

Министерство путей сообщения
Российской Федерации
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения

БЕССОНОВ В.А.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Хабаровск
2000

Министерство путей сообщения Российской Федерации
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Бессонов В.А.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Рекомендовано
Редакционно-издательским советом ДВГУПС
в качестве учебного пособия

Хабаровск
2000

УДК 537.87(075.8)
ББК 3 88
Б 536

Рецензенты:
Кафедра «Электротехника» Хабаровского
государственного технического университета
(зав. кафедрой, доцент *Л.В. Зелев*)

Главный инженер службы электрификации
и электроснабжения Дальневосточной железной дороги
В.В. Шаталов

Бессонов В.А.

Б 536 Электромагнитная совместимость: Учебное пособие. – Хаба-
ровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 80 с.

В учебном пособии описаны источники влияния, создающие электромагнитные поля, рассмотрены электрические, магнитные, гальванические влияния.

Получены уравнения электромагнитного влияния между однопроводными линиями, рассмотрены принципы расчета опасных и мешающих влияний. В работе дан анализ взаимного электрического влияния воздушных высоковольтных линий, а также проводов контактной сети и системы ДПР, рассмотрены методы защиты линий связи от опасных и мешающих влияний.

Проанализированы факторы экологического воздействия ЛЭП сверхвысокого напряжения и даны методы обеспечения электромагнитной совместимости электрических полей высоковольтных линий и экологии окружающей среды.

Решены и представлены в качестве примеров задачи по расчету напряженности электрического поля трехфазных ЛЭП и контактной сети электрических железных дорог переменного тока, разработаны задания для выполнения контрольных работ.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения специальностей 1002 и 1004.

УДК 537.87(075.8)
ББК 3 88

© Издательство Дальневосточного государственного
университета путей сообщения (ДВГУПС), 2000

ВВЕДЕНИЕ

Вокруг проводов, передающих электрическую энергию переменного тока, возникает переменное электромагнитное поле, которое создает во всех смежных сооружениях, находящихся в этом поле (другие линии электропередачи, воздушные и кабельные линии связи, металлические трубопроводы, заборы и др.), электродвижущие силы (ЭДС) и, как следствие, токи. Эти ЭДС и токи могут производить опасные и мешающие влияния, то есть создавать условия работы электрического и другого оборудования, несовместимые с техническими требованиями и правилами техники безопасности. Обеспечить работу электрооборудования в пределах допустимых норм электромагнитного влияния – обеспечить электромагнитную совместимость.

В соответствии с определением Международной электротехнической комиссии (МЭК) под электромагнитной совместимостью понимается способность электротехнического оборудования работать удовлетворительно в электромагнитной среде, не создавая недопустимого влияния на другое электротехническое оборудование и окружающую среду.

В предлагаемом учебном пособии рассматриваются источники влияния, методика расчета напряжений и токов, наведенных влияющей линией в смежных сооружениях, мероприятия по защите смежных линий от мешающих и опасных влияний. Кроме того, дано описание проблем экологического воздействия электрического поля на окружающую среду и методов уменьшения этого воздействия.

1. ИСТОЧНИКИ ВЛИЯНИЯ

1.1. Общие сведения об электрическом и магнитном полях

В электрических цепях могут быть токи и напряжения постоянные по величине и направлению; постоянные по направлению, но переменные по величине; периодически изменяющиеся по величине и направлению; импульсного характера. Переменные токи и напряжения различной формы создают в пространстве, окружающем электрические цепи, переменные электрические и магнитные поля. Характер изменения этих полей соответствует характеру изменения электрического напряжения и тока в рассматриваемой цепи.

Если в проводе имеются переменные напряжения U и ток I , то электрическое поле можно представить (рис. 1.1) в виде силовых линий, начинающихся в проводе и заканчивающихся на поверхности земли. В земле электрического поля, создаваемого напряжением провода U , нет, поэтому кабельные линии, проложенные в земле, электрическому влиянию не подвержены.

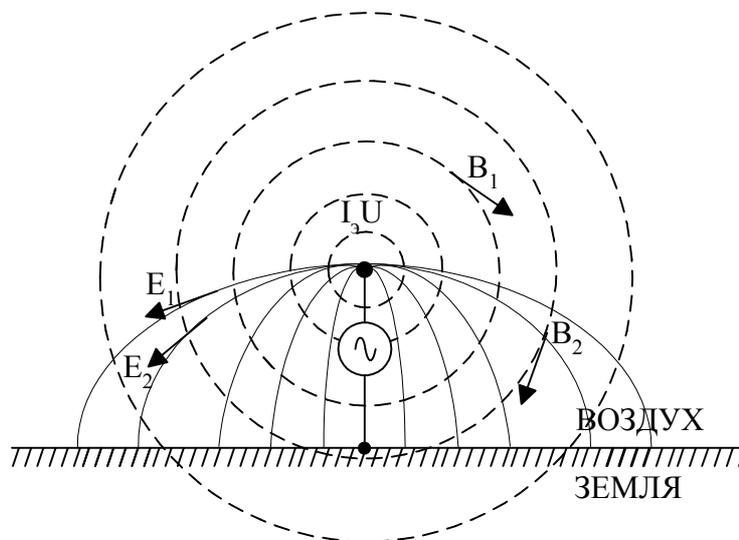


Рис.1.1. Силовые линии электромагнитного поля

Силовые линии магнитного поля, создаваемого током I , замыкаясь по концентрическим окружностям вокруг провода, проникают и в землю, поэтому кабельные линии в земле, так же как и воздушные, подвергаются воздействию магнитного поля.

Электромагнитное поле в каждой точке характеризуется четырьмя векторными величинами: напряженностью электрического поля \vec{E} , В/м, электрической индукцией \vec{D} , Кл/м², напряженностью магнитного поля \vec{H} , А/м, магнитной индукцией \vec{B} , Тл (тесла).

Составляющие электрического поля (\vec{E}, \vec{D}) и магнитного поля (\vec{H}, \vec{B}) находятся во взаимной зависимости.

Для поля в вакууме имеем:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

где ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м; μ_0 – магнитная постоянная, равная $1,26 \cdot 10^{-6}$, Г/м.

Взаимосвязь векторов электромагнитного поля основывается на следующих четырех положениях [1].

Закон полного тока: $i_{\text{п}} = \oint \text{H} d\ell$; знак \oint у интеграла означает, что интегрирование производится по замкнутому контуру; полный ток $i_{\text{п}}$ включает в себя ток проводимости и ток смещения $i_{\text{см}} = \varepsilon_0 (\partial E / \partial t)$.

Отсюда следует, что всякое изменение электрического поля во времени $\partial E / \partial t$ вызывает появление магнитного поля.

Закон электромагнитной индукции, который устанавливает связь между ЭДС, индуцируемой в контуре, и магнитным потоком, пересекающим этот контур

$$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}; \quad \oint \text{E} d\ell = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Из этих формул видно, что всякое изменение магнитного поля во времени $\partial \Phi / \partial t$ приводит к появлению электрического поля.

Теорема Остроградского-Гауса, которая устанавливает связь между потоком вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность и электрическим зарядом, расположенным внутри этой поверхности, имеет вид $N = Q/\varepsilon_0$.

Если $Q = 0$, то $N = 0$, то есть электрическое поле может возникнуть только в результате изменения магнитного потока.

Принцип непрерывности магнитного потока, который выражается в том, что полный поток магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю, то есть вошедший внутрь любого объема магнитный поток равен магнитному потоку, вышедшему из того же объема, или математически $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$, здесь интеграл берется по замкнутой поверхности.

1.2. Высоковольтные линии переменного тока

Трехфазные линии электропередачи (ЛЭП) переменного тока подразделяются на симметричные и несимметричные.

На рис. 1.2 представлены возможные схемы расположения проводов трехфазной ЛЭП в пространстве.

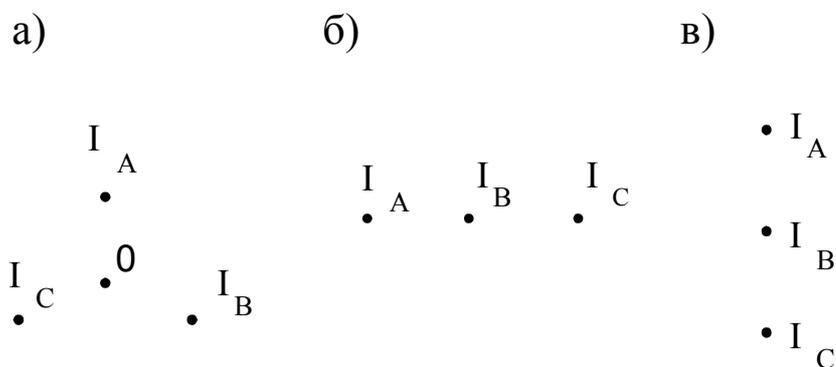


Рис. 1.2. Схемы расположения проводов симметричных трехфазных ЛЭП: а) по вершинам равностороннего треугольника; б) в одной горизонтальной; в) в одной вертикальной плоскостях.

В схеме, изображенной на рис. 1.2, а, суммарный вектор магнитной индукции в центре треугольника (точка 0) в любой момент времени (при симметричных токах I_A , I_B , I_C) будет равен нулю. В схемах рис. 1.2, б и 1.2, в это условие не соблюдается ни в одной точке пространства, но при близости расположения проводов друг к другу эта схема практически тоже симметрична. Пример несимметричной ЛЭП трехфазного тока приведен на рис. 1.3.

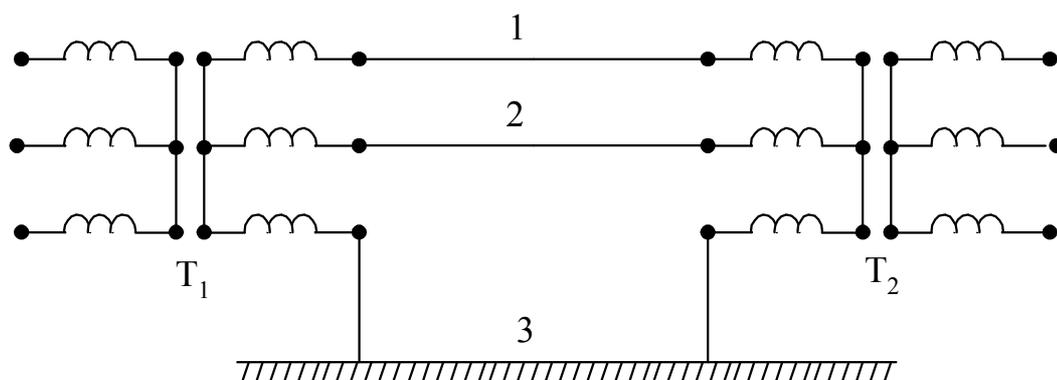


Рис. 1.3. Схема несимметричной трехфазной ЛЭП: T_1 и T_2 – повышающий и понижающий трансформаторы; 1 и 2 – провода ЛЭП; 3 – земля

Так как расстояние между каждым проводом 1 и 2 и землей намного больше, чем расстояние между проводами 1 и 2, эта линия относится к несимметричным. Несимметрия такой ЛЭП с точки зрения влияния на смежные сооружения усугубляется тем, что ток, протекающий в земле, может находиться от поверхности земли на глубине нескольких сотен метров.

1.3. Высоковольтные линии постоянного тока

Передача электрической энергии постоянным током по сравнению с передачей переменным током имеет ряд преимуществ, главными из которых являются следующие. Предел передаваемой мощности по ЛЭП постоянного тока не зависит от ее длины и значительно больше чем у передачи переменным током; отсутствует понятие предела по статической устойчивости в ЛЭП постоянного тока; отсутствует реактивное сопротивление; энергосистемы, связанные ЛЭП постоянного тока, могут работать несинхронно или с различными частотами. Для линии постоянного тока требуется два провода вместо трех или даже один, что показано на рис. 1.4.

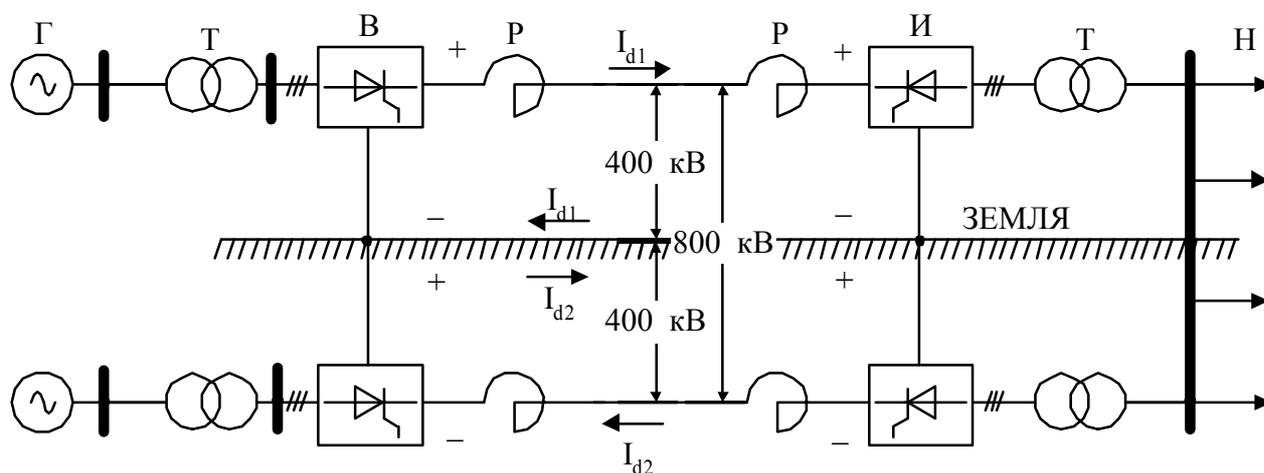


Рис. 1.4. Схема ЛЭП постоянного тока

Здесь Г – генератор, Т – трансформатор, В – выпрямитель, И – инвертор, Р – реактор (для сглаживания гармоник), Н – нагрузка. Когда работают обе линии, схема называется биполярной, причем в одну линию подается "+", в другую "-", это нужно для того, чтобы выпрямленные токи в земле I_{d1} и I_{d2} были направлены в разные стороны. Если они равны, то ток в земле будет равен нулю, вся энергия будет передаваться напряжением 800 кВ.

В случае отключения одной линии вторая остается в работе, напряжение в линии будет равно 400 кВ, такая линия называется униполярной. Имеются также линии постоянного тока напряжением ± 750 кВ (1500 кВ).

Влияющим фактором в линиях постоянного тока являются высшие гармоники, создающие вокруг проводов электромагнитные поля соответствующих частот. При применении 6-ти фазных выпрямителей частота гармоник кратна 300 Гц, то есть в ЛЭП постоянного тока присутствуют гармоники 300, 600, 900, ... Гц.

1.4. Электрифицированные железные дороги постоянного и переменного тока

В России магистральные электрические железные дороги работают на постоянном (3 кВ) и переменном однофазном токе промышленной частоты (50 Гц, 25 кВ).

При существующих схемах выпрямления ("звезда–две обратные звезды с уравнительным реактором", мостовая схема) в контактной сети дорог постоянного тока появляются гармоники с частотой $f = 50mk$, где m – количество фаз выпрямителя тяговой подстанции, k – порядковый номер гармоники (1, 2, 3 и т. д.). В настоящее время большинство тяговых подстанций имеют 6-ти фазные выпрямители, которые обуславливают появление гармоник, кратных 300 (300, 600, 900, 1200, ... Гц). Амплитуды этих гармоник относительно невелики, поэтому достаточно применить на тяговых подстанциях недорогостоящие сглаживающие реакторы и фильтрустройства, чтобы влияния, оказываемые этими гармониками, не превышали допустимых норм.

В последнее время стали применять 12-ти фазные выпрямители, которые уменьшают пульсацию выпрямленного напряжения, увеличивают коэффициент мощности тяговых подстанций, сокращают количество гармоник и уменьшают их амплитуды. В соответствии с вышеуказанной формулой при наличии 12-ти фазных выпрямителей в контактной сети появляются гармоники частотой $f = 600, 1200, 1800, \dots$ Гц.

При увеличении числа фаз выпрямителя уменьшается влияние электрических железных дорог постоянного тока на смежные сооружения.

Выше сказанное справедливо, если к выпрямителям подводится симметричное напряжение питающей системы, если же симметрия нарушается, то в контактной сети постоянного тока дополнительно появляются гармоники, кратные 100.

На дорогах переменного тока на электровозах применяют однофазную двухполупериодную с нулевым выводом или мостовую схему выпрямления, при которых в контактной сети появляются гармоники с частотой 50, 150, 250, 350... Гц. На дорогах постоянного тока постоянная составляющая выпрямленного тока I_d при нормальных режимах не оказывает влияние на смежные сооружения, а на дорогах переменного тока все составляющие тока контактной сети наводят ЭДС в смежных сооружениях.

1.5. Грозовые разряды

Воздушная оболочка вокруг земного шара состоит из нескольких слоев: тропосфера (верхняя граница 7÷18 км), стратосфера (высота от 7÷18 км над землей – до 80 км), ионосфера (от 80 до 900 км). Ионосфера – хорошо проводящая среда, являющаяся как бы обкладкой огромно-

го сферического конденсатора, второй обкладкой которого служит шаровая поверхность земли; воздушную среду между ними можно рассматривать в качестве диэлектрика. Верхняя обкладка (ионосфера) заряжена положительно, земная поверхность – отрицательно. Напряженность электрического поля такого природного конденсатора неравномерна из-за разной плотности воздуха, у поверхности земли она составляет 120 В/м. Напряженность электрического поля в атмосфере меняется и зависит от наличия заряженных облаков.

Общая величина напряженности электрического поля у поверхности земли может достигать 5000 В/м и выше. При критических разностях потенциалов между облаком и землей (свыше 10^9 В) возникает электрический разряд, т.е. молния.

На рис.1.5 а изображено прямое попадание молнии в кабель без пробоя изоляции жил, здесь

линия 1 – оболочка кабеля, 2 – две жилы кабеля.

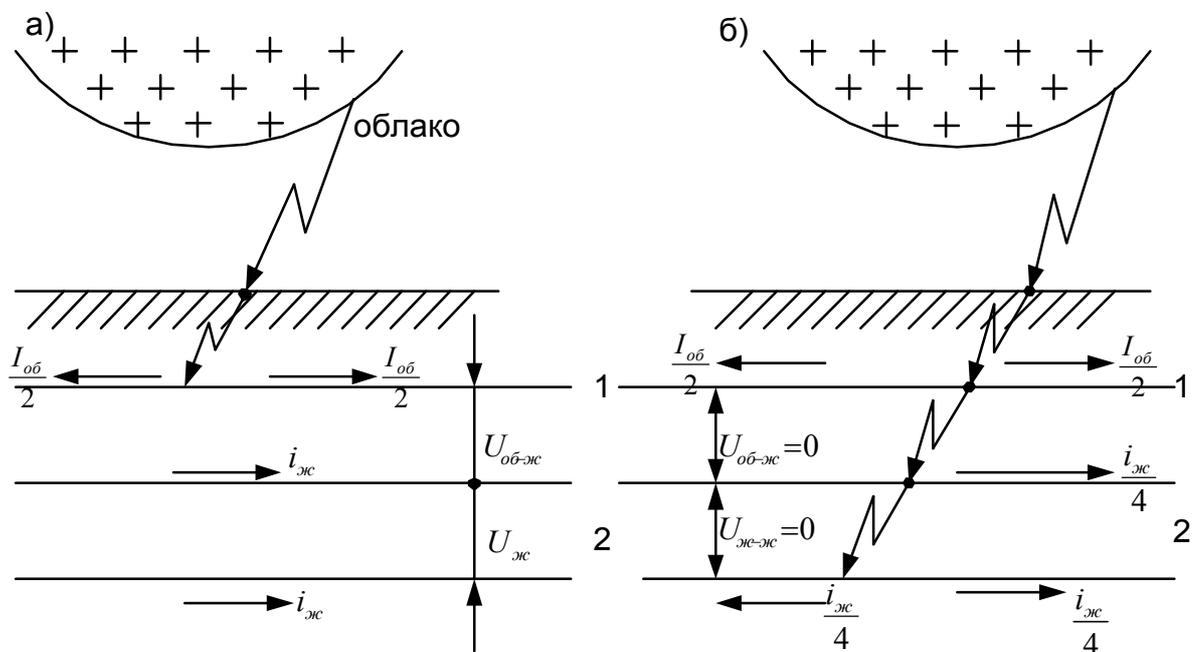


Рис. 1.5. Прямое попадание тока молнии в кабель

При попадании молнии в оболочку кабеля, ток растекается влево и вправо и индуцирует в кабеле ЭДС ($U_{об-ж}$ – между оболочкой и жилой, $U_{ж-ж}$ – между жилами) и токи $i_{ж}$. Эти ЭДС могут быть опасны для изоляции жил кабеля и подключенной к ним аппаратуры. Если при этом изоляция между оболочкой и жилами пробьется, то ток молнии попадет и в жилы (рис. 1.5, б), при этом в месте удара молнии напряжения $U_{об-ж} = 0$, $U_{ж-ж} = 0$, в отдаленных местах эти ЭДС могут достичь опасных значений.

На рис. 1.6 показаны случаи косвенного действия разрядов молнии.

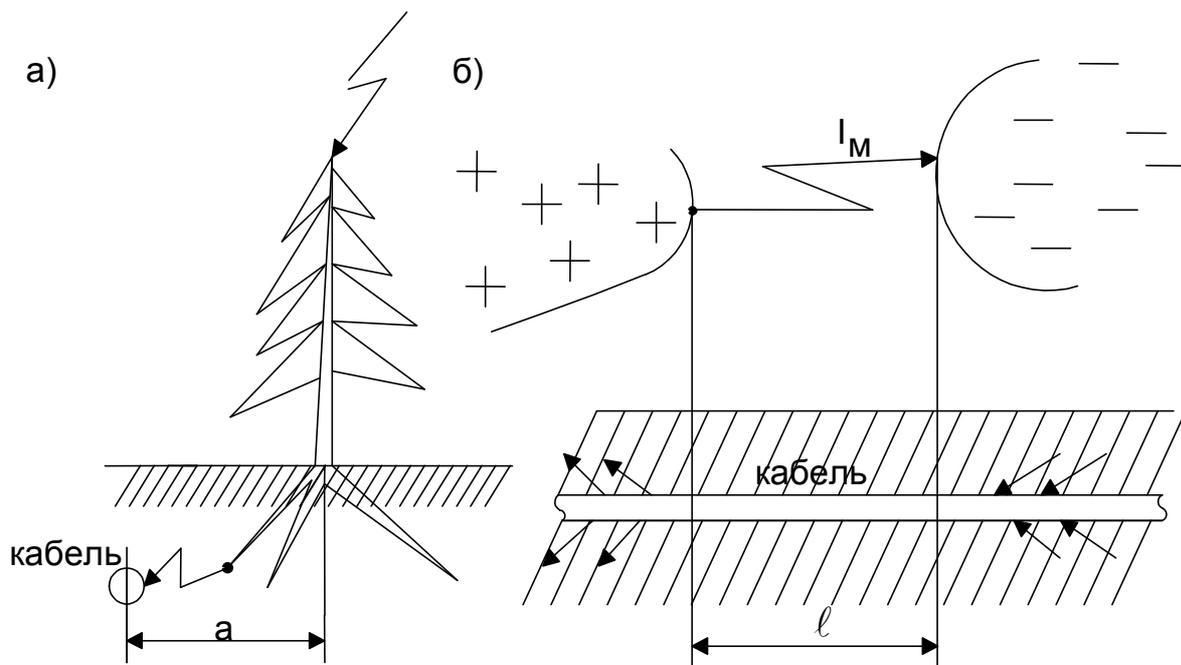


Рис. 1.6. Косвенное действие разряда молнии

При ударе молнии в дерево разряд по его корням может пройти в кабель (рис. 1.6, а). Расстояние a , которое перекрывается электрической дугой молнии, возрастает с увеличением удельного сопротивления земли.

Второй случай косвенного действия изображен на рис. 1.6, б: при разряде молнии между облаками ток I_M индуцирует в кабеле (и воздушных линиях) ЭДС, которые пропорциональны величинам I_M и l .

1.6. Высокочастотные каналы систем передачи на высоковольтных ЛЭП переменного и постоянного тока

Провода высоковольтных ЛЭП кроме передачи электрической энергии могут использоваться для передачи сигналов связи, телеуправления и устройств защиты ЛЭП от аварийных режимов работы. Указанные высокочастотные каналы создаются на частоте 40-500 кГц.

Схема подключения высокочастотных устройств к ЛЭП по схеме "фаза-земля" представлена на рис. 1.7.

Каждый передатчик работает на своей частоте, его мощность составляет 10÷100 Вт и выше. С влиянием высокочастотных каналов на каналы систем передачи (воздушные, кабельные линии связи и другие) следует считаться, если мощность высокочастотных постов превышает 5 Вт.

К источникам влияния относятся также мощные передающие радиостанции.

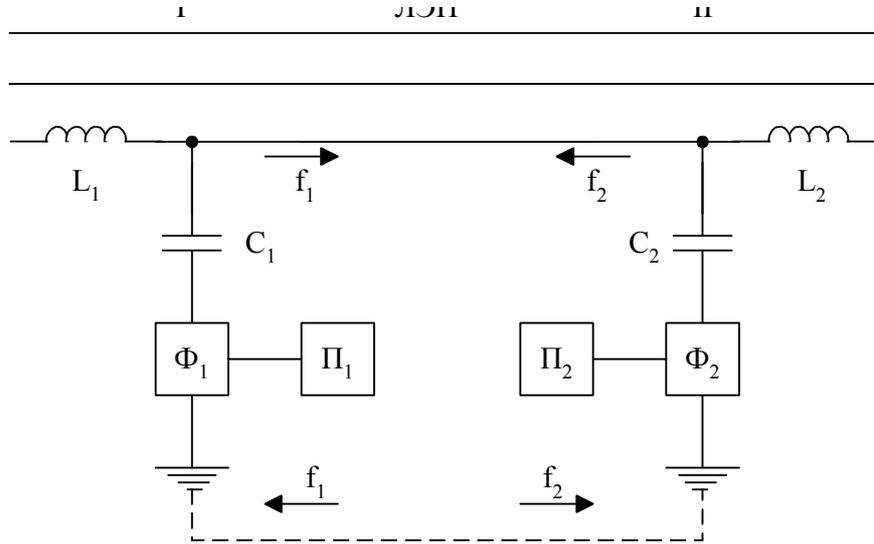


Рис. 1.7. Схема подключения высокочастотных устройств к ЛЭП: I, II – высокочастотные посты (связи, телеуправления, устройств защиты); П₁, П₂ – приемно-передающие устройства; Φ₁, Φ₂ – фильтры; С₁, С₂ – конденсаторы; L₁, L₂ – дроссели заграждения, не пропускающие высокочастотные сигналы к силовому оборудованию; f₁, f₂ – несущие частоты

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЛИЯНИЕ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

Электромагнитное поле как форма существования материи – это единый и неделимый объект, но для удобства исследования поле разделяют на электрическое и магнитное. Поэтому можно раздельно говорить о природе электрического и магнитного влияниях. Кроме того, существует понятие гальванического влияния влияющих линий на смежные сооружения.

2.1. Электрическое влияние

При электрическом влиянии во влияющем проводе имеется напряжение относительно земли, ток отсутствует. Возьмем в качестве влияющей линии провод контактной сети переменного тока с напряжением U_k , а в качестве подверженной влиянию – жилу 2 однопроводной воздушной линии связи (рис. 2.1).

Будем считать, что влияющая и подверженная влиянию линии имеют длину значительную, по сравнению с высотой подвески, и одинаковую.

Между точкой 1 и 2 существует проводимость

$$Y_{KC} = g_{KC} + j\omega C_{KC},$$

где g_{KC} – активная проводимость изоляции и воздуха; ωC_{KC} – реактивная (емкостная) проводимость между контактным проводом и линией связи.

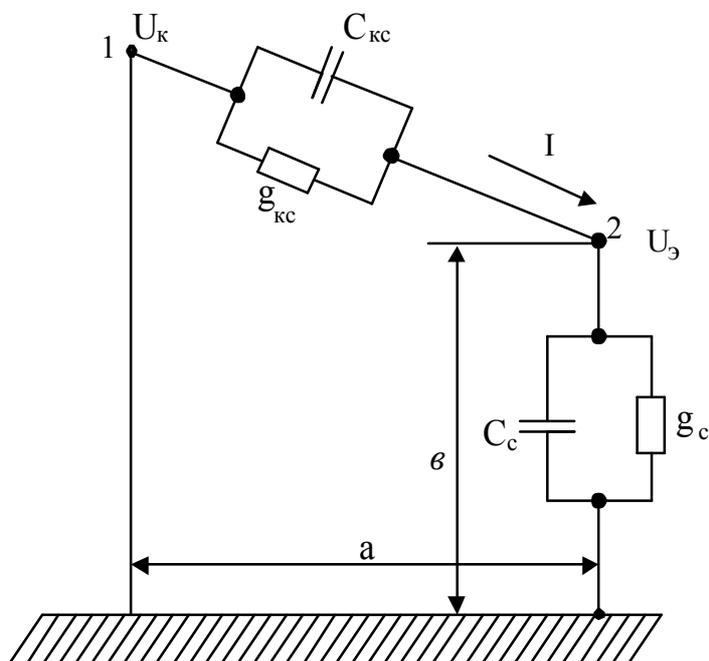


Рис. 2.1. Схема электрического влияния

Аналогично, проводимость линии связи

$$y_c = g_c + j\omega C_c,$$

где g_c – активная проводимость линии связи провода 2 относительно земли; ωC_c – реактивная проводимость (измеряются проводимости в См/км).

Обычно активные проводимости очень малы, то есть $g \ll \omega C$, поэтому примем $y_{KC} = j\omega C_{KC}$, $y_c = j\omega C_c$.

Между контактным проводом и землей имеется разность напряжений U_K , под воздействием этого напряжения из точки 1 через точку 2 в

точку 0 потечет ток
$$i = \dot{U}_K \frac{y_{KC} \cdot y_c}{y_{KC} + y_c}.$$

Потенциал U_3 провода 2 относительно земли (количественная оценка электрического влияния) будет равен падению напряжения между точками 2 и 0, то есть

$$\dot{U}_3 = \frac{i}{y_c} = \dot{U}_K \frac{y_{KC}}{y_{KC} + y_c} = \dot{U}_K \frac{C_{KC}}{C_{KC} + C_c}.$$

Выясним зависимость U_3 от высоты подвески провода 2.

Как правило, $b \ll a$, поэтому $C_{KC} \ll C_c$ (емкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между его обкладками), поэтому

$$U_э \approx U_к \frac{C_{кс}}{C_c}$$

При уменьшении высоты подвески $\mathbf{в}$ C_c возрастает, а $C_{кс}$ остается практически постоянной, вследствие чего при приближении провода 2 к земле его потенциал будет уменьшаться; когда провод ляжет на землю, $\mathbf{в} = 0$, $C_c = \infty$, $U_э = 0$, то есть на провода, лежащие на земле и в земле, электрическое влияние не действует (силовые линии электрического поля от провода 1 заканчиваются на поверхности земли).

2.2. Магнитное влияние

Суть магнитного влияния рассмотрим на примере воздействия магнитного поля контактного провода на однопроводную жилу воздушной линии связи (при магнитном влиянии $U_к=0$).

Ток контактного провода $I_к$ (рис. 2.2, а) течет от электровоза на тяговую подстанцию по рельсу и земле. Ввиду того, что рельс как массивный стальной проводник оказывает переменному току большое сопротивление, возрастающее с увеличением тока, будем считать [1], что практически весь ток $I_к$ в обратном направлении протекает по земле, при этом образуется первый влияющий контур "контактный провод–земля".

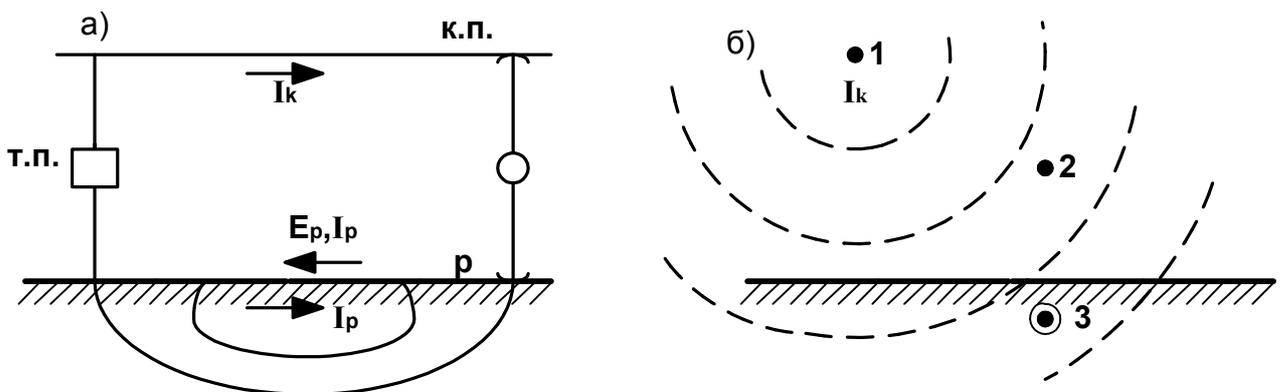


Рис. 2.2. Влияющие контуры контактной сети

Ток $I_к$ наведет в рельсе на единицу длины ЭДС E_p , отстающую от тока на угол 90° (рис. 2.3, а) и равную $E_p = j\omega M_{кр} \cdot I_к = z_{кр} \cdot I_к$, где ω – угловая частота, $M_{кр}$ – коэффициент взаимной индукции на единицу длины между контактным проводом и рельсом, $Z_{кр}$ – сопротивление взаимной индукции.

Так как в рельсе появляется ЭДС E_p , а рельс шунтирован землей, то в рельсе потечет ток I_p (индуктированный ток), отстающий от E_p на угол φ , определяемый отношением индуктивного и активного сопротивлений

рельса x_p/r_{pa} . Это отношение больше 2, 3 [2], поэтому угол $\varphi > 70^\circ$. Практически ток I_p находится в противофазе току I_k и протекает по контуру "рельс–земля", который является вторым влияющим контуром.

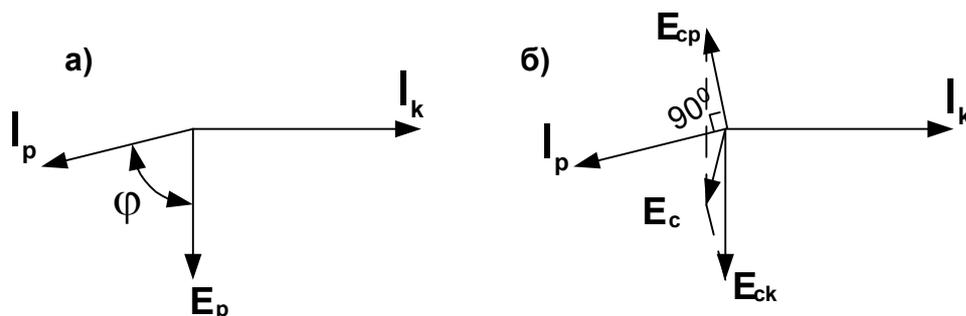


Рис. 2.3. Векторные диаграммы

Первый контур с током \dot{I}_k наведет в проводе 2 воздушной линии ЭДС $E_{ck} = j \omega M_{ck} \dot{I}_k$, (рис. 2.3, б) где M_{ck} – коэффициент взаимной индукции между контактным проводом и проводом 2; второй контур с током \dot{I}_p создает в том же проводе 2 ЭДС $E_{cp} = j \omega M_{cp} \dot{I}_p$, где M_{cp} – коэффициент взаимной индукции между рельсом и проводом 2. Как показано на рис. 2.3, б, результирующая E_c , наведенная в проводе 2, при наличии рельса меньше, чем ЭДС E_{ck} , то есть рельс как бы экранирует воздушную линию связи. Отношение $E_c/E_{ck} = r$ называется коэффициентом экранирующего (или защитного) действия рельсовой цепи. Для двухпутных участков $r = 0,4 \div 0,6$, то есть рельсы в среднем в два раза уменьшают магнитное влияние контактного провода. Из вышенаписанных формул выразим $E_c = E_{ck} \cdot r = \omega M_{ck} \dot{I}_k \cdot r$. Зная величину r , можно найти значение E_c , не вычисляя ток рельса I_p .

Экранирующим эффектом при магнитном влиянии обладает также металлическая оболочка кабеля. Оценим магнитное влияние контактной сети на жилу кабеля 3 (рис. 2.2, б). Силовые линии магнитного поля переменного тока, проникая в землю, пересекают жилу и оболочку кабеля, вследствие чего в них возникают ЭДС: $E_{об} = j \omega M_{к-об} \dot{I}_k \cdot r$, $E_{ж} = j \omega M_{к-ж} \dot{I}_k \cdot r$, где $M_{к-об}$, $M_{к-ж}$ – коэффициенты взаимной индукции на единицу длины между контактным проводом и оболочкой и контактным проводом и жилой. Поскольку расстояние между контактным проводом и жилой практически такое же, как между контактным проводом и оболочкой, то $E_{ж} = E_{об}$. Эти две ЭДС изображены на рис. 2.4 как два одинаковых по модулю вектора, отстающих на 90 градусов от создающего их тока I_k .

Оболочка кабеля шунтирована землей, поэтому в оболочке потечет ток $I_{об}$, который будет отставать от своей ЭДС $E_{об}$ на угол φ , опреде-

ляемый отношением индуктивного и активного сопротивлений оболочки кабеля. Это отношение больше двух, поэтому угол φ больше 60° .

Ток оболочки создает вокруг жилы свое магнитное поле, а в жиле – новую ЭДС $E_{ж1} = j \omega M_{об-ж} \cdot I_{об}$, $M_{об-ж}$ – коэффициент взаимной индукции между оболочкой и жилой.

Эта ЭДС будет отставать от индуктирующего ее тока также на угол 90° . Результирующую ЭДС магнитного влияния E_m получим, сложив векторы $E_{ж}$ и $E_{ж1}$ по правилу параллелограмма. Эта ЭДС меньше, чем ЭДС $E_{ж}$, т.е. оболочка кабеля уменьшает магнитное влияние, экранируя жилу кабеля. Отношение $E_m / E_{ж} = r_{об}$ называется коэффициентом защитного действия оболочки кабеля, для различных типов кабеля $r_{об} = 0,01 \div 0,1$, т.е. оболочка кабеля уменьшает магнитное влияние в $100 \div 10$ раз.

Как видно из рис. 2.4, если увеличить $E_{ж1}$ до значения $E'_{ж1}$, то результирующая ЭДС уменьшается (E'_m). Но увеличить $E'_{ж1}$ можно только увеличением тока $I_{об}$, который определяется выражением (без учета переходного сопротивления между оболочкой и землей)

$$I_{об} = E_{об} / \sqrt{R_{об}^2 + X_{об}^2},$$

где $R_{об}$ и $X_{об}$ – активное и индуктивное сопротивления оболочки.

Сопротивление $X_{об}$ мало зависит от толщины оболочки, поэтому для увеличения $I_{об}$ уменьшают $R_{об}$, помещая для этого между жилами кабеля и оболочкой прослойку из цветного металла (экран). Увеличению тока $I_{об}$ способствует также заземление

через определенное расстояние ($3 \div 5$ км) оболочки кабеля.

Второй способ уменьшения E_m состоит в том, чтобы $E_{ж1}$ заняла вертикальное положение. Действительно, при таком положении вектора $E_{ж1}$ и равенстве его модуля величине $E_{ж}$ значение E_m будет равно нулю. Поскольку вектор $E_{ж}$ жестко связан с током $I_{об}$ углом 90° , то повернуть вектор $E_{ж1}$ можно только увеличивая угол φ , для чего необходимо повышать индуктивность оболочки. В этих целях в качестве материала оболочки применяют специальные сорта сталей с повышенной магнитной проницаемостью.

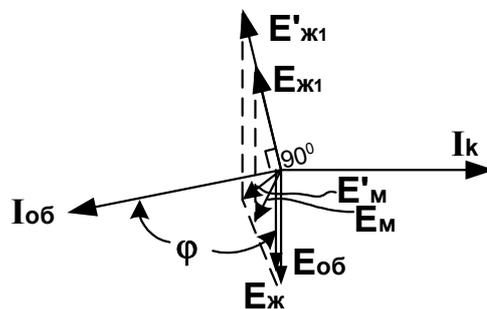


Рис. 2.4. Векторная диаграмма

2.3. Гальваническое влияние

Этот вид влияния заключается в затекании тяговых токов (блуждающих токов) в каналы однопроводных линий связи (рис. 2.5).

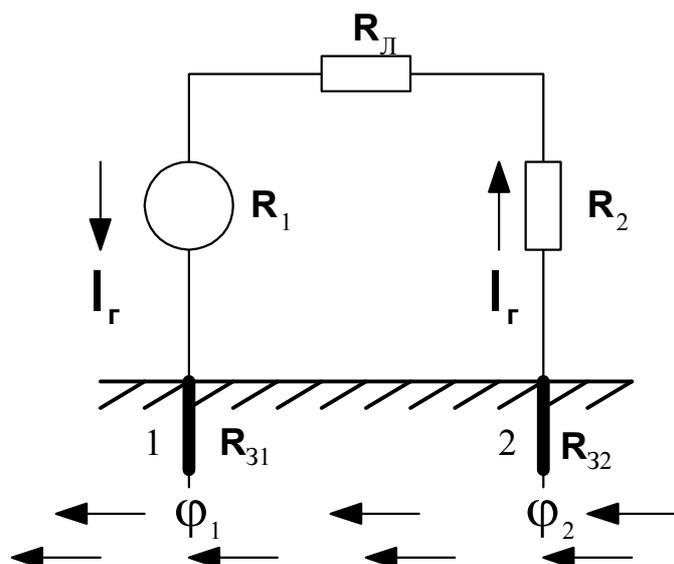


Рис. 2.5. Схема гальванического влияния: R_1 , R_2 – сопротивления передающего и принимающего устройств однопроводной линии связи; $R_{\text{Л}}$ – сопротивление линии; R_{31} , R_{32} – сопротивления заземлений начала и конца линии

Протекание блуждающего тока в земле является причиной появления в точках 1 и 2 потенциалов φ_1 и φ_2 . Разность этих потенциалов создает посторонний ток в линии, ток гальванического влияния

$$I_{\text{г}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_{31} + R_1 + R_{\text{Л}} + R_2 + R_{32}}$$

Этот ток, накладываясь на сигналы, передаваемые по линии связи, искажает их.

В двухпроводных линиях связи гальваническое влияние практически отсутствует, так как ее провода изолированы от земли.

3. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ МЕЖДУ ОДНОПРОВОДНЫМИ ЛИНИЯМИ

3.1. Вывод основных уравнений $U_{\text{сх}}$, $I_{\text{сх}}$

Ознакомившись с понятием электрического и магнитного влияния, необходимо оценить количественно значения ЭДС и токов, наводимых электромагнитным полем влияющей линии в линии, подверженной влиянию.

В таких случаях принято анализировать взаимодействие однопроводных влияющей и подверженной влиянию линий, причем, обратными влияниями часто пренебрегают, так как уровень передаваемой энергии

влияющей линии на несколько порядков выше, чем линии, подверженной влиянию. В качестве влияющей линии могут быть контактная сеть электрифицированных железных дорог, одна фаза линии электропередачи; в качестве линии, подверженной влиянию, рассматриваются цепь «провод–земля» воздушной линии, «оболочка–земля» кабельной линии; цепь «жила–земля» кабеля без металлической оболочки. Примем в качестве влияющей линии контактный провод электрифицированной железной дороги переменного тока K , а в качестве подверженной влиянию – смежную линии C (однопроводную, воздушную линию), рис. 3.1.

Отметим, что взаимное расположение влияющей и подверженной влиянию линий называется "сближением" (ℓ – длина сближения, a – ширина сближения). При a неизменной, сближение называется параллельным; если линии располагаются под углом друг к другу (ширина сближения a разная в начале и конце сближения), то такое сближение называется косым. В реальности линии на одних участках идут параллельно, на других – под углом, такое сближение называется сложным.

В общем случае напряжение и ток во влияющей линии по ее длине меняются, примем для упрощения, что напряжение U_k и ток I_k в контактной сети неизменны (вывод основных уравнений без этого допущения изложен в [1]).

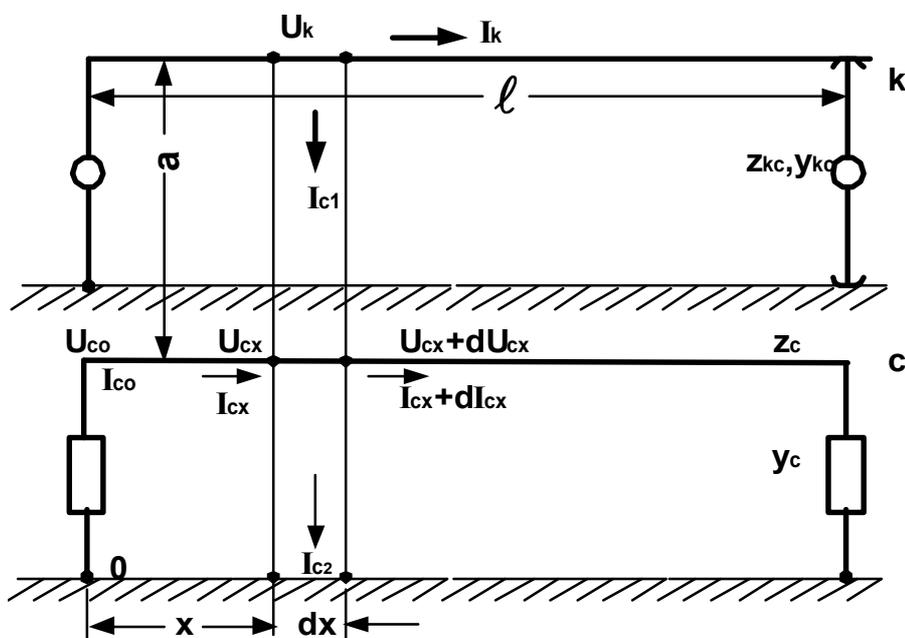


Рис. 3.1. Схема сближения контактной сети K и смежной линии C

Примем также, что сближение параллельное (это значит, что коэффициенты магнитной и емкостной связи между линиями **К** и **С** одинаковы на любом отрезке), длина обеих линий **К** и **С** одинакова и равна ℓ .

Обозначим через U_{cx} , I_{cx} наведенные напряжением \dot{U}_K и током \dot{I}_K в смежной линии соответственно напряжение относительно земли и ток в линии в точке с произвольной абсциссой x (начало координат в начале линий). Полное сопротивление линии **С** $Z_c = r_c + j\omega L_c$, Ом/км, здесь r_c – активное сопротивление, ω – угловая частота, L_c – индуктивность линии; полная проводимость этой линии относительно земли $y_c = g_c + j\omega C_c$, Ом/км, где g_c – активная проводимость (проводимость изоляции), ωC_c – реактивная (емкостная) проводимость, C_c – емкость линии **С**; $y_{kc} = g_{kc} + j\omega C_{kc}$, См/км, взаимная проводимость между линиями **К** и **С** (параметр электрической связи), где g_{kc} – активная проводимость, C_{kc} – емкость между этими линиями; $Z_{kc} = j\omega M_{kc}$, Ом/км, сопротивление взаимной индукции (параметр магнитной связи) между линиями **К** и **С**, здесь M_{kc} – коэффициент взаимной индукции на единицу длины. Обычно активная проводимость намного меньше емкостной, поэтому, как и выше, принимаем $y_c \approx j\omega C_c$, $y_{kc} \approx j\omega C_{kc}$, причем C_c – емкость смежной линии относительно земли и контактной сети, то есть $C_c = C_{co} + C_{kc}$.

На бесконечно малом участке dx падение напряжения dU_{cx} определяется двумя факторами: падением напряжения от протекания тока I_{cx} на сопротивлении $Z_c \cdot dx$ и падением напряжения (наводимой ЭДС) от тока I_k за счет взаимной индукции, $I_k \cdot Z_{kc} \cdot dx$. Напряжение U_{cx} больше $U_{cx} + dU_{cx}$ (ток I_{cx} течет слева направо), поэтому величина dU_{cx} должна быть отрицательной (при возрастании x U_{cx} убывает, приращение функции отрицательно), с учетом сказанного

$$-d\dot{U}_{cx} = Z_c \dot{I}_{cx} dx + Z_{kc} \dot{I}_k dx. \quad (3.1)$$

Неизвестны \dot{U}_{cx} и \dot{I}_{cx} , поэтому необходимо составить второе дифференциальное уравнение.

В линии **С** в сечении на расстоянии x протекает ток \dot{I}_{cx} , в сечении на расстоянии $x + dx$ ток равен $\dot{I}_{cx} + d\dot{I}_{cx}$, следовательно, изменение тока на участке dx равно $d\dot{I}_{cx}$. Это изменение вызвано двумя причинами: I_{c1} и I_{c2} . Ток I_{c1} , протекающий из линии **К** в линию **С**, будет определяться разностью напряжений $(\dot{U}_K - \dot{U}_{cx})$, умноженной на проводимость канала длиной dx , которая будет равна $y_{kc} \cdot dx$, поэтому

$$\dot{I}_{c1} = (\dot{U}_K - \dot{U}_{cx}) y_{kc} dx.$$

Ток I_{c2} протекает из линии **С** в землю, он будет равен

$$\dot{I}_{c2} = (\dot{U}_{cx} - \dot{U}_{3x}) y_c dx,$$

где \dot{U}_{3x} – потенциал земли, $\dot{U}_{3x} = 0$.

Ток I_{c1} увеличивает, а ток I_{c2} уменьшает ток в линии **С**, поэтому

$$\begin{aligned} d\dot{I}_{cx} &= \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{c2} = (\dot{U}_K - \dot{U}_{cx}) y_{kc} - \dot{U}_{cx} y_c dx, \text{ или} \\ -d\dot{I}_{cx} &= (\dot{U}_{cx} - \dot{U}_K) y_{kc} dx + \dot{U}_{cx} y_c dx. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Как правило $\dot{U}_{cx} \ll \dot{U}_K$, поэтому величиной \dot{U}_{cx} в скобках выражения (3.2) пренебрегают, после чего с учетом выражений (3.1), (3.2) запишем

$$-\frac{d\dot{U}_{cx}}{dx} = z_{kc} \dot{I}_K + z_c \dot{I}_{cx}; \quad (3.3)$$

$$-\frac{d\dot{I}_{cx}}{dx} = -y_{kc} \dot{U}_K + y_c \dot{U}_{cx}. \quad (3.4)$$

Продифференцируем уравнение (3.3) по x

$$-\frac{d^2\dot{U}_{cx}}{dx^2} = z_c \frac{d\dot{I}_{cx}}{dx}, \quad \text{отсюда} \quad \frac{d^2\dot{U}_{cx}}{dx^2} = -\frac{d\dot{I}_{cx}}{dx} z_c. \quad (3.5)$$

Перепишем уравнение (3.5) с учетом формулы (3.4)

$$\frac{d^2\dot{U}_{cx}}{dx^2} = \dot{U}_{cx} z_c y_c - \dot{U}_K y_{kc} z_c. \quad (3.6)$$

Обозначим $\sqrt{z_c y_c} = \gamma$, эта величина называется коэффициентом распространения волны в смежной линии.

Представим уравнение (3.6) в виде

$$\frac{d^2\dot{U}_{cx}}{dx^2} - \gamma^2 \dot{U}_{cx} + y_{kc} z_c \dot{U}_K = 0. \quad (3.7)$$

Решение этого линейного неоднородного уравнения второго порядка, как известно, дает

$$\dot{U}_{cx} = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x} + C, \quad (3.8)$$

где А, В, С – постоянные интегрирования, которые необходимо найти.
Из выражения (3.8)

$$\frac{d \dot{U}_{cx}}{dx} = \gamma A e^{\gamma x} - \gamma B e^{-\gamma x}; \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2 \dot{U}_{cx}}{dx^2} = \gamma^2 A e^{\gamma x} + \gamma^2 B e^{-\gamma x}. \quad (3.10)$$

Подставив значения выражений (3.10) и (3.8) в уравнение (3.7), получим

$$-\gamma^2 C + y_{kc} z_c \dot{U}_k = 0, \text{ откуда } C = \frac{y_{kc}}{\gamma^2} z_c \dot{U}_k = \frac{y_{kc} z_c}{z_c y_c} \dot{U}_k = \frac{y_k}{y_c} U_k.$$

Обозначив $y_{kc}/y_c = k_2$ и подставив значение С в формулу (3.8), запишем

$$\dot{U}_{cx} = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x} + k_2 \cdot \dot{U}_k.$$

Из уравнения (3.3)

$$\dot{I}_{cx} = -\frac{d \dot{U}_{cx}}{dx} \cdot \frac{z_{kc}}{z_c} \cdot \dot{I}_k. \quad (3.11)$$

Обозначив $z_{kc}/z_c = k_1$ и подставив в выражение (3.11) значение $d \dot{U}_{cx} / dx$ из формулы (3.9), получим

$$\dot{I}_{cx} = -\frac{\gamma}{z_c} (A e^{\gamma x} - B e^{-\gamma x}) - k_1 \dot{I}_k. \quad (3.12)$$

$$\text{Отношение } \frac{\gamma}{z_c} = \frac{\sqrt{z_c y_c}}{z_c} = \sqrt{\frac{y_c}{z_c}} = \frac{1}{\sqrt{(z_c/y_c)}} = \frac{1}{z_{cb}},$$

где $z_{cb} = \sqrt{z_c/y_c}$ – волновое сопротивление смежной линии.

$$\text{Окончательно } \dot{U}_{cx} = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x} + k_2 \cdot \dot{U}_k; \quad (3.13)$$

$$\dot{I}_{cx} = -\frac{1}{Z_{CB}}(A e^{\gamma x} - B e^{-\gamma x}) - \kappa_1 \dot{I}_K. \quad (3.14)$$

Обозначим через \dot{U}_{co} и \dot{I}_{co} напряжение и ток в начале смежной линии и выразим через них постоянные интегрирования A и B .

Если $x = 0$ (рис. 2.7), то $\dot{U}_{cx} = \dot{U}_{co}$, $\dot{I}_{cx} = \dot{I}_{co}$; с учетом сказанного, используя уравнения (3.13), (3.14), запишем

$$\dot{U}_{co} = A + B + \kappa_2 \dot{U}_K; \quad (3.15)$$

$$\dot{I}_{co} = -\frac{1}{Z_{CB}}(A - B) - \kappa_1 \dot{I}_K. \quad (3.16)$$

Из уравнения (3.15) $B = -A + (\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K)$, подставив это значение в формулу (3.16), получим после преобразований

$$A = \frac{\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K}{2} - \frac{Z_{CB}(\dot{I}_{co} + \kappa_1 \dot{I}_K)}{2}; \quad (3.17)$$

$$B = \frac{\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K}{2} + \frac{Z_{CB}(\dot{I}_{co} + \kappa_1 \dot{I}_K)}{2}. \quad (3.18)$$

После подстановки значений A и B в уравнения (3.13), (3.14), они предстанут в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_{cx} &= (\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K) \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) - Z_{CB} (\dot{I}_{co} + \kappa_1 \dot{I}_K) \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) + \kappa_2 \dot{U}_K = \\ &= (\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K) \text{Ch} \gamma x - Z_{CB} (\dot{I}_{co} + \kappa_1 \dot{I}_K) \text{Sh} \gamma x + \kappa_2 \dot{U}_K; \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\dot{I}_{cx} = -\frac{\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K}{Z_{CB}} \text{Sh} \gamma x + (\dot{I}_{co} + \kappa_1 \dot{I}_K) \text{Ch} \gamma x - \kappa_1 \dot{I}_K. \quad (3.20)$$

В формулах (3.19), (3.20) $\text{Sh} \gamma x$, $\text{Ch} \gamma x$ соответственно гиперболические синус и косинус. Значение \dot{U}_{co} , \dot{I}_{co} получить несложно, используя режимы работы смежной линии. Например, если начало линии изолировано от земли, то $\dot{I}_{co} = 0$, если начало линии заземлено, то $\dot{U}_{co} = 0$. Таким образом, конкретные значения \dot{U}_{co} , \dot{I}_{co} найдем, анализируя конкретные режимы работы смежной линии.

3.2. Анализ кривых U_{cx} , I_{cx} при электрическом влиянии

При электрическом влиянии $\dot{I}_K = 0$, поэтому уравнения (3.19), (3.20) примут вид

$$\dot{U}_{cx} = (\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K) \text{Ch}\gamma x - z_{cb} \dot{I}_{co} \text{Sh}\gamma x + \kappa_2 \dot{U}_K; \quad (3.21)$$

$$\dot{I}_{cx} = -\frac{\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K}{z_{cb}} \text{Sh}\gamma x + \dot{I}_{co} \text{Ch}\gamma x. \quad (3.22)$$

Анализ кривых U_{cx} , I_{cx} произведем для следующих режимов работы смежной линии (рис. 3.2):

1. Линия **С** изолирована.
2. Линия **С** одним концом изолирована, другим – заземлена.
3. Линия **С** заземлена в начале и конце.

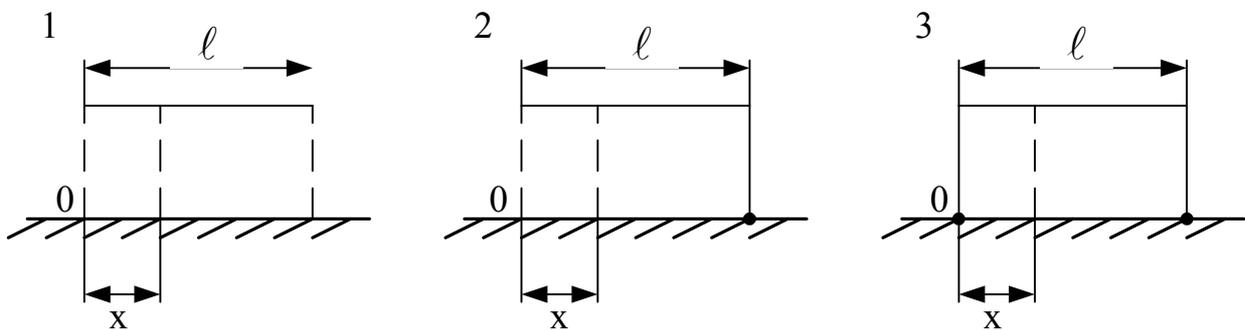


Рис. 3.2. Режимы работы смежной линии l

Для определения \dot{U}_{co} , \dot{I}_{co} при первом режиме наметим начальные условия. Если $x = 0$, то $\dot{I}_{cx} = \dot{I}_{co} = 0$, при $x = l$ $\dot{I}_{cx} = \dot{I}_{cl} = 0$, так как в изолированной линии ток в начале и конце протекать не может.

С учетом вышеизложенного, уравнение (3.22) предстанет в виде

$$0 = -\frac{\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_K}{z_{cb}} \text{Sh}\gamma l, \text{ откуда } \dot{U}_{co} = \kappa_2 \dot{U}_K.$$

После подстановки значений $\dot{U}_{co} = \kappa_2 \dot{U}_K$, $\dot{I}_{co} = 0$, в (3.21), (3.22) получим

$$\dot{U}_{cx} = \kappa_2 \dot{U}_K, \dot{I}_{cx} = 0. \quad (3.23)$$

Эти кривые представлены на рис. 3.3 (с индексом 1). При первом режиме наведенный потенциал смежной линии постоянен по всей длине, а ток в линии в любом сечении равен нулю.

Найдем значения U_{co} и I_{co} для второго режима работы смежной линии **C**. Для этого режима при $x = 0$, $I_{cx} = I_{co} = 0$, а при $x = l$, $U_{cx} = 0$ (конец линии заземлен). Подставив второе начальное условие в формулу (3.21), получим $0 = (\dot{U}_{co} - \kappa_2 \dot{U}_k) \text{Ch} \gamma l + \kappa_2 \dot{U}_k$,

$$\dot{U}_{co} = \kappa_2 \dot{U}_k \left(1 - \frac{1}{\text{Ch} \gamma l} \right), \quad (3.24)$$

Подставляя найденные значения \dot{U}_{co} и \dot{I}_{co} в формулы (3.21), (3.22), запишем окончательно

$$\dot{U}_{cx} = \kappa_2 \dot{U}_k \left(1 - \frac{\text{Ch} \gamma x}{\text{Ch} \gamma l} \right); \quad (3.25)$$

$$\dot{I}_{cx} = \frac{\kappa_2 \dot{U}_k}{Z_c \text{Ch} \gamma l} \text{Sh} \gamma x. \quad (3.26)$$

Задавая x значения в пределах от нуля до l , строим кривые U_{cx} и I_{cx} (кривые с индексом 2 на рис. 3.3).

Докажем без вычисления, что U_{co} при втором режиме будет меньше, чем $\kappa_2 U_k$. Напомним, что $\text{Ch} \gamma l = (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) / 2$; если $l = 0$, то $\text{Ch} \gamma l = 1$, следовательно, при $l > 0$, $\text{Ch} \gamma l > 1$,

значит, скобка выражения (24) $\left(1 - \frac{1}{\text{Ch} \gamma l} \right) < 1$, то есть при втором режиме

$$U_{co} < \kappa_2 U_k.$$

Для третьего режима, при $x = 0$ и $x = l$ $\dot{U}_{cx} = \dot{U}_{co} = \dot{U}_{cl} = 0$.

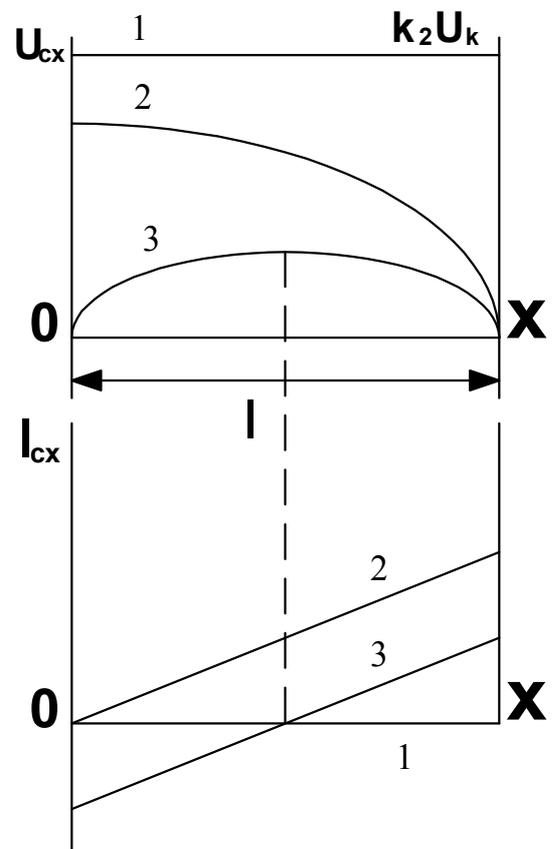


Рис. 3.3. Кривые U_{cx} и I_{cx} при электрическом влиянии

(U_{cl} – напряжение в конце линии). Окончательный вид уравнений U_{cx} и I_{cx} предлагается читателю найти самостоятельно, кривые U_{cx} и I_{cx} представлены на рис. 3.3 с индексом 3. Как показано на рисунке, при третьем режиме ток в смежной линии в начале и конце имеет разное направление. Это станет понятным, если обратиться к схеме замещения линии (рис. 3.4).

На этом рисунке емкость линии относительно земли представлена в виде большого количества элементарных конденсаторов. Максимум потенциала находится в середине линии, следовательно, через каждый конденсатор и заземления потечет ток от середины влево – одного направления, вправо – противоположного направления.

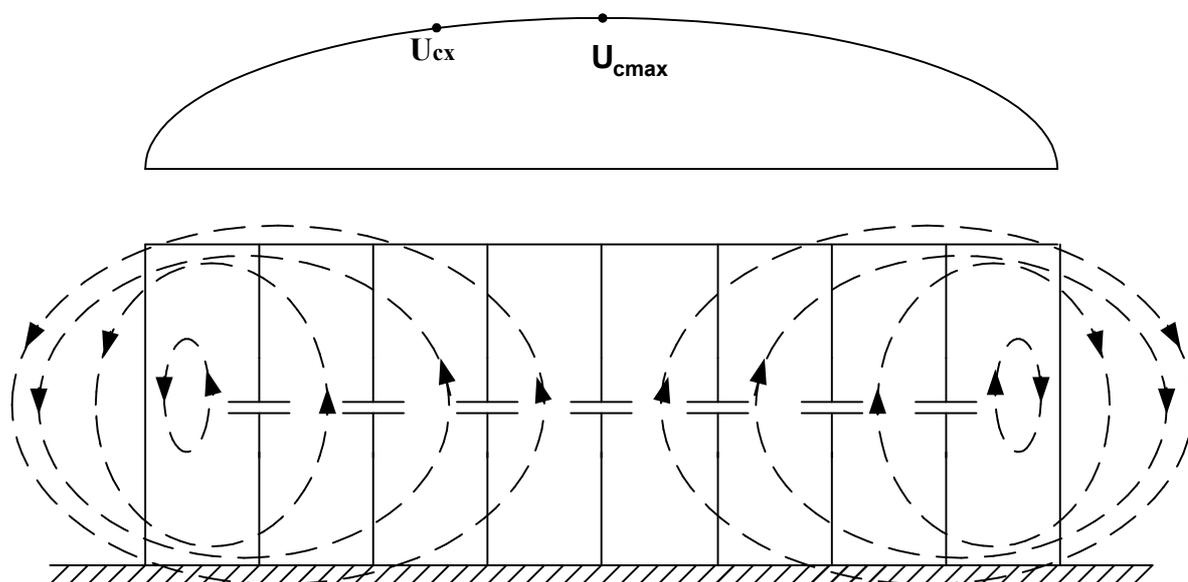


Рис. 3.4. Схема замещения смежной линии

Ток в линии определяется суммой элементарных токов, протекающих через конденсаторы, поэтому он равен нулю в середине и максимален по концам линии.

Анализ кривых U_{cx} и I_{cx} , изображенных на рис. 3.3, позволяет сделать вывод, что при электрическом влиянии самым опасным режимом работы смежной линии **С** является первый режим (линия изолирована от земли), так как при этом режиме напряжение относительно земли имеет максимальное значение.

3.3. Анализ кривых U_{cx} , I_{cx} при магнитном влиянии

При магнитном влиянии $\dot{U}_K = 0$, поэтому уравнения (3.19), (3.20) получают вид

$$\dot{U}_{cx} = \dot{U}_{co} \operatorname{Ch}\gamma\chi - z_{cb} (\dot{I}_{co} + K_1 \dot{I}_K) \operatorname{Sh}\gamma\chi; \quad (3.27)$$

$$\dot{I}_{cx} = -\frac{\dot{U}_{co}}{z_{cb}} \operatorname{Sh}\gamma\chi + (\dot{I}_{co} + K_1 \dot{I}_K) \operatorname{Ch}\gamma\chi - K_1 \dot{I}_K. \quad (3.28)$$

Анализ кривых U_{cx} и I_{cx} произведен для тех же трех режимов работы смежной линии, представленных на рис. 3.2. Для первого режима при $x = 0$ и $x = \ell$ ток I_{cx} равен нулю, следовательно, $\dot{I}_{co} = 0$; второе неизвестное U_{co} найдем после подстановки в формулу (3.28) значения $I_{cx} = I_{co} = 0$ при $x = \ell$:

$$0 = -\frac{\dot{U}_{co}}{z_{cb}} \operatorname{Sh}\gamma\ell + K_1 I_K \operatorname{Ch}\gamma\ell - K_1 \dot{I}_K, \text{ отсюда}$$

$$\dot{U}_{co} = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \left(\frac{\operatorname{Ch}\gamma\ell - 1}{\operatorname{Sh}\gamma\ell} \right). \quad (3.29)$$

Помня, что $\operatorname{Ch}\gamma\ell = \operatorname{Ch}^2 \frac{\gamma\ell}{2} + \operatorname{Sh}^2 \frac{\gamma\ell}{2}$, $\operatorname{Sh}\gamma\ell = 2\operatorname{Sh} \frac{\gamma\ell}{2} \operatorname{Ch} \frac{\gamma\ell}{2}$, $\operatorname{Ch}^2 \frac{\gamma\ell}{2} - \operatorname{Sh}^2 \frac{\gamma\ell}{2} = 1$, после преобразований получим $\frac{\operatorname{Ch}\gamma\ell - 1}{\operatorname{Sh}\gamma\ell} = \operatorname{th} \frac{\gamma\ell}{2}$, тогда

$$\dot{U}_{co} = z_{cb} K_1 I_K \operatorname{th} \frac{\gamma\ell}{2}. \quad (3.30)$$

После подстановки значения \dot{U}_{co} из (3.30) и $\dot{I}_{co} = 0$ в формулы (3.27), (3.28) будем иметь

$$\dot{U}_{cx} = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \left(\operatorname{th} \frac{\gamma\ell}{2} \operatorname{Ch}\gamma\chi - \operatorname{Sh}\gamma\chi \right); \quad (3.31)$$

$$\dot{I}_{cx} = K_1 \dot{I}_K \left(\operatorname{Ch}\gamma\chi - \operatorname{th} \frac{\gamma\ell}{2} \operatorname{Sh}\gamma\chi - 1 \right). \quad (3.32)$$

Если $x = 0$, $\dot{U}_{cx} = \dot{U}_{co}$; при $x = \ell$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{cx} &= z_{cb} K_1 \dot{I}_K \left(\operatorname{th} \frac{\gamma \ell}{2} \operatorname{Ch} \gamma \ell - \operatorname{Sh} \gamma \ell \right) = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \times \\ &\times \left[\frac{\operatorname{Sh} \frac{\gamma \ell}{2}}{\operatorname{Ch} \frac{\gamma \ell}{2}} \left(\operatorname{Ch}^2 \frac{\gamma \ell}{2} + \operatorname{Sh}^2 \frac{\gamma \ell}{2} \right) - 2 \operatorname{Sh} \frac{\gamma \ell}{2} \operatorname{Ch} \frac{\gamma \ell}{2} \right] = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \times \\ &\times \frac{\operatorname{Sh} \frac{\gamma \ell}{2}}{\operatorname{Ch} \frac{\gamma \ell}{2}} \left(\operatorname{Ch}^2 \frac{\gamma \ell}{2} + \operatorname{Sh}^2 \frac{\gamma \ell}{2} - 2 \operatorname{Ch}^2 \frac{\gamma \ell}{2} \right) = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \times \\ &\times \operatorname{th} \frac{\gamma \ell}{2} \left(-\operatorname{Ch}^2 \frac{\gamma \ell}{2} + \operatorname{Sh}^2 \frac{\gamma \ell}{2} \right) = -z_{cb} K_1 \dot{I}_K \operatorname{th} \frac{\gamma \ell}{2} = -\dot{U}_{co}. \end{aligned}$$

Получим значение \dot{U}_{cx} в середине линии, то есть при $x = \ell/2$, оно будет равно

$$\dot{U}_{cx} = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \left(\frac{\operatorname{Sh} \frac{\gamma \ell}{2}}{\operatorname{Ch} \frac{\gamma \ell}{2}} \operatorname{Ch} \frac{\gamma \ell}{2} - \operatorname{Sh} \frac{\gamma \ell}{2} \right) = 0.$$

Вид кривых \dot{U}_{cx} и I_{cx} для первого режима представлен на рис. 3.5 линиями с цифрой один.

Найдем значения U_{co} и I_{co} для второго режима работы смежной линии, при $x = 0$, $I_{cx} = I_{co} = 0$ (начало линии изолировано); если $x = \ell$, то $U_{cx} = 0$ (конец линии заземлен). Подставляя начальные условия в формулу (3.27), запишем

$$0 = \dot{U}_{co} \operatorname{Ch} \gamma \ell - z_{cb} K_1 \dot{I}_K \operatorname{Sh} \gamma \ell;$$

отсюда

$$\dot{U}_{co} = z_{cb} K_1 \dot{I}_K \operatorname{th} \gamma \ell. \quad (3.33)$$

С учетом выражения (3.33) и $I_{co} = 0$, формулы (3.27) и (3.28) примут вид

$$\dot{U}_{cx} = Z_{CB} K_1 \dot{I}_K (\text{th}\gamma\ell \text{Ch}\gamma x - \text{Sh}\gamma x); \quad (3.34)$$

$$\dot{I}_{cx} = K_1 \dot{I}_K (\text{Ch}\gamma x - \text{th}\gamma\ell \text{Sh}\gamma x - 1). \quad (3.35)$$

Чтобы построить кривую (3.34), сравним значения U_{co} при первом и втором режимах. Для первого режима из выражения (3.30) $\dot{U}_{co1} = Z_{CB} K_1 \dot{I}_K \text{th}(\gamma\ell/2)$; для частоты 50 Гц величина $\gamma\ell/2$ очень мала, например, для контактного провода МФ-100 при его длине $\ell=100$ км $\gamma=(1,8+j6,8)10^{-3}$, 1/км, то есть $\gamma \ll 1$. При $x \rightarrow 0$ предел $\text{th}x/x=1$, поэтому $\text{th}(\gamma\ell/2) = \gamma\ell/2$. Принимая к сведению вышеизложенное, получаем

$$\dot{U}_{co1} = \frac{Z_{CB} K_1 \gamma \ell \dot{I}_K}{2} = \sqrt{Z_c Y_c} \cdot \frac{Z_K}{Z_c} \times \sqrt{\frac{Z_c}{Y_c}} \cdot \frac{\dot{I}_K \ell}{2} = Z_{KC} \dot{I}_K \frac{\ell}{2}. \quad (3.36)$$

После аналогичных преобразований, напряжение в начале линии при втором режиме, определяемое формулой (3.33), будет равно

$$\dot{U}_{co2} = Z_{KC} \cdot \dot{I}_K \cdot \ell. \quad (3.37)$$

Сравнивая U_{co1} и U_{co2} , видим, что при втором режиме напряжение в начале линии в два раза больше, чем при первом режиме. Легко доказать, что кривую 2 (рис. 3.5, а) можно получить, если увеличить все ординаты кривой 1 на одну и ту же величину U_{co1} . Ток в линии, определяемый выражением (3.35), представлен кривой 2 на рис. 3.5, б. При определении U_{co} и I_{co} , для третьего режима учтем, что при $x=0$ $U_{cx}=U_{co}=0$ и при $x=\ell$ $U_{cx}=0$, так как начало и конец линии заземлены. Читателю предлагается убедиться в том, что при третьем режиме напряжение U_{cx} во всех точках равно нулю (кривая 3, рис. 3.5, а), а ток по всей длине одинаков и равен $\dot{I}_{cx} = -K_1 \cdot \dot{I}_K$ (кривая 3, рис. 3.5, б). Анализ кривых (рис. 3.5, а) приводит к выводу о том, что наибольший потенциал при магнитном влиянии появляется при втором режиме работы смежной линии.

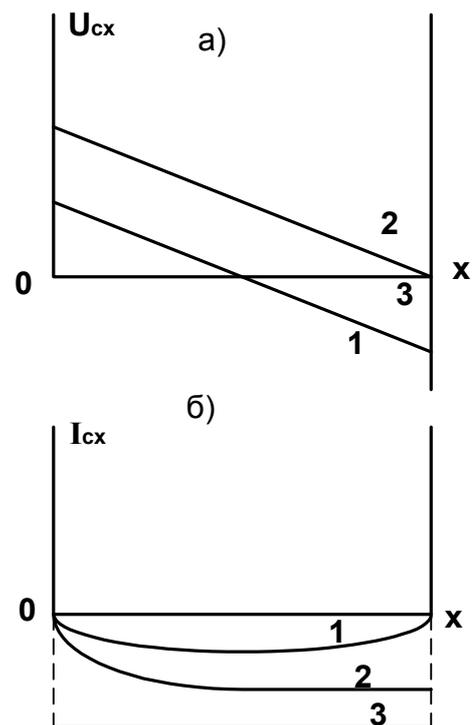


Рис. 3.5. Кривые U_{cx} и I_{cx} при магнитном влиянии

Итак, при электрическом влиянии опасное напряжение возникает при первом режиме работы смежной линии, а при магнитном влиянии – при втором режиме.

4. ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ОПАСНЫХ И МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

4.1. Расчет опасных влияний

В смежной линии в общем случае могут возникать все три вида влияний: электрическое, магнитное и гальваническое с соответствующими ЭДС $U_{\text{э}}$, $U_{\text{м}}$, $U_{\text{г}}$. Результирующее значение опасного наведенного потенциала определяется формулой

$$U_{\text{оп}} = \sqrt{U_{\text{э}}^2 + U_{\text{м}}^2 + U_{\text{г}}^2}. \quad (4.1)$$

По этой формуле рассчитывается опасное напряжение для однопроводной воздушной смежной линии. Если линия двухпроводная, то в формуле (4.1) будет отсутствовать $U_{\text{г}}$. Для кабельных однопроводных линий $U_{\text{оп}} = \sqrt{U_{\text{м}}^2 + U_{\text{г}}^2}$, так как эти линии электрическому влиянию не подвержены; в случае двухпроводных кабельных линий $U_{\text{оп}} = U_{\text{м}}$, с учетом (3.37)

$$\dot{U}_{\text{м}} = z \cdot I_{\text{вл}} \ell = j\omega M I_{\text{к}} \ell, \quad (4.2)$$

где z , M – сопротивление и коэффициент взаимной индукции между влияющей и смежной линиями; ℓ – длина гальванически неразделенного участка, примем, что эта длина равна расстоянию между подстанциями; $I_{\text{вл}}$ – ток влияющей линии, в нашем случае – ток контактной сети $I_{\text{к}}$

Расчет опасных напряжений $U_{\text{э}}$ при электрическом влиянии будет рассмотрен ниже, остановимся более подробно на расчете опасных напряжений при магнитном влиянии.

При определении опасного напряжения по формуле (4.2) расчетными режимами тяговой сети являются два режима: вынужденный и короткого замыкания; если влияющая линия – промышленная ЛЭП, то $I_{\text{вл}}$ – ток фазы. Ток контактной сети неодинаков по ее длине (рис. 4.1), при двустороннем питании может иметь на некоторых участках противоположное направление.

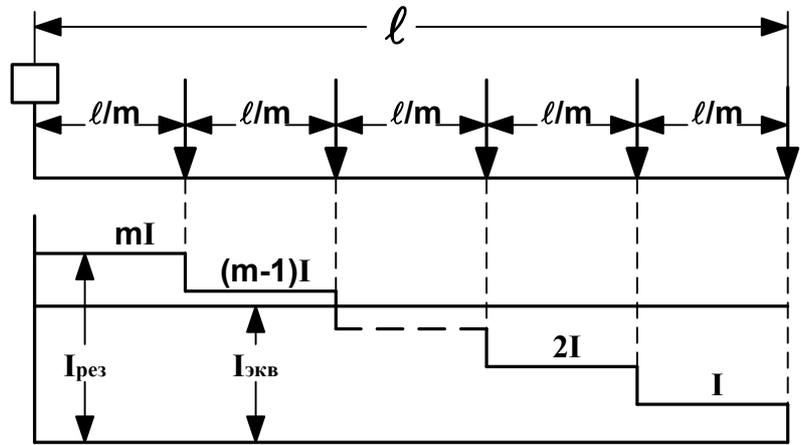


Рис. 4.1. Схема для определения эквивалентного тока при вынужденном режиме

Потенциал, наведенный в смежной линии, будет максимальным при условии, что токи на всех участках контактной сети имеют одинаковое направление, а это означает, что расчетным режимом работы контактной сети при определении опасного напряжения при магнитном влиянии будет одностороннее питание контактной сети. Таким образом, вынужденный режим – это такой режим, когда на подстанционной зоне находится максимум поездов и одна подстанция отключена (одностороннее питание).

Максимум поездов определяется по формуле $m=t_x/\theta_0$, где t_x – время хода поезда по зоне, θ_0 – минимальный интервал попутного следования. Чтобы найти опасное напряжение по формуле (4.2), можно было бы рассчитать по ней наведенные потенциалы от тока каждого участка контактной сети, а потом их сложить. В практических расчетах поступают иначе, вводя понятие эквивалентного тока. Это такой неизменный по всей зоне контактной сети ток, который наводит в смежной линии такую же ЭДС, как и действительные токи на всех участках контактной сети. Выразим этот ток, анализируя схему, находящуюся на рис. 4.1. Принимается, что все электровозы однотипны, количество их должно быть максимально возможным m , тогда ток $I_{рез} = m \cdot I$.

Выразим ЭДС, наведенную в смежной линии, двояко (через ток эквивалентный и через токи участков контактной сети):

$$E = M \cdot I_{экв} \cdot l = M \left[I \frac{l}{m} + 2I \frac{l}{m} + \dots + (m-1)I \frac{l}{m} + mI \frac{l}{m} \right],$$

или
$$I_{экв} \cdot m = (1 + 2 + \dots + m - 1) \cdot I + I_{рез} \cdot l \quad (4.3)$$

Выражение в скобках формулы (4.3) есть арифметическая прогрессия, у которой $a_1 = 1$; разность $q = 1$; $a_n = 1 + (m-2)$, ее сумма $S = (a_1 + a_n)(m-1)/2 = m(m-1)/2$, тогда $I_{экв} \cdot m = I_{рез} \cdot l/m \cdot m(m-1)/2 + I_{рез} \cdot l$, отсюда

$I_{\text{ЭКВ}} \cdot m = I_{\text{рез}} \cdot [(m-1)/2 + 1]$, или

$$I_{\text{ЭКВ}} = I_{\text{рез}} \cdot \frac{m+1}{2m}. \quad (4.4)$$

Принято $I_{\text{рез}}$ выражать через максимальную потерю напряжения в контактной сети, которая для расчетной схемы, изображенной на рис. 4.1, б, будет находиться на пантографе последнего электровоза,

$$\Delta U_{\text{max}} = \left[I_{\text{рез}} \frac{\ell}{m} + (m-1) I \frac{\ell}{m} + \dots + 2I \frac{\ell}{m} + I \frac{\ell}{m} \right] \cdot Z_{\text{oc}}, \quad (4.5)$$

где Z_{oc} – погонное составное сопротивление контактной сети,

или

$$\Delta U_{\text{max}} = \frac{\ell}{m} \left\{ I_{\text{рез}} + [(m-1) + \dots + 2 + 1] I \right\} Z_{\text{oc}},$$

то есть

$$\Delta U_{\text{max}} = \frac{\ell}{m} \left[I_{\text{рез}} + \frac{m(m-1)}{2} \cdot \frac{I_{\text{рез}}}{m} \right] Z_{\text{oc}},$$

после преобразований получим

$$I_{\text{рез}} = \frac{2m}{1+m} \cdot \frac{\Delta U_{\text{max}}}{Z_{\text{oc}} \cdot \ell}. \quad (4.6)$$

В формуле (4.6) $Z_{\text{oc}} = r_o \cdot \cos\varphi + x_o \cdot \sin\varphi$, где r_o , x_o – погонные активное и индуктивное сопротивления контактной сети, $\cos\varphi$ – коэффициент мощности первой гармоники электровоза, обычно $\cos\varphi = 0,82$. Величина $\Delta U_{\text{max}} = 8500$ В, если $\ell > 30$ км, $\Delta U_{\text{max}} = 5500$ В, если $15 < \ell < 30$ км.

Таким образом, для определения наведенного опасного напряжения в смежной линии нужно найти по формуле (4.6) $I_{\text{рез}}$, по формуле (4.4) $I_{\text{ЭКВ}}$ и подставить его значение в формулу (4.2) вместо влияющего тока.

Выше отмечалось, что смежная линия на электрических железных дорогах экранируется рельсами, оболочкой кабеля и другими устройствами, поэтому формула (4.2) приобретает вид

$$U_{\text{он}} = \omega M I_{\text{вл}} \ell r, \quad (4.7)$$

где $r = r_p \cdot r_{\text{об}} \cdot r_{\text{тр}}$, здесь r – общий коэффициент защитного действия, r_p – рельса; $r_{\text{об}}$ – оболочки кабеля; $r_{\text{тр}}$ – отсасывающего трансформатора и так далее.

Формула (4.2) получена при условии, что сближение смежной линии параллельное, на самом деле – оно сложное, поэтому

$$U_{on} = \omega I_{\text{вн}} \sum_{i=1}^n M_i \ell_i r_i, \quad (4.8)$$

где M_i , ℓ_i, r_i – соответственно коэффициент взаимной индукции на участке параллельного сближения (см. рис. 4.2), длина участка, коэффициент защитного действия для этого участка. Все величины в формуле (4.8) соответствуют частоте 50 Гц. Влияние других гармоник [3] учитывают введением в формулу (4.8) коэффициента формы кривой тока контактной сети $k_{\text{ф}}$, который принимается равным для воздушных линий и оболочек кабеля 1,15, а для кабельных жил – 1.

Значение M_i , Гн/км, можно найти по формуле [3]

$$M = 10^{-4} \ln \left(1 + \frac{6 \cdot 10^5}{a^2 \cdot \sigma \cdot f} \right), \quad (4.9)$$

где a – ширина сближения, м; σ – проводимость земли; f – частота тока.

Если элемент сближения косой (участок ℓ_2 , рис. 4.2), то вместо a_2 ставим эквивалентную ширину сближения [4], равную $a_3 = \sqrt{a_1 \cdot a_3}$.

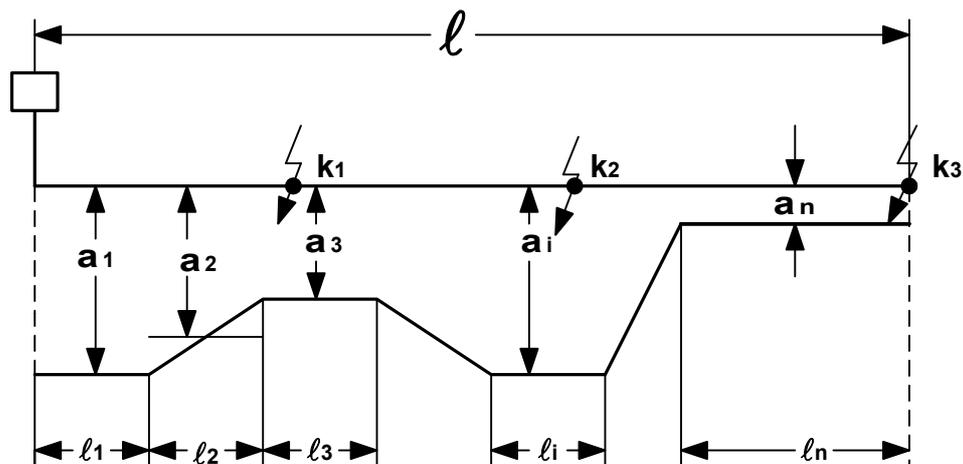


Рис. 4.2. Расчетная схема при сложном сближении

Другим расчетным режимом для определения опасного напряжения по формуле (4.8) является режим короткого замыкания (КЗ) в контактной сети.

Рассмотрим расчет тока КЗ $I_{\text{к}}$ при применении тяговых трансформаторов «звезда – треугольник», см. рис. 4.3.

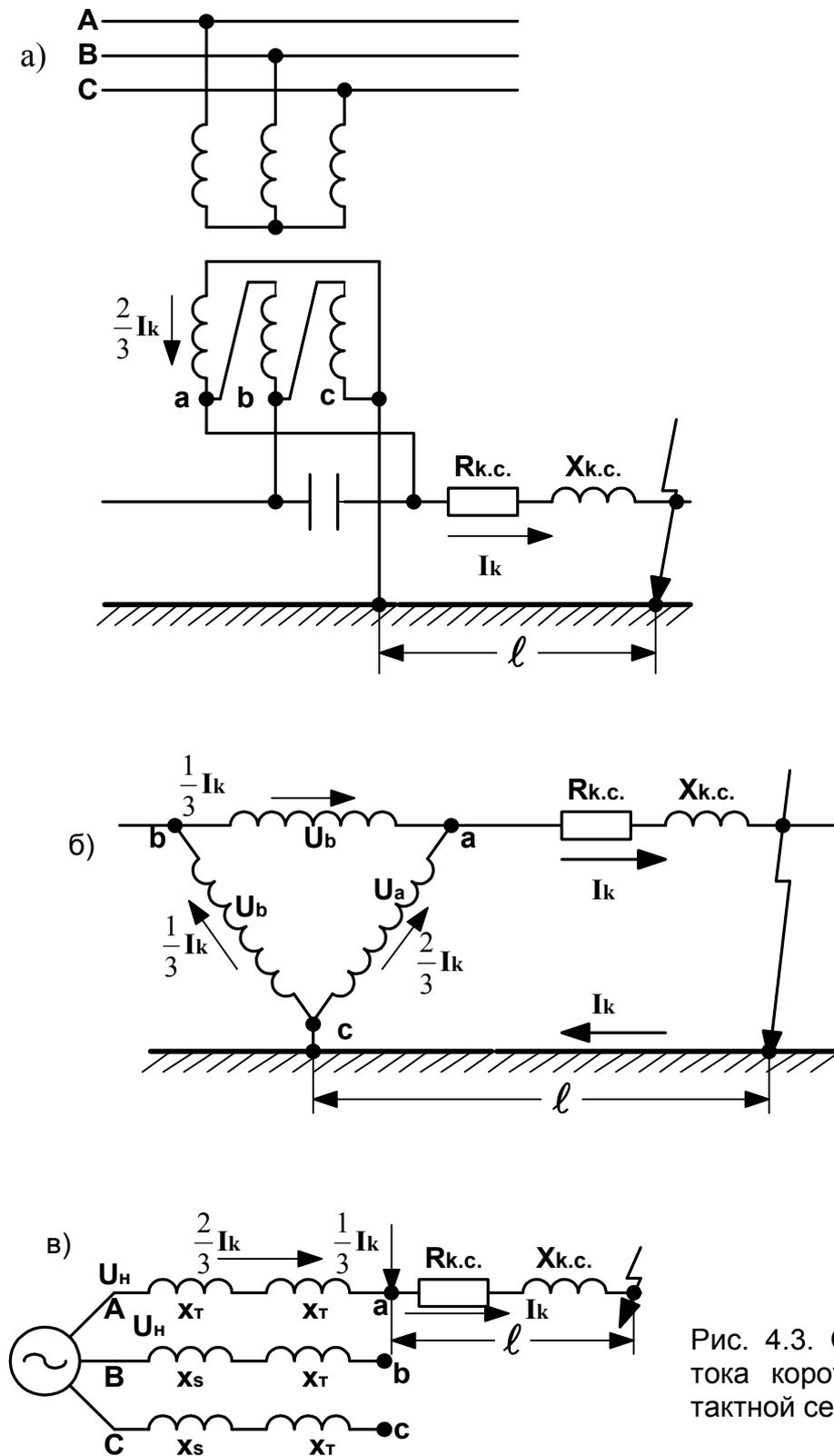


Рис. 4.3. Схемы для определения тока короткого замыкания в контактной сети

Пусть КЗ произошло на расстоянии l на правом плече подстанции (здесь напряжение фазы А, рис. 4.3, а). Ток короткого замыкания распределяется по обмоткам трансформатора и фазам системы так,

как показано на рис. 4.3, б. Тогда схема замещения при КЗ в фазе А будет представлена на рис. 4.3, в, где все параметры должны быть приведены к напряжению $U_H = 27,5$ кВ.

Запишем для фазы А, где произошло КЗ, очевидное равенство

$$\dot{U}_H = j \frac{2}{3} \dot{I}_K (X_S + X_T) + \dot{I}_K r_0 \ell + j \dot{I}_K x_0 \ell, \quad (4.10)$$

где r_0, x_0 – погонное активное и индуктивное сопротивление контактной сети; X_S, X_T – индуктивное сопротивление системы и подстанции, они определяются [2] следующим образом:

$$X_S = 3 \cdot \frac{U_H^2}{S_{K3}}, \quad X_T = 3 \cdot u_K \cdot \frac{U_H^2}{100 S_H}, \quad (4.11)$$

где S_{K3} – мощность КЗ на шинах подстанции, МВА; S_H – номинальная мощность трансформаторов подстанции, МВА; u_K – напряжение КЗ трансформатора в %; $U_H = 27,5$ кВ.

После подстановки указанных величин в формулу (4.10) получим

$$\dot{U}_H = I_K \left\{ \left[2U_H^2 \left(\frac{1}{S_{K3}} + \frac{u_K}{100 S_H} \right) + x_0 \ell \right] j + r_0 \ell \right\},$$

модуль тока

$$I_K = \frac{10^3 \cdot U_H}{\sqrt{\left[2U_H^2 \left(\frac{1}{S_{K3}} + \frac{u_K}{100 S_H} \right) + x_0 \ell \right]^2 + (r_0 \ell)^2}}. \quad (4.12)$$

Подставив значение I_K в формулу (4.8) вместо $I_{ВЛ}$, получим опасное напряжение при режиме КЗ.

Какое значение ℓ следует подставлять в формулу (4.12)? Чем дальше точка КЗ, тем меньше I_K , но больше $\sum M_i \ell_i$, т.е. сразу нельзя определить место КЗ, для которого $U_{оп}$ будет максимальным, поэтому намечают несколько точек короткого замыкания K_1, K_2, K_3 (рис. 4.2). Для каждой точки находят I_K , соответствующую сумму $\sum M_i \ell_i$, по формуле (4.8) рассчитывают значения $U_{оп}$, выбирая наибольшее для сравнения

с допустимыми нормами. Допустимые нормы опасных напряжений для вынужденного режима и режима КЗ для воздушных и кабельных смежных линий представлены в [3]. Например, допустимое напряжение для воздушной линии связи с деревянными опорами равно при вынужденном режиме 60 В, при режиме КЗ 2000 В, если время отключения тяговой сети защитой $t_0 < 0,15$ сек.

4.2. Расчет мешающих влияний

Во влияющих линиях, кроме тока частотой 50 Гц, могут быть токи гармонических составляющих, например, в контактной сети дорог переменного тока присутствуют все гармоники нечетного спектра. В фазах ЛЭП системы, от которой питаются тяговые подстанции переменного тока с трансформаторами "звезда - треугольник", имеются так же гармоники нечетного спектра, за исключением тех, которые кратны трем.

Каждая гармоника влияющей линии наведет в начале смежной, законченной в конце линии, ЭДС, определяемую по формуле

$$U_k = \omega_k M_k I_{в.к} \cdot \Gamma_{р.к} \cdot \Gamma_{об.к} \cdot \Gamma_{тр.к} \cdot \ell, \quad (4.13)$$

где ω_k – угловая частота, $\omega_k = 2\pi f_k$; M_k – коэффициент взаимной индукции гармоники, определяемый формулой (4.9); $I_{в.к}$ – влияющий ток гармоники порядка k ; $\Gamma_{р.к}$, $\Gamma_{об.к}$, $\Gamma_{тр.к}$ – коэффициенты защитного действия соответственно рельса, оболочки кабеля, отсасывающего трансформатора для k -й гармоники; ℓ – длина усиливающего участка (принимается для упрощения равной длине влияющей линии).

Одинаковые значения U_k разных частот, например, для $f = 50$ Гц и $f = 1000$ Гц, будут оказывать различное мешающее воздействие на линии связи, так как человеческое ухо неодинаково воспринимает звуковые сигналы различных частот, в частности, звуковые колебания частотой 50 Гц человеком практически не воспринимаются, а колебания частотой 1000 Гц для человека наиболее чувствительны.

Поэтому прежде чем находить эквивалентное значение всех U_k по формуле $U_э = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2}$, необходимо привести все

U_k к одному эталону, который учитывал бы различное воздействие частот на слуховой аппарат человека.

Эталон принято считать частоту 800 Гц; для приведения ЭДС любой частоты к ЭДС с частотой 800 Гц надо первую умножить на коэффициент

акустического воздействия p_k , зависимость которого от частоты представлена на рис. 4.4 или задается таблицей [3].

С учетом сказанного, эквивалентная ЭДС, называемая напряжением шума (или психометрическим напряжением) предстанет в виде

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (U_k \cdot p_k)^2}. \quad (4.14)$$

Формула (4.14) справедлива для однопроводных линий связи, причем, U_k есть продольная ЭДС, создающая мешающий ток в контуре провод–земля (или жила кабеля–земля).

На рис. 4.5 изображена схема двухпроводной линии связи: в начале линии – передающее устройство, в конце – приемное устройство.

Мешающий ток гармоника будет определяться разностью $U'_k - U''_k$, наведенных влияющей линией. Поэтому для определения $U_{\text{ш}}$ для двухпроводной линии нужно в формуле (4.14) вместо U_k подставить $U'_k - U''_k$. Эта разность очень мала,

так как провод 1 и провод 2 находятся практически на одинаковом расстоянии от влияющей линии (расстояние между проводами 0,4–0,6 м, расстояние до влияющей линии – десятки метров).

Отношение $(U'_k - U''_k)$ к среднему их значению $(U'_k + U''_k) / 2$ называется коэффициентом чувствительности η_k , то есть $\eta_k = \frac{(U'_k - U''_k)}{(U'_k + U''_k) / 2}$.

Так как $U'_k \approx U''_k$, то $\eta_k = \frac{U'_k - U''_k}{U'_k}$, откуда $(U'_k - U''_k) = U'_k \cdot \eta_k$, здесь

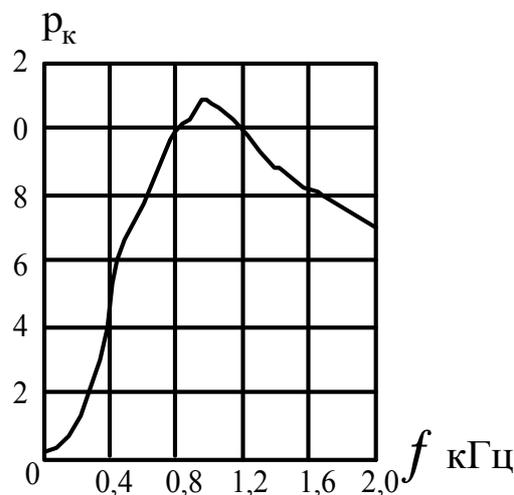


Рис. 4.4. Коэффициент акустического воздействия в зависимости от частоты

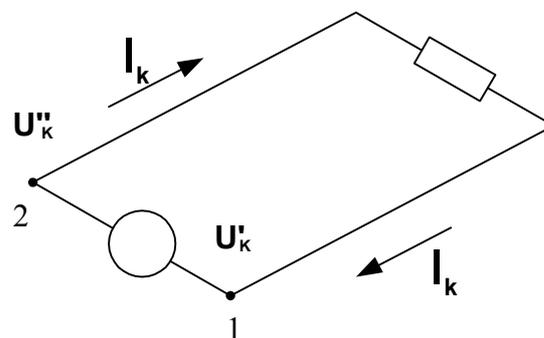


Рис. 4.5. Схема двухпроводной линии связи

\dot{U}_k находится по формуле (4.13). Напряжение шума для двухпроводной линии с учетом вышеизложенного будет определяться выражением

$$U_{ш} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (U_k p_k \eta_k)^2}. \quad (4.15)$$

Значение η_k можно брать из [3], оно колеблется в пределах 0,001–0,01. Для однопроводной линии связи $\eta_k = 1,0$. Указанные значения η_k говорят о том, что двухпроводная линия связи на два – три порядка менее чувствительна к помехам, чем однопроводная. Расчет напряжения шума по формуле (4.15) вызывает большие затруднения, так как количество гармоник, формирующих $U_{ш}$, может достигать нескольких десятков ($n=69$) [5]. Поэтому в практических расчетах используют упрощенную методику, идея которой заключается в замене всего спектра гармоник одной, так называемой определяющей гармоникой, с таким током, который наводит в линии связи такую же ЭДС шума, как и все гармоники. Порядок определяющей гармоники зависит [5] от количества путей на рассматриваемом участке, длины плеча тяговой сети, мощности тяговых трансформаторов и так далее. При одночастотном методе расчета все параметры рассчитывают для определяющей частоты и подставляют в формулу (4.13), причем, ток определяющей гармоники находят по выражению $I_{BK} = I_k \cdot K_{yc}$, где значение I_k берется из таблицы, изображенной в п. 3.2, а коэффициент усиления K_{yc} – по кривым рисунка п. 3.3 [5].

Если влияющая линия – ЛЭП трехфазного тока, проложенная вдоль линии связи и содержащая гармоники, – то необходимо по формуле (4.13) рассчитать для каждой гармоники значения наведенных напряжений шума в линии связи от каждой фазы $\dot{U}_{AK}, \dot{U}_{BK}, \dot{U}_{CK}$ по влияющим токам $\dot{I}_{AK}, \dot{I}_{BK}, \dot{I}_{CK}$. Затем производится их геометрическое суммирование [3]

$$\dot{U}_k = \dot{U}_{AK} + \dot{U}_{BK} + \dot{U}_{CK}. \quad (4.16)$$

Определив модули \dot{U}_k для влияющего диапазона частот, по формуле (4.15) находят результирующее напряжение шума. Диапазон влияющих частот можно определить по рис. 13, б [5].

Рассчитанные напряжения шума сравнивают с нормами [3]. Допустимые нормы зависят от типа линии связи. Например, для междугородной линии связи Министерства связи и МПС норма на усилительный участок равна 1,5 мВ.

5. ВЗАИМНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Тяговая сеть электрифицированных железных дорог состоит из нескольких проводов, находящихся под напряжением 27,5 кВ: контактная сеть одного и более путей, система питания линейных нетяговых потребителей КРД и ДПР, причем часто возникают ситуации, когда одна часть проводов находится под напряжением, а с другой – по тем или иным причинам напряжение снято.

С позиции электромагнитной совместимости и электробезопасности представляют интерес значения потенциалов обесточенных проводов, наведенных электрическим полем проводов, находящихся под напряжением.

5.1. Электрическое поле двух параллельных заряженных осей и двухпроводной линии

Введем понятие заряженной оси, под которой понимается тонкий, теоретически бесконечно длинный металлический проводник с зарядом τ на единицу длины. Известно [6], что напряженность электрического поля от заряженной оси на расстоянии r от нее определяется выражением (размерность В/км) $E = \tau/2\pi\epsilon_0 r$, где ϵ_0 – электрическая проницаемость окружающей среды. Потенциал поля на том же расстоянии r от оси равен

$$\varphi = -\int E dr = -\int \frac{\tau dr}{2\pi\epsilon_0 r} = -\frac{\tau \ln r}{2\pi\epsilon_0} + C = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{r} + C, \quad (5.1)$$

где C – постоянная интегрирования.

В итоге необходимо определить разницу потенциалов и производные от потенциалов по координатам (напряженность поля), для этого не надо определять величину C .

Пусть теперь имеются две параллельных заряженных оси: одна с зарядом τ , другая – с зарядом $(-\tau)$ (рис. 5.1).

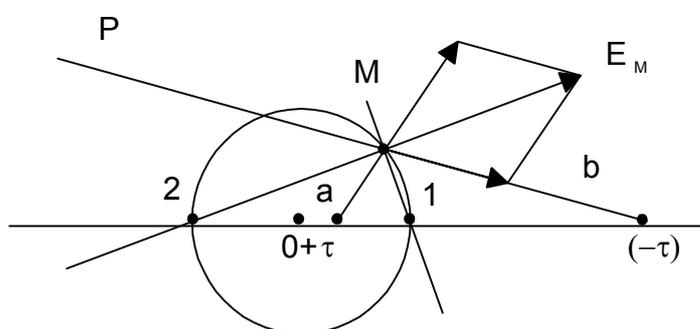


Рис. 5.1. Напряженность электрического поля от двух заряженных осей

В произвольной точке **M** на расстоянии **a** и **b** от заряженных осей потенциал φ_M в соответствии с формулой (5.1) (эта величина скалярная) определится выражением

$$\varphi_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{a} + \frac{(-\tau)}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{b} + C = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \cdot \frac{b}{a} + C. \quad (5.2)$$

Из выражения (5.2) следует, что величина φ_M остается постоянной при разных значениях **a** и **b**, но при одинаковом их отношении. Геометрическим местом точек, для которых отношение **a** и **b** постоянно, является окружность с центром в точке ноль, радиус которой можно найти геометрическим построением [6]. Для этого нужно провести биссектрисы углов ($\angle aMb$) и ($\angle PMa$), точки 1 и 2 пересечения биссектрис с линией, проходящей через заряженные оси, и точка **M** принадлежат искомой окружности. Положение точки ноль найдем, если диаметр окружности разделим пополам.

Рассмотрим электрическое поле двух проводников с одинаковым радиусом **r**, расстояние между которыми **d** (рис. 5.2).

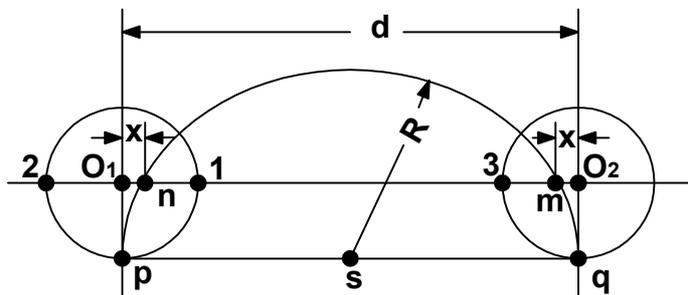


Рис. 5.2. Геометрические и электрические центры двухпроводной линии

Если сообщим левому проводу заряд τ на единицу длины, а правому – заряд $(-\tau)$, то в пространстве между проводниками возникнет электрическое поле. Расположим заряженные оси проводов так, чтобы поверхности проводов являлись эквипотенциальными (точки **n** и **m**). Точками O_1 и O_2 означают геометрические оси проводов. Напряженность электрического поля внутри проводов равна нулю, потенциалы точек 1 и 2 одинаковы, так как находятся на одной эквипотенциали. Исходя из этого условия, можно определить расстояние **x** между геометрическими центрами проводников и заряженными осями [6] по формуле

$$x = \frac{d}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - r^2}. \quad (5.3)$$

Здесь знак плюс соответствует положению точки m , а знак минус – точке n .

Положение заряженных осей (электрических осей проводов) можно вычислить также геометрическим построением (рис. 5.2), приняв $R = \rho S = Sq = \rho q / 2$.

Видно, что если $d \gg r$, то $x \ll r$. Например, $d = 1000$ мм, $r = 10$ мм, по формуле (5.3) получаем $x = 0.1$ мм.

Реальное расстояние между высоковольтными проводами на порядок выше, поэтому практически геометрические центры проводов совпадают с их электрическими осями.

5.2. Расчет потенциалов электрического поля, создаваемого одним проводом

Рассмотрим электрическое поле, создаваемое заряженной осью с зарядом τ на единицу длины, расположенной над плоской проводящей поверхностью (землей), для чего определим характеристики поля в верхней полуплоскости (диэлектрика, в нашем случае – в воздухе, рис. 5.3).

Для решения задачи применим метод зеркальных изображений, суть которого заключается в следующем. Заряд τ создаст в точке M некий потенциал. Так как вследствие электростатической индукции от заряда τ на поверхности земли выступают заряды, которые в точке M создают другой потенциал, то суммарное значение потенциала в этой точке φ_M будет равно сумме указанных двух потенциалов.

Согласно положениям электротехники [6], если поместить на расстоянии h от поверхности земли такой же заряд τ , но с обратным знаком (точка $1'$), то оба заряда τ и $(-\tau)$ наведут в точке M тот же потенциал φ_M . Таким образом, φ_M , в соответствии с формулой (5.2), будет равен

$$\varphi_M = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{1}{a_{1M}} + \frac{(-\tau)}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{1}{b_{1M}} = \tau q \ln \frac{b_{1M}}{a_{1M}}, \quad (5.4)$$

где $q = \frac{1}{2\pi \epsilon_0}$.

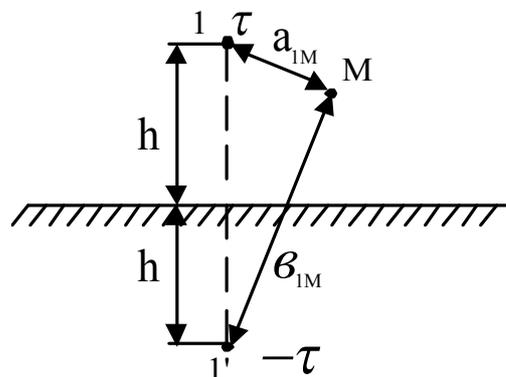


Рис. 5.3. Схема для пояснения метода зеркальных изображений

Принимаем, что геометрические и электрические оси проводов совпадают, тогда a_{1M} , b_{1M} – это расстояния от точки М до геометрических центров проводов.

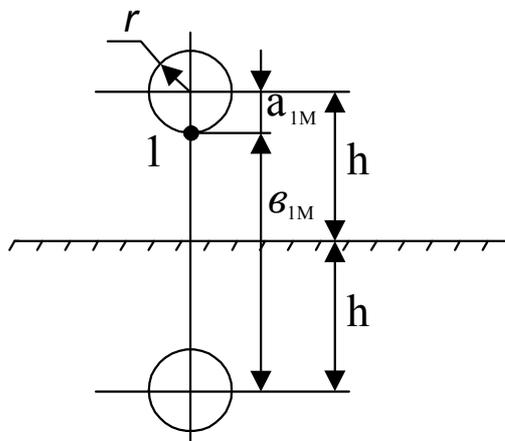


Рис. 5.4. Схема для определения потенциала на поверхности провода

Если поместим точку М на поверхность провода с радиусом r (точка 1, рис. 5.4), то $a_{1M} = r$; $b_{1M} = 2h - r = 2h$; так как $h \gg r$, то

$$\varphi_1 = \tau q \ln \frac{2h}{r}. \quad (5.5)$$

В формулах (5.4), (5.5) величины

$$q \ln \frac{b_{1M}}{a_{1M}} = \alpha_{1M}, \quad (5.6)$$

$$q \ln \frac{a_{11}}{b_{11}} = q \ln \frac{2h}{r} = \alpha_{11} \quad (5.7)$$

называют взаимными и собственными потенциальными коэффициентами.

5.3. Расчет потенциала смежного провода, наведенного электрическим полем влияющего провода

В качестве влияющего провода возьмем одиночный контактный про-

вод К. Заданы: потенциал контактного провода φ_K , радиусы проводов, расстояния между проводами, расчетная схема, представленная на рис. 5.5. Требуется найти потенциал смежного провода φ_C . Потенциалы φ_K , φ_C и линейные заряды проводов τ_K и τ_C будут связаны в соответствии с разд. 5.2 данного пособия следующим образом

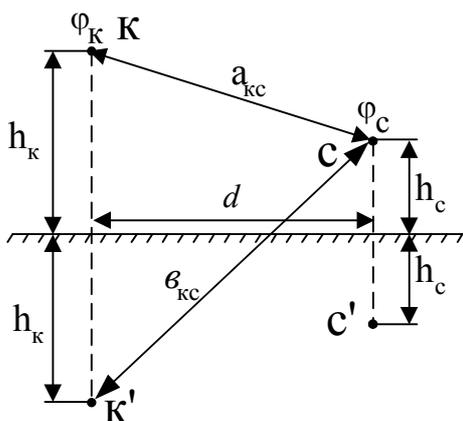


Рис. 5.5. Расчетная схема для одного контактного провода

$$\varphi_K = \tau_K \alpha_{KK} + \tau_C \alpha_{KC}, \quad (5.8)$$

$$\varphi_C = \tau_K \alpha_{CK} + \tau_C \alpha_{CC},$$

где α_{KK} и $\alpha_{CK} = \alpha_{KC}$ будут определяться по формулам (5.7) и (5.6) соответственно.

Уравнения (5.8) называются уравнениями Максвелла.

Как правило, заряд смежной линии очень мал (линия связи или другие низковольтные провода) или совсем отсутствует (провод отключен

от источника питания и изолирован), поэтому принимаем $\tau_c = 0$; тогда из первого уравнения системы (5.8) получаем $\tau_k = \varphi_k / \alpha_{kk}$, а из второго уравнения

$$\varphi_c = \frac{\varphi_k \alpha_{kc}}{\alpha_{kk}}, \quad (5.9)$$

$$\alpha_{kc} = q \ln \frac{b_{kc}}{a_{kc}}, \quad \alpha_{kk} = q \frac{2h_k}{r_k}, \quad (5.10)$$

где r_k – радиус контактного провода.

Подставив значения α_{kc} и α_{kk} в формулу (5.9), получим

$$\varphi_c = \varphi_k \frac{\ln(b_{kc} / a_{kc})}{\ln(2h_k / r_k)}. \quad (5.11)$$

Далее, по данным рис. 5.5 находим

$$\ln \frac{b_{kc}}{a_{kc}} = \ln \frac{\sqrt{d^2 + (h_k + h_c)^2}}{\sqrt{d^2 + (h_k - h_c)^2}} = \frac{1}{2} \ln \frac{d^2 + (h_k + h_c)^2}{d^2 + (h_k - h_c)^2} = \quad (5.12)$$

$$\frac{1}{2} \ln \frac{1 + 2(h_k h_c) / (d^2 + h_k^2 + h_c^2)}{1 - 2(h_k h_c) / (d^2 + h_k^2 + h_c^2)} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + x}{1 - x};$$

значение x очевидно из формулы (5.12), в нашем случае $x < 1$. Логарифмическую функцию можно разложить в ряд

$$\ln \frac{b_{kc}}{a_{kc}} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + x}{1 - x} = \frac{1}{2} \cdot 2 \left(x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \dots \right). \quad (5.13)$$

Так как $x < 1$, то в формуле (5.13) с достаточной степенью точности можно ограничиться первым членом, то есть

$$\ln \frac{b_{kc}}{a_{kc}} = x = \frac{2h_k h_c}{d^2 + h_k^2 + h_c^2}. \quad (5.14)$$

Обозначив $\frac{2}{\ln(2h_K / r_K)} = p$, с учетом формулы (5.14) выражение (5.11) приведем к виду

$$\varphi_c = \varphi_K \frac{h_K \cdot h_c}{d^2 + h_K^2 + h_c^2} \cdot p. \quad (5.15)$$

Пример. Напряжение контактной сети $U_K = 25000$ В, $\varphi_K = U_K$; $h_K = 6$, 25 м; $h_c = 6$ м; провод МФ-100, $r_K = 0,056$ м. По формуле (69) при $d=15$ м $U_c = \varphi_c = 812$ В.

5.4. Расчет потенциалов, наведенных электрическим полем в изолированных проводах контактной сети и линии ДПР

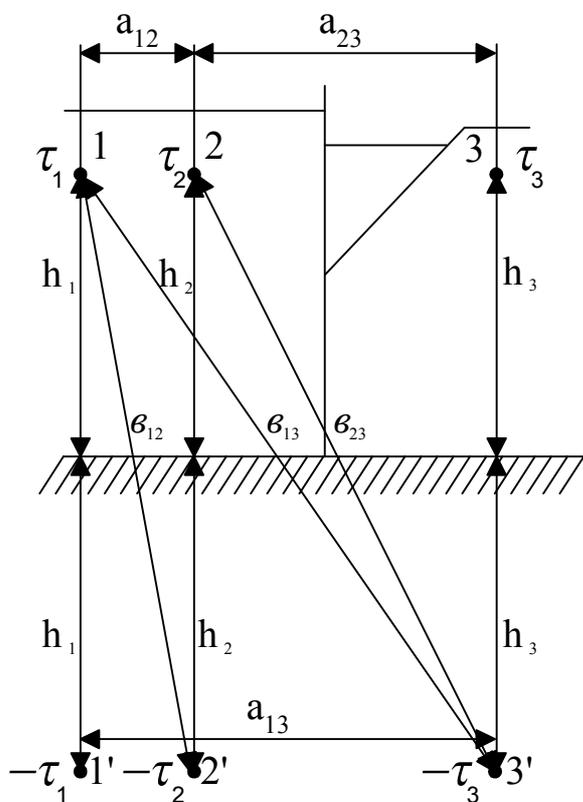


Рис. 5.6. Расчетная схема для однопутного участка

На рис. 5.6 представлена расчетная схема для однопутного участка контактной сети с цепной подвеской (точка 3) и проводами ДПР (точки 1 и 2), расположенными с полевой стороны опор.

Для упрощения выводов трос и провод контактной сети заменяется одним эквивалентным проводом [9], его радиус находится по формуле

$$r_э = \sqrt[n]{nr_0 r_p^{n-1}}, \quad (5.16)$$

где n – количество проводов; r_0 – радиус одного провода; r_p – радиус окружности, по которой располагаются провода расщепленной фазы.

В нашем случае $n = 2$, $r_0 = r_{cp} = 0,0056$ м (средний радиус контактного провода и несущего троса); $r_p = a_{cp} / 2 = 1,6 / 2 = 0,8$ м (a_{cp} – среднее расстояние между контактным проводом и несущим тросом). После

вычисления по формуле (5.16) получим $r_э = 0,095$ м. Для системы из трех проводов, представленных на рис. 5.6 с зарядами на единицу длины τ_1, τ_2, τ_3 и потенциалами $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, уравнения Максвелла запишутся в виде

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \tau_1 \alpha_{11} + \tau_2 \alpha_{12} + \tau_3 \alpha_{13}; \\
\varphi_2 &= \tau_1 \alpha_{21} + \tau_2 \alpha_{22} + \tau_3 \alpha_{23}; \\
\varphi_3 &= \tau_1 \alpha_{31} + \tau_2 \alpha_{32} + \tau_3 \alpha_{33},
\end{aligned}
\tag{5.17}$$

где α_{kk} – собственные потенциальные коэффициенты, определяемые по формуле (5.7); α_{km} – взаимные потенциальные коэффициенты, вычисляемые по формуле (5.6). Не трудно доказать, что $\alpha_{km} = \alpha_{mk}$, т.е. $\alpha_{12} = \alpha_{21}$, $\alpha_{13} = \alpha_{31}$, $\alpha_{23} = \alpha_{32}$.

1-й случай

Линия ДПР – под напряжением, с контактного провода напряжение снято, он изолирован. Необходимо найти потенциал этого провода φ_3 . В уравнениях (5.17) $\dot{\varphi}_1 = 27$ кВ, $\dot{\varphi}_2 = 27e^{j120}$, так как $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ – напряжения двух плеч питания тяговой подстанции, угол между которыми 120 градусов и от которых питаются провода 1 и 2 ДПР. Поскольку провод 3 отключен, $\tau_3 = 0$, с учетом этого перепишем первые два уравнения системы (5.17)

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \tau_1 \alpha_{11} + \tau_2 \alpha_{12}; \\
\varphi_2 &= \tau_1 \alpha_{12} + \tau_2 \alpha_{22},
\end{aligned}
\tag{5.18}$$

отсюда найдем неизвестные заряды τ_1 и τ_2

$$\tau_1 = \frac{\varphi_1 \alpha_{22} - \varphi_2 \alpha_{12}}{\alpha_{11} \alpha_{22} - \alpha_{12}^2}; \quad \tau_2 = \frac{\varphi_2 \alpha_{11} - \varphi_1 \alpha_{12}}{\alpha_{11} \alpha_{22} - \alpha_{12}^2}.$$

После подстановки значений τ_1, τ_2, τ_3 в последнее уравнение системы (5.17) получим

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{\dot{\varphi}_2 (\alpha_{11} \alpha_{23} - \alpha_{12} \alpha_{13}) - \dot{\varphi}_1 (\alpha_{12} \alpha_{23} - \alpha_{13} \alpha_{22})}{\alpha_{11} \alpha_{22} - \alpha_{12}^2}.
\tag{5.19}$$

Высота подвески эквивалентных проводов контактной сети и линии ДПР находится в пределах 7,5–8,5 м, примем $h_1 = h_2 = h_3 = 8$ м. При габарите опор контактной сети 3,1 м, диаметре опоры 0,5 м, будем иметь: $a_{12} = 1,6$ м; $a_{23} = 5,2$ м; $a_{13} = 6,8$ м.

Поэтому $b_{12} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 6,8^2} = 16,1$ м; $b_{23} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 5,2^2} = 16,8$ м; $b_{13} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 6,8^2} = 17,4$ м. Для линий ДПР, как правило, используют провода А-50, А-70, примем их радиусы $r_1 = r_2 = 5,7 \cdot 10^{-3}$ м, тогда по формулам (5.6) и (5.7) рассчитываем

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = q \ln(2 \cdot 8 / 0,0057) = 7,93q ; \quad \alpha_{33} = q \ln(2 \cdot 8 / 0,095) = 5,13q ;$$

$$\alpha_{12} = q \ln(16,1 / 1,6) = 2,3q ; \quad \alpha_{23} = q \ln(16,8 / 5,2) = 1,17q ;$$

$$\alpha_{13} = q \ln(17,4 / 6,8) = 0,94q .$$

В результате расчета по формуле (5.19) получим $\dot{\varphi}_3 = 0,75 + j3,8$ или $\varphi_3 = 3,9$ кВ.

2-й случай

Контактный провод 3 под напряжением, провода 1 и 2 отключены и изолированы, найти потенциалы проводов 1 и 2 системы ДПР. Расчетная схема (рис. 5.6) и уравнения (5.17) такие же, как для первого случая. Так как провода 1 и 2 отключены от источника питания, то $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = 0$. Из последнего уравнения системы (5.17) $\tau_3 = \varphi_3 / \alpha_{33}$, поэтому $\varphi_1 = \varphi_3 \alpha_{13} / \alpha_{33}$, $\varphi_2 = \varphi_3 \alpha_{23} / \alpha_{33}$ или $\varphi_1 = (27,5 \ 0,94) / 5,13 = 5,0$ кВ; $\varphi_2 = (27,5 \ 1,17) / 5,13 = 6,3$ кВ.

Рассмотрим расчет потенциалов в проводах тяговой сети двухпутного участка (рис. 5.7), для которого уравнения Максвелла предстанут в виде

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha_{11} \tau_1 + \alpha_{12} \tau_2 + \alpha_{13} \tau_3 + \alpha_{14} \tau_4 ; \\ \varphi_2 &= \alpha_{12} \tau_1 + \alpha_{22} \tau_2 + \alpha_{23} \tau_3 + \alpha_{24} \tau_4 ; \\ \varphi_3 &= \alpha_{13} \tau_1 + \alpha_{23} \tau_2 + \alpha_{33} \tau_3 + \alpha_{34} \tau_4 ; \\ \varphi_4 &= \alpha_{14} \tau_1 + \alpha_{24} \tau_2 + \alpha_{34} \tau_3 + \alpha_{44} \tau_4 . \end{aligned} \quad (5.20)$$

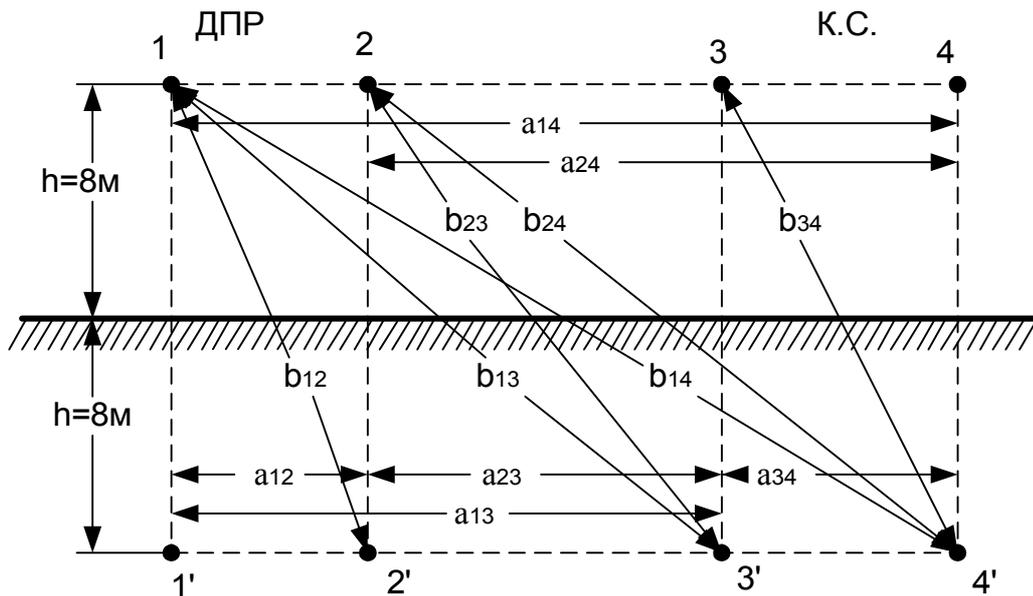


Рис. 5.7. Расчетная схема для двухпутного участка

3-й случай

Контактный провод 3 обесточен и изолирован, другой провод 4 и провода 1 и 2 системы ДПР находятся под напряжением. Задано: $\dot{\varphi}_1 = 27,5$ кВ, $\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_4 = 27,5e^{j120}$, необходимо найти $\dot{\varphi}_3$.

Так как провод 3 отключен, то $\tau_3 = 0$. Значения потенциальных коэффициентов, кроме α_{14} , α_{24} , α_{34} , такие же, как в первом случае. Найдем значения α_{14} , α_{24} , α_{34} , для схемы, расположенной на рис. 5.7. Приняв расстояние между осями путей на перегоне $a_{34} = 4,1$ м и $h = 8$ м, находим

$$b_{14} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 10,8^2} = 19,4 \text{ м};$$

$$b_{24} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 9,3^2} = 18,5 \text{ м};$$

$$b_{34} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 4,1^2} = 16 \text{ м};$$

$$\alpha_{44} = \alpha_{33} = 5,13 \text{ q},$$

по формуле (5.6) вычисляем $\alpha_{14} = 0,58$ q; $\alpha_{24} = 0,69$ q; $\alpha_{34} = 1,4$ q. Подставив в первое, второе и четвертое системы уравнения (5.20) значения α и учитывая, что $\tau_3 = 0$, получим

$$27,5 = (7,93\tau_1 + 2,3\tau_2 + 0,58\tau_4) \text{ q};$$

$$27,5 e^{j120} = (2,3\tau_1 + 7,93\tau_2 + 0,69\tau_4) \text{ q}; \quad (5.21)$$

$$27,5 e^{j120} = (0,58\tau_1 + 0,69\tau_2 + 5,13\tau_4) \text{ q}.$$

Решив систему уравнений (5.21), находим значения τ_1 , τ_2 , τ_4 и подставляем эти значения в третье уравнение систем (5.20), в результате получим $\dot{\varphi}_3 = -2,9 + j8,47$, то есть $\varphi_3 = 8,9$ Кв.

4-й случай

Провод 4 (рис. 5.7) обесточен и изолирован, это значит, что $\tau_4 = 0$. Подставляем это условие и соответствующие значения потенциальных коэффициентов α в первые три уравнения (5.20), получим

$$27,5 = (7,93\tau_1 + 2,3\tau_2 + 0,94\tau_3) \text{ q};$$

$$27,5 e^{j120} = (2,3\tau_1 + 7,93\tau_2 + 1,17\tau_3) \text{ q}; \quad (5.22)$$

$$27,5 e^{j120} = (0,94\tau_1 + 1,17\tau_2 + 5,13\tau_3) \text{ q}.$$

Решив систему уравнений (5.22) и определив значения τ_1, τ_2, τ_3 , подставляем их в последнее уравнение системы (5.20), после чего вычислим $\phi_4 = 3,15 + j7,15$, или $\phi_4 = 7,8$ кВ.

Причиной того, что $\phi_4 < \phi_3$ является то, что провод 4 находится на большем расстоянии от проводов системы ДПР, чем провод 3. Более подробно примеры для схемы, представленной на рис. 5.7 рассмотрены в [7].

5.5. Расчет потенциалов точек электрического поля, создаваемого трехфазной линией переменного тока

Потенциал произвольной точки 4 (рис. 5.8) будет равен сумме потенциалов, создаваемых каждым проводом и его зеркальным изображением. Примем высоту подвески всех проводов одинаковой и равной H , радиус проводов – r . Потенциал в указанной точке от провода 1 можно

найти по формуле (5.4) $\phi_{41} = \tau_1 q \ln \frac{b_{14}}{a_{14}}$, аналогично от провода 2

$\phi_{42} = \tau_2 q \ln \frac{b_{24}}{a_{24}}$, от провода 3 $\phi_{43} = \tau_3 q \ln \frac{b_{34}}{a_{34}}$. Составляющая потенциала

в точке 4 от собственного заряда отсутствует, так как заряд точки 4 $\tau_4 = 0$.

Следовательно

$$\phi_4 = \phi_{41} + \phi_{42} + \phi_{43} = \tau_1 q \ln \frac{b_{14}}{a_{14}} + \tau_2 q \ln \frac{b_{24}}{a_{24}} + \tau_3 q \ln \frac{b_{34}}{a_{34}}, \quad (5.23)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – заряды проводов, зависящие от их потенциалов относительно земли.

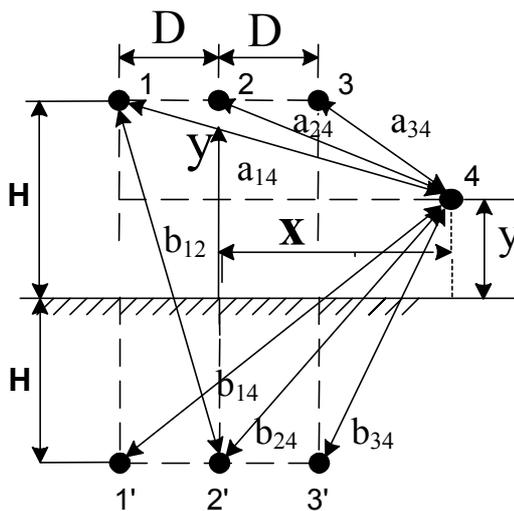


Рис. 5.8. Схема для расчета потенциала в точке 4

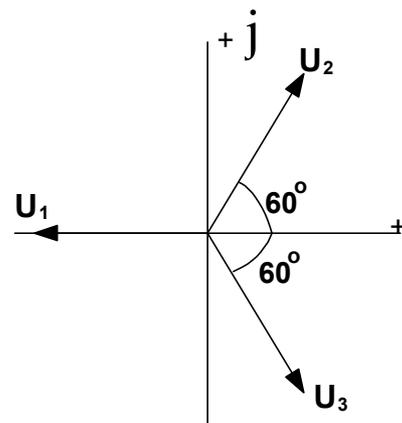


Рис. 5.9. Векторная диаграмма фазовых напряжений

Поместим точку 4 на поверхность провода 1. С учетом условий, изображенных на рис. 5.4 и 5.8, получим

$$\varphi_1 = \tau_1 q \ln \frac{2H}{r} + \tau_2 q \ln \frac{b_{12}}{a_{12}} + \tau_3 q \ln \frac{b_{13}}{a_{13}}. \quad (5.24)$$

Поместим точку 4 на поверхность провода 2, после чего по аналогии с формулой (5.24), т.е. имея в виду, что $\alpha_{21} = \alpha_{12}$, $b_{21} = b_{12}$ и так далее, найдем

$$\varphi_2 = \tau_1 q \ln \frac{b_{12}}{a_{12}} + \tau_2 q \ln \frac{2H}{r} + \tau_3 q \ln \frac{b_{23}}{a_{23}}. \quad (5.25)$$

Поместив точку 4 на поверхность провода 3, запишем

$$\varphi_3 = \tau_1 q \ln \frac{b_{13}}{a_{13}} + \tau_2 q \ln \frac{b_{23}}{a_{23}} + \tau_3 q \ln \frac{2H}{r}. \quad (5.26)$$

Обозначив $q \ln \frac{b_{km}}{a_{km}} = \alpha_{km}$, $q \ln \frac{2H}{r} = \alpha_{kk}$, имея в виду, что $\alpha_{km} = \alpha_{mk}$, сведем в одну систему уравнения (5.23), (5.24), (5.25), (5.26)

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha_{11} \tau_1 + \alpha_{12} \tau_2 + \alpha_{13} \tau_3; \\ \varphi_2 &= \alpha_{12} \tau_1 + \alpha_{22} \tau_2 + \alpha_{23} \tau_3; \\ \varphi_3 &= \alpha_{13} \tau_1 + \alpha_{23} \tau_2 + \alpha_{33} \tau_3; \\ \varphi_4 &= \alpha_{14} \tau_1 + \alpha_{24} \tau_2 + \alpha_{34} \tau_3. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Неизвестны величины τ_1 , τ_2 , τ_3 , φ_4 , их значения можно рассчитать решением системы (5.27). Для упрощения решения задачи примем, что провода влияющей линии 1, 2, 3 располагаются так, что расстояния между ними одинаковы или почти одинаковы, поэтому вместо α_{12} , α_{23} , α_{13} примем их среднее значение, то есть [1]

$$\bar{\alpha}_{12} = (\alpha_{12} + \alpha_{23} + \alpha_{13}) / 3. \quad (5.28)$$

Так как высота подвески проводов принимается одинаковой, то $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}$. Потенциал проводов φ – это напряжение этих проводов относительно земли, значит $\dot{\varphi}_1 = \dot{U}_1$, $\dot{\varphi}_2 = \dot{U}_2$, $\dot{\varphi}_3 = \dot{U}_3$, здесь \dot{U} – фазо-

вое напряжение каждого провода. С учетом вышеизложенного перепишем систему (5.27)

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \alpha_{11}\tau_1 + \bar{\alpha}_{12}\tau_2 + \bar{\alpha}_{12}\tau_3; \\ \dot{U}_2 &= \bar{\alpha}_{12}\tau_1 + \alpha_{11}\tau_2 + \bar{\alpha}_{12}\tau_3; \\ \dot{U}_3 &= \bar{\alpha}_{12}\tau_1 + \bar{\alpha}_{12}\tau_2 + \alpha_{11}\tau_3; \\ \dot{U}_4 &= \alpha_{14}\tau_1 + \alpha_{24}\tau_2 + \alpha_{34}\tau_3.\end{aligned}\tag{5.29}$$

Коэффициенты α в последнем уравнении системы не могут быть одинаковыми, так как точка 4 может находиться в любом месте.

Для определения U_4 необходимо решить систему первых трех уравнений из системы (5.29)

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \alpha_{11}\tau_1 + \bar{\alpha}_{12}\tau_2 + \bar{\alpha}_{12}\tau_3; \\ \dot{U}_2 &= \bar{\alpha}_{12}\tau_1 + \alpha_{11}\tau_2 + \bar{\alpha}_{12}\tau_3; \\ \dot{U}_3 &= \bar{\alpha}_{12}\tau_1 + \bar{\alpha}_{12}\tau_2 + \alpha_{11}\tau_3\end{aligned}\tag{5.30}$$

и получить величины τ_1, τ_2, τ_3 , затем значения этих величин подставить в четвертое уравнение системы (5.29). Систему уравнений (5.30) решим методом Крамера [8]. Согласно этому методу

$$\tau_1 = \frac{\Delta\tau_1}{\Delta}, \tau_2 = \frac{\Delta\tau_2}{\Delta}, \tau_3 = \frac{\Delta\tau_3}{\Delta},\tag{5.31}$$

в формулах (5.31) Δ – определитель системы (5.30), который равен

$$\begin{aligned}\Delta &= \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \bar{\alpha}_{12} & \bar{\alpha}_{12} \\ \bar{\alpha}_{12} & \alpha_{11} & \bar{\alpha}_{12} \\ \bar{\alpha}_{12} & \bar{\alpha}_{12} & \alpha_{11} \end{vmatrix} = \\ &= \alpha_{11}^3 + 2\bar{\alpha}_{12}^3 - 3\alpha_{11}\bar{\alpha}_{12}^2 = (\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})^2(\alpha_{11} + 2\bar{\alpha}_{12}).\end{aligned}\tag{5.32}$$

Чтобы найти определитель $\Delta\tau_1$, надо в определителе, представленном в (5.32), заменить первый столбец коэффициентов значениями $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$, т.е.

$$\begin{aligned} \Delta\tau_1 &= \begin{vmatrix} U_1 & \bar{\alpha}_{12} & \bar{\alpha}_{12} \\ U_2 & \alpha_{11} & \bar{\alpha}_{12} \\ U_3 & \bar{\alpha}_{12} & \alpha_{11} \end{vmatrix} = \\ &= (\alpha_{11}^2 - \bar{\alpha}_{12}^2)\dot{U}_1 - \bar{\alpha}_{12}(\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})(\dot{U}_2 + \dot{U}_3). \end{aligned} \quad (5.33)$$

Для упрощения решения задачи примем, что фазовые напряжения симметричны, т.е. $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$; $\dot{U}_2 + \dot{U}_3 = -\dot{U}_1$, поэтому

$$\Delta\tau_1 = \dot{U}_1(\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})(\alpha_{11} + 2\bar{\alpha}_{12}). \quad (5.34)$$

Для нахождения определителя $\Delta\tau_2$ необходимо второй столбец коэффициентов в определителе (5.32) заменить величинами $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$, после чего докажем, что

$$\Delta\tau_2 = \dot{U}_2(\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})(\alpha_{11} + 2\bar{\alpha}_{12}), \quad (5.35)$$

аналогично $\Delta\tau_3 = \dot{U}_3(\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})(\alpha_{11} + 2\bar{\alpha}_{12})$.

Подставляя значения τ_1, τ_2, τ_3 из формул (5.31) в последнее уравнение системы (5.29), получим с учетом формул (5.32), (5.33), (5.34), (5.35)

$$\begin{aligned} \dot{U}_4 &= (\alpha_{14}\Delta\tau_1 + \alpha_{24}\Delta\tau_2 + \alpha_{34}\Delta\tau_3) / \Delta = \\ &= \frac{(\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})(\alpha_{11} + 2\bar{\alpha}_{12})(\alpha_{14}\dot{U}_1 + \alpha_{24}\dot{U}_2 + \alpha_{34}\dot{U}_3)}{(\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12})^2(\alpha_{11} + 2\bar{\alpha}_{12})}. \end{aligned}$$

Окончательно определим

$$\dot{U}_4 = \frac{\alpha_{14}\dot{U}_1 + \alpha_{24}\dot{U}_2 + \alpha_{34}\dot{U}_3}{\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12}}. \quad (5.36)$$

Рассмотрим применение полученной формулы для конкретной схемы расположения проводов трехфазной ЛЭП. В дальнейшем нас будут интересовать проблемы экологического влияния линий высокого и сверхвысокого напряжения на окружающую среду, поэтому в качестве расчетной схемы примем такую, в которой провода располагаются, как в подобного рода ЛЭП, то есть в одной горизонтальной плоскости (рис. 5.8).

Расположим систему координат так, чтобы отсчет начинался на поверхности земли под проводом 2. Расстояние между фазами – Д; высота подвески проводов – Н; x, y – текущие координаты произвольной точки 4.

Систему фазовых симметричных напряжений расположим на комплексной плоскости, как показано на рис. 5.9.

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -U_\phi; \quad \dot{U}_2 = U_\phi e^{j60} = U_\phi (0,5 + j0,87); \\ \dot{U}_3 &= U_\phi (0,5 - j0,87).\end{aligned}$$

Согласно расчетной схеме на рис. 5.8,

$$\alpha_{14} = \ln \frac{b_{14}}{a_{14}} = \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2}}{\sqrt{(H-y)^2 - (D+x)^2}}.$$

Величину q опускаем, так как она входит во все коэффициенты α формулы (5.36) и сокращается. Аналогично получаем

$$\alpha_{24} = \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + x^2}}{\sqrt{(H-y)^2 - x^2}}; \quad \alpha_{34} = \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + (x-D)^2}}{\sqrt{(H-y)^2 - (x-D)^2}}.$$

С учетом вышеизложенного формула (5.36) получит вид

$$\begin{aligned}\varphi_4 &= \frac{U_\phi}{\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12}} [-\alpha_{14} + (0,5 + j0,87)\alpha_{24} + (0,5 - j0,87)\alpha_{34}] = \\ &= \frac{U_\phi}{\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12}} \left[-\ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2}}{\sqrt{(H-y)^2 + (D+x)^2}} + (0,5 + j0,87) \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + x^2}}{\sqrt{(H-y)^2 + x^2}} + \right. \\ &\quad \left. + (0,5 - j0,87) \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + (x-D)^2}}{\sqrt{(H-y)^2 + (x-D)^2}} \right] \quad (5.37)\end{aligned}$$

где $\alpha_{11} = \ln \frac{2H}{r}$; $\bar{\alpha}_{12}$ определяется по формуле (5.28), а ее составляющие

$$\alpha_{12} = \alpha_{23} = \ln(\sqrt{(2H)^2 + D^2} / D), \quad \alpha_{13} = \ln(\sqrt{(2H)^2 + (2D)^2} / 2D). \quad (5.38)$$

Формула (5.37) позволяет найти потенциал изолированного провода, находящегося в заданной точке с координатами x, y .

6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ОПАСНЫХ И МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

Электромагнитное поле влияющих высоковольтных линий создает в смежных линиях потенциалы и токи, которые могут быть опасными для изоляции и обслуживающего персонала, искажать передаваемую по проводам информацию, мешая нормальной работе каналов линий связи.

Полностью устранить электромагнитные влияния высоковольтных линий, в том числе и контактной сети электрических железных дорог, практически невозможно, стремление уменьшить наведенные напряжения до нуля потребовало бы огромных расходов. Поэтому целесообразнее допускать влияния в пределах установленных норм, которые не нарушают существенно нормальную работу смежных линий и не являются опасными для изоляции и обслуживающего персонала. Обеспечить влияние в пределах норм – значит обеспечить электромагнитную совместимость. При этом снижать электромагнитные влияния до установленных норм необходимо при помощи защитных мероприятий, которые потребуют минимальных затрат.

Все мероприятия по уменьшению влияний подразделяются на активные и пассивные. К первой группе относятся мероприятия, применяемые в источниках влияний, например, в устройствах электрических железных дорог. Эти мероприятия уменьшают влияние на все смежные объекты. Мероприятия, относящиеся ко второй группе, применяемые в смежных линиях, называются пассивными, потому что уменьшают влияние только в тех линиях, в которых установлены. К активным мерам защиты на электрических железных дорогах можно отнести отсасывающие трансформаторы и демпфирующие устройства при переменном токе, фильтрующие устройства на дорогах постоянного тока.

Некоторое снижение магнитных влияний можно достичь применением схемы двустороннего питания контактной сети, при которой токи на фидерной зоне текут в разных направлениях, поэтому электродвижущие силы, наведенные в смежной линии этими токами, имеют разные знаки, благодаря чему суммарные наведенные потенциалы будут меньше, чем при одностороннем питании.

Значение допустимых опасных напряжений увеличиваются, если сокращается время их воздействия [5], поэтому необходимо увеличивать быстрдействие защит от коротких замыканий. Самыми распространенными мероприятиями пассивной защиты являются: **относ смежных линий от влияющей, каблирование смежных линий**. В линиях связи применяют скрещивание проводов, использование редуccionных и разделительных трансформаторов, разрядников и других методов.

6.1. Пассивные методы защиты линий связи от опасных и мешающих влияний

Дадим краткую характеристику некоторым пассивным методам защиты, а затем более подробно рассмотрим активные способы защит от электромагнитных влияний. Относ смежных линий – это увеличение ширины сближения влияющей и смежной линии, что приводит к уменьшению электрической и магнитной связи между ними. Такая мера защиты применима для воздушных линий связи общего назначения, но не пригодна для железнодорожной связи, так как по технологии работы железных дорог требуются пункты подключения к этой связи не только на станциях, но и на перегоне. Электрическое влияние при увеличении ширины сближения между воздушными линиями быстро затухает, при 150 м между линиями электрическое влияние практически отсутствует. Минимально допустимая ширина сближения воздушной линии с контактной сетью по условия защит от мешающих магнитных влияний на дорогах переменного тока составляет при разной проводимости земли величину от нескольких сотен метров до 4–8 км. Относ воздушной линии связи на указанные расстояния делает этот способ защиты на железных дорогах переменного тока не приемлемым.

Наиболее эффективным методом пассивной защиты является каблирование линий связи, эффект каблирования металлической оболочкой рассмотрен в подразд. 2.2. Напоминаем, что коэффициент защитного действия оболочки кабеля составляет величину 0,01–0,1, то есть магнитные влияния уменьшаются соответственно в 10–100 раз. Замена воздушной линии связи кабельной требует значительных затрат, но повышает надежность линии при эксплуатации.

Редукционные трансформаторы [5] предназначены для защиты кабельных линий связи от магнитного влияния электрических железных дорог переменного тока и линий электропередачи, схема включения редукционного трансформатора представлена на рис. 6.1.

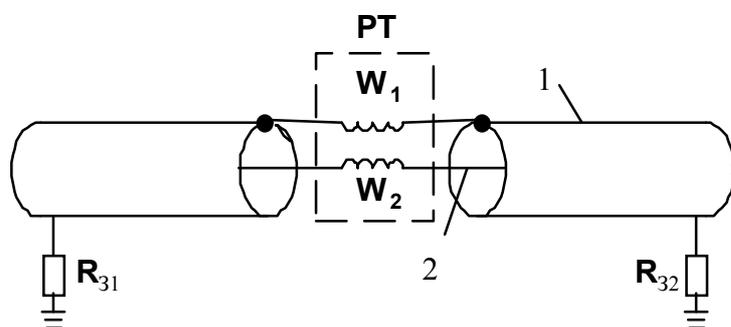


Рис. 6.1. Схема включения редукционного трансформатора

Первичная обмотка w_1 включена в рассечку металлической оболочки кабеля, вторичная обмотка w_2 последовательно с жилой кабеля. Принципы его действия можно пояснить при помощи векторной диаграммы рис. 2.4. Ток влияющей линии наведет в оболочке и жиле две одинаковые ЭДС, ЭДС оболочки создает в ней

ток оболочки, который практически находится в противофазе с влияющим током и создает в жиле еще одну ЭДС, знак которой противоположен знаку ЭДС от влияющего тока, поэтому результирующая ЭДС в жиле уменьшается.

Разделяющие трансформаторы, включаемые в цепь линии связи, делят ее на гальванически несвязанные участки, уменьшая тем самым значения потенциала линий относительно земли (рис. 6.2.).

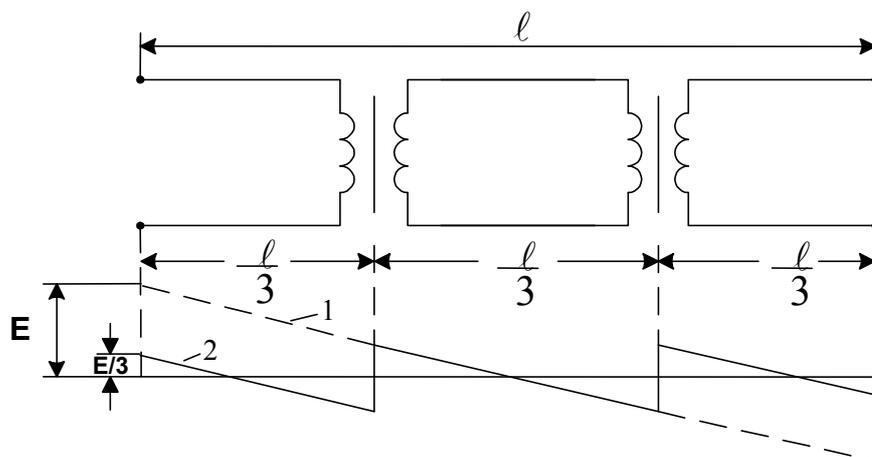


Рис. 6.2. Схема включения разделяющих трансформаторов

При отсутствии трансформаторов в проводе линии связи при его изолированном состоянии наводится потенциал (кривая 1), максимальное значение которого определяется (см. подразд. 3.3) выражением $E = \omega M_{bc} I \ell / 2$. В этом выражении M_{bc} – погонный коэффициент взаимной индукции между влияющей и смежной линиями; I – влияющий ток, ℓ – длина сближения.

При разделении участка длиной ℓ на 3 равные части потенциал каждой части будет определяться кривой 2, для которой максимум будет в три раза меньше.

6.2. Активные методы защиты связи от опасных и мешающих влияний

В контактной сети электрических железных дорогах и в промышленных линиях электропередачи постоянного тока при 6-ти фазной схеме выпрямления присутствуют гармоники с частотой, кратной 300 Гц, если система напряжений симметрична, и 100 Гц, если система напряжений несимметрична (см. подразд. 1.3; 1.4).

Для уменьшения влияний линий постоянного тока, имеющих гармоники, то есть для обеспечения электромагнитной совместимости этих линий с линиями связи, на преобразовательных подстанциях устанавливают **сглаживающие устройства**, состоящие из реакторов и резонансных контуров. Реакторы, включаемые последовательно с влияющей ли-

нией, уменьшают амплитуды гармоник. Резонансные контуры, включаемые параллельно, состоят из последовательно включенных конденсаторов и индуктивных катушек.

Сопrotивление такого контура $x = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}$ для любой частоты можно сделать равным нулю, подобрав соответствующие L и C . Сглаживающие устройства имеют, в зависимости от их типа, несколько резонансных цепочек. Более подробно о сглаживающих устройствах изложено в [10].

В контактной сети электрических железных дорог переменного тока имеются гармоники нечетного порядка, причем источником этих гармоник служит электровоз, (см. схему, представленную на рис. 6.3).

Гармоники I_3, I_5, I_7 и др. протекают в контуре, состоящем из индуктивного сопротивления контактной сети $x_{кc}$, трансформатора подстанции x_T и электровоза $x_э$. Кроме того, имеется распределенная емкость между контактным проводом и рельсом x_c . При перемещении электровоза сопротивления $x_{кc}, x_c, x_э$ непрерывно изменяются, поэтому для каждой гармоники имеется такое расположение электровоза на зоне, при котором индуктивное и емкостное сопротивления контура равны, при этом наступает резонанс напряжений, при резонансе резко возрастают амплитуды гармоник, что является причиной увеличения магнитного влияния на линии связи. Поэтому необходимо ликвидировать условия возникновения резонансных явлений для гармоник тональных частот 500–1300 Гц, звуковые колебания которых наиболее чувствительно воспринимаются ухом человека.

Для этих целей на подстанции устанавливают **демпфирующие устройства**, состоящие из активного сопротивления и емкостного, которые изменяют параметры резонирующего контура. Параметры R_d и C_d выбирают так, чтобы стали невозможными резонансные явления для гармоник тональных частот, для этого нужно, чтобы $R_d = 20\text{--}50$ Ом, $C_d = 1,5\text{--}4$ мкФ, ($z_d = 3000\text{--}5000$ Ом). Ток демпфирующего устройства равен 5–8 А, следовательно, потери активной мощности в нем незначительны. Следует отметить, что изменив параметры контура и выведя из резонанса гармоники тональных частот, мы создаем условия резонанса для других гармоник, а именно для низкочастотных и высокочастотных, но гармоники низкочастотные имеют небольшие значения коэффициента акустического воздействия, а высокочастотные, кроме того, низкие амплитуды, поэтому оба вида гармоник даже при резонансе практически не увеличивают мешающие влияния.

В случаях, когда требуется уменьшить только электрическое влияние, применяют **провод обратного напряжения (ПОН)**. Назначение ПОН очевидно из рассмотрения схемы его включения (рис. 6.4).

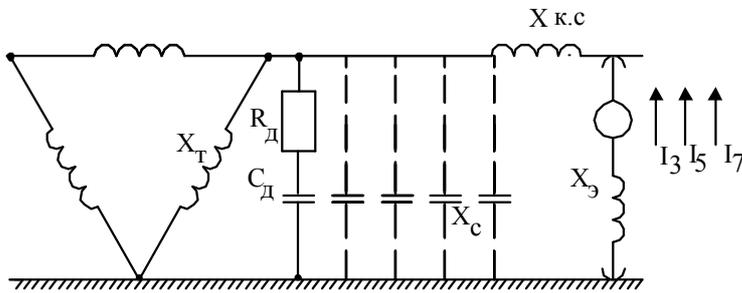


Рис. 6.3. Схема включения демпфирующего устройства

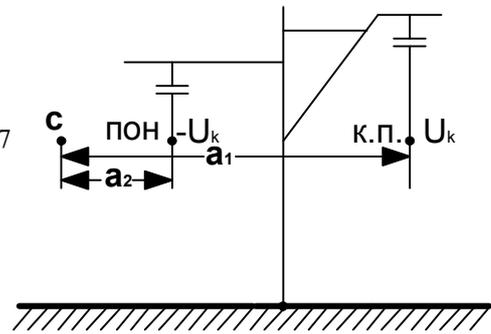


Рис. 6.4. Схема включения провода обратного напряжения

В контактный провод подается напряжение U_k , а в провод ПОН, подвешенный с полевой стороны опоры, напряжение $(-U_k)$, поэтому результирующий потенциал в смежном проводе будет равен $U_{сэ} = k'_2 U_k - k''_2 U_k = (k'_2 - k''_2) U_k$. В этом выражении k'_2, k''_2 – коэффициенты, зависящие от расстояний a_1, a_2 . Эти расстояния соизмеримы, поэтому величина $U_{сэ}$ при наличии ПОН значительно меньше, чем $k'_2 U_k$. Поскольку ток в проводе ПОН практически отсутствует или очень мал, достаточно в качестве этого провода подвесить стальной провод диаметром 5 мм. Скомпенсировать магнитные влияния воздушной линии до допустимых норм трудно, поэтому эффект от провода ПОН небольшой, вследствие чего в современных условиях его не применяют, но принцип снижения электрического влияния при помощи ПОН используется для уменьшения напряженности электрического поля под проводами ЛЭП сверхвысокого напряжения, о чем будет сказано в разд. 2.2.

Самым эффективным защитным мероприятием от магнитных влияний является применение **отсасывающих трансформаторов**. Принцип работы такого трансформатора заключается в следующем. Как было указано в подразд. 2.2, рельсы экранируют смежные линии, причем, чем ближе по значению ток рельса к току контактной сети, тем меньше результирующая ЭДС магнитного влияния.

Ток в рельсе I_p индуктируется током контактной сети I_k и определяется выражением $I_p = z_{кр} I_k / z_p$, где $z_{кр}$ – сопротивление взаимной индукции между контактным проводом и рельсом, z_p – полное сопротивление рельса. Следовательно, увеличивать ток I_p при заданном токе I_k можно или увеличением магнитной связи контактного провода и рельса (увеличением $z_{кр}$), или уменьшением сопротивления рельса. Второй путь требует огромных капитальных затрат, суть первого заключается в следующем (рис. 6.5).

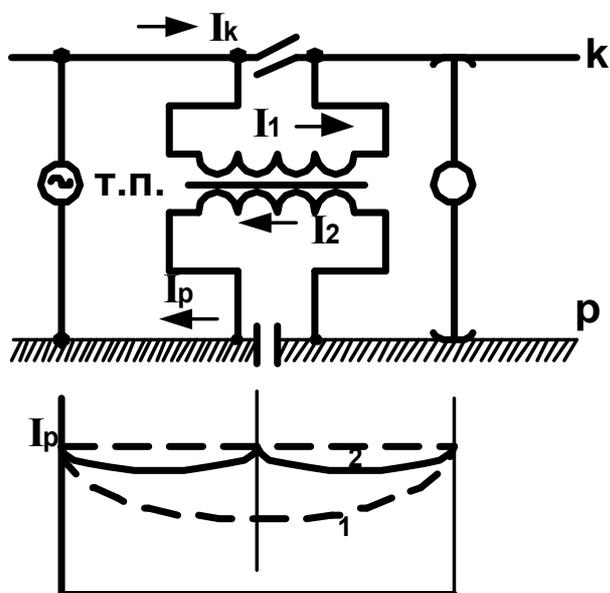


Рис. 6.5. Схема включения отсасывающего трансформатора

форматора показано на рис. 6.5. Увеличение тока в рельсе происходит как бы за счет «отсасывания» его из земли трансформатором, отсюда и произошло название «отсасывающий трансформатор».

Фактически токи I_1 и I_2 сдвинуты относительно друг друга из-за наличия тока намагничивания на угол, меньший чем 180° . Для достижения сдвига по фазе этих токов на 180° , при котором защитное действие

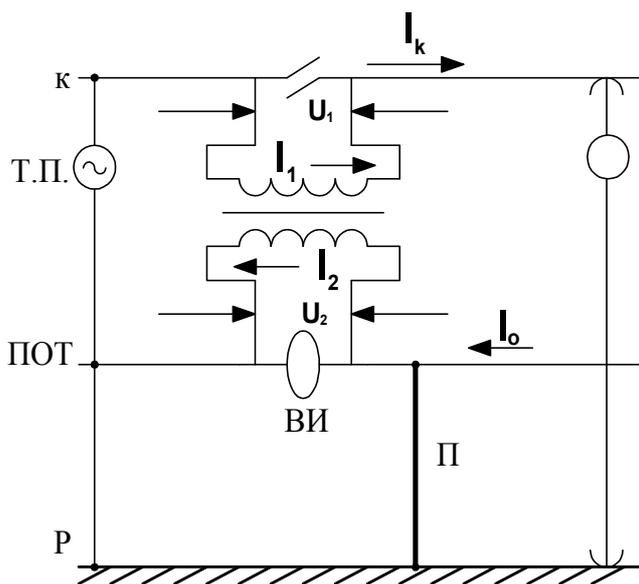


Рис. 6.6. Схема включения отсасывающего трансформатора с проводом обратного тока

Первичная обмотка отсасывающего трансформатора включается в рассечку контактного провода (при помощи изолирующего сопряжения), вторичная обмотка – в рассечку рельсовой цепи (при помощи изолирующего стыка), количество витков обеих обмоток обычно одинаково, то есть коэффициент трансформации $k = 1$, поэтому токи обмоток I_1 и I_2 равны. Ток $I_k = I_1$, а ток $I_p = I_2 = I_1$ только при нахождении в месте установки трансформатора, при удалении же от него ток в рельсе уменьшается ввиду утечки его из рельса в землю.

Изменение тока в рельсе при отсутствии (кривая 1), наличии (кривая 2) отсасывающего трансформатора

отсасывающего трансформатора возрастает, его первичную или вторичную обмотку шунтируют сопротивлением, при этом коэффициент трансформации трансформатора должен быть больше или меньше единицы. Шунтирующие сопротивления целесообразнее подключать ко вторичной обмотке, так как в этом случае шунт не будет находиться под напряжением контактной сети.

Защитное действие отсасывающего трансформатора подключаемого по схеме, представленной на рис. 6.5, умень-

шается вследствие утечки тока из рельса в землю. Поэтому на практике чаще применяется схема (рис. 6.6) включения отсасывающего трансформатора с проводом обратного тока (ПОТ).

Вторичная обмотка трансформатора включается в рассечку ПОТ, которая конструктивно осуществляется при помощи врезного изолятора (ВИ). Для обеспечения протекания тока вторичной обмотки между ПОТ и рельсом устанавливается перемычка (П). Если коэффициент трансформации отсасывающего трансформатора $k_T = 1$, то $I_2 = I_1 = I_k$, ток ПОТ $I_0 = I_2 = I_k$.

Поскольку ПОТ соединен с рельсами только у перемычки и тяговой подстанции, ток I_0 остается неизменным и равным току I_k на всем участке между перемычкой и тяговой подстанцией, поэтому защитное действие схемы, представленной на рис. 6.6, больше чем схемы на рис. 6.5.

Через первичную обмотку отсасывающего трансформатора протекает весь ток контактной сети, поэтому мощность трансформатора $S = U_1 I_k$, где U_1 – напряжение на входе первичной обмотки, равное падению напряжения на ней от тока I_k , то есть, $U_1 = I_k z_H$, здесь z_H – сопротивление нагрузки отсасывающего трансформатора, которая определяется выражением $z_H = U_2 / I_0$, (U_2 – напряжение на входе вторичной обмотки). Величина z_H зависит [11] от места нахождения электровоза, расстояния между перемычками, от сопротивлений провода ПОТ, рельса, от сопротивлений взаимной индукции между проводом ПОТ и контактным проводом, проводом ПОТ и рельсом, от проводимости земли и других факторов. Как показали эксперименты [11], значение z_H колеблется в пределах 1,1–2,1 Ом. Если принять $I_k = 300$ А, $z_H = 1,4$ Ом, то $U_1 = 300 \cdot 1,4 = 420$ В, тогда мощность отсасывающего трансформатора будет равна $S = 420 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 126$ кВА, эта же величина может быть найдена другим способом: $S = I^2 z_H = 300^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} = 126$ кВА. Как видно, мощность отсасывающего трансформатора по сравнению с мощностью трансформаторов тяговых подстанций (2×25 ; 2×40 МВА) составляет незначительную долю. Промышленностью выпускаются отсасывающие трансформаторы следующих типов: ОМО-320/20А, ОМО-800/20А, ОМО-320/20. Маркировка обозначает: отсасывающий, с масляным охлаждением, однофазный. Трансформатор с буквой А имеет алюминиевую обмотку, без буквы А – медную. Номинальная мощность трансформаторов 75, 105, 225 кВА. Коэффициент трансформации отсасывающего трансформатора можно менять в пределах 0,895–1,14 с интервалом 3 %, что необходимо при подключении шунтов на первичной или вторичной обмотках трансформатора. В подстанционной зоне установить только один отсасывающий трансформатор, то при значительном удалении от него электровоза ток

I_0 будет равен току I_K только на участке между подстанциями и перемычкой П, поэтому для поддержания тока I_0 на уровне тока I_K на всей зоне необходимо установить несколько отсасывающих трансформаторов, [11], (рис. 6.7).

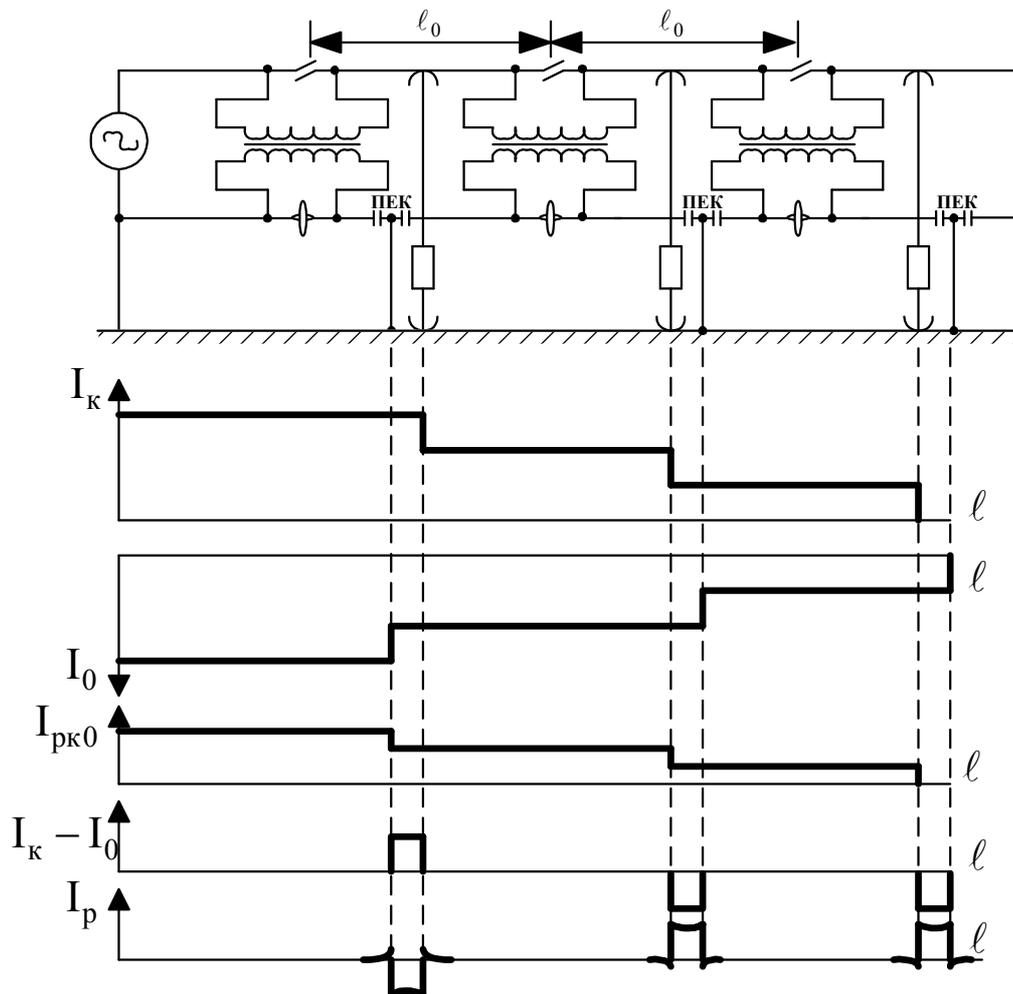


Рис. 6.7. Схема включения группы отсасывающих трансформаторов

Здесь на диаграммах: I_K – ток в контактной сети на участках зоны; I_0 – ток в обратном проводе на тех же участках. Ток I_K индуцирует в рельсах ЭДС E_{PK} , а ток I_0 – ЭДС E_{PO} , эти ЭДС отстают от соответствующих токов (рис. 6.8, а, вращение векторов против часовой стрелки) на 90° . Сложив векторы указанных ЭДС, получим суммарную ЭДС в рельсах E_{PKO} . Рельсы шунтированы землей, поэтому при наличии ЭДС E_{PKO} в них потечет ток I_{PKO} , отстающий от своей ЭДС на угол φ .

Таким образом, на смежную линию будет оказывать влияние система, состоящая из трех токов: I_K , I_0 , I_{PKO} . Ток I_K индуцирует в смежной линии (рис. 6.8, б) ЭДС E_{CK} , ток I_0 – ЭДС E_{CO} , ток I_{PKO} – ЭДС E_{CP} . Указанные ЭДС отстают от соответствующих токов на 90° . Сложив ЭДС E_{CK} и E_{CO} ,

получим ЭДС $E_{\text{ско}}$, которая в сумме с ЭДС $E_{\text{ср}}$ образует так называемую транзитную ЭДС $E_{\text{с1}}$. Эта ЭДС не зависит от интервала между отсасывающими трансформаторами.

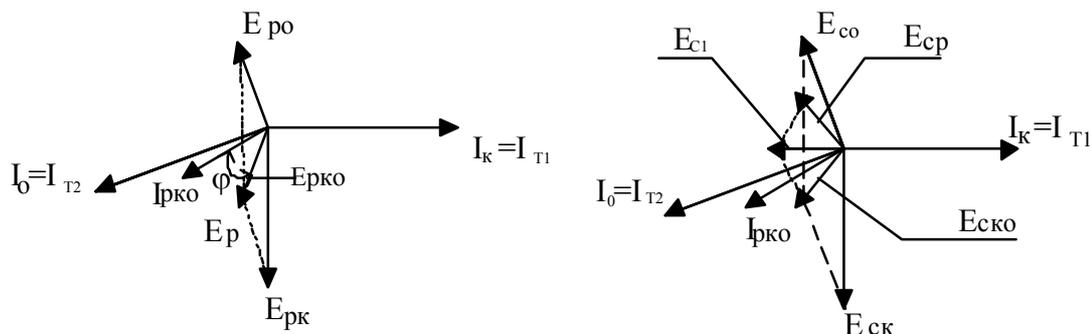


Рис. 6.8. Векторные диаграммы для определения: а) тока $I_{\text{рко}}$; б) транзитной ЭДС $E_{\text{с1}}$

При определении магнитного влияния тяговой сети на линию связи, мы пренебрегали тяговой составляющей тока в рельсе, считая, что ток электровоза целиком протекает по земле, а в рельсе имеется только ток $I_{\text{рко}}$, индуктированный токами I_k и I_0 . Такое допущение нельзя принимать для участков рельсов между перемычками и электровозами, так как при близком расположении электровоза от перемычки значительная доля его тока будет течь к перемычке именно по рельсу. Этот ток I_p будет определяться на каждом участке рельса между электровозом и перемычкой разностью токов $I_k - I_0$ (см. диаграмму этой разницы на рис. 6.7), диаграмма тока I_p так же представлена на рис. 6.7. Ток I_p протекает только в отдельных местах рельсовой цепи, поэтому ЭДС, наведенная дополнительно в линии связи этим током, называется местной составляющей $E_{\text{с2}}$. Результирующая ЭДС E_c , создаваемая тяговой сетью, при наличии отсасывающих трансформаторов, будет равна $E_c = E_{\text{с1}} + E_{\text{с2}}$.

Для уменьшения индуктивного сопротивления провода обратного тока можно применять устройства продольной емкостной компенсации (ПЕК), схема включения ПЕК показана на рис. 6.7.

Располагать ПЕК следует ближе к перемычкам, так как в этих местах разница напряжений между рельсом и ПОТ близка к нулю и уровень изоляции ПЕК относительно земли будет минимальным.

7. ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ НА ЭКОЛОГИЮ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В период с 1970 по 1985 г. в бывшем СССР вводилось в эксплуатацию по 7–8 тыс. км в год ЛЭП напряжением 220–750 кВ (ЛЭП напряжением 1150 кВ длиной 1,3 тыс. км введена в строй в 1985 г.). Линии с напряжением 6–220 кВ относятся к высоковольтным линиям, линии с напряжением 330–1150 кВ называются линиями сверхвысокого напряжения (СВН).

Практически электрифицированы районы с благоприятными климатическими условиями, где сосредоточена основная масса населения и большая часть обрабатываемых земель и лесных массивов (европейская часть России, Средняя Азия, Казахстан, южная часть Сибири и Дальнего Востока). Сооружение в таких районах воздушных ЛЭП способствует выводу из хозяйственного использования большого количества пахотных земель и лугов. Поэтому понятно стремление оттеснить ЛЭП на непригодные к сельскохозяйственному использованию земли и в лесные массивы. В последнем случае приходится делать просеки, ширина которых определяется расстояниями между крайними проводами плюс расстояния от крайних проводов до лесного массива, равные высоте дерева этого массива (20 м), что необходимо для того, чтобы упавшие в сторону ЛЭП деревья не повредили крайние провода линии и опоры.

В табл. 7.1 приведены данные о расстояниях между крайними проводами, о ширине трассы и общей их площади в лесах [9] для ЛЭП напряжением 220–1150 кВ на 1985 г.

Таблица 7.1

Номинальное напряжение $U_{\text{ЛН}}$, кВ	220	330	500	750	1150
Расстояние между крайними проводами, м	14/4	18,5/6	23,5/9	40/15	47/28
Ширина трассы линии, м	54/44	58,5/46	63,5/49	80/55	87/66
Общая площадь линий в лесах, тыс. га	$\frac{200}{162}$	$\frac{84}{66}$	$\frac{120}{94}$	$\frac{25}{18}$	$\frac{6}{4,6}$

Общая площадь в лесах, занимаемая воздушными линиями 220–1150 кВ, составляет на указанный период времени, согласно данным табл.7.1, 435 тыс. га, это наносит огромный ущерб лесному хозяйству. Кроме того, содержание просек на трассах линий связано с большими трудозатратами, так как один раз в пять лет необходимо повторять вырубку подрастающих деревьев.

Описанное вредное воздействие на природу и ущерб, вызванный этим воздействием, можно значительно уменьшить, отказавшись от традиционных методов проектирования и строительства воздушных линий.

Уменьшить ширину просеки можно за счет сокращения расстояния между проводами соседних фаз до минимально необходимых для обеспечения надежной работы линий при перенапряжениях.

Основной изолирующей средой воздушных линий электропередачи является воздух, лишь в точках крепления проводов к опорам используются изоляторы, поверхность которых может увлажняться мелко-капельной влагой (изморозь, туман, роса), что приводит к снижению электрической прочности изоляторов. Увеличению электрической прочности способствует удлинение путей утечки токов по поверхности изоляторов, поэтому применяют такие изоляторы, которые без изменения их размеров позволяют увеличивать пути утечки токов по поверхности. В этом отношении преимущества имеют изоляторы из полимеров, материал которых позволяет создавать ребра любой толщины и под любым углом наклона [9].

Фарфоровые и стеклянные изоляторы, имеющие низкие прочностные характеристики и технологические особенности, по указанным показателям уступают изоляторам из полимеров.

Фактором, влияющим на электрическую прочность воздушных промежутков между проводами, является напряженность электрического поля на поверхности провода. Эта величина зависит от многих факторов, в первую очередь, от радиуса провода: чем меньше радиус провода, тем выше напряженность. Так как увеличение физического радиуса провода только для уменьшения напряженности электрического поля неприемлемо из-за затрат цветного металла, то прибегают к расщеплению фазы ЛЭП. Суть этого метода заключается в том, что вместо одного провода сечением S подвешивают несколько проводов с тем же суммарным сечением S , но теперь напряженность электрического поля будет определяться не радиусом одиночного провода, а эквивалентным радиусом $r_э$, значение которого можно найти [9] по формуле (5.16). Чем больше количество проводов, на которое расщепляется фаза, и больше расстояние между расщепленными проводами в фазе, тем меньше напряженность электрического поля на поверхности провода, тем больше электрическая прочность воздушного промежутка между фазами, между фазой и землей и между фазой и элементами опоры.

Для увеличения эквивалентного радиуса провода фазы наряду с ее расщеплением в последние годы стали применять разработанные в СССР и США так называемые расширенные провода (рис. 7.1).

Сущность этих проводов состоит в наличии внутренней полости, образованной каркасной спиралью из алюминиевых проволок, наматываемой на стальной сердечник обычной конструкции. На рис. 7.1 изображены:

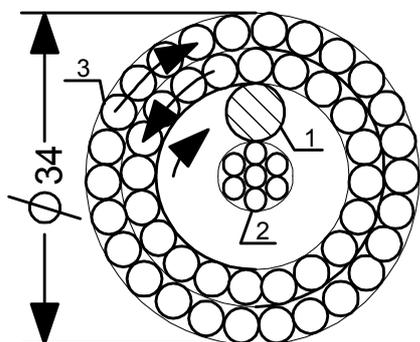


Рис. 7.1. Схема расширенного провода

1 – спираль, образующая каркас расширенного провода;

2 – обычный сердечник сталеалюминиевого провода;

3 – токопроводящие жилы. Стрелками показаны направления намоток проводов.

Конструкция опоры также влияет на напряженность электрического поля на поверхности проводов в месте их крепления к опоре. С целью уменьшения напряженности электрического поля на поверхности проводов в месте их крепления к опоре разработаны оптимальные конструкции опор ЛЭП [9]. К снижению напряженности электрического поля приводит уменьшение расстояния между фазами ЛЭП.

Для уменьшения указанного расстояния в пролете применяют изоляционные распорки, препятствующие сближению проводов под воздействием ветровых отклонений. Линии электропередачи с перечисленными выше способами уменьшения междуфазового расстояния называются компактными линиями. Расчеты показывают (табл. 7.1, значения в знаменателе), что применение перечисленных методов уменьшения междуфазовых расстояний позволяет существенно снизить расстояния между крайними проводами, ширину трасс и площадь линий в лесах. Площадь сохраненных лесов, если бы были применены описанные выше мероприятия, составила бы около 90 тыс. га.

Кроме отрицательного воздействия высоковольтных линий на сельскохозяйственные и лесные угодья, необходимо отметить вредное воздействие высокой напряженности электрического поля на организмы человека и животных. При напряженности $E > 10-15$ кВ/м происходят физиологические изменения в организме человека, связанные с воздействием на нервную и сердечно-сосудистую системы, мышечную ткань и другие органы. При этом меняется кровяное давление, пульс, может появиться аритмия сердца, повышенная нервная возбудимость.

Наиболее чувствительны к электрическим полям копытные животные и человек в обуви, т.е. особи, изолированные «копытом и обувью» от земли [9]. В этом случае на изолированном от земли проводящем объемном теле наводится потенциал, зависящий от соотношения емкости тела на землю и на провода ЛЭП. Чем меньше емкость на землю (т.е. чем толще подошва обуви), тем больше наведенный потенциал, который может достигать значения до 10 кВ. Если при этом тело приближается к заземленному предмету (ноги или руки человека к травинке или веточке куста), происходит искровой разряд, сопровождаемый звуковым эффектом (потрескиванием) с протеканием импульса тока через тело. Сопротивление в цепи разряда определяется, в основном, сопротивле-

нием растительности, составляющим 1,5–3,5 мегаома на метр длины растения летом и 100–500 МОм/м зимой. Максимум импульса тока через человека достигает 100–200 мкА, что безопасно для здоровья человека, но при этом возможны вторичные травмы, происходящие вследствие испуга и произвольных движений.

Ток значительно возрастает, если тело приближается к хорошо заземленному металлическому предмету. В этом случае максимум импульса тока определяется только переходным сопротивлением кожи и может достигать десятков ампер, однако, воздействие таких импульсов тока из-за малой их длительности неопасно. Опасные воздействия тока могут произойти при соприкосновении тела человека с изолированным от земли большим механизмом (например, трактор на резиновом ходу), емкость которого значительно больше чем у человека. Поэтому все механизмы, находящиеся в зоне повышенной напряженности электрического поля ЛЭП, должны надежно заземляться, например, с помощью металлической цепи.

С учетом изложенных факторов разработаны и утверждены Минздравом СССР “Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты”. Эти нормы, применяющиеся с 28.02.84 г., устанавливают защитные зоны (территории вдоль оси высоковольтных линий), пребывание в которых в некоторых случаях небезопасно, если напряженность поля на уровне 1,8 м (рост человека) от поверхности земли составляет 1кВ/м и больше. Так как население, проживающее вблизи ВЛ, контактирует с санитарно-защитной зоной (переход под линией, сельскохозяйственные работы в зоне), разработаны меры и средства, обеспечивающие безопасность людей. Одним из требований является достаточное удаление ВЛ от мест проживания людей. С точки зрения экологии нежелательно располагать вводы ВЛ 330 и 500 кВ на территории населенных пунктов. Если же избежать этого не удастся, необходимо обеспечить под линией в границах населенной местности напряженность электрического поля не более 5 кВ/м. Соблюдение этого условия может потребовать создания сокращенных пролетов между опорами для обеспечения меньшей стрелы провеса.

При выборе трассы для ВЛ 750 и 1150 кВ расстояние от оси линии до границ населенных пунктов с учетом перспективы их развития должно быть не менее 250 м для ВЛ 750 кВ и 300 м – для ВЛ 1150 кВ.

Пересекать населенные пункты ЛЭП разрешается только в исключительных случаях, в сельской местности, при расположении домов в один ряд, линией ВЛ 750 кВ, при этом высота подвески проводов должна быть не менее 22–23 м. Нормы максимально допустимой напряженности поля для других случаев: 5 кВ/м – на участках пересечения населенной местности в пределах садов, огородов; 10 кВ/м – на участках пересечения автодорог с ВЛ СВН; 15 кВ/м – на участках пересечения ненаселенной

местности над пашнями и выгонами; 20 кВ/м – на загороженных и труднодоступных участках, где нельзя использовать машины и механизмы.

Санитарными нормами предусмотрено оснащение линий средствами маркировки для ЛЭП 750 и 1150 кВ. С обеих сторон от оси линии на расстоянии 200 м устанавливается знак «Остановка запрещена – 200 м». Этот знак предупреждает об опасности прикосновения к корпусу машины, случайно остановившейся в пределах санитарно-защитной зоны и не имеющей заземляющего устройства.

Одним из важных требований по обеспечению безопасности населения является, снабжение заземлителями всех машин и механизмов, работающих в защитной зоне, ответственность за это возлагается на землепользователей. В качестве заземлителей могут использоваться металлические цепи, свисающие до земли, или специальные заземлители типа “груша”. Эти заземлители одновременно являются средствами защиты машин на резиновом ходу от самовозгорания. Уменьшение напряженности поля под ЛЭП может быть достигнуто при использовании растительного массива под линиями, так как стволы деревьев и ветки кустарников имеют значительную проводимость, особенно в летнее время. Сопротивление корневой системы деревьев и кустарников очень мало по сравнению с сопротивлением веток (30–40 кОм). В связи с этим при высоте кустарниковой растительности под проводами линий 4 м (габарит для прохода механизмов и машин) падение напряжения на указанной высоте не превышает десятков вольт летом и 3–4 кВ зимой, поэтому средняя напряженность поля в массиве кустарниковой растительности не превышает 0,01 кВ/м при положительных температурах и 1 кВ/м – при отрицательных температурах. Таким образом, оставление древесно-кустарниковой растительности высотой до 4 м под проводами линии обеспечивает полную экологическую безопасность людей и животных и уменьшает трудозатраты по повторным вырубкам трасс ЛЭП. Как влияет электрическое поле на растения?

С помощью длительных наблюдений установлено почти полное отсутствие такого влияния с напряженностью до 50 кВ/м, не обнаружено влияние электрического поля и на цветение и плодоношение плодовых деревьев яблонь, груш и др. Таким образом, вопреки существующей практике сооружения ЛЭП, нужно сохранять на трассах растительность высотой 4–5 метров, производя вырубку высокорастущих деревьев.

В зонах интенсивного земледелия целесообразно использовать трассы линий для разведения плодово-ягодных садов.

Одним из эффективных способов уменьшения напряженности электрического поля является установка заземленных тросов под проводами линий. Габарит проводов до земли по условиям обеспечения безопасности перемещения под линиями различных механизмов составляет 4–4,5 м. Поэтому, если высота заземленного троса в месте его максимального провеса

не будет превышать 4–4,5 м, высота подвески проводов над землей не изменится и не потребует более высоких опор. Суть защитного эффекта заземленного троса (рис. 7.2) заключается в следующем.

Заряды проводов 1, 2, 3, находящихся под напряжением, наведут в тросах 4, 5, 6 заряды противоположного знака. Последние в каждой точке поля будут создавать свою напряженность, противоположную знаку напряженности от проводов 1, 2, 3. В результате происходит компенсация поля проводов полем тросов, что приводит к снижению напряженности поля. Более эффективна подвеска под каждым проводом линии двух тросов, разнесенных в горизонтальной плоскости. Количественная оценка величины снижения напряженности поля при применении заземленных тросов изложена в [9]. Однако подвеска дополнительных тросов приводит к значительному удорожанию линии, экономически более выгодно увеличивать высоту подвески проводов. Поэтому заземленные тросы применяют только при пересечении дорог.

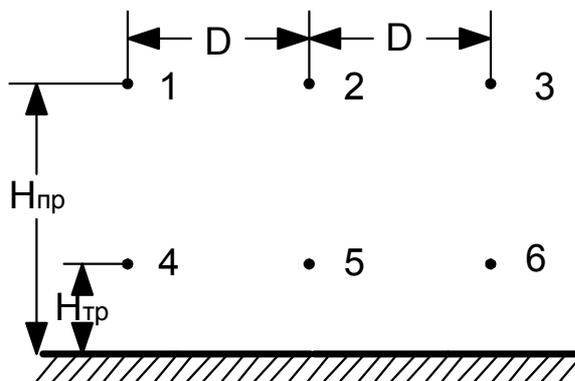


Рис. 7.2. Схема расположения заземляющих тросов под проводами линии

Иногда экономически более целесообразно тросы под проводами линии не заземлять, а «нагрузить» токами, тем самым, обеспечив эффективное использование их сечения. В этом случае вместо стальных тросов следует подвешивать сталеалюминиевые провода и подключать их к источнику напряжения. Для обеспечения экранирующего эффекта потенциал каждого провода должен быть противоположен потенциалу верхнего провода. В данном случае имеем дело с проводами обратного напряжения, о которых шла речь в подразд. 6. 2.

Как показано в [14], таким способом достигается снижение напряженности электрического поля примерно в два раза. Если заземленные тросы подвешиваются на высоте 4–4,5 м над землей, то при наличии рабочего напряжения на нижних проводах их высота определяется нормами ПУЭ, а высота подвески верхних проводов увеличивается, следовательно, должно быть увеличено дополнительно расстояние между верхней и нижней цепью, что приводит к увеличению высоты опор линии. Кроме этого недостатка, возникают трудности, связанные с эксплуатацией двухцепной линии с разными системами напряжений.

Нельзя не отметить еще одного вредного воздействия электрического поля ЛЭП, особенно линий СВН, на экологическую обстановку – речь идет о создаваемом линиями шуме, который слышен при хорошей погоде (без осадков), шум также имеется при дожде. Шум вызывается ко-

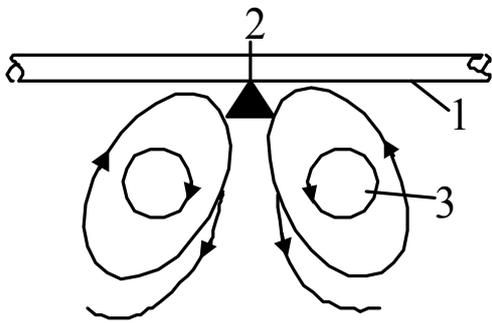


Рис. 7.3. Схема возникновения воздушного потока у поверхности провода

ронным разрядом на проводах. Механизм такого разряда (лавинно-импульсного) состоит в следующем (рис. 7.3).

Коронный разряд из-за шероховатости поверхности провода 1 происходит с отдельных пятен, где наибольшая напряженность электрического поля (точка 2). При коронном разряде из этой точки устремляется поток ионов со скоростью примерно 500 м/сек. Поток ионов увлекает частицы воздуха, создается воздушный поток 3, движущийся по замкнутым траекториям со скоростью до 20 м/сек. Этот поток и служит источником шума.

При дожде возникает новый процесс, связанный с деформацией заряженных капель и отрывом их от поверхности провода, это явление еще больше усиливает шум. Уровень шума в децибелах [13] приближенно оценивается формулой

При дожде возникает новый процесс, связанный с деформацией заряженных капель и отрывом их от поверхности провода, это явление еще больше усиливает шум. Уровень шума в децибелах [13] приближенно оценивается формулой

$$\text{Ш} = 16 + 1,11E_{\text{макс.}} + 9r_0 + 15 \lg n - 10 \lg B, \quad (7.1)$$

где $E_{\text{макс.}}$ – действующее значение максимальной напряженности поля на поверхности провода, кВ/см; r_0 – радиус провода, см; n – число составляющих проводов в фазе; B – расстояние от крайней фазы, м.

Наличие трех фаз учитывается путем добавления 3-4 дБ. Для ВЛ напряжением 1150 кВ принят допустимый уровень акустических шумов в плохую погоду на расстоянии 100 м от крайней фазы 35-70 дБ. Расчет по формуле (7.1) показывает, что для ВЛ 750 и 1150 кВ при конструкции провода, удовлетворяющей требованиям ограничения потерь на корону, уровень шумов получается в пределах допустимого.

Кроме проводов ЛЭП, шумовое воздействие на окружающую среду производят распределительные устройства (РУ), основными источниками шума в РУ являются силовые трансформаторы (постоянный шум) и воздушные выключатели (только в процессе отключения).

ГОСТ 12. 1. 003-83 нормирует допустимый уровень шума для каждого трансформатора, однако эти нормы значительно превышают допустимые для территорий жилой застройки, которые могут располагаться вблизи РУ. Поэтому при проектировании РУ определяется расстояние, на котором следует его располагать для ограничения уровня шума на территории жилой застройки до допустимого.

Если такое расстояние выдержать нельзя [9], применяют следующие мероприятия:

1) создание звукового экрана между РУ и территорией жилой застройки в виде стенки необходимой высоты и толщины с использованием рельефа местности;

2) окружение трансформатора со всех сторон звукопоглощающими преградами;

3) создание полос зеленых насаждений между РУ и территорией жилой застройки, при этом должно быть обеспечено плотное прилегание крон деревьев между собой и заполнение пространства под кронами до земли кустарником.

Все вышеизложенное говорит о том, что линии электропередачи оказывают многостороннее воздействие, поэтому необходима разработка мероприятий, обеспечивающих оптимальное сосуществование сети ВЛ, природы и человека.

8. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЛИНИЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В разделах пособия изложены суть электрического влияния высоковольтных линий на смежные линии, методы расчета потенциалов в любой точке поля и на поверхности проводов, наведенных электрическим полем, экологическое воздействие электрического поля. Чтобы судить об экологической совместимости в каждом конкретном случае, необходимо умение расчета напряженности электрического поля в любой точке этого поля.

8.1. Расчет напряженности электрического поля трехфазной высоковольтной линии

Как показано в подразд. 5.5, потенциал электрического поля, создаваемого трехфазной линией с конкретным расположением фазовых проводов, в произвольной точке М с координатами x, y , определяется выражением (5.37)

$$\begin{aligned} \phi_M = \frac{U_\phi}{\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12}} & \left[-\ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2}}{\sqrt{(H-y)^2 + (D+x)^2}} + (0,5 + j0,87) \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + x^2}}{\sqrt{(H-y)^2 + x^2}} + \right. \\ & \left. + (0,5 - j0,87) \ln \frac{\sqrt{(H+y)^2 + (x-D)^2}}{\sqrt{(H-y)^2 + (x-D)^2}} \right], \end{aligned} \quad (8.1)$$

где D – межфазовое расстояние; H – высота подвески проводов; U_ϕ – фазовое напряжение линии; $\alpha_{11}, \bar{\alpha}_{12}$ – потенциальные коэффициенты, определяемые по формулам (5.38), (5.28).

Если продифференцируем φ_M по x , то получим выражение для горизонтальной составляющей напряженности электрического поля, то есть $E_x = -d\varphi_M/dx$, аналогично, вертикальная составляющая напряженности будет равна $E_y = -d\varphi_M/dy$. Тогда модуль напряженности электрического поля в точке М определится выражением $E_M = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$.

На человека, находящегося перпендикулярно проводам, действует вертикальная составляющая E_y , (ток, протекающий через человека, создается именно этой составляющей), поэтому нам необходимо найти только E_y [9].

Напомним, что $\ln a/b = \ln a - \ln b$, производная от логарифма $(\ln a)' = a'/a$, производная от квадратного корня равна производной от подкоренного выражения, деленной на удвоенный квадратный корень. Поэтому производная от $\ln\sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2}$ по y будет равна

$$\begin{aligned} \left(\ln\sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2} \right)' &= \frac{2(H+y)}{2\sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2} \sqrt{(H+y)^2 + (D+x)^2}} = \\ &= \frac{H+y}{(H+y)^2 + (D+x)^2}. \end{aligned}$$

После нахождения производных от всех составляющих квадратной скобки формулы (8.1), получим (опуская знак минус):

$$\dot{E}_y = \frac{d\varphi_M}{dy} = \frac{U_\phi}{\alpha_{11} - \bar{\alpha}_{12}} \left\{ \begin{aligned} & - \left[\frac{H+y}{(H+y)^2 + (D+x)^2} + \frac{H-y}{(H-y)^2 + (D+x)^2} \right] + \\ & + (0,5 + j0,87) \left[\frac{H+y}{(H+y)^2 + x^2} + \frac{H-y}{(H-y)^2 + x^2} \right] + \\ & + (0,5 - j0,87) \cdot \left[\frac{H+y}{(H+y)^2 + (D-x)^2} + \frac{H-y}{(H-y)^2 + (D-x)^2} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (8.2)$$

Пример расчета: Вычислить напряженность электрического поля линии 500 кВ, построить график напряженности поля в поперечном сечении линии на высоте 1,8 м (рост человека) от поверхности земли при

высоте подвески проводов у опоры $H_1 = 22$ м и для середины пролета (габарит проводов), где $H_2 = 8$ м. После построения графика напряженности в указанных точках определить безопасную зону для человека, исходя из допустимого значения напряженности $E_{\text{доп}} = 5$ кВ/м.

Исходные данные: $U_n = 500$ кВ, $U_f = 289$ кВ; расстояние между фазами $D = 12$ м, $H_1 = 22$ м, $H_2 = 8$ м, $y = 1,8 \approx 2$ м; радиус провода АС-240 $r_o = 10,8$ мм; количество проводов в расщепленной фазе $n = 3$, ее радиус $r_p = 0,23$ м, следовательно, эквивалентный радиус фазы в соответствии с формулой (5.16) будет равен $r_3 = \sqrt[3]{3 \cdot 0,0108 \cdot 0,23^2} = 0,13$ м.

1-й случай, $H_1 = 22$ м.

По формулам (5.38), (5.28) находим

$$\alpha_{11} = \ln(2 \cdot 22 / 0,13) = 5,82; \alpha_{12} = \alpha_{23} = \ln\left[\sqrt{(2 \cdot 22)^2 + 12^2} / 12\right] = 1,34;$$

$$\alpha_{13} = \ln\left[\sqrt{(2 \cdot 22)^2 + (2 \cdot 12)^2} / (2 \cdot 12)\right] = 0,74; \bar{\alpha}_{12} = (1,34 \cdot 2 + 0,74) / 3 = 1,14.$$

После подстановки найденных значений в формулу (8.2), получим выражение

$$\begin{aligned} \dot{E}_y = & \frac{289}{5,82 - 1,14} \left\{ - \left[\frac{24}{24^2 + (12 + x)^2} + \frac{20}{20^2 + (12 + x)^2} \right] + \right. \\ & + (0,5 + j0,87) \left[\frac{24}{24^2 + x^2} + \frac{20}{20^2 + x^2} \right] + (0,5 - j0,87) \times \\ & \times \left. \left[\frac{24}{24^2 + (12 - x)^2} + \frac{20}{20^2 + (12 - x)^2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (8.3)$$

Задавая значения x , определяем по формуле (8.3) соответствующие им значения модуля E_y , кВ/м, результаты сводим в табл. 8.1.

Таблица 8.1

x , м	0	1	2	5	8	10	12	15	17	20	25	30
E_y при $H_1 = 22$ м	1,4	1,6	1,4	1,8	2,1	2,5	2,7	2,9	2,9	2,7	2,3	2,0
E_y при $H_2 = 8$ м	12,8	12,3	9,7	7,8	9,4	12,8	14,4	12,5	9,7	6,3	3,2	1,9

2-й случай, $H_2 = 8$ м.

Потенциальные коэффициенты находим аналогично первому случаю:

$$\alpha_{11} = \ln(2 \cdot 8 / 0,13) = 4,8; \alpha_{12} = \alpha_{23} = \ln\left[\sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 12^2} / 12\right] = 0,51;$$

$$\alpha_{13} = \ln\left[\sqrt{(2 \cdot 8)^2 + (2 \cdot 12)^2} / (2 \cdot 12)\right] = 0,18; \bar{\alpha}_{12} = (0,51 \cdot 2 + 0,18) / 3 = 0,4.$$

Подставив найденные значения в формулу (8.2), получим выражение:

$$\begin{aligned} \dot{E}_y = & \frac{289}{4,8 - 0,4} \left\{ - \left[\frac{10}{10^2 + (12 + x)^2} + \frac{6}{6^2 + (12 + x)^2} \right] + \right. \\ & + (0,5 + j0,87) \left[\frac{10}{10^2 + x^2} + \frac{6}{6^2 + x^2} \right] + (0,5 - j0,87) \times \\ & \left. \times \left[\frac{10}{10^2 + (12 - x)^2} + \frac{6}{6^2 + (12 - x)^2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (8.4)$$

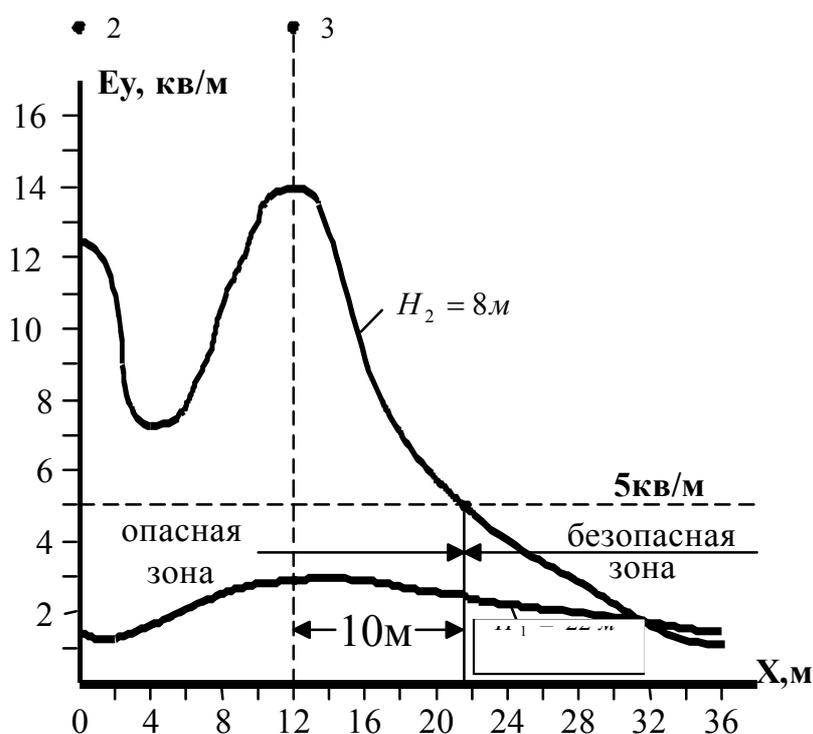


Рис. 8.1. Зависимость напряженности электрического поля под проводами ЛЭП

Подставляя в формулу (8.4) значения x , находим соответствующие им значения E_y и заносим их в табл. 8.1. По данным табл. 8.1 строим графики зависимости E_y от x для $H_1 = 22$ м и $H_2 = 8$ (рис. 8.1).

Проведя на этом рисунке горизонтальную на уровне 5 кВ/м (допустимое значение напряженности поля), определяем безопасную зону для людей. Безопасная зона при $H_2 = 8$ находится на расстоянии 10 м от крайней фазы. Под

опорой ($H_1 = 22$ м) опасная зона отсутствует, так как вся кривая E_y лежит ниже 5 кВ/м. Кривые E_y при $x < 0$ симметричны кривым при $x > 0$, поэтому не приводятся.

8.2. Расчет напряженности электрического поля контактной сети переменного тока

1-й случай. Однопутный участок

Цепная подвеска на дорогах переменного тока, как правило, состоит из троса ПБСМ-95 и провода МФ-100; примем, что их радиусы одинаковы: $r_T = r_{пр} = 0,0056$ м. Заменим цепную подвеску одним эквивалентным проводом в соответствии с формулой (5.16). Как показано в подразд. 5.4, для нашего случая $r_э = 0,095$ м; при расстоянии между тросом и проводом $a_{кт} = 1,6$ м высота подвеса эквивалентного провода будет равна $h_э = h_k + a_{кт}/2$, или $h_э = 6,25 + 1,6/2 = 7,05$ м ($h_k = 6,25$ м – габарит контактного провода на перегоне). По аналогии с рис. 5.5 и формулой (5.11), потенциал в точке М (рис. 8.2, а), наведенный электрическим полем эквивалентного контактного провода, будет равен

$$\varphi_M = \varphi \frac{\ln(b_{1M} / a_{1M})}{\ln(2h_э / r_э)}, \quad (8.5)$$

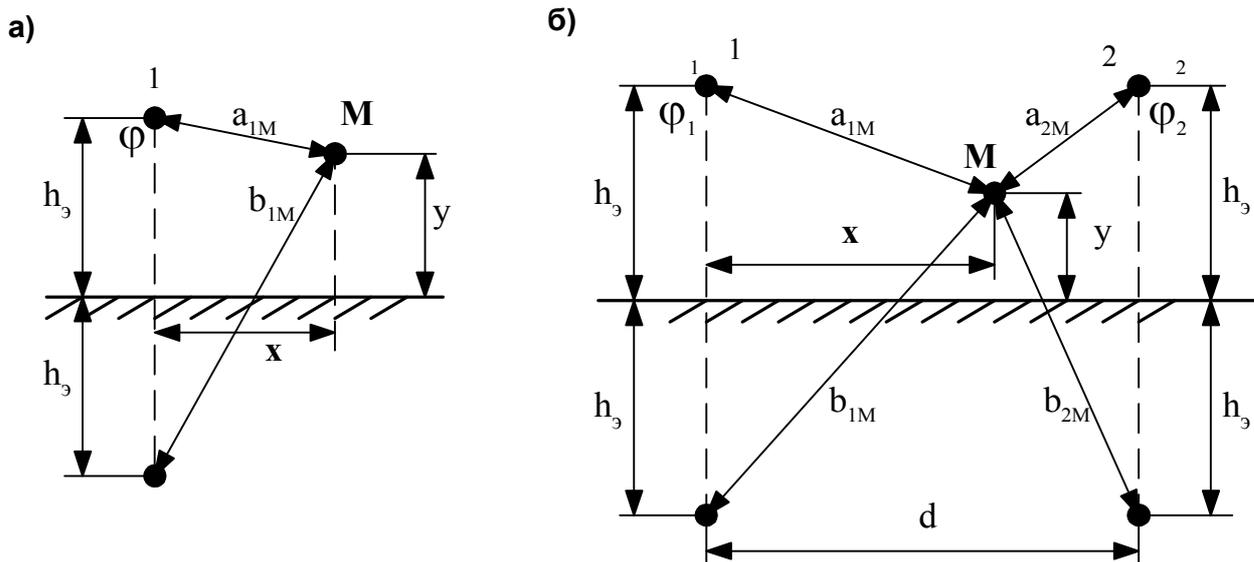
где $\varphi = U_k = 27,5$ кВ,

$$b_{1M} = \sqrt{(h_э + y)^2 + x^2}, \quad a_{1M} = \sqrt{(h_э - y)^2 + x^2}. \quad (8.6)$$

С учетом формул (8.6) выражение (8.5) представим в виде

$$\varphi_M = \frac{U_k}{p} \ln \frac{\sqrt{(h_э + y)^2 + x^2}}{\sqrt{(h_э - y)^2 + x^2}}, \quad (8.7)$$

здесь значение p очевидно из формулы (8.5).



8.2. Расчетные схемы для определения E_y : а) для однопутного участка, б) для двухпутного участка

Вертикальную составляющую напряженности электрического поля в произвольной точке М с координатами x, y найдем, продифференцировав выражение (8.7):

$$E_y = \frac{d\varphi_M}{dy} = \frac{U_K}{\rho} \left[\frac{h_{\text{Э}} + y}{(h_{\text{Э}} + y)^2 + x^2} + \frac{h_{\text{Э}} - y}{(h_{\text{Э}} - y)^2 + x^2} \right]. \quad (8.8)$$

Рассчитаем напряженность поля на уровне головы человека, стоящего на земле ($y = 1,8$ м), и на уровне головы человека, работающего под напряжением с изолированной вышки (т.е. на поверхности контактного провода, $y = h_k - r_k = 6,25 - 0,0056 = 6,24$ м). Определяем значение $\frac{U_K}{\rho} = \frac{27,5}{\ln(2 \cdot 7,05 / 0,095)} = 5,5$, тогда для $y = 1,8$ выражение E_y получит вид

$$E_y = 5,5 \left[\frac{8,85}{8,85^2 + x^2} + \frac{5,25}{5,25^2 + x^2} \right]. \quad (8.9)$$

Задавая разные значения x , находим по формуле (8.9) соответствующие значения E_y , кВ/м, результаты представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Напряженность E_y , кВ/м	Расстояние x , м										
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3	4	5	6	8
Однопутный участок, $y = 1,8$ м	1,7		1,6		1,5		1,3		1,0		0,6
Однопутный участок, $y = 6,24$ м	7,2	5,4	3,1	1,9	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
Двухпутный участок, $y = 1,8$ м	2,2		2,3			2,3		2,3	2,2	2,0	1,6
Двухпутный участок, $y = 6,24$ м	6,3	4,8	3,1	2,2	1,8	1,7	1,8	3,1	6,3	2,9	1,0

Для $y = 6,24$ м расчетная формула имеет вид

$$E_y = 5,5 \left[\frac{13,29}{13,29^2 + x^2} + \frac{0,81}{0,81^2 + x^2} \right]. \quad (8.10)$$

Задаваясь различными значениями x , определяем соответствующие значения E_y , результаты заносим в табл. 8.2. Кривые зависимости E_y от x для однопутного участка изображены на рис. 8.3, а: здесь кривая 1 – для $h = 1,8$ м, кривая 2 – для $h = 6,24$ м.

2-й случай. Двухпутный участок

Расчетная схема представлена на рис. 8.2, б. Для определения E_y составим систему уравнений Максвелла, учитывая, что в точке М нет заряда:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \alpha_{11} \tau_1 + \alpha_{12} \tau_2; \\ \varphi_2 &= \alpha_{21} \tau_1 + \alpha_{22} \tau_2; \\ \varphi_M &= \alpha_{1M} \tau_1 + \alpha_{2M} \tau_2,\end{aligned}\tag{8.11}$$

где α – потенциальные коэффициенты, τ_1, τ_2 – заряды проводов на единицу длины.

Ранее указывалось, что $\alpha_{21} = \alpha_{12}$; $\alpha_{11} = \alpha_{22}$, так как высота подвеса эквивалентных проводов обоих путей одинакова, кроме того, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, поэтому первые два уравнения системы (8.11) предстанут в виде

$$\begin{aligned}\varphi &= \alpha_{11} \tau_1 + \alpha_{12} \tau_2; \\ \varphi &= \alpha_{21} \tau_1 + \alpha_{22} \tau_2.\end{aligned}$$

Решение этой системы дает $\tau_1 = \tau_2 = \frac{\varphi}{(\alpha_{11} + \alpha_{12})}$.

Подставив значения τ_1 и τ_2 в третье уравнение системы (8.11), получим

$$\varphi_M = \frac{\varphi}{\alpha_{11} + \alpha_{12}} (\alpha_{1M} + \alpha_{2M}).\tag{8.12}$$

Выразим коэффициенты α_{1M} и α_{2M} через координаты точки М, с учетом рис. 8.2, б

$$\begin{aligned}\alpha_{1M} &= \ln \frac{b_{1M}}{a_{1M}} = \ln \frac{\sqrt{(h_3 + y)^2 + x^2}}{\sqrt{(h_3 - y)^2 + x^2}}; \\ \alpha_{2M} &= \ln \frac{b_{2M}}{a_{2M}} = \ln \frac{\sqrt{(h_3 + y)^2 + (d - x)^2}}{\sqrt{(h_3 - y)^2 + (d + x)^2}}.\end{aligned}$$

Подставив значения α_{1M}, α_{2M} в формулу (8.12), получим

$$\varphi_M = \frac{\varphi}{\alpha_{11} + \alpha_{12}} = \left[\ln \frac{\sqrt{(h_3 + y)^2 + x^2}}{\sqrt{(h_3 - y)^2 + x^2}} + \ln \frac{\sqrt{(h_3 + y)^2 + (d - x)^2}}{\sqrt{(h_3 - y)^2 + (d - x)^2}} \right].\tag{8.13}$$

Вертикальная составляющая напряженности электрического поля будет равна

$$\begin{aligned}E_y = |d\varphi_M / dy| &= \frac{\varphi}{\alpha_{11} + \alpha_{12}} \left[\frac{h_3 + y}{(h_3 + y)^2 + x^2} + \frac{h_3 - y}{(h_3 - y)^2 + x^2} + \frac{h_3 + y}{(h_3 + y)^2 + (d - x)^2} + \right. \\ &\left. + \frac{h_3 - y}{(h_3 - y)^2 + (d - x)^2} \right].\end{aligned}\tag{8.14}$$

Рассчитаем E_y на уровне головы человека, стоящего на земле ($y=1,8$ м), и на уровне головы человека, работающего под напряжением, с изолированной вышки ($y = 6,24$ м). Как и в первом случае, $h_3 = 7,05$ м, $\varphi = 27,5$ кВ; примем расстояние между путями на перегоне $d = 5$ м. Находим значения α_{11} и α_{12} : $\alpha_{11} = \ln(2h_3/r_3) = \ln(2 \cdot 7,05/0,095) = 5$; $\alpha_{12} = \ln(\sqrt{(2h_3)^2 + d^2}/d) = \ln(\sqrt{(2 \cdot 7,05)^2 + 5^2}/5) = 1,1$. Подставляя указанные и найденные значения в формулу (8.14), при $y = 1,8$ м, находим E_y для разных значений x и заносим в табл. 8.2.

Выполнив аналогичные расчеты по формуле (8.14) для $y = 6,24$ м, заполняем соответствующую графу в табл. 8.2.

По данным табл. 8.2 строим графики E_y в зависимости от x (рис. 8.3).

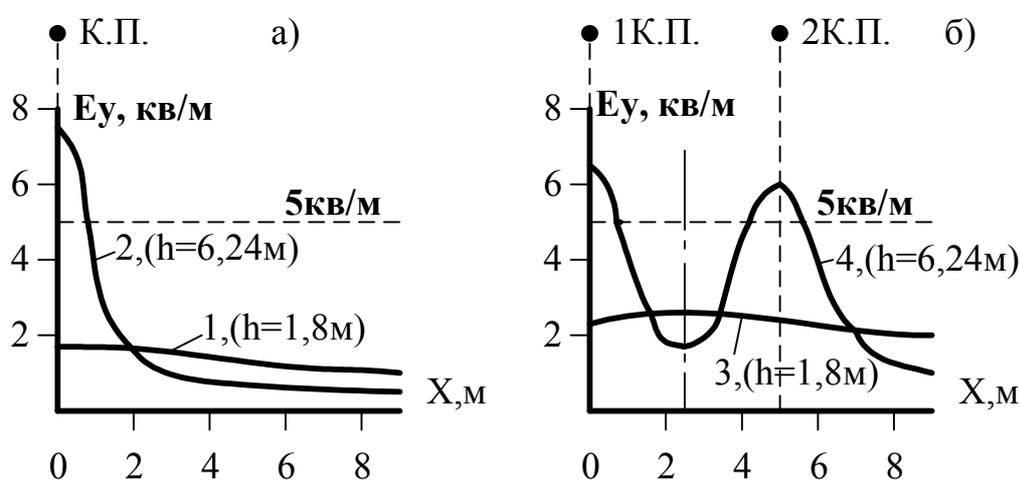


Рис. 8.3. Кривые зависимости E_y от расстояния до оси путей: а) для однопутного участка, б) для двухпутного участка

На рис. 8.3, а кривая 1 – для $h = 1,8$ м, кривая 2 – для $h = 6,24$ м для однопутного участка. Обе кривые симметричны (ось симметрии при $x = 0$), поэтому кривые при $x < 0$ не приводятся.

Аналогичные кривые для двухпутного участка изображены на рис. 8.3, б, здесь ось симметрии – вертикаль при $x = 2,5$ м.

Допустимое значение напряженности электрического поля, при котором человек может длительно работать, составляет 5 кВ/м. При работе под напряжением на изолирующей вышке эксплуатационный персонал контактной сети подвергается воздействию напряженности электрического поля выше допустимого значения. Следовательно, время работы людей под напряжением с изолирующей вышки должно быть ограничено в соответствии с санитарными нормами [12].

9. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Задание № 1 на контрольную работу по дисциплине “Электромагнитная совместимость” для студентов всех форм обучения по специальности 1002.

1. Исходные данные

№	Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Напряжение линейное, кВ	330			500				750		
2	Напряжение фазовое, кВ	190			289				434		
3	Расстояние между осями фаз D , м	8,5	9,0	9,5	12	12,5	13	13,5	17	17,5	18
4	Радиус провода r_0 , мм	7,6	9,4	10,8	9,4	10,8	12	12	10,8	10,8	12
5	Количество проводов в фазе n , шт.	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
6	Радиус расщепленной фазы r_p , м	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3
7	Высота подвески провода под опорой, м	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5
8	Габарит линии в середине пролета, м	6,5	7	7,5	7,5	8,0	8,5	9	9	9,5	10

Примечания: данные по пункту 6 взяты из [15, стр. 485]; номер варианта по пунктам 3 и 4 соответствует последней цифре шифра или номера зачетной книжки студента, по пунктам 5 и 6 – предпоследней цифре, по пунктам 7 и 8 – третьей цифре от конца.

2. Содержание задания

Для трехфазной линии сверхвысокого напряжения:

1. рассчитать напряженность электрического поля в плоскости, перпендикулярной ЛЭП, на различном расстоянии от ее оси (от средней фазы) под опорой и в середине пролета на уровне головы человека ($h = 1,8$ м);

2. построить кривые зависимости напряженности электрического поля от удаления от оси ЛЭП по результатам расчета в пункте 1;

3. приняв за допустимое значение напряженности электрического поля $E = 5$ кВ/м, определить безопасную зону длительного нахождения человека вблизи линии СВН.

Задание № 2 на контрольную работу по дисциплине “Электромагнитная совместимость” для студентов всех форм обучения специальности 1004.

1. Исходные данные

№	Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Напряжение контактной сети, кВ.	25	26	27	28	29	30	29	28	27	26
2	Высота подвеса к.п., h_k , м.	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8
3	Радиусы к.п. (числитель) и н.т. (знаменатель), мм.	5,6	5,8	6,0	6,2	6,0	5,8	5,6	5,4	6,0	5,6
		6,0	6,2	6,0	6,0	5,8	6,0	5,6	5,8	6,2	6,0
4	Среднее расстояние между к.п. и н.т., $a_{кт}$, м	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2
5	Расстояние между осями путей d , м	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,0	5,0	4,8	4,6	4,4

Примечание. Номер варианта по пункту 1 соответствует последней цифре шифра или номера зачетной книжки студента, по пункту 2 – предпоследней цифре, по пункту 4 – третьей цифре от конца, по пунктам 3 и 5 – последней цифре.

2. Содержание задания

1. Рассчитать для заданного варианта эквивалентный радиус контактной сети $r_э$ и высоту подвески $h_э$.

2. Для двухпутного участка рассчитать напряженность электрического поля E_y на уровне головы человека ($h = 1,8$ м), стоящего на пути на разном расстоянии от оси первого пути.

3. Для этого же участка рассчитать E_y на уровне подвески к.п. h_k для разного расстояния от оси первого пути.

4. Произвести такие же расчеты E_y для $h = 1,8$ и $h = h_k$, для однопутного участка, при условии, что второй путь отсутствует.

5. По результатам расчета построить кривые зависимости E_y от x для всех четырех случаев.

6. Сравнив максимальное расчетное значение E_y под контактным проводом на высоте $h_k = 6,24$ м на однопутном и двухпутном участке с допустимой нормой напряженности электрического поля 5 кВ/м, сделать вывод о возможности длительной работы людей под напряжением с изолированной вышки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов М. И. и др. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Связь, 1979.
2. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982.
3. Справочник по электроснабжению железных дорог / Под ред. К.Г. Марквардта. – Т. 1. – М.: Транспорт, 1980.
4. Михайлов М. И. и др. Защита сооружений связи от опасных и мешающих влияний. – М.: Связь, 1978.
5. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных ж.д. переменного тока. – М.: Транспорт, 1989.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электроники. – М.: Высшая школа, 1964.
7. Бессонов В.А., Матющенко В.С. Расчет потенциалов, наведенных электрическим полем в изолированных проводах контактной сети и линии ДПР. Межвуз. сб. науч. тр. ДВГУПС: «Повышение эффективности и надежности систем электроснабжения». – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 1999.
8. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966.
9. Александров Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – Л.: Электроатомиздат, 1989.
10. Бей Ю. М. и др. Тяговые подстанции. – М.: Транспорт, 1986.
11. Павлов Н. В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока. – М.: Транспорт, 1965.
12. Михайлов А. В., Хотинский В. Г. Санитарно-защитные зоны воздушных линий электропередачи. – М., Энергетик. – № 10, 1984.
13. Кизаветтер В. Е. и др. Помехи от линий высокого напряжения, обзор докладов СИГРЭ-72. – Л.: Энергия, 1976.
14. Управляемые линии электропередачи / Под ред. В. А. Веникова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
15. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ИСТОЧНИКИ ВЛИЯНИЯ	4
1.1. Общие сведения об электрическом и магнитном полях	4
1.2. Высоковольтные линии переменного тока	5
1.3. Высоковольтные линии постоянного тока	7
1.4. Электрифицированные железные дороги постоянного и переменного тока	8
1.5. Грозовые разряды	8
1.6. Высокочастотные каналы систем передачи на высоковольтных ЛЭП переменного и постоянного тока	10
2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЛИЯНИЕ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ	11
2.1. Электрическое влияние	11
2.2. Магнитное влияние	13
2.3. Гальваническое влияние	16
3. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ МЕЖДУ ОДНОПРОВОДНЫМИ ЛИНИЯМИ	16
3.1. Вывод основных уравнений U_{cx} , I_{cx}	16
3.2. Анализ кривых U_{cx} , I_{cx} при электрическом влиянии	22
3.3. Анализ кривых U_{cx} , I_{cx} при магнитном влиянии	25
4. ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ОПАСНЫХ И МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ	28
4.1. Расчет опасных влияний	28
4.2. Расчет мешающих влияний	34
5. ВЗАИМНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ	37
5.1. Электрическое поле двух параллельных заряженных осей и двухпроводной линии	37
5.2. Расчет потенциалов электрического поля, создаваемого одним проводом	39
5.3. Расчет потенциала смежного провода, наведенного электрическим полем влияющего провода	40
5.4. Расчет потенциалов, наведенных электрическим полем в изолированных проводах контактной сети и линии ДПР	42
5.5. Расчет потенциалов точек электрического поля, создаваемого трехфазной линией переменного тока	46
6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ОПАСНЫХ И МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ	51
6.1. Пассивные методы защиты линий связи от опасных и мешающих влияний	52
6.2. Активные методы защиты линий связи от опасных и мешающих влияний	53

7. ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ НА ЭКОЛОГИЮ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	60
8. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЛИНИЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	67
8.1. Расчет напряженности электрического поля трехфазной высоковольтной линии.....	67
8.2. Расчет напряженности электрического поля контактной сети переменного тока	71
9. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ	75
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	78

План 1999 г.
Поз. 2.4.

Виктор Алексеевич Бессонов.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ. Учебное пособие.

* * *

Редактор М.В. Бережная. Техн. редактор Е.И. Павлоцкая. Корректор О.Н. Хавиль.
ЛР № 021068 от 1.08.96 г. ПЛД №79-19 от 19.01.00 г.
Подписано в печать 21.08.00. Печать офсетная. Бумага тип. №2. Формат 60x84/16.
Печ. л. 4,65. Зак. 56. Тираж 125. Цена 25 р.

* * *

Издательство ДВГУПС.
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.