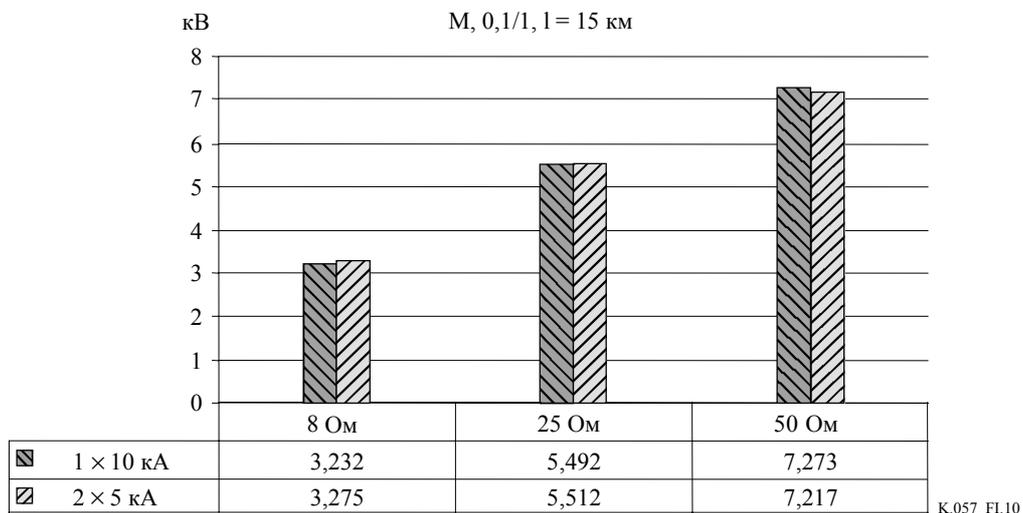
с) Место замыкания на удалении 14 км

A 400-кВ линия с 2 экранированными проводами без противовеса
R2 Сопротивление заземления опоры: 25 Ом
L15 Длина линии: L = 15 км
Ток 1×10 кА, проходящий только с левой стороны от точки замыкания

Рисунок I.9/K.57 – Повышение потенциала дефектной опоры при различных вариантах сопротивления заземления опоры и подстанции



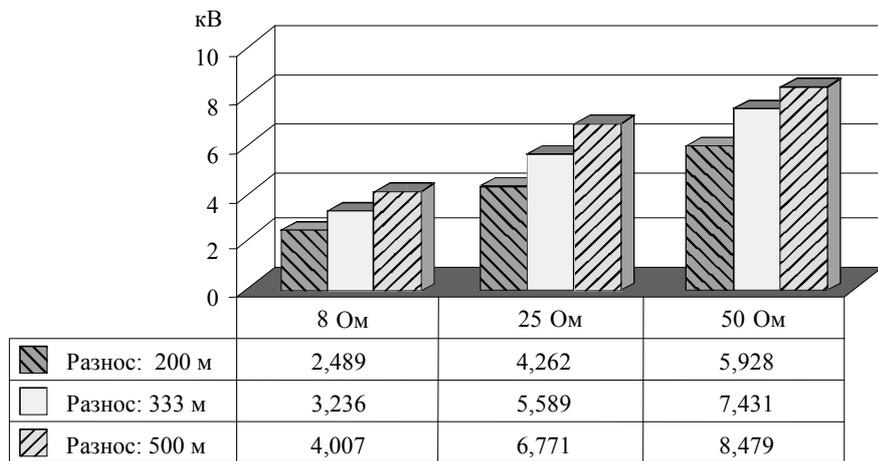
а) Сопротивления заземления подстанции S1 = 0,1 Ом/0,1 Ом



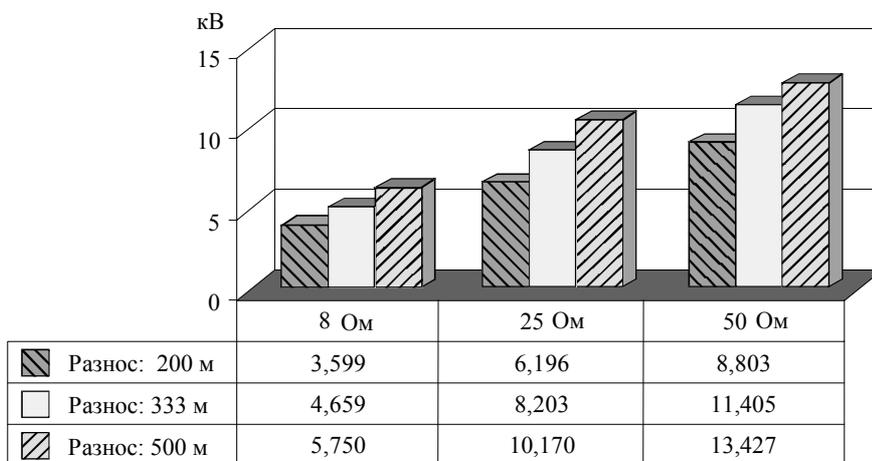
б) Сопротивления заземления подстанции S2 = 0,1 Ом/1 Ом

A 400-кВ линия с 2 экранированными проводами без противовеса
 F2 Место замыкания: L/2 км (F2)

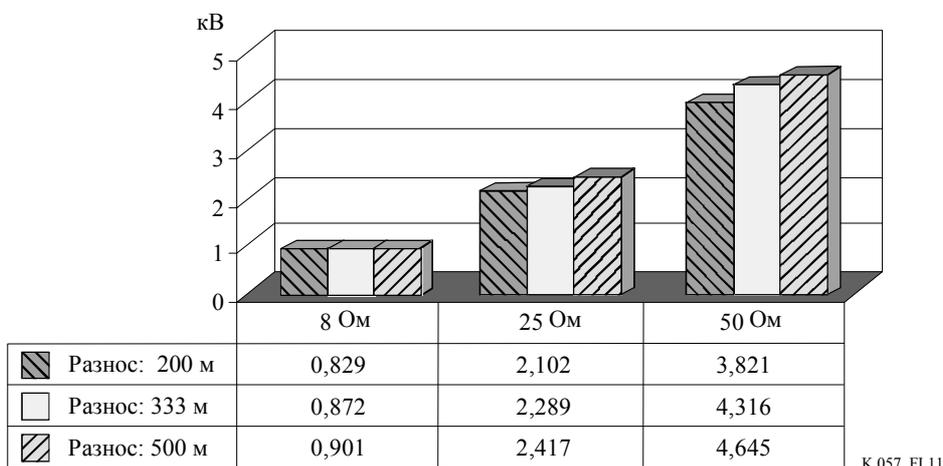
Рисунок I.10/К.57 – Повышение потенциала дефектной опоры при одностороннем (1 × 10 кА) или двустороннем (2 × 5 кА) токе замыкания и вариантах сопротивления заземления опоры



а) 1 экранированный провод



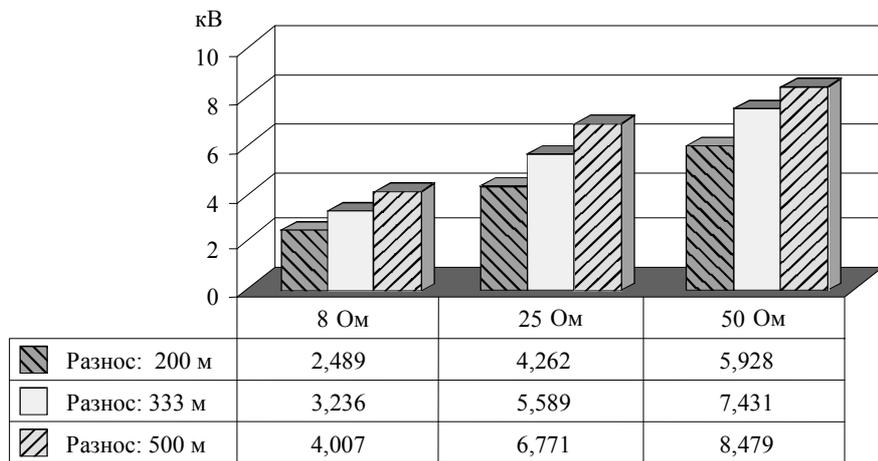
б) 2 экранированных провода



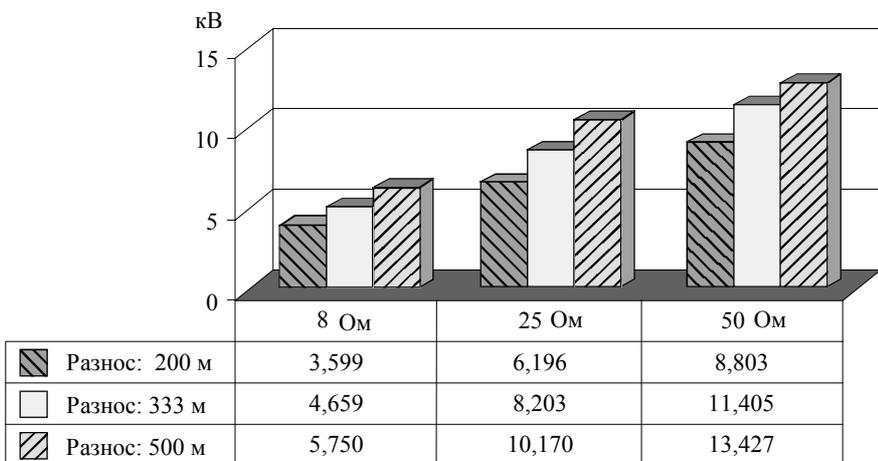
в) 1 экранированный провод и противовес

В 400-кВ линия
 L15 Длина линии: L = 15 км
 F2 Место замыкания: L/2 км
 Ток 2 × 5 кА, проходящий только с левой стороны от точки замыкания
 S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом

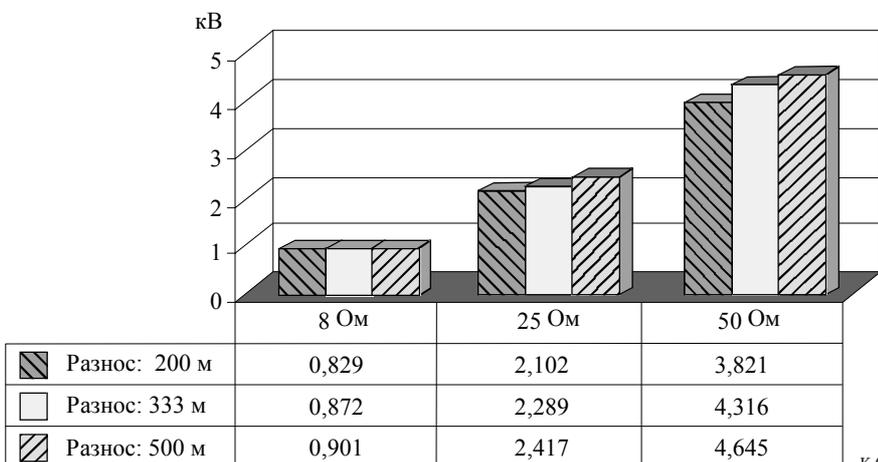
Рисунок I.11/К.57 – Повышение потенциала дефектной опоры при различных расстояниях между опорами



а) 1 экранированный провод



б) 2 экранированных провода



К.057_Ф1.11

в) 1 экранированный провод и противвес

В 400-кВ линия
 L15 Длина линии: L = 15 км
 F2 Место замыкания: L/2 км
 Ток 2 × 5 кА, проходящий только с левой стороны от точки замыкания
 S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом

Рисунок I.12/К.57 – Повышение потенциала дефектной опоры при различных расстояниях между опорами

I.4 Расчет требуемого уровня изоляции

Согласование уровня изоляции, необходимого для цепи источника питания и при повышении потенциала опор ЛЭП, может осуществляться, исходя из повышения потенциала дефектной опоры при соблюдении определяющих условий и параметров, приводимых в таблице I.1.

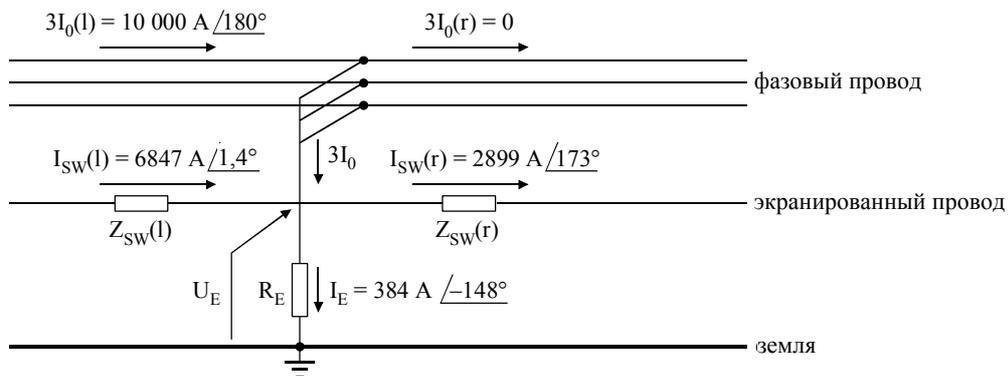
I.4.1 Отображение схемы дефектной опоры

По результатам моделирования линии электропередачи – включая систему экранированных проводов – получается не только потенциал опоры, но и распределение тока на дефектной опоре, как показано на подробной схеме части а) рисунка I.13. Эти величины напряжения и тока позволяют определить входное полное сопротивление экранированного провода (проводов), наблюдаемого в обоих направлениях, т. е. $Z_{sw}(l)$ и $Z_{sw}(r)$, и их параллельный эквивалент, т. е. эквивалентное полное сопротивление в точке возбуждения системы экранированных проводов, наблюдаемое от дефектной опоры (см. часть б) рисунка I.13). Векторные значения Z_{sw} приведены в таблице I.3. Они связаны с односторонним движением тока замыкания (1×10 кА), но идентичные величины были получены и в отношении двустороннего (2×5 кА) тока замыкания, несмотря на значительную разницу в распределении тока экранированного провода.

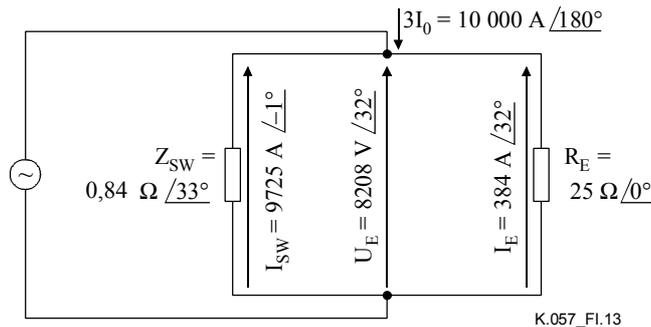
Полное сопротивление в точке возбуждения находится в диапазоне от 0,1 до 1,2, что совсем немного в сравнении с сопротивлением заземления опоры. В итоге повышение потенциала данной опоры определяется скорее средним значением сопротивлений заземления расположенных по соседству 5–10 опор, нежели самой рассматриваемой опоры. Другими словами, T-EPR данной опоры не может быть значительно уменьшено за счет уменьшения сопротивления только этой опоры.

Таблица I.3/К.57 – Полное сопротивление в точке возбуждения, наблюдаемое со стороны дефектной опоры

Сопротивление заземления [Ом]	Конфигурация экранированного провода					
	1 sw		2 sw		1 sw + cp	
	[Ом]	[град.]	[Ом]	[град.]	[Ом]	[град.]
8	0,491	33,2	0,336	23,5	0,090	19,9
25	0,844	33,5	0,570	25,7	0,232	20,3
50	1,162	38,5	0,752	31,8	0,435	22,8
sw	экранированный провод					
cp	противовес					



а) Подробная схема



б) Эквивалентная схема

- B 400-кВ линия с 2 экранированными проводами без противовеса
- R2 Сопротивление заземления опоры: 25 Ом
- L15 Длина линии: L = 15 км
- S1 Заземление подстанции: 0,1 Ом/0,1 Ом
- Ток 1×10 кА, проходящий только с левой стороны от точки заземления

Рисунок I.13/К.57 – Отображение схемы дефектной опоры

I.4.2 Согласование уровней изоляции и тока замыкания на землю

Повышение потенциала дефектной опоры при соблюдении девяти определяющих условий и параметров приведено в таблице I.1 применительно к току замыкания на землю 10 кА. Модули этих величин T-EPR воспроизводятся в таблице I.4 и рассматриваются как базовые величины U_b для согласования уровня изоляции.

Таблица I.4/К.57 – Базовые величины повышения потенциала опоры (T-EPR) для согласования уровня изоляции

Сопротивление заземления [Ом]	Конфигурация экранированного провода		
	1 sw [кВ]	2 sw [кВ]	1 sw + cp [кВ]
8	4,663	3,237	0,872
25	8,208	5,589	2,290
50	11,413	7,432	4,316
sw	экранированный провод		
cp	противовес		

Используя базовые величины T-EPR U_b , можно определить следующие два вида конструктивных параметров:

1) **Требуемое напряжение изоляции**, U_{is} для данного тока замыкания на землю может быть определено по следующей формуле:

$$U_{is} = U_b \frac{I_{ef}}{10} \quad [\text{кВ}],$$

где

U_b – базовое напряжение, соответствующее конфигурации среднего сопротивления заземления и экранированного провода исследуемой линии, взятое из таблицы I.3;

I_{ef} – ток замыкания на землю, в кА, опоры ЛЭП, несущей рассматриваемую базовую радиостанцию.

Представим, к примеру, следующие условия для линии электропередачи, на опоре которой находится базовая станция:

- a) линия электропередачи оснащена двумя экранированными проводами;
- b) среднее значение сопротивления заземления опор составляет около 25 Ом;
- c) ток замыкания фазы на землю, относящийся к опоре с базовой станцией: $I_{ef} = 21$ кА.

Базовое напряжение, соответствующее первым двум условиям, равно: $U_b = 5,589$ кВ. С учетом и третьего условия напряжение изоляции, требуемое для оборудования подачи питания (развязывающий трансформатор, кабельная разводка), определяется как:

$$U_{is} = 5,589 \frac{21}{10} = 11,737 \quad [\text{кВ}]. \quad (\text{I-1})$$

Требуемый уровень напряжения изоляции округленно составляет 12 кВ.

2) **Допустимый ток замыкания фазы на землю**, I_{ef} , соответствующий различным предопределенным уровням напряжения изоляции (U_{is}), может определяться следующим выражением:

$$I_{ef} = 10 \frac{U_{is}}{U_b} \quad [\text{кА}], \quad (\text{I-2})$$

где

U_b – базовое напряжение, соответствующее конфигурации среднего сопротивления заземления и экранированного провода исследуемой линии, взятое из таблицы I.4;

U_{is} – предопределенные уровни напряжения изоляции оборудования подачи питания (развязывающий трансформатор, кабельная разводка), например, приводимые в первой колонке таблицы I.5.

С точки зрения инженерных расчетов можно предположить, что серия развязывающих трансформаторов изготавливается с заданными уровнями напряжения изоляции. В этом случае допустимые замыкания на землю, классифицируемые согласно уровням изоляции, могут быть определены для конфигурации среднего сопротивления заземления и экранированного провода исследуемой линии по формуле I-2.

Представим, к примеру, следующие условия для линии электропередачи, на опоре которой находится базовая станция:

- 1) линия электропередачи оснащена двумя экранированными проводами;
- 2) среднее значение сопротивления заземления опор составляет около 25 Ом.

Кроме того, в качестве третьего условия:

- 3) уровень напряжения изоляции оборудования подачи питания (развязывающий трансформатор, кабельная разводка) равен $U_{is} = 20$ кВ.

Базовое напряжение, соответствующее первым двум условиям, равно $U_b = 5,589$ кВ. С учетом и третьего условия ток замыкания на землю опоры ЛЭП, несущей данную базовую радиостанцию, определяется как:

$$I_{ef} = 10 \frac{20}{5,589} = 35,785 \quad [\text{кА}].$$

Округленное значение допустимого тока замыкания на землю составляет 36 кА согласно величине, представленной в 8-м ряду и 4-й колонке таблицы I.5.

Таблица I.5/К.57 – Допустимый ток замыкания на землю, соответствующий различным уровням изоляции

0	1	2	3	4	5
	Уровни напряжения изоляции оборудования подачи питания [кВ]	Среднее сопротивление заземления опор [Ом]	Допустимый ток замыкания на землю [кА] при различной конфигурации экранированного провода		
			1 sw [кА]	2 sw [кА]	1 sw + cp [кА]
1	10	8	21	31	115
2		25	12	18	44
3		50	9	13	23
4	15	8	32	46	172
5		25	18	27	66
6		50	13	20	35
7	20	8	43	62	229
8		25	24	36	87
9		50	18	27	46
10	50	8	107	154	573
11		25	61	89	218
12		50	44	67	116
sw экранированный провод					
cp противовес					

Допустимые значения тока замыкания на землю определяются для уровней напряжения изоляции 10 кВ, 15 кВ, 20 кВ и 50 кВ, и установленные выше варианты параметров линии электропередачи, а результаты приведены в рядах 1–12 и колонках 3–5 таблицы I.5.

Выбор требуемого уровня напряжения изоляции производится на основе реальных величин тока замыкания на землю. Величины тока замыкания на землю обычно даются как максимальные и средние значения для каждого HV уровня национальной сетки.

Максимальные токи замыкания относятся к замыканию на подстанции; поэтому такие большие токи никогда не возникают в случаях замыкания на линии электропередачи.

Добавление II

Указания относительно схемы подачи LV питания

II.1 Схема подачи LV питания

Схема подачи питания низкого напряжения состоит из следующих элементов (если следовать от опоры к сети подачи питания, см. рисунок 1):

- 1) Развязывающий трансформатор, устанавливаемый в шкафу подачи питания, принадлежит к LV/LV типу, т.е. 400 В/(400/230) В, подсоединенный, предпочтительно, по схеме "треугольник/звезда" (D/Y₀).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Соединение треугольником (D) имеет то преимущество, что в нем отсутствует нейтральный провод и, таким образом, нет необходимости в 4-м MV SPD (устройстве защиты от импульсных напряжений средневольтного типа) и оно может также питать неуравновешенные нагрузки.

- 2) Соединительный кабель является последним участком линии LV питания, входящим в зону Z-EPR, между шкафом развязывающего трансформатора и точкой разветвления. Его минимальная длина больше, чем размер зоны Z-EPR и полосы отчуждения (расстояния спада) HV линии электропередачи (не менее 30 м).

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Соединительный участок может представлять собой воздушную линию в тех исключительных случаях, когда национальные правила позволяют использовать воздушные линии в зоне полосы отчуждения HV линий.

- 3) Точка разветвления является точкой подключения соединительного кабеля к соединительному участку LV линии. Разветвление оснащается:

- устройством защиты от импульсных напряжений низковольтного типа (LV SPD);
- заземлением с малым сопротивлением (менее 10 Ом);
- электроизмерительными приборами, если это необходимо.

- 4) Соединительная линия – это участок LV линии подачи питания между точкой подключения к сети питания и точкой разветвления.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Соединительные линии могут подавать питание также нескольким потребителям, особенно в случае длинных линий (несколько сот метров). В этом случае в точке разветвления необходимо высококачественное заземление, или же каждый потребитель оснащается LV SPD.

- 5) Точка подключения может располагаться в любой точке LV электросети общего пользования или на LV терминалах MV/LV трансформатора, используемого только для RBS, но размещаемого вне зоны Z-EPR. Точка подключения оснащается следующими устройствами:

- устройством SPD

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – В устройствах SPD нет необходимости в случае, когда потребители, оснащенные SPD, получают питание через соединительную линию, а в точке разветвления не установлено никаких электроизмерительных приборов.

- заземлением с малым сопротивлением (менее 10 Ом)

ПРИМЕЧАНИЕ 5. – Применительно к TN(-C-S) LV сети результирующее полное сопротивление, наблюдаемое в точке соединения с землей, может быть достаточно низким и без применения дополнительных электродов заземления.

- электроизмерительными приборами, если это необходимо

ПРИМЕЧАНИЕ 6. – Измерение мощности может производиться в точке подключения только в случае, когда по соединительной линии не подается питание никакому потребителю.

ПРИМЕЧАНИЕ 7. – В случае, если RBS получает питание от MV/LV трансформатора, расположенного в зоне Z-EPR и оснащенного проводником выравнивания потенциала (см. рисунок 5), питающий трансформатор действует также как развязывающий трансформатор. Таким образом, SPD низковольтного типа применяется в шкафу подачи питания RBS и MOV на стороне MV (это устройство обычно применяется для защиты трансформатора от воздействия грозовых перенапряжений, поступающих из MV линии).

II.2 Принципы защиты

Защита системы LV питания включает защиту от перенапряжений промышленной частоты (50 Гц), возникающих при замыканиях на землю и импульсных воздействиях, вызываемых ударами молнии в опору, на которой установлена RBS.

II.2.1 Защита от EPR на промышленной частоте

Ток замыкания на землю вызывает повышение потенциала электродов (Т-EPR) на промышленной частоте (50 Гц) на самом заземлении опоры и постепенный спад повышения потенциала Земли (Z-EPR) вокруг опоры. Величина Т-EPR может быть рассчитана в соответствии с "Указаниями по согласованию уровня изоляции, необходимого для цепи электропитания и при повышении потенциала опор ЛЭП," представленными в виде Добавление I.

Принцип защиты заключается в изоляции системы LV подачи питания, входящей в зону Z-EPR, от повышения потенциала. Потенциал проводов линии подачи питания фиксируется относительно удаленной земли. (Фазовые провода заземляются через заземление нейтрали (если предположить систему TN), в то время как нейтраль и экран кабеля, если он имеется, заземляются напрямую.) Первичная обмотка развязывающего трансформатора также имеет потенциал удаленной земли из-за своего металлического соединения с линией подачи питания. С другой стороны, нейтраль вторичной обмотки связана с заземлением опоры.

При вышеперечисленных условиях защита может быть обеспечена за счет следующих мер:

- 1) изоляция первичной (треугольной) обмотки развязывающего трансформатора относительно вторичной обмотки, стального сердечника и любой другой металлической части шкафа;
- 2) изоляция фазовых проводов и любой металлической части (нейтрального экрана) LV соединительного кабеля относительно любой заземленной части шкафа и опоры и земли в зоне Z-EPR;
- 3) применение устройства SPD (MOV или аналогичного устройства), выдерживающего перенапряжения на промышленной частоте, т. е. надлежащий подбор его номинального напряжения (U_r).

ПРИМЕЧАНИЕ. – Номинальное напряжение (U_r) представляет собой среднеквадратичное значение напряжения промышленной частоты, которое может подаваться в течение 10 последовательных секунд между терминалами разрядников для защиты от атмосферных перенапряжений после максимальной предварительной нагрузки. Оно характеризует противостояние этого разрядника перенапряжениям на промышленной частоте (временным перенапряжениям).

Непрерывное рабочее напряжение (U_c), т. е. максимальное среднеквадратичное значение напряжения промышленной частоты, которое может непрерывно подаваться между терминалами разрядников, составляет 80% от U_r .

II.2.2 Защита от грозовых перенапряжений

В случае удара молнии в опору, на которой размещается RBS, большая часть тока молнии проходит в землю через заземление опоры. Таким образом, возникает аналогичная, но импульсного типа, зона EPR вследствие появления токов замыкания на землю, как описывалось выше. Величина Т-EPR импульсного типа опоры по существу определяется произведением величины тока молнии и полного сопротивления заземления опоры. Диапазон тока молнии составляет от 10 до 100 кА максимум, а полного сопротивления заземления – от 5 до 10 Ом. Следовательно, повышение потенциала опоры меняется в пределах от 50 до 2000 кВ (Типичная величина: 50 кА × 10 Ом = 500 кВ максимум).

II.2.2.1 Защита развязывающего трансформатора

Вышеуказанное перенапряжение импульсного типа могло бы возникать между обмотками и между первичной обмоткой и заземленными частями развязывающего трансформатора. Нереально спроектировать развязывающий трансформатор для такого высокого уровня изоляции. Например, развязывающий трансформатор, рассчитанный на уровень изоляции 20 кВ на промышленной частоте, может выдержать около 70 кВ импульсного напряжения. Поэтому импульсное перенапряжение должно выравняться устройствами SPD, подключенными между терминалами на первичной стороне и заземлением опоры, к которому также подсоединена нейтраль вторичной обмотки.

Устройство SPD должно удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Максимальное остаточное напряжение ниже напряжения, которое выдерживает развязывающий трансформатор при грозовых импульсах.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Максимальное остаточное напряжение – это максимальная пиковая величина напряжения между терминалами разрядника для защиты от грозовых перенапряжений при номинальном разрядном токе. Оно характеризует способность этого разрядника ограничивать уровень перенапряжения.

Максимальное остаточное напряжение обычно в три раза превышает величину U_r .

- 2) Напряжение (U_r) имеет достаточно большую величину для обеспечения того, чтобы разрядник для защиты от перенапряжений выдерживал максимальное повышение потенциала опоры на промышленной частоте. С учетом возможной величины повышения потенциала опоры (от 10 до 40 кВ) необходимы указанные выше разрядники MV SPD для защиты развязывающего трансформатора (обычно металлоокисный варистор, MOV).

Соблюдение этого требования чрезвычайно важно для того, чтобы обеспечить восстановление состояния изоляции на промышленной частоте после разряда грозового импульса.

- 3) Номинальный разрядный ток, соответствующий максимальному току молнии, на который рассчитана защита. Ток (I_{LV}), поступающий на LV линию подачи питания через предохранители, представляет собой часть тока молнии (I_L) и может приблизительно аппроксимироваться в соответствии с параллельно подключенными полным сопротивлением заземления опоры (R) и волновым сопротивлением LV линии (Z_{LV0}) в виде:

$$I_{LV} = \frac{R}{R_E + Z_{LV0}} I_L \cong \frac{R}{100} I_L.$$

В последней части формулы предполагается, что волновое сопротивление LV фидера кабельного типа находится в диапазоне от 80 до 90 Ом; таким образом, $Z_{LV0} + R \cong 100$ Ом.

II.2.2.2 Защита соединительного кабеля

Устройства MV SPD, подключенные к терминалам на первичной стороне развязывающего трансформатора, инжектируют грозовой импульс в соединительный кабель. Величина инжектированного импульсного напряжения относительно опоры, а также земли вблизи опоры равна остаточному напряжению устройств MV SPD. В результате градиент напряжения на концах кабеля, т. е. фазовые провода – земля для неэкранированного кабеля или экран – земля для экранированного кабеля, равен остаточному напряжению устройств MV SPD вблизи опоры.

Определение градиента напряжения соединительного кабеля все более затрудняется при удалении от опоры. Величина инжектированного импульсного напряжения относительно удаленной земли – это потенциал опоры от грозового импульса, уменьшенный за счет остаточного напряжения при прохождении через устройства MV SPD. Это напряжение представляет собой выброс, имеющий пик в несколько сотен киловольт. Однако пиковая величина импульсной волны появляется в кабеле только в том случае, когда волна способна пройти такое расстояние, что пик волны окажется в точке питающего LV кабеля, находящейся за пределами зоны EPR. Геометрическое удлинение фронта волны вдоль LV линии составляет около 300 м, даже если предположить, что волна является очень крутой со временем по фронту 1 мкс. Обычно длина соединительного кабеля составляет 50–150 м (см. Добавление III). Его проводники замыкаются на землю либо через устройства LV SPD (фазовые проводники), либо заземляются напрямую (нейтральный провод и экран, если таковой имеется), образуя практически короткое замыкание в точке разветвления. Такое завершение по типу короткого замыкания вызывает отрицательную отраженную волну напряжения, которая стремится уменьшить приходящую волну. Результирующее напряжение остается ниже примерно на 1/10 величины пикового напряжения, если соединительный кабель остается короткозамкнутым.

В свете вышеизложенных условий можно предположить, что градиент напряжения LV кабеля не выше (даже для удаленной земли, т. е. вне зоны EPR), чем остаточное напряжение устройств MV SPD, защищающих развязывающие трансформаторы. Однако следует сохранять высокий уровень изоляции по всей длине соединительного кабеля.

Наконец, следует отметить, что изложенные выше пояснения носят качественный характер, не касаясь воздействия двух таких факторов, как повышение потенциала у заземления точки разветвления и воздействие соединительного участка линии подачи питания. Точные конструктивные значения для фактических условий могут быть получены по результатам количественного анализа, например, путем моделирования в рамках Программы расчетов электромагнитных переходных процессов (ЕМТР).

П.3 Выбор расчетных значений для защиты

Расчетные значения, характеризующие элементы защиты, могут выбираться следующим образом и логическим порядком.

П.3.1 Уровень напряжения развязывающего трансформатора

- a) Уровень напряжения изоляции на частоте 50 Гц первичной обмотки развязывающего трансформатора должен быть выше, чем максимальное среднеквадратичное значение повышения потенциала опоры вследствие замыкания на землю. По своей сути он определяется величиной тока замыкания на землю, средним значением сопротивлений заземления нескольких опор, экранированных проводов и противовеса. В отношении выбора нужного уровня изоляции см. указания в Добавлении I.
- b) Однако в отношении наиболее часто встречающихся на практике случаев подходят следующие уровни напряжения изоляции на промышленной частоте между обмотками и между первичной обмоткой и заземленными частями:
 - 10 кВ (среднеквадратичное значение – rms) для наиболее часто встречающихся на практике случаев тока замыкания на землю до 20 кА;
 - 20 кВ (среднеквадратичное значение) в случае, когда средняя величина сопротивлений заземления велика и относится к неблагоприятным значениям тока замыкания на землю, т. е. до 40 кА.
- c) Кроме того, электрическая прочность диэлектрика первичной обмотки в отношении импульсного напряжения должна быть выше, чем остаточное напряжение применяемых устройств MV SPD (MOV или аналогичных устройств). Информативные значения применительно к вышеупомянутым уровням изоляции даются в таблице П.1 для характеристик типового устройства MV SPD.

П.3.2 Характеристики MV SPD (MOV или аналогичных устройств)

- a) Номинальное напряжение (U_r) устройства MV SPD равно или превышает максимальное среднеквадратичное значение EPR конкретной опоры при замыкании на землю.

Таблица П.1/К.57 – Характеристики MV SPD (MOV или аналогичных устройств), соответствующие двум типичным уровням напряжения развязывающего трансформатора

Уровень изоляции трансформатора [кВ rms]	Характеристики разрядника MV SPD (MOV)			
	Номинальное напряжение, U_r [кВ rms]	Непрерывное рабочее напряжение, U_c [кВ rms]	Остаточное напряжение с волной 8/20 мкс	
			при 10 кА [кВ пиковое]	при 20 кА [кВ пиковое]
10	10	8	28	32
20	20	16	56	64

- b) Номинальный разрядный ток должен соответствовать самому наибольшему значению тока молнии, отводимому разрядником.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Номинальный разрядный ток представляет собой пиковое значение импульса тока молнии, имеющего форму 8/20 биэкспоненциальной импульсной волны, используемой для классификации разрядников для защиты от перенапряжения. Энергопоглощающая способность, выражаемая в кДж/кВ_{U_c}, также используется для описания характеристик разрядной способности защитного устройства.

Отводимый ток является частью тока молнии. Его значение (в процентах) приближенно равно сопротивлению (в омах) заземления опоры, на которой установлена RBS (см. пункт П.2.2.1 b)).

Варистор MOV с номинальным разрядным током 20 кА может обеспечить защиту при токе молнии с пиковым значением не менее 100 кА, когда сопротивление заземления менее 20 Ом. В случае более низкого сопротивления заземления надлежащая защита может обеспечиваться MOV с номинальным разрядным током менее 20 кА.

II.3.3 Характеристики устройств LV SPD

Номинальный разрядный ток устройств LV SPD равен или превышает такой же ток устройств MV SPD для LV SPD, подключенных между каждым фазовым проводом и землей в точке разветвления согласно пункту II.3.2 b).

ПРИМЕЧАНИЕ. – С учетом пункта II.3.2 b) применяемое устройство LV SPD имеет по меньшей мере номинальный разрядный ток 20 кА.

В других случаях выбор и применение устройств LV SPD должны соответствовать требованиям, изложенным в серии стандартов МЭК в документе МЭК 61643, в частности МЭК 61643-1, [II.1] и МЭК 61643-12, [II.2].

II.3.4 Соединительный кабель

II.3.4.1 Напряжение, выдерживаемое изоляцией

Напряжение, выдерживаемое изоляцией соединительного кабеля относительно земли, должно превышать номинальное напряжение и остаточное напряжение применяемого устройства MV SPD (MOV) для промышленной частоты и импульсного напряжения (см. информативные величины в таблице II.2).

Такие значения выдерживаемого напряжения должны обеспечиваться между металлическими структурами и землей, где применяются устройства MV SPD, т. е. между фазовыми проводами и землей для варианта 1 и между экраном и землей для вариантов 2 и 3.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Требуемые значения выдерживаемых напряжений между изолированным оборудованием и заземленными частями шкафа подачи питания могут обеспечиваться за счет достаточных величин воздушного промежутка. Минимальными величинами воздушного промежутка для максимальных значений напряжения аппаратуры и соответствующими им уровнями изоляции согласно МЭК 71 являются следующие:

Таблица II.2/К.57 – Информативные величины для требуемых выдерживаемых напряжений и воздушных промежутков

Максимальное напряжение для аппаратуры [кВ rms]	Номинальное выдерживаемое напряжение грозового импульса [кВ пиковое]	Минимальный воздушный промежуток (внутри помещения) [мм]
12	75	90
24	125	160

II.3.4.2 Длина соединительного кабеля

Минимальная длина соединительного кабеля является большей, чем размер зоны EPR и полосы отчуждения (расстояние падения), где это применимо, HV линии электропередачи (не менее 30 м; более подробно об этом см. Добавление III).

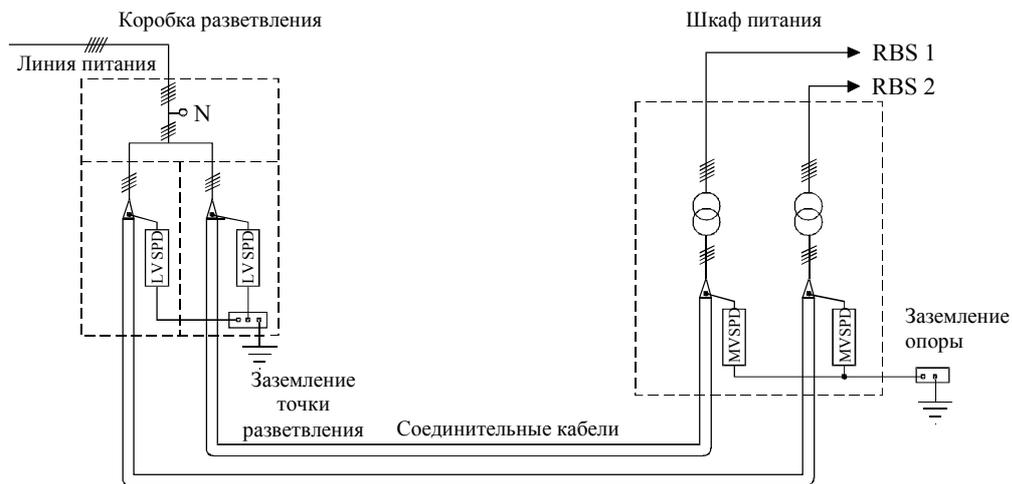
С другой стороны, следует, по возможности, избегать излишнего удлинения соединительного кабеля, чтобы снизить затраты на эту секцию, имеющую повышенный уровень изоляции, и предотвратить возникновение перенапряжений, связанных с явлением бегущей волны (см. пункт II.2.2.2, а также Добавление III).

II.4 Варианты подачи питания на несколько станций RBS

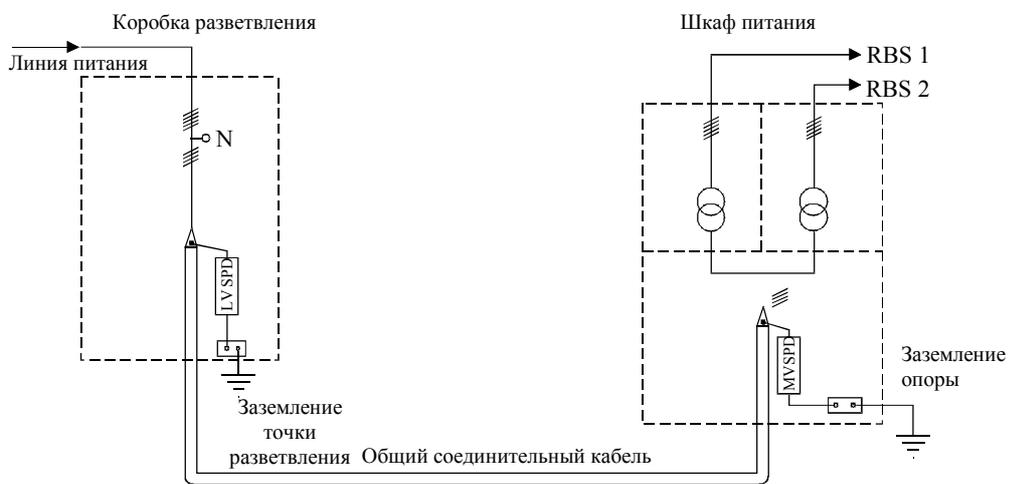
В некоторых случаях на одной и той же опоре линии электропередачи могут устанавливаться несколько RBS, которые, например, эксплуатируются разными поставщиками услуг. Возможные варианты подачи питания при такой эксплуатации нескольких RBS показаны на рисунке II.1 с предполагаемыми двумя RBS. Все большее число элементов системы питания становятся элементами общего пользования при следовании от варианта а) до варианта с), что в результате приводит к меньшим затратам на установку, но, с другой стороны, к меньшей гибкости в эксплуатации и техническом обслуживании.

Различные схемы подачи питания (см. рисунок П.1) могут характеризоваться следующими основными свойствами:

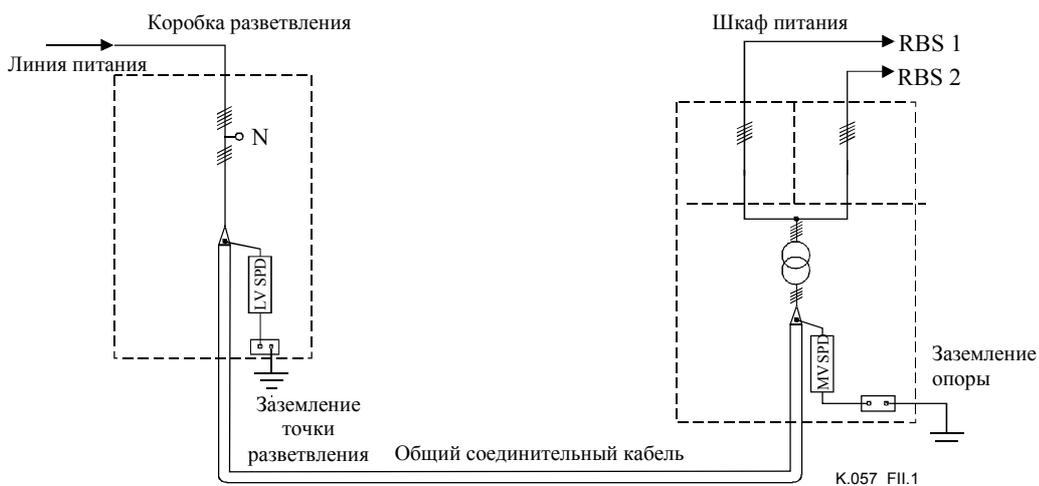
- a) Каждый элемент схемы отделяется, т. е. дублируется от точки разветвления до шкафа подачи питания. В точке разветвления или в отдельном отсеке шкафа подачи питания может устанавливаться отдельный счетчик потребляемой энергии (в кВт/ч). Следует упомянуть, что устройства LV SPD могут быть, в принципе, объединены и заменяться единым набором, подключаемым к общему ответвлению (линии подачи питания).
- b) Соединительный кабель, устройства MV SPD и LV SPD в шкафу подачи питания и в точке разветвления, соответственно, являются общими для двух RBS. Отдельные счетчики потребляемой энергии для каждой RBS могут устанавливаться только в отдельных отсеках шкафа подачи питания.
- c) Соединительный кабель, устройства SPD и развязывающий трансформатор используются совместно. Питание разделяется только на вторичной стороне развязывающего трансформатора. Потребление энергии каждой RBS может измеряться вспомогательными счетчиками, устанавливаемыми в отдельных отсеках на кабелях питания на вторичной стороне. Общий счетчик потребляемой энергии – включая потери на развязывающем трансформаторе – может устанавливаться либо в отсеке шкафа подачи питания на первичной стороне, либо в точке разветвления.



а) Раздельное питание



б) Общий соединительный кабель и SPD (как MV, так и LV типа)



в) Общий соединительный кабель, SPD и развязывающий трансформатор

Рисунок П.1/К.57 – Варианты подачи питания к нескольким RBS, установленным на одной и той же опоре

Добавление III

Определение характеристик и регулирование зоны EPR заземления опоры и расчет минимальной длины соединительного участка

III.1 Определение характеристик зоны EPR заземления опоры

III.1.1 EPR для реальных оснований опоры

В данном пункте дается описание характеристик зоны повышения потенциала Земли (Z-EPR), происходящего вокруг основания опоры как следствие тока, инжектируемого в землю через систему электродов заземления опоры высоковольтной ЛЭП. В нем также представлен ряд цифр, полученных, с одной стороны, по результатам полевых измерений, а, с другой стороны, по исследованиям моделируемых явлений.

Профили кривых зависимости Z-EPR от расстояния в процентах, нормированные к потенциалу заземления (V_e), представлены на рисунке III.1. Эти профили были получены по результатам измерений, проводившихся в полевых условиях вокруг основания опоры 220-кВ линии электропередачи, измерения которой приведены в части б) рисунка III.1. В части а) данного рисунка показаны измеренные профили Z-EPR в зависимости от расстояния на поверхности земли в отдельных четырех направлениях [III.1].

Часть б) рисунка III.1 показывает нормированные профили потенциала в двойном логарифмическом масштабе, что обеспечивает лучшую картину сравнения профилей различных направлений, показанных на рисунке для более дальних расстояний.

На рисунке III.2 приведены 3-мерные графики Z-EPR в двух различных масштабах. Они были получены при моделировании [III.2] системы заземления 220-кВ линии, структура которой приведена на рисунке III.3.

Профили Z-EPR, нормированные к потенциалу опоры на глубине 0,5 м, перпендикулярно трассе прохождения линии, через центральную точку между устоями опоры, нанесены для двух различных значений удельного сопротивления земли на рисунке III.4. Здесь приведен случай, когда кольцевой провод не установлен.

На основе представленной информации можно сделать следующие главные практические выводы:

- В непосредственной близости от основания опоры изменение EPR происходит достаточно быстро. Вследствие этого существенное значение имеет соединение в целях выравнивания потенциала различных шкафов, например подачи питания и оборудования RBS.
- Удельное сопротивление земли влияет на величину потенциала заземления (T-EPR и Z-EPR), но не влияет на величину и профиль нормированного Z-EPR (см. рисунок III.4).
- Различия в профилях Z-EPR для различных направлений имеют значение только в непосредственной близости от основания опоры. На большем удалении от основания опоры профили Z-EPR для разных направлений практически идентичны и уменьшаются с расстоянием x в соответствии со схемой $1/x$ (гиперболической). Последнее делает возможным для практических целей эквивалентное полусферическое отображение заземления опоры.

III.1.2 Отображение Z-EPR с помощью концепции эквивалентной полусферы

Из технической литературы [III.3] хорошо известно, что Z-EPR может быть описано при помощи весьма простых выражений, когда полусфера или эквивалентная полусфера заменяет фактический электрод.

Эти простые формулы также предполагают наличие однородной почвы по крайней мере в поверхностном слое.

Z-EPR полусферического электрода на расстоянии x выражается формулой:

$$V_x = \frac{\rho}{2\pi x} I, \quad (\text{III-1})$$

где

ρ – удельное сопротивление почвы; и

I – ток, проходящий через электрод заземления

Потенциал V_e заземления опоры становится равным:

$$V_e = R \cdot I, \quad (\text{III-2})$$

где R – сопротивление заземления опоры ЛЭП.

Составив соотношение V_x/V_e , получаем следующее выражение:

$$\frac{V_x}{V_e} = \frac{\rho}{2\pi R x}. \quad (\text{III-3})$$

И, наконец, минимальное расстояние x_{\min} от центра электрода, где потенциал земли V_e равен оговоренной величине, может быть получено по формуле:

$$x_{\min} = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho V_e}{R V_x}, \quad (\text{III-4})$$

в которой, как предполагается, известны следующие значения:

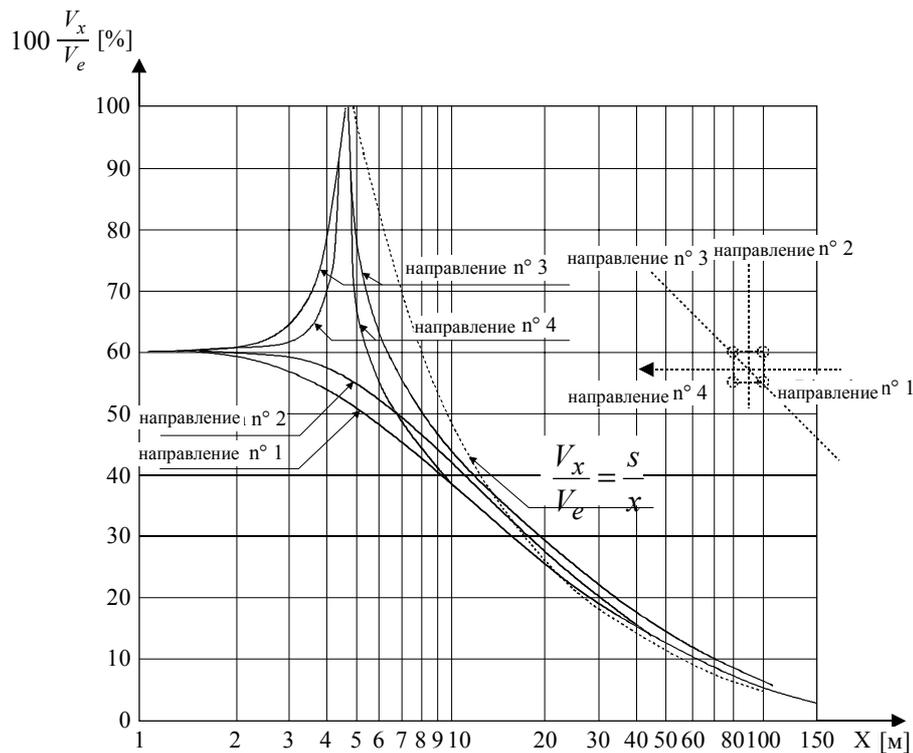
ρ – удельное сопротивление поверхностного слоя почвы в месте расположения опоры с установленной на ней RBS

R – сопротивление заземления опоры с размещенной на ней RBS (значение рассматривается в Добавлении I)

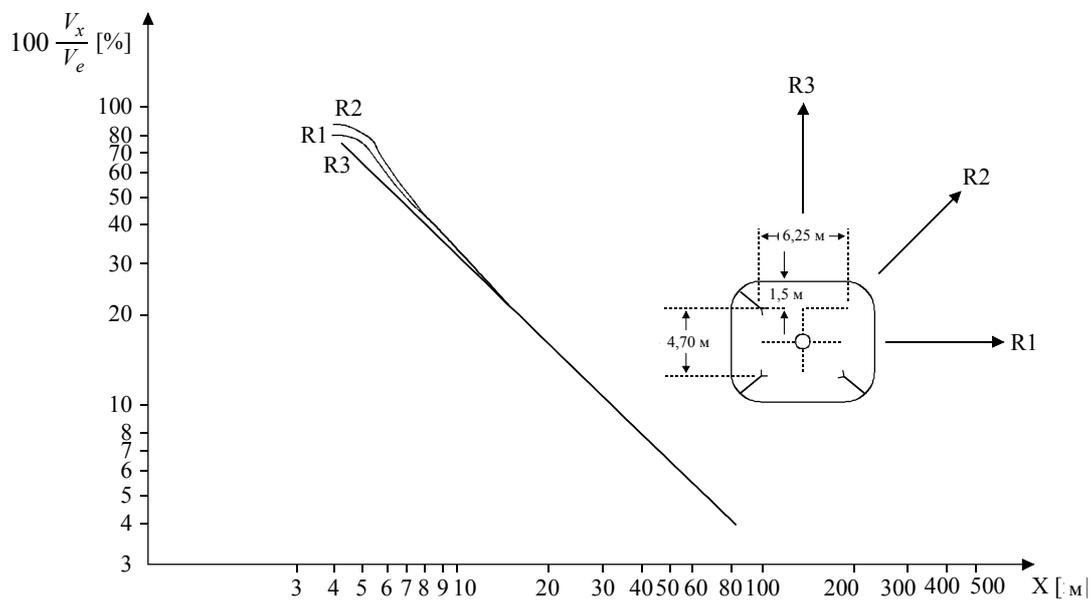
V_e – повышение потенциала опоры с размещенной на ней RBS (значение получено в соответствии с Добавлением I)

V_x – допустимый без нагрузки потенциал земли на удаленном конце соединительного участка, т. е. в точке разветвления.

В случае, когда соединительный кабель проложен вдоль прямой трассы линии, x_{\min} равно требуемой минимальной длине соединительного участка.



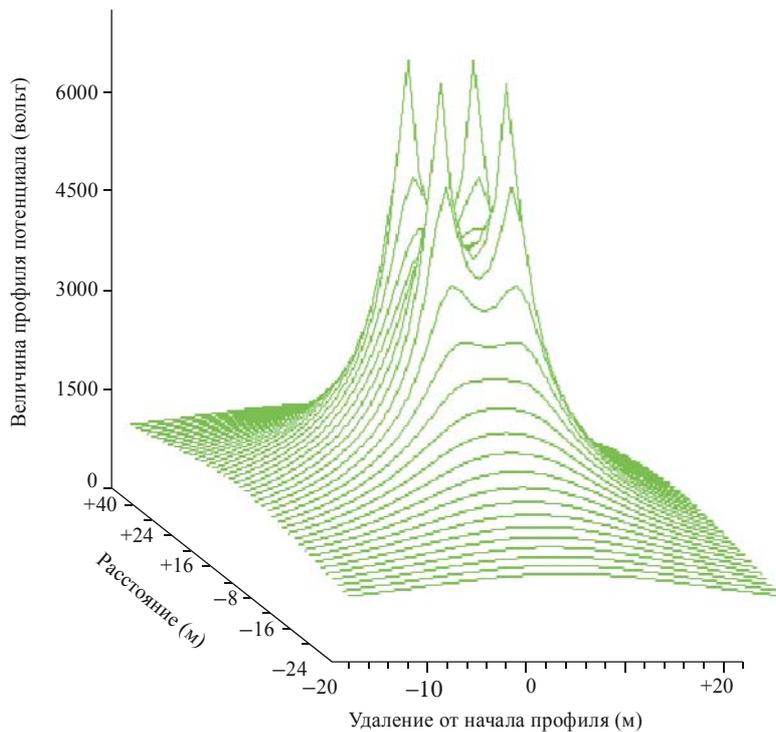
а) Профили нормированного потенциала вблизи основания опоры в различных направлениях, указанных на рисунке (s – радиус эквивалентной полусферы, представляющей заземление опоры)



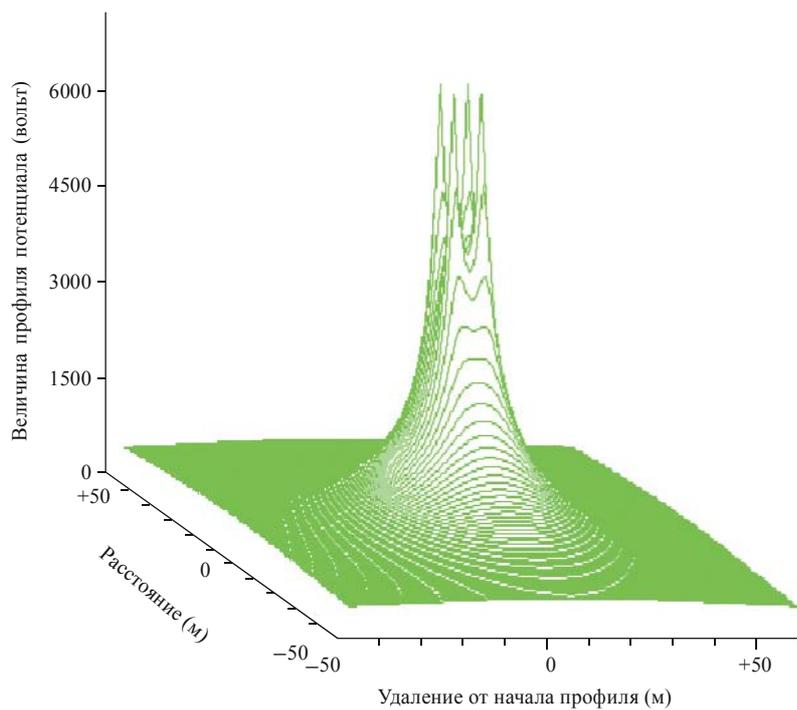
б) Профили нормированного потенциала в двойном логарифмическом масштабе применительно к большему удалению от основания опоры в разных направлениях, указанных на рисунке

K.057_FIII.1

Рисунок III.1/К.57 – Z-EPR, нормированное по потенциалу заземления (в процентах), измеренному вокруг основания 220-кВ линии электропередачи, с размерами, приведенными на рисунке III.1 б)



а) Показанная площадь: 40 40м



K.057_FIII.2

б) Показанная площадь: 100 100 м

Рисунок III.2/К.57 – Трехмерные графики Z-EPR на глубине 0,5 м, $\rho = 1500$ Ом·м, ток замыкания на землю 10 кА, число проводов заземления: 1, структура заземления согласно рисунку III.3

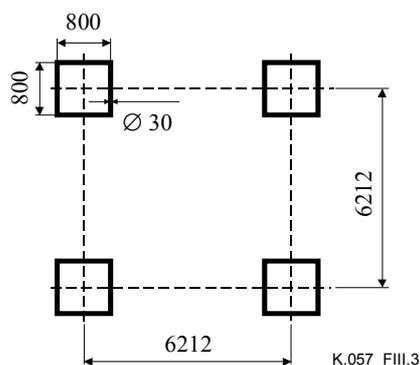


Рисунок III.3/К.57 – Схема и размеры (в мм) электродов заземления 220-кВ линии электропередачи, рассматриваемой при моделировании EPR – глубина заложения электродов: 1,7 м

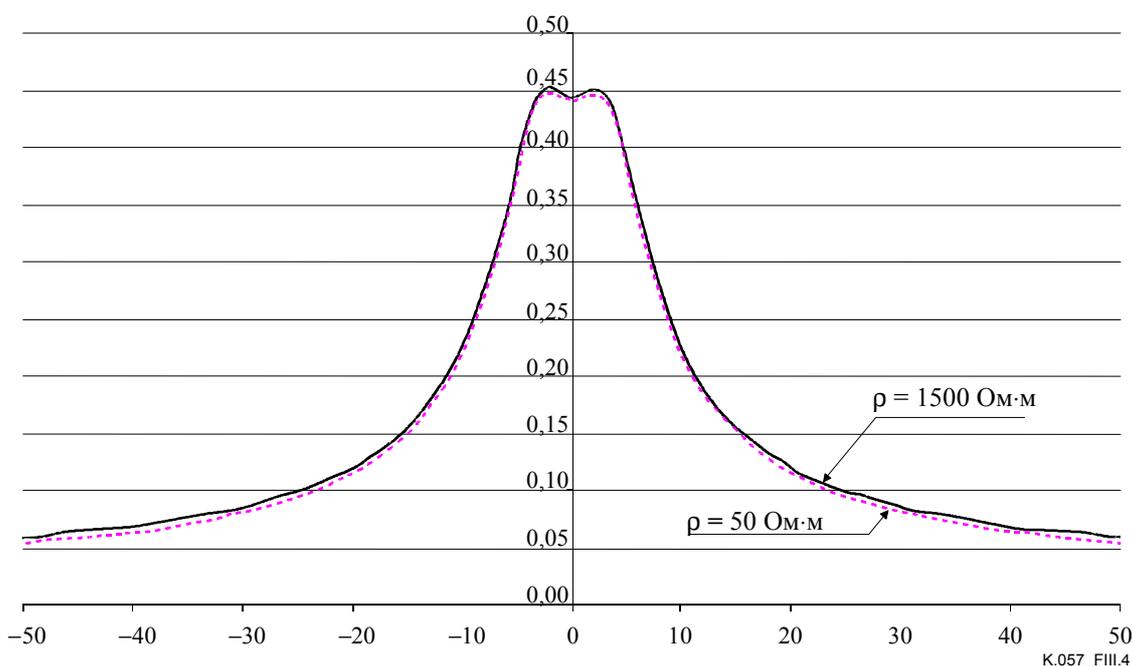


Рисунок III.4/К.57 – Профили Z-EPR, нормированного по потенциалу опоры на глубине 0,5 м, перпендикулярно к трассе линии через центральную точку между стойками опоры

III.2 Регулирование напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения с помощью потенциала PGE

При исследовании Z-EPR выявилась существенная разность потенциалов между стойками опоры, а также рядом с опорой (см. рисунки III.1, III.2 и III.4). Эта разность вызывает появление напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения, способных подвергать опасности персонал, работающий в непосредственной близости от шкафа RBS. Возможности регулирования напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения посредством PGE рассматриваются ниже.

III.2.1 Эффективность PGE

а) Применяемый метод и основные параметры моделирования

Вычисления процесса моделирования осуществлялись с использованием комплекта программного обеспечения CDEGS (см. ссылку [III.2]). Этот метод позволяет учитывать фактическую схему расположения электродов заземления и удельное сопротивление и структуру почвы (даже слоистой земли).

В ходе вычислений учитывались следующие общие условия:

- однородность земли (удельное сопротивление $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);
- частота: 50 Гц (инжекция тока: 1000 А в опору, включая стойки).

Стоит упомянуть о том, что в оценках учитываются только нормированные значения, на которые не влияет ни удельное сопротивление земли, ни величина инжектированного тока.

b) *Моделирование схемы заземления опоры и расположения электродов заземления для выравнивания потенциала*

Схема расположения электродов заземления опоры обозначена в таблице III.1 под кодовым номером 9. Размеры воспроизводятся на рисунке III.7. В действительности, система заземления опоры состоит из четырех электродов квадратной формы, расположенных в нижней части фундамента опоры и связанных между собой через корпус опоры (см. рисунок III.14). Структура и размеры заземления опоры характеризуются следующими параметрами:

- материал электрода: сталь круглого сечения диаметром 30 мм;
- глубина: 2,0 м;
- боковой размер электрода квадратной формы каждой стойки: $1,7 \times 1,7 \text{ м}$;
- расстояние между осевыми линиями электродов стоек опоры: $6,5 \times 6,5 \text{ м}$.

Схема расположения электродов и рамки выравнивающих электродов заземления показаны для шкафа рядом с опорой на рисунке III.5 и шкафа между стойками опоры на рисунке III.6.

Структура и схема моделируемых систем рамочных электродов заземления, выравнивающих напряжение, определяются следующими данными:

- материал электрода: сталь круглого сечения диаметром 20 мм;
- глубина: 0,3 м;
- расположение:
 - рядом с опорой (см. рисунок III.5);
 - по центру между стойками опоры (см. рисунок III.6);
- размеры PGE (см. рисунок III.7):
 - внешняя рамка $3,6 \times 3,6 \text{ м}$;
 - внутренняя рамка $2,4 \times 2,4 \text{ м}$.

Размеры рамок PGE одинаковы как для шкафа рядом с опорой, так и для шкафа между стойками опоры. Если предполагается только одна рамка, то это внешняя рамка.

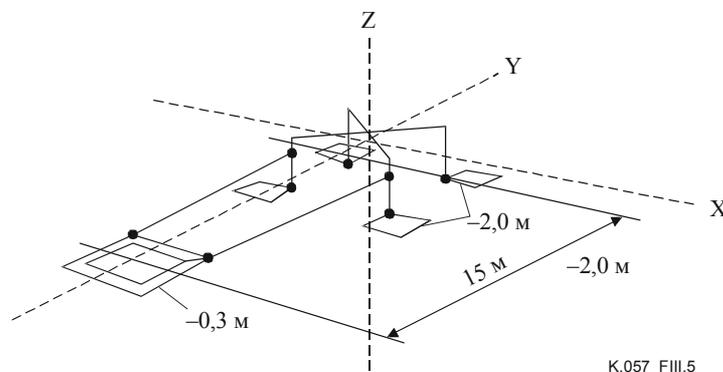


Рисунок III.5/К.57 – Схема расположения электродов заземления опоры и двойных рамочных электродов заземления, выравнивающих потенциал. Расположение шкафа: рядом с опорой

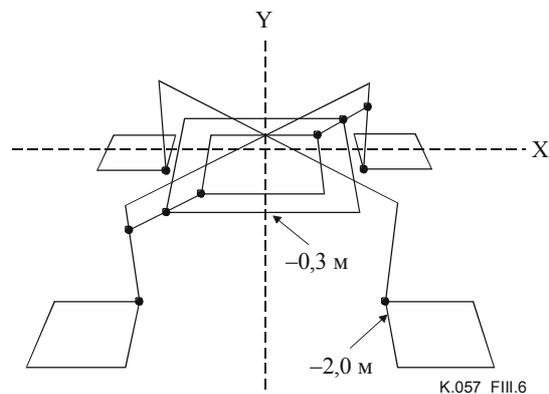


Рисунок III.6/К.57 – Схема расположения электродов заземления опоры и двойных рамочных электродов заземления, выравнивающих потенциал. Расположение шкафа: между стойками опоры

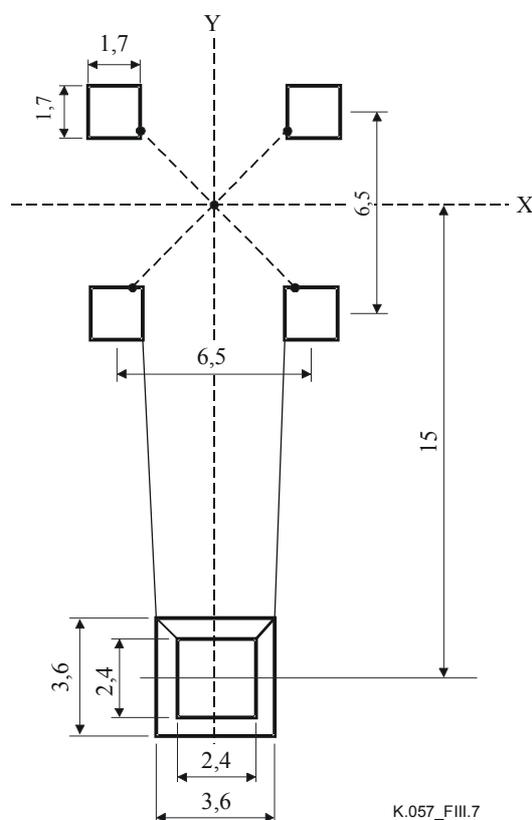


Рисунок III.7/К.57 – Размеры в метрах электрода заземления опоры и двойного рамочного электрода PGE, в м

с) *Профили потенциала земной поверхности и напряжения прикосновения*

Код CDEGS предоставляет полное решение EMF обеспечения системы электродов, например, потенциал, распределение тока, электрическое и магнитное поле в любом месте окружающей зоны. Такой результат может быть далее обработан, что даст в результате значения напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения и т. д.

Общая картина представлена на трехмерном графике потенциала на данном уровне земли, наподобие того, как показано на рисунке III.2.

Что касается количественного анализа результатов, профили потенциала земной поверхности до удаленного заземления и напряжения прикосновения между заземлением шкафа (связанного с заземлением опоры) и земной поверхностью вблизи шкафа даны как функция длины в трех характерных направлениях применительно к следующим двум местам расположения шкафа:

- рядом с опорой (см. рисунки III.8, III.9 и III.10);
- между стойками опоры (см. рисунки III.11, III.12 и III.13).

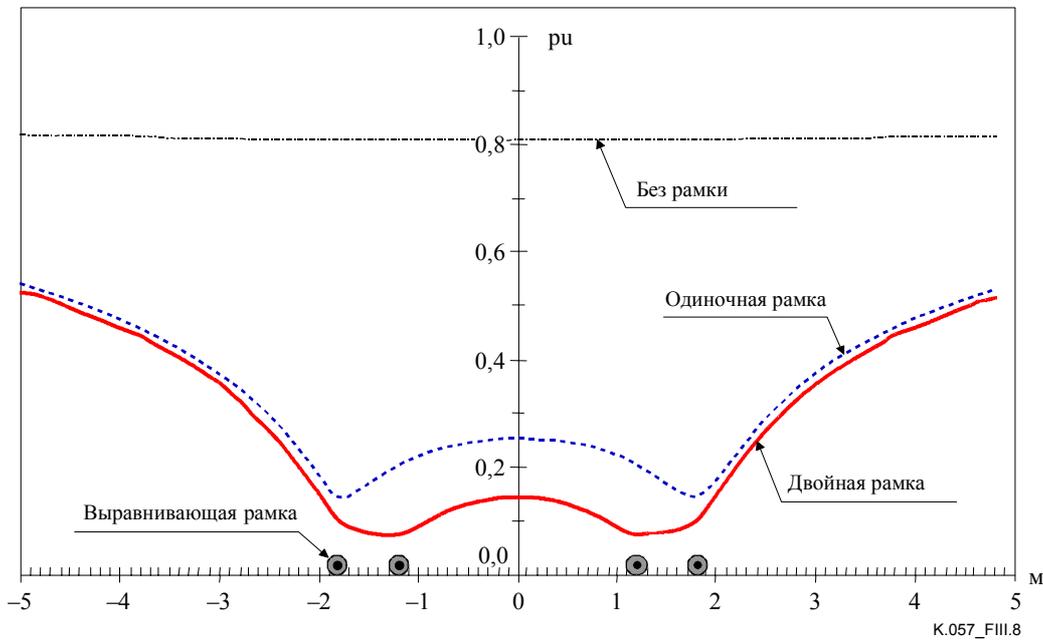


Рисунок III.8/К.57 – Профиль напряжения прикосновения (r_u , база: Т-ЕPR) для шкафа, расположенного рядом с опорой. Профиль: направление X, по осевой линии рамки выравнивающего электрода

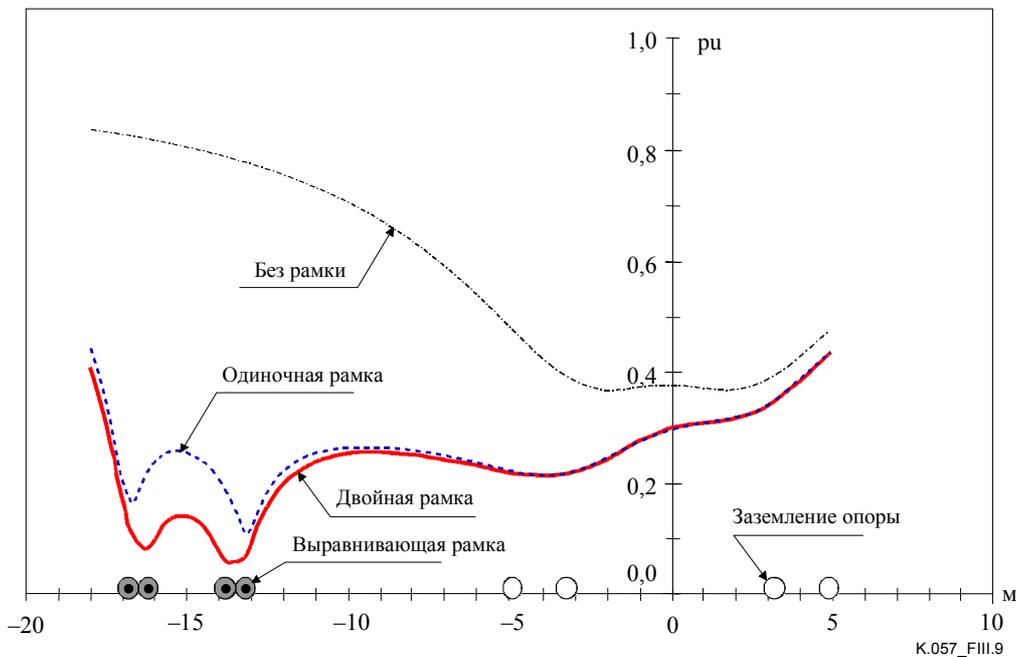


Рисунок III.9/К.57 – Профиль напряжения прикосновения (r_u , база: Т-ЕPR) для шкафа, расположенного рядом с опорой. Профиль: направление Y, по осевой линии выравнивающей рамки и электродов заземления опоры

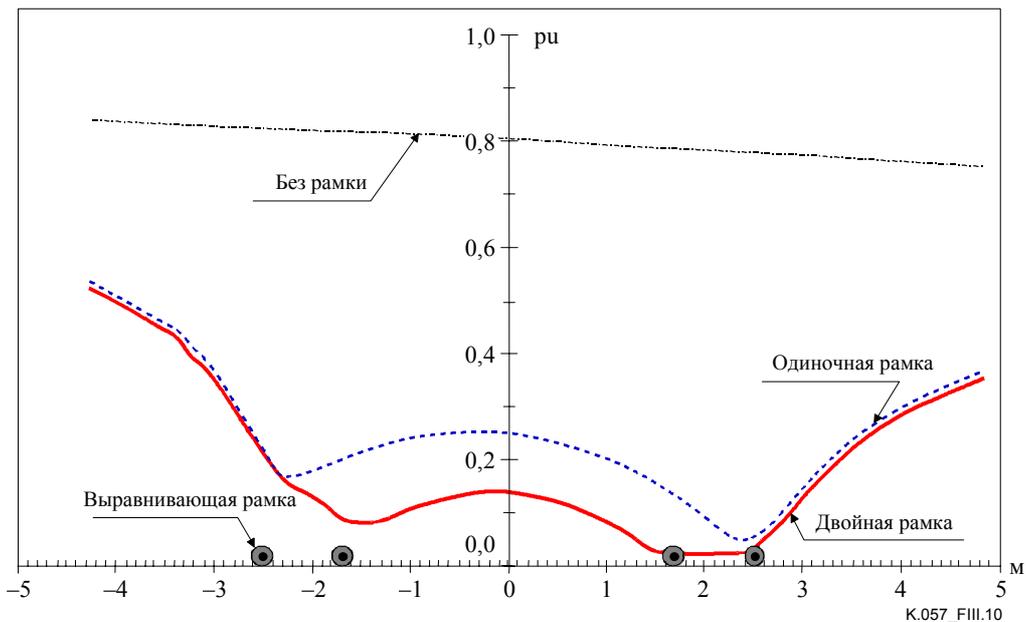


Рисунок III.10/К.57 – Профиль напряжения прикосновения (u_i , база: T-EPR) для шкафа, расположенного рядом с опорой. Профиль: направление под углом 45° через центральную точку рамки PGE

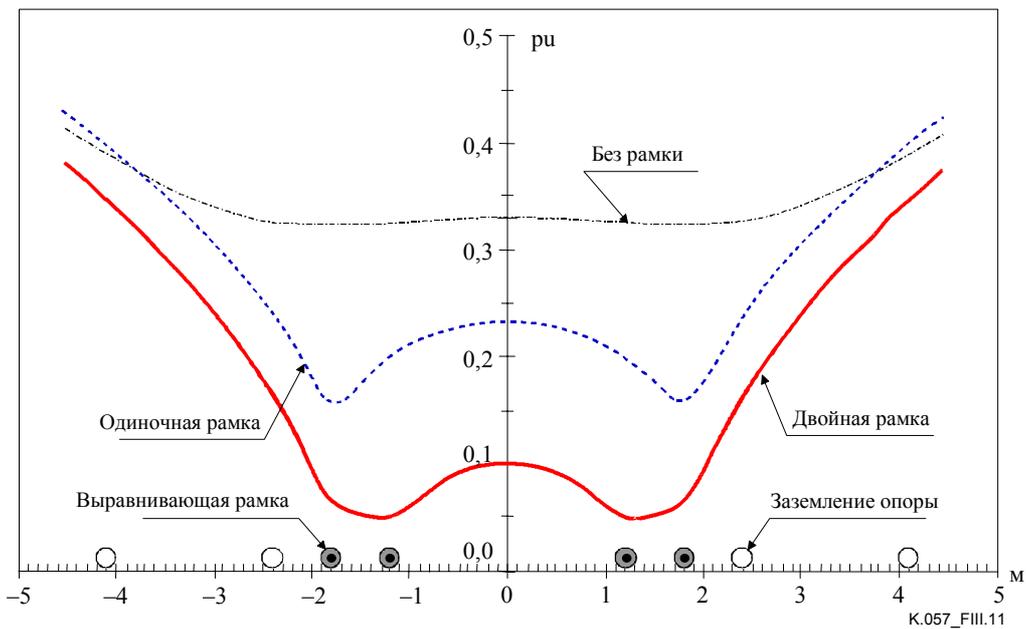


Рисунок III.11/К.57 – Профиль напряжения прикосновения (u_i , база: T-EPR) для шкафа, расположенного между стойками опоры. Профиль: направление X по осевой линии рамки PGE

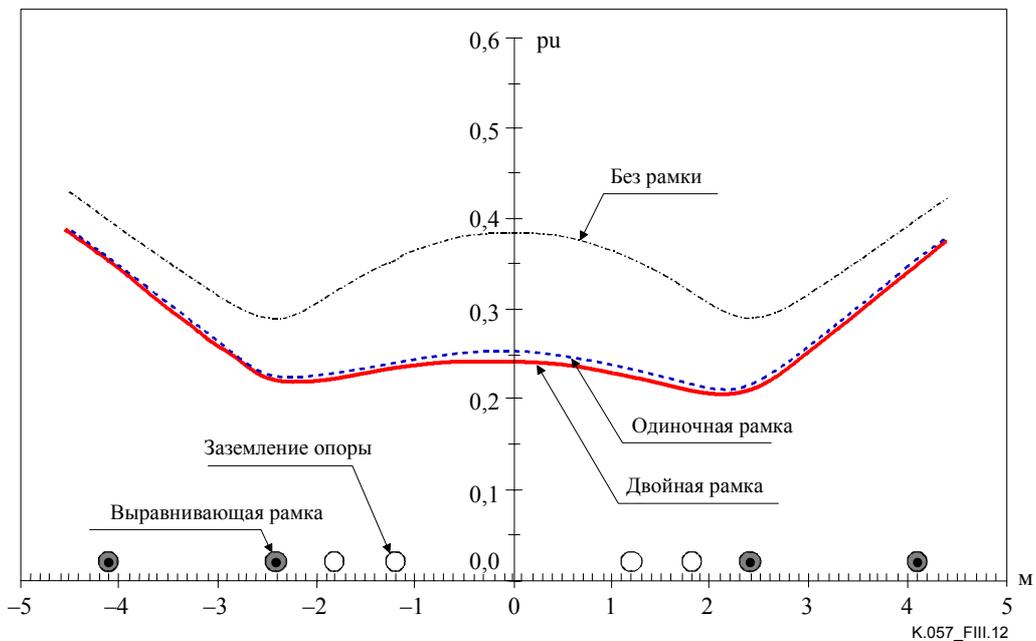


Рисунок III.12/К.57 – Профиль напряжения прикосновения (u_i , база: T-EPR) для шкафа, расположенного между стойками опоры. Профиль: направление X по осевой линии электродов заземления опоры

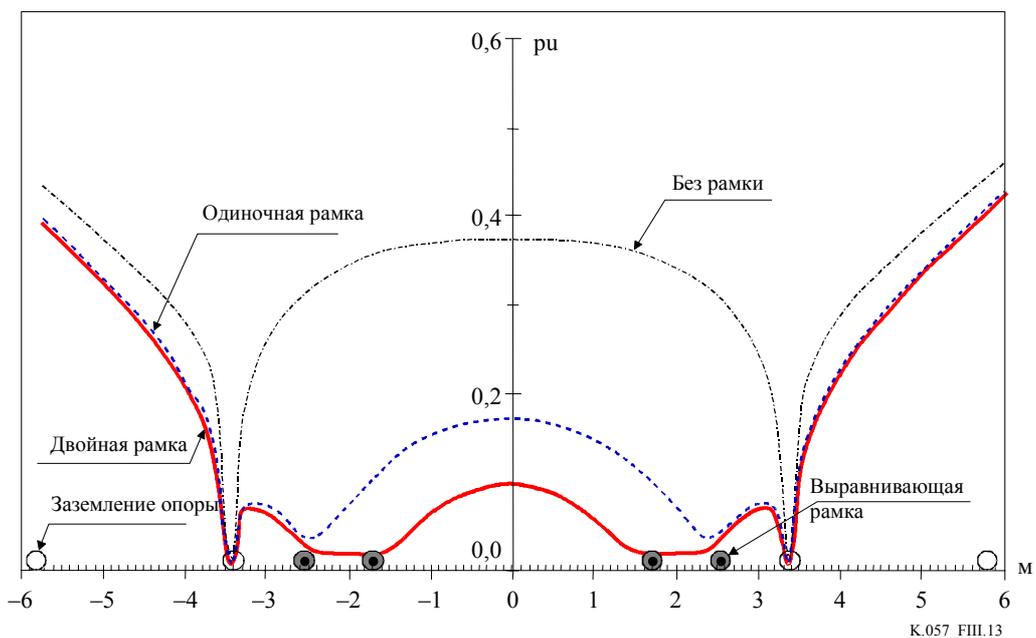


Рисунок III.13/К.57 – Профиль напряжения прикосновения (u_i , база: T-EPR) для шкафа, расположенного между стойками опоры. Профиль: направление под углом 45° через центральную точку рамки выравнивающего электрода

Чтобы можно было судить об эффективности рамки PGE, профили даны для следующих изучавшихся вариантов:

- без рамки PGE (сплошной профиль коричневого цвета);
- одиночная рамка PGE (пунктирный профиль синего цвета);
- двойные рамки PGE (сплошной профиль красного цвета).

Применительно к базовым условиям, указанным в пункте III.2.1 а), потенциалы электродов следующие:

Расположение шкафа	Потенциалы электродов (В)		
	Применяемая рамка PGE		
	Без рамки	Одиночная рамка	Двойная рамка
Между стойками	2746	2554	2530
Рядом с опорой	2746	1870	1844

Стоит упомянуть о том, что при делении вышеприведенных значений напряжения на 1000 А получаем сопротивление заземления системы электродов.

С учетом того что профили даны как нормированные значения, на результат не влияют ни значение ρ , ни величина инжектированного тока.

Вертикальный масштаб графиков выражается в значениях на единицу (ρu). База – повышение потенциала электрода (Т-EPR).

Небольшие заполненные или пустые кружочки над шкалой длины указывают положение рамки PGE или ячеистой рамки заземления опоры вдоль направляющей линии профиля. Они помогают при качественном анализе эффективности применяемых выравнивающих электродов.

Значение ρu можно легко пересчитать в напряжение, соответствующее реальным условиям на линии, исходя из информации, содержащейся в Добавлении I, в частности, в таблице I.1.

Например, пусть напряжение прикосновения $u_t = 0,15 \rho u$. (Соответствует рисунку III.8, т. е. шкаф расположен рядом с опорой, используется одиночная рамка PGE, сторона шкафа находится прямо над рамкой PGE.)

Опора, на которой размещена станция RBS, должна принадлежать линии, характеризуемой следующими параметрами:

- 1) среднее сопротивление заземления опоры 25 Ом;
- 2) наличие двух экранированных проводов;
- 3) средний разнос между опорами около 330 м (поправочный коэффициент разноса может не учитываться);
- 4) ток замыкания фазы на землю $I_{ef} = 15$ кА.

С учетом условий 1) и 2) повышение потенциала заземления опоры из таблицы I.1 составляет: $U_b = 5589$ В/10 кА.

Значение напряжения прикосновения с учетом также условия 4) получается следующим образом:

$$U_t = u_t \times U_b \frac{I_{ef}}{10} = 0,15 \times 5589 \frac{15}{10} = 0,15 \times 8384 = 1258 \text{ В}$$

Значения напряжения прикосновения, относящиеся к трем рассмотренным вариантам рамки PGE, следующие:

Напряжение прикосновения	Применяемая рамка PGE		
	Без рамки	Одиночная	Двойная
ρu	0,805	0,15	0,08
Для реальных условий (В)	6751	1258	671

d) Анализ результатов

Представленные профили ясно демонстрируют эффективность рамок PGE для снижения напряжения прикосновения и ступенчатого напряжения. Воздействие PGE показано сбоку шкафа в профилях направления X, проходящих через осевую линию рамки PGE (см. рисунки III.8 и III.11), тогда как оно показано в угловой части шкафа на профилях под углом 45° (см. рисунки III.10 и III.13). Профиль

направления Y в отношении схемы, в которой шкаф расположен рядом с опорой (см. рисунок III.9), дает значения как для окружающего участка шкафа, так и для участка вокруг стоек опоры.

1) *Эффект снижения напряжения прикосновения при выравнивании*

Снижающее воздействие выравнивающих рамок можно охарактеризовать следующими значениями напряжения прикосновения:

Применяемое выравнивание	Диапазон напряжения прикосновения	Замечания
Без рамки	От 0,33 до 0,4 до 0,8 ^(*)	^(*) Для шкафа, расположенного рядом с опорой
Одиночная рамка	От 0,15 до 0,20	Над выравнивающей рамкой
Двойная рамка	От 0,05 до 0,10	В зоне над рамками

Снижающее воздействие выравнивающих рамок в отношении напряжения прикосновения можно подытожить следующими выводами:

- Одиночная рамка PGE снижает напряжение прикосновения примерно наполовину относительно состояния, при котором не применяется никакой рамки PGE. Этот уровень снижения наблюдается в узкой зоне прямо над электродом PGE. Степень снижения может быть даже менее 0,25 при расположении шкафа рядом с опорой.
- Применение второй выравнивающей рамки обеспечивает дополнительную степень снижения – от 0,33 до 0,50. Такой уровень снижения оказывает влияние на более обширную зону над двойными рамками PGE.

2) *Воздействие PGE на ступенчатое напряжение*

Ступенчатое напряжение получается с помощью градиента (крутизны) профилей потенциала земли. Нижеследующие выводы могут характеризовать воздействие на ступенчатое напряжение системы электродов PGE:

- Применение выравнивающих рамок практически не влияет на ступенчатое напряжение за пределами внешней выравнивающей рамки (в качестве примера см. рисунки III.11 и III.12).
- Ступенчатое напряжение существенно снижается в зоне над двойными рамками электродов PGE.
- Ступенчатое напряжение практически одинаково для систем PGE с одиночной и двойными рамками за пределами внешней выравнивающей рамки.

III.2.2 Выводы и предложения

а) *Выводы*

Использование системы PGE эффективно снижает напряжение прикосновения на корпусе шкафа. Это чрезвычайно важно для безопасности персонала, работающего в непосредственной близости от шкафа RBS. Поэтому использование системы PGE целесообразно в любом случае и совершенно необходимо в случаях, когда шкафы располагаются рядом с опорой.

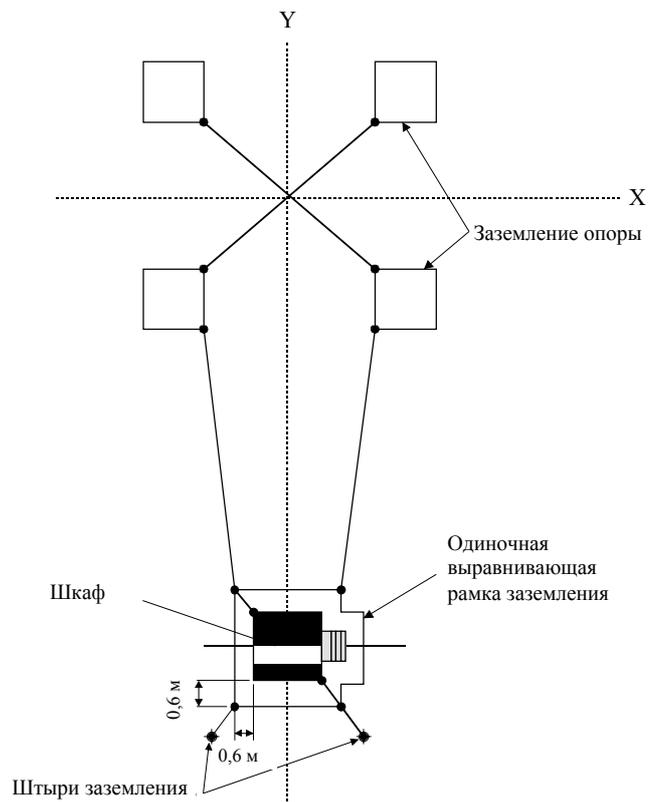
PGE снижает и ступенчатое напряжение. Однако, для случая с одиночной рамкой PGE это снижение ограничивается узкой полосой прямо над электродом PGE. Более эффективное снижение ступенчатого напряжения достигается при использовании двойных рамок PGE, особенно в зоне над двойными рамками PGE.

Система PGE не снижает ступенчатое напряжение на участке за пределами системы PGE. Стоит упомянуть о том, что снижение ступенчатого напряжения не является ключевым вопросом безопасности в наружной зоне. Подобное ступенчатое напряжение может наблюдаться в окружающей зоне любой опоры высоковольтной ЛЭП. Для снижения такого ступенчатого напряжения не предпринимается никаких действий. Согласно многолетнему опыту не отмечалось случаев поражения людей ступенчатым напряжением, которое может появиться в зоне, окружающей опоры ЛЭП.

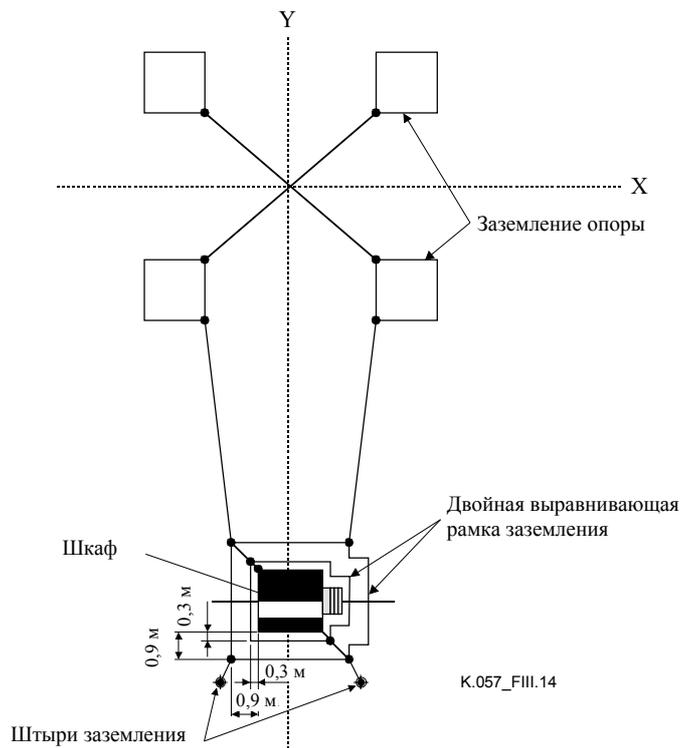
б) *Предложения по применению PGE*

Чтобы избежать появления небезопасного уровня ступенчатого напряжения и напряжения прикосновения при приближении к шкафу оборудования или проникновении в него, этот шкаф окружается рамками электродов PGE. Схемы расположения электродов показаны на рисунках III.14 и III.15, соответственно, для двух типичных месторасположений шкафа, т. е. между стойками опоры или рядом с опорой. В отношении применения системы PGE можно руководствоваться следующими указаниями:

- Глубина закладки электродов заземления должна составлять 0,3 м.
- Минимальные размеры электродного проводника должны составлять 3,5 на 30 мм оцинкованного плоского стального листа или стали цилиндрического сечения диаметром 20 мм.
- Электроды PGE должны быть связаны как с заземлением шкафа, так и со стойками опоры, по крайней мере, в двух углах по диагонали в случае расположения шкафа между стойками опоры (см. рисунок III.14).
- Если необходимо, дополнительно должны быть установлены и соединены с системой заземления два вертикальных штыря заземления.
- В случае использования одиночной рамки PGE она укладывается вокруг шкафа на расстоянии 0,6 м от края шкафа, включая металлические ступеньки, если таковые имеются.
- В случае применения заземления из двойных рамок PGE рамки располагаются на расстоянии $\pm 0,3$ м от осевой линии, предполагаемой на удалении 0,6 м от края шкафа, т. е. внутреннее и внешнее заземления рамок находятся на расстоянии 0,3 и 0,9 м от края шкафа, соответственно. Использование такого рода заземления из двойных рамок является предпочтительным для неблагоприятных условий, приводящих к значительному повышению потенциала, особенно в случаях, когда шкафы располагаются рядом с опорой.



а) Применение одиночной рамки PGE



б) Применение двойной рамки PGE

Рисунок III.14/К.57 – Схема расположения системы PGE в случае, когда шкаф размещается рядом с опорой

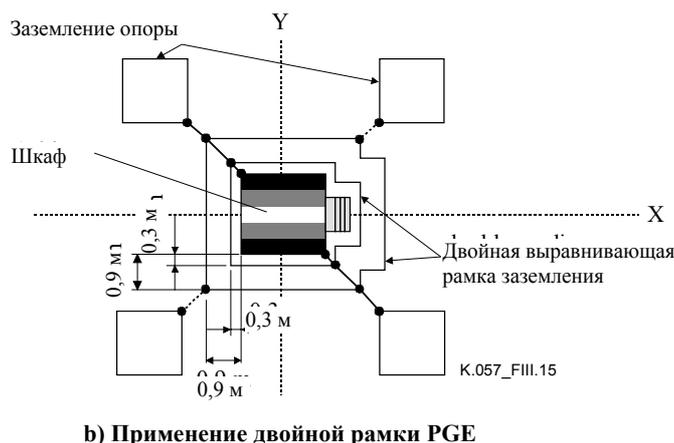
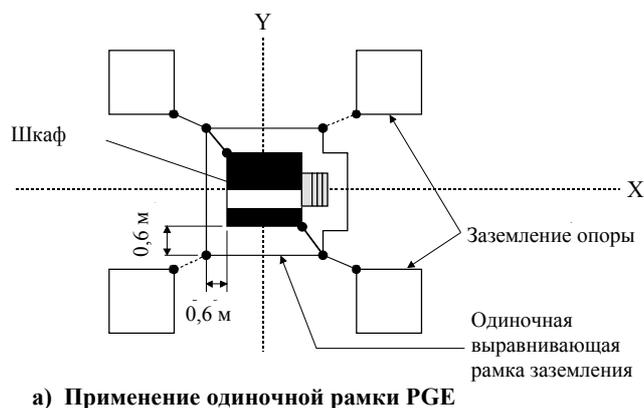


Рисунок III.15/К.57 – Схема расположения системы PGE в случае, когда шкаф размещается между стойками опоры

III.3 Расчет минимальных значений длины

Для целей ориентации расчетные значения определяются для потенциалов электродов заземления, равных уровням напряжения изоляции, рассматриваемым в Добавлении I.

Значение ρ/R необходимо для расчета минимальных значений длины по формуле III-4. Расчет основан на представлении сопротивления заземления опоры R через эквивалентную полусферу. Между эквивалентным радиусом полусферы, r_{eq} , и R применяется следующее соотношение:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_{eq}}. \quad (\text{III-5})$$

Для соотношения ρ/R путем изменения вышеуказанной формулы получается нижеследующее выражение:

$$\frac{\rho}{R} = 2\pi r_{eq}. \quad (\text{III-6})$$

Из формулы III-6 ясно видно, что значение ρ/R связано с r_{eq} посредством множителя 2π .

Соотношения ρ/R в практических целях определяются следующим образом. Система заземления основания опоры в целом моделируется по коду CDEGS [III.2] для серии реальных схем расположения (фактически для 21 различного случая). При вычислениях ток 1000 А (произвольная величина) инжектируется в систему электродов. Код CDEGS решает проблему электромагнитного поля в связи с вводимой системой электродов, закладываемой в однородную землю с данным удельным сопротивлением почвы, ρ . (Код CDEGS позволяет также выполнять расчеты для слоистой структуры земли.) Выбранное произвольно значение ρ при вычислениях с помощью моделирования составляет 50 Ом·м. Одним из результатов вычисления является повышение потенциала электрода по отношению к удаленной земле. Сопротивление заземления, R , системы заземления опоры получается, по

определению, как отношение рассчитанного повышения потенциала к инжектированному току, учитываемому при расчетах, т. е. 1000 А. Используя вычисленное значение R и принятое для вычислений значение ρ , вычисляется отношение ρ/R для каждой моделируемой структуры электродов заземления. Следует отметить, что отношение ρ/R не зависит ни от значения ρ , ни от значения инжектированного тока, учитываемого при расчетах с помощью моделирования.

Структура и геометрические размеры электрода заземления каждой стойки опоры показаны на рисунке III.16.

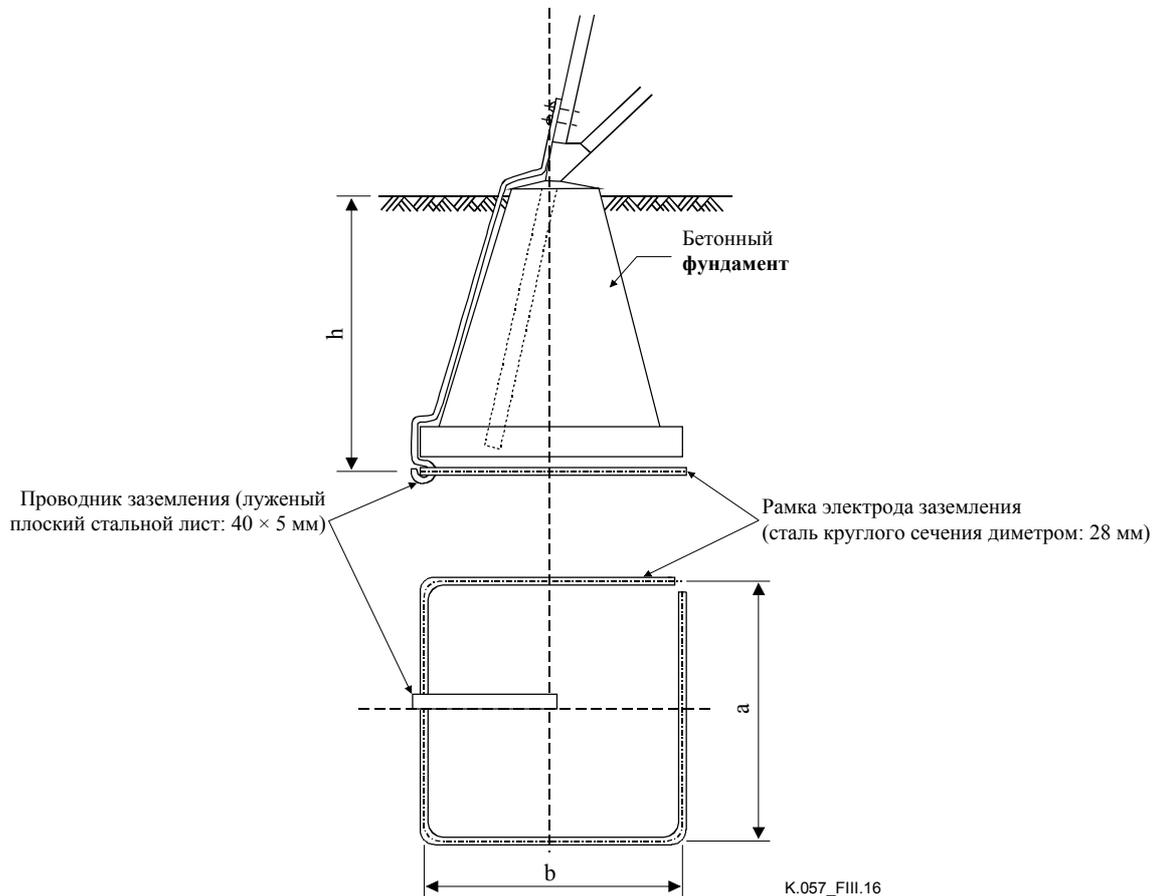


Рисунок III.16/К.57 – Структура и геометрические размеры электрода заземления стойки опоры

Фундамент опоры состоит либо из четырех стоек (что типично для фундамента свободно стоящей опоры), либо двух стоек (что типично для Н-образной промежуточной опоры). В соответствии с этими вариантами выполнялись расчеты для схем размещения электродов заземления, состоящих из четырех или двух рамочных электродов (см. в 1-й колонке таблицы III.1). Расстояние между стойками (f_1 и f_2) фундамента, боковые размеры (a и b) рамочного электрода и глубина электрода заземления представляют собой геометрические размеры систем электродов согласно таблице III.1.

Рассчитанные значения ρ/R для 21 структуры системы заземления занесены в последнюю колонку таблицы III.1. Принимая $\rho/R = 18$, что подходит примерно к половине значений в указанной таблице, получаем по формуле III-4:

$$x_{min} = \frac{1}{2\pi} 18 \frac{V_e}{V_x} = 2,9 \frac{V_e}{V_x}. \quad (\text{III-7})$$

Учитывая, что:

- потенциалы электродов заземления в соответствии с уровнями напряжения изоляции, используемыми в Добавлении I, составляют:

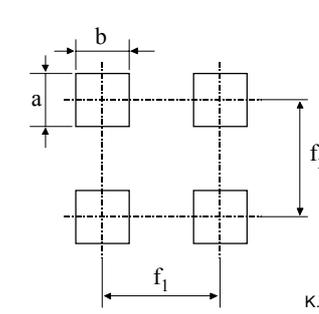
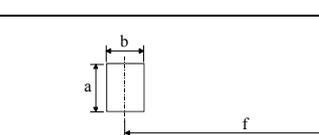
$$V = 10 \text{ кВ}, 15 \text{ кВ}, 20 \text{ кВ} \text{ и } 50 \text{ кВ}$$

- допустимые оговоренные потенциалы заземления без нагрузки у шкафа преобразования для медного кабеля связи или в точках разветвления составляют:

$$V_x = 650 \text{ В или } 1 \text{ кВ}, 1,5 \text{ кВ} \text{ и } 2 \text{ кВ},$$

в таблице III.2 приведены минимальные значения длины соединительного участка, полученные по формуле III-7.

Таблица III.1/К.57 – Примеры значений параметра ρ/R для различных схем заземления опоры

Заземление опоры							ρ/R	
Схема	Типичный уровень напряжения [кВ]	Код случая	Размеры рамочного электрода [м]					
			Разнос стоек ^{а)}		Боковой ^{б)}	Глубина		
			f_1	f_2				a
 <p>К.057_ТIII.1(1)</p> <p>Фундамент свободно стоящей опоры</p>	120	1	3,6		1,3	1,8	13,3	
	120	2	3,7		1,3	1,8	13,5	
	220	3	4,5	4,0	1,4	1,6	14,1	
	120	4	4,8		1,6	1,6	15,5	
	120	5	7,2	4,3	1,4	1,8	15,8	
	120	6	4,5		2,0	1,9	17,1	
	220	7	6,0		1,7	1,8	17,4	
	400	8	6,8		1,7	1,6	17,6	
	220	9	6,5		1,7	2,0	18,2	
	120	10	6,0		1,9	2,4	19,3	
	400	11	7,5	5,5	2,0	2,0	19,4	
	750	12	9,0		2,2	1,8	21,9	
	400	13	8,2		2,3	2,4	22,9	
	220	14	7,0		2,8	2,0	23,1	
	750	15	10,0		2,4	2,9	25,7	
	220	16	9,0		3,0	2,8	27,3	
	750	17	11,0		3,0	4,1	31,2	
 <p>К.057_ТIII.1(2)</p> <p>Система электродов заземления Н-образной промежуточной опоры</p>	400 ^{с)}	18	19,0		1,2	1,6	9,7	
	120	19	5,4		4,2	1,8	2,5	15,5
	220	20	18,0		3,2	2,5	2,9	18,1
	750 ^{с)}	21	26,4		2,9	1,1	5,3	18,4

а) Дается только одно значение в случае, если расстояния разноса между стойками фундамента опоры идентичны, т. е. $f_1 = f_2 = f$, или фундамент опоры состоит только из двух стоек с разномом f (см., соответственно, верхнюю и нижнюю схемы в 1-й колонке таблицы).

б) Дается только одно значение в случае, если боковые размеры электрода заземления рамочного типа идентичны, т. е. $a = b$.

с) Система электродов заземления Н-образной промежуточной опоры с оттяжками.

Таблица III.2/К.57 – Минимальные требуемые значения длины соединительного участка, соответствующие уровням напряжения изоляции (Добавление I) и допустимое значение Z-EPR в точке разветвления

Уровень напряжения изоляции, (V) [кВ]	Минимальная длина [м]			
	до шкафа преобразования для медного кабеля связи ^{a)}	соединительного участка		
		Допустимое значение EPR в точке разветвления, V_x		
	650 В	1 кВ	1,5 кВ	2 кВ
10	44	29	19	14
15	67	43	29	22
20	28	58	39	29
50	221	144	96	72

^{a)} См. рисунки 5 и 6.

Литература

- [I.1] SOLLERKVIST (F.J.), VARJU (G.), KÁROLYI (K.): Sophisticated multiconductor modelling in the frequency domain, Part 1: Numerical solution, Part 2: Case studies; *COST 261 Workshop*, Calgiari 2000.
- [II.1] IEC 61643-1 (2002-01), *Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Part 1: Performance requirements and testing methods*.
- [II.2] IEC 61643-12 (2002-02), *Low-voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Selection and application principles*.
- [III.1] FAVEZ (B.), GOUQUL (J.C.): Contribution of studies on problems resulting from the proximity of overhead lines with underground metal pipe lines. *CIGRÉ 36.04*, 1970.
- [III.2] CDEGS software package of the Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada.
- [III.3] ITU-T Handbook, Directives, Volume II, *Calculating induced voltages and currents in practical cases*, Chapter 5, "Calculation of conductive coupling", ITU, Geneva 1999.

СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

Серия А	Организация работы МСЭ-Т
Серия В	Средства выражения, определения терминов, символы, классификация
Серия С	Общая статистика электросвязи
Серия D	Общие принципы тарификации
Серия E	Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы
Серия F	Нетелефонные службы связи
Серия G	Системы и среда передачи, цифровые системы и сети
Серия H	Аудиовизуальные и мультимедийные системы
Серия I	Цифровая сеть с интеграцией служб
Серия J	Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов
Серия К	Защита от помех
Серия L	Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений
Серия M	TMN и техническое обслуживание сетей: международные системы передачи, телефонные, телеграфные, факсимильные и арендованные каналы
Серия N	Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ
Серия O	Требования к измерительной аппаратуре
Серия P	Качество телефонной передачи, телефонные установки, сети местных линий
Серия Q	Коммутация и сигнализация
Серия R	Телеграфная передача
Серия S	Оконечное оборудование для телеграфных служб
Серия T	Оконечное оборудование для телематических служб
Серия U	Телеграфная коммутация
Серия V	Передача данных по телефонной сети
Серия X	Сети передачи данных и взаимосвязь открытых систем
Серия Y	Глобальная информационная инфраструктура и аспекты межсетевого протокола (IP)
Серия Z	Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи