

Самарская Государственная Академия Путей Сообщения

Кафедра ЭСЖТ

Заведующий кафедрой: профессор д.т.н. Григорьев В.Л.

Преподаватель Дисциплины: Окладов С.А.

Электромагнитная совместимость устройств электрифицированных железных дорог

**Конспект лекций для студентов специальности
"Электроснабжение железнодорожного транспорта"**

2005 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Лекция 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛИЯНИЙ

Лекция 2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Лекция 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

Лекция 4. МАГНИТНОЕ ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

Лекция 5. ЭКРАНИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ

Лекция 6. ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ

Лекция 7. ЗАЩИТА ОТ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ.

СУММИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗНЫХ ВИДОВ ВЛИЯНИЯ

Лекция 8. РАСЧЕТЫ ВЛИЯЮЩИХ ТОКОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ И ВЫНУЖДЕННОМ РЕЖИМЕ

Лекция 9. ВЛИЯНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Лекция 10. ВЛИЯНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ НА ЛИНИИ ПР И ДПР

Лекция 11. НОРМЫ ОПАСНЫХ И МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

Лекция 12. МЕШАЮЩИЕ ВЛИЯНИЯ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

Лекция 13. ИСТОЧНИКИ МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

Лекция 14. АКТИВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЙ

ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

Лекция 15. ПАССИВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЙ

ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

Заключение

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Лекция 1.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛИЯНИЙ

1.1. Терминология и определения При обсуждении вопросов электромагнитной совместимости электротехнических устройств друг с другом приходится говорить о влиянии отдельных цепей или устройств на другие цепи или устройства. Под **влиянием** далее будем понимать процесс (или состояние) такого типа, при котором в некоторых устройствах будут появляться дополнительные напряжения и токи за счет перекачки части электрической энергии из других устройств. При этом **внешними влияниями** назовем влияния на низковольтные цепи со стороны высоковольтных (или сильнотоковых) цепей, а **взаимными** - влияния от соседних цепей одной или однотипной линии. Так, внешними будут влияния со стороны тяговой сети на линии связи, а взаимными - влияния друг на друга разных пар многопроводной линии связи.

Влияющая линия создает в окружающем пространстве электрическое поле, определяемое напряжением в линии, а также магнитное поле, связанное с токами в линии. По характеру зависимости от времени влияющих напряжений и токов различают постоянные напряжения и токи, периодические напряжения и токи и импульсные напряжения и токи. По механизму влияния различают три следующих вида.

Во-первых, **электрическое влияние**, появляющееся за счет электрического поля влияющей линии (контактной сети) или, по-другому, за счет емкостной связи между линиями (рис. 1а).

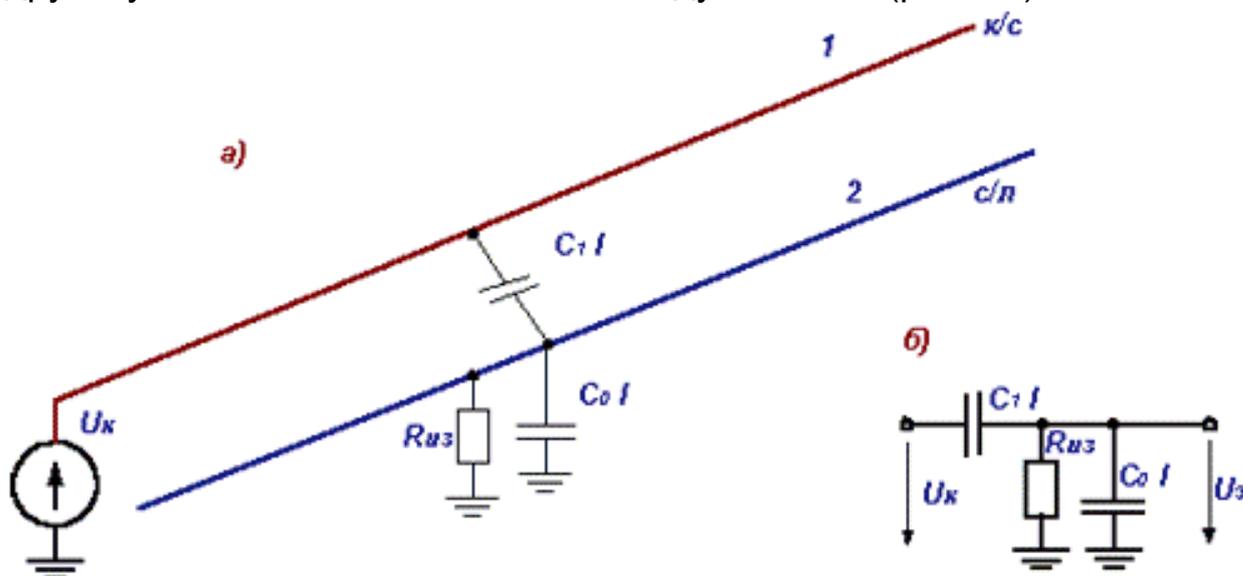


Рис. 1

Контактную сеть и смежный провод можно рассматривать как обкладки конденсатора емкостью $1 l$, где C_1 - емкость между смежной линией и контактной сетью на 1 км длины системы, l - длина системы, км. Вместе со вторым конденсатором с обкладками смежная линия - земля емкостью $C_0 l$ этот конденсатор образует емкостный делитель,

определяющий напряжение электрического влияния на смежной линии (рис. 1б)

$$U_{\text{э}} = U_{\text{к}} \frac{C_1^l}{C_1^l + C_0^l} = U_{\text{к}} \frac{C_1}{C_1 + C_0},$$

которое не зависит от длины системы, если смежная линия находится полностью в зоне влияния. Наличие утечки по изоляции смежной линии R из приводит к тому, что при строго постоянном напряжении влияющей линии электрическое влияние отсутствует. Система электрической тяги постоянного тока в нормальном режиме оказывает влияние на смежные линии только из-за пульсаций выпрямленного напряжения.

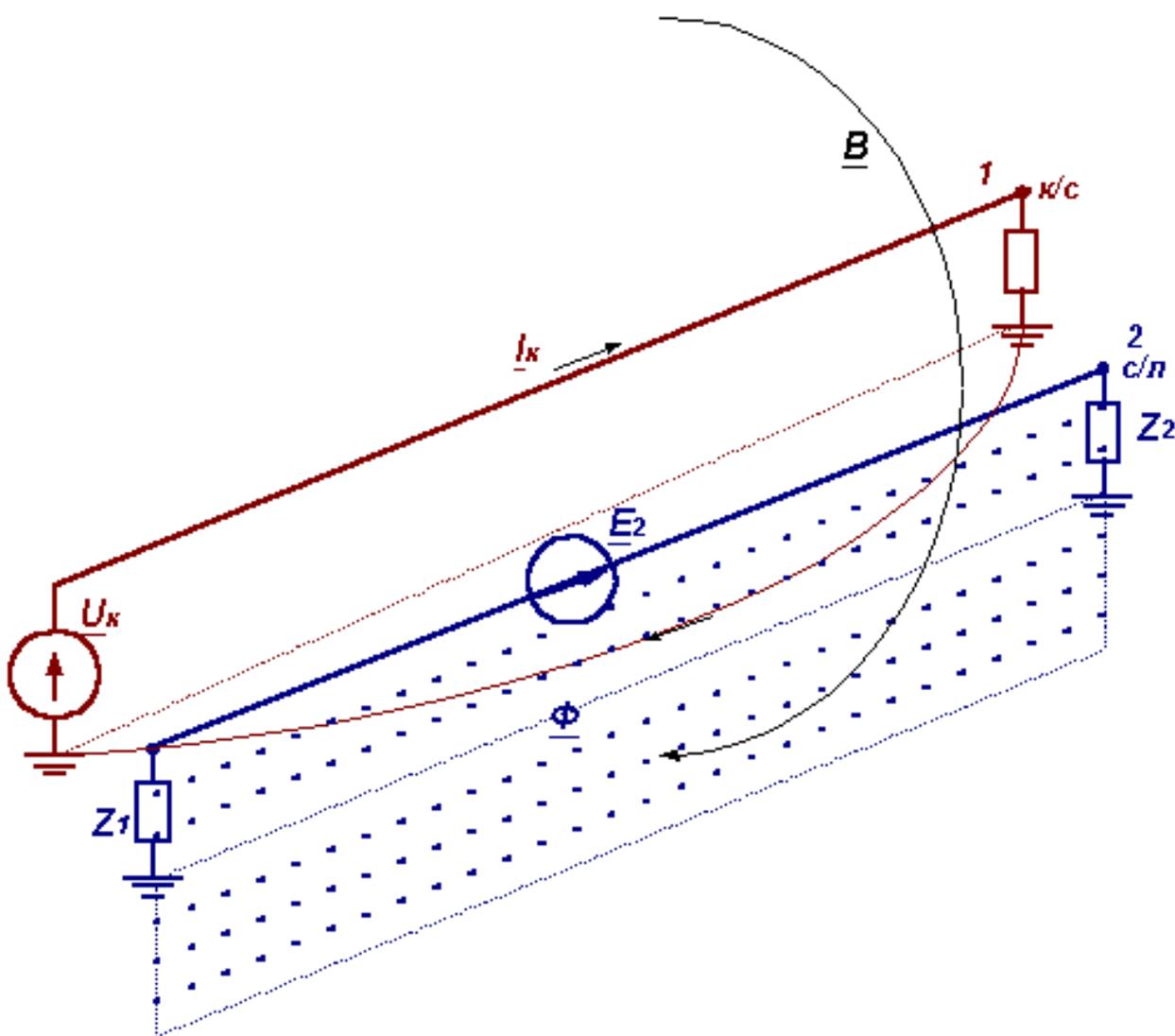


Рис. 2

Во-вторых, **магнитное влияние**, обусловленное наведением ЭДС в замкнутых контурах при пересечении их переменным магнитным полем (рис. 2). Ток, протекающий в контактной сети, создает магнитное поле в окружающем пространстве. В контуре смежный провод - земля переменным магнитным полем наводится ЭДС, величина которой определяется законом электромагнитной индукции

по выражению $e_2 = -\frac{d\Phi}{dt}$, для синусоидальных токов $\underline{E}_2 = -j\omega\Phi$, где Φ - магнитный поток под смежной линией в воздухе и в земле.

Можно говорить о существовании воздушного трансформатора, первичная обмотка которого образована контактной сетью и землей, а вторичная обмотка - это контур смежная линия - земля. Наибольшее магнитное влияние создается контактной сетью при системе 1x25 кВ. При электротяге постоянного тока магнитное влияние обусловлено только пульсациями тока в контактной сети, а строго постоянный ток создает постоянное магнитное поле, от которого ЭДС не возникает. Система тяги 2x25 кВ занимает промежуточное положение по степени опасности магнитного влияния.

В-третьих, это **гальваническое влияние**, возникающее за счет токов, протекающих в земле, на объектах, имеющих заземления.

Кроме того, различные виды влияний подразделяют по значениям наводимых напряжений, то есть по силе воздействия, на **опасные** и **мешающие влияния**. Опасные влияния могут вызвать поражения людей электрическим током или привести к повреждениям аппаратуры или пожарам, а мешающие влияния, которые меньше по величине и только снижают устойчивость работы линий связи или телемеханики, нарушают нормальную их работу и действуют как помехи.

В связи со сказанным введены еще несколько понятий и определений. Так, **сближением** между электрифицированной железной дорогой и смежными линиями называют такое взаимное их расположение, при котором в цепях этих линий могут возникать опасные и мешающие напряжения и токи, то есть смежные линии находятся в зоне влияния ЭЖД.

Длиной сближения называют длину той части смежной линии, которая находится в зоне влияния тяговой сети ЭЖД.

Шириной сближения называется кратчайшее расстояние между осью железной дороги и проводами смежной линии.

1.2. Влияющие линии и линии, подверженные влиянию В большинстве случаев влияющие линии можно отнести к одному из двух видов: симметричные цепи и несимметричные цепи. Симметричными называют такие цепи, которые имеют одинаковые по модулю токи и напряжения во всех проводах, сдвинутые на 180° в двухпроводных цепях и на 120° в трехпроводных относительно друг друга. Векторная сумма напряжений (остаточное напряжение) такой цепи равна нулю, а ток нулевой последовательности (ток в земле) отсутствует. Провода такой линии имеют одинаковые первичные и вторичные параметры. Влияние симметричной линии на смежную линию минимально и может возникнуть лишь из-за различия параметров связи между отдельными проводами влияющей линии и проводами смежной линии, подверженной влиянию, то есть из-за поперечной несимметрии.

Несимметричными называют такие цепи, провода которых характеризуются разными параметрами, а токи и напряжения в проводах по величине не равны между собой. Углы сдвига фаз в общем случае отличаются от 180° в двухпроводной цепи или 120° в трехпроводной. Если же земля используется в качестве одного из рабочих проводов и по земле протекает полный рабочий ток цепи, то влияние на смежную линию будет наибольшим.

Влияющие линии могут быть разделены на четыре основные группы. Наиболее важной группой влияющих линий с профессиональной точки зрения являются провода тяговой сети и линии, расположенные на опорах контактной сети. Это **тяговая сеть** электрифицированной железной дороги постоянного и переменного тока. Наибольшее влияние оказывает тяговая сеть переменного тока 1×25 кВ, являющаяся полностью несимметричной цепью и характеризуемая токами в сотни ампер. Влияние тяговой сети 2×25 кВ в несколько раз меньше, а тяговая сеть постоянного тока оказывает влияние только из-за пульсаций выпрямленного напряжения. Выпрямители и инверторы на тяговых подстанциях или на ЭПС определяют наличие высших гармоник в напряжении и токе тяговой сети. Поскольку рассматриваются линии, прокладываемые вблизи железной дороги, то влияние тяговой сети обычно самое значительное из возможных видов влияния. Далее по тексту чаще всего речь будет идти о влиянии именно тяговой сети на смежные линии.

Из **линий, расположенных на опорах контактной сети** или на отдельных опорах, значительное влияние оказывают линии систем ДПР и ПР. У этих линий рабочее напряжение такое же, как и напряжение контактной сети, однако протекающие токи значительно меньше, соответственно меньше и магнитное влияние этих линий. Линии питания автоблокировки и продольного электроснабжения напряжением $6-10$ кВ, помимо существенно меньшего напряжения по сравнению с контактной сетью, в нормальном режиме характеризуются симметричной системой напряжений по отношению к земле. Три емкостных тока электрического влияния в сумме дают малую величину, отличную от нуля только за счет разных расстояний проводов ЛЭП до смежного провода, подверженного влиянию (рис. 3). Токи линий электропередачи, как правило, несинусоидальны, поэтому они могут быть источниками влияний в широком диапазоне частот.

Значительное влияние могут оказывать **трехфазные линии внешнего электроснабжения** ввиду больших напряжений и токов. Практически влияние этих линий сказывается редко из-за большого расстояния до этих линий и более-менее симметричного режима в них.

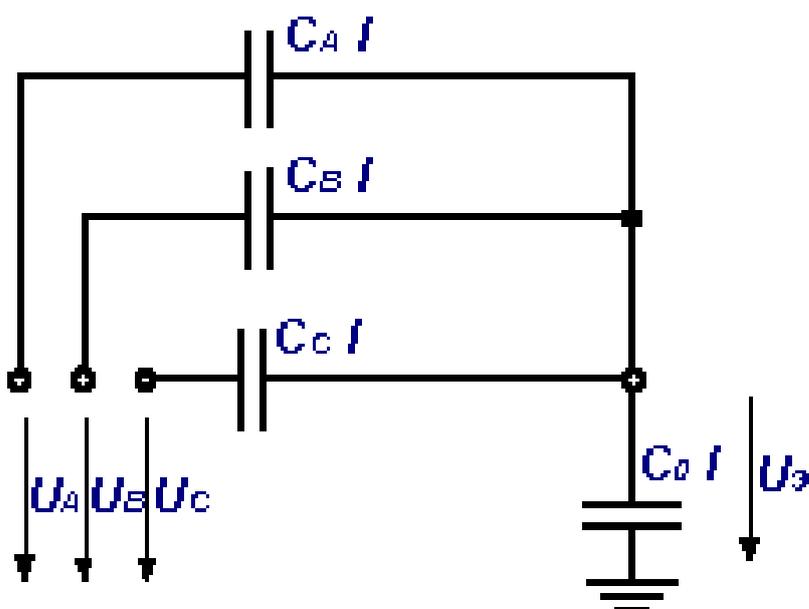


Рис. 3

Из природных факторов немало неприятностей приносят **разряды молнии**, которые вызывают появление больших импульсных напряжений и токов.

Подверженными влиянию оказываются все смежные линии, расположенные в зоне влияния контактной сети или одной из перечисленных выше линий: отключенная секция контактной сети, отключенная секция линии электропередачи, волноводный провод, линии низкого напряжения и линии связи. Влияние контактной сети 1x25 кВ вызывает также изменения режима работы линий 6-10 кВ, расположенных на опорах контактной сети, поскольку нарушается работа системы сигнализации от однофазных коротких замыканий. В общем, наводимые напряжение тем больше, чем ближе смежная линия к влияющему проводу, поэтому провода, подвешенные на опорах контактной сети, подвержены наиболее сильному влиянию со стороны последней.

РЕЗЮМЕ

Тяговая сеть электрифицированной железной дороги оказывает электрическое, магнитное и гальваническое влияния на смежные линии. Электрическое влияние обусловлено емкостными связями между контактной сетью и смежным проводом, магнитное влияние возникает из-за переменного магнитного поля, создаваемого током контактной сети, а гальваническому влиянию подвержены цепи, имеющие заземления.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 2.

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

2.1. Особенности тяговой сети и принятые допущения

Для устройств электроснабжения электрифицированной железной дороги тяговая сеть является основным видом влияющей цепи. Она включает в свой состав тяговую подстанцию, электровозы и тяговую сеть. В тяговую сеть входят питающие и отсасывающие провода, провода контактной сети, рельсы с распределенной проводимостью на землю и сама земля. Влияющее напряжение тяговой сети равно рабочему напряжению контактной сети, а ток в земле по модулю соизмерим с током контактной сети. Поэтому тяговая сеть практически полностью несимметрична и оказывает сильное влияние на соседние цепи.

При рассмотрении влияния тяговой сети на смежные линии придется считаться с распределенностью системы и с большой ее электрической длиной. Для упрощения далее приняты во внимание следующие допущения:

- 1) при анализе влияния тяговой сети вначале будет рассмотрено влияние только контура контактная сеть - земля; влияние рельсов будет учтено несколько позже;
- 2) смежную линию будем считать однородной и вначале однопроводной, затем перейдем к двухпроводной линии как к сочетанию двух однопроводных;
- 3) сближение с контактной сетью будем считать параллельным и вначале будем полагать длину сближения равной длине смежной линии;
- 4) напряжения и токи в контактной сети и в смежной линии считаются синусоидальными, во всяком случае, речь будет идти о гармонических синусоидальных составляющих при учете несинусоидальности.

2.2. Простейшая линия и ее параметры

Наиболее распространенным механизмом для анализа процессов в электрических цепях и предсказания их поведения являются законы Кирхгофа в совокупности с законом Ома и производные от них методы (контурных токов, узловых потенциалов, узловых напряжений и другие). К сожалению, все эти методы не учитывают запаздывание распространения электромагнитного поля и годятся только для электрически коротких цепей. Кроме того, все элементы электрической цепи рассматриваются квантованно, то есть распределенность элементов никак не учитывается, что не позволяет говорить о распределении потенциала по элементу даже в случае электрически малой его длины.

Максимальная скорость распространения электромагнитного поля в пространстве составляет 300 м/мкс. Цепь будет электрически короткой, если время распространения поля вдоль нее много меньше времени существенного изменения напряжения или тока в цепи;

считается, что для синусоидальных напряжений и токов можно говорить о небольшой длине линии, если время распространения поля вдоль нее не превышает одной десятой периода напряжения. Для двухпроводной воздушной линии с расстоянием между проводами 3 м, высоте расположения проводов над землей 30 м и длине линии 30 км время распространения поля между проводами составит 0.01 мкс, между проводами и землей - 0.1 мкс, вдоль линии - 100 мкс, так что для электромагнитных процессов между проводами можно говорить о малых расстояниях между проводами до частот 10 МГц, между проводами и землей - до 1 МГц, а вдоль проводов - до частот не более 1 кГц, что соответствует частотам высших гармоник электроэнергетических систем. Именно до таких частот можно предсказывать поведение двухпроводной системы с помощью законов Кирхгофа и производных от них методов; далее нужно использовать что-нибудь другое.

Двухпроводная линия, кроме всего прочего, является простейшей из многопроводных линий, составленных из тонких параллельных друг другу проводов. Почему это так? Потому, что более простая по конструкции однопроводная линия либо использует землю в качестве обратного провода и надо заниматься вопросами распределения тока в проводящей земле, то есть теорией поля, что очень непросто; либо один провод излучает электромагнитное поле в окружающее пространство (если земля электрически далеко), что в общем случае ничуть не проще, чем с землей. Когда же проводов два, а расстояние между ними много меньше расстояния до земли, то два этих провода являются самодостаточной системой, земля им не нужна, поскольку электрическое поле двух противоположно заряженных проводов уменьшается с ростом расстояния от проводов по кубическому закону и земле почти ничего не перепадает; примерно такая же картина получается и с магнитным полем, когда токи по проводам по соседству (в одном сечении перпендикулярно проводам) протекают одинаковые и противоположных направлений.

Так что пока речь пойдет о двухпроводной линии, для которой можно не учитывать наличие расположенных вблизи нее предметов (рис. 3). Источник ЭДС в начале линии обеспечивает такое разделение зарядов, что на одном проводе будет заряд $+q$, а на другом $-q$, а также и токи в проводах оказываются одинаковыми и противоположно направленными. Если на некотором расстоянии x от начала линии выделить электрически короткий участок dx , то можно обойти трудность, связанную с невозможностью применения законов Кирхгофа к длинной линии; на малой длине dx при малости расстояний h и d по сравнению с длиной l линии на участке dx законы Кирхгофа вполне применимы! Однако вначале следует составить схему замещения участка dx , что сделано на рис. 4а. На нем элементы dR' и dR'' отражают потери энергии в проводах на их нагрев, dL' , dL'' и dM отображают собственные индуктивности проводов и их

взаимосвязь через магнитное поле, причем начала катушек расположены слева, но направления токов в катушках противоположны, что отвечает частичной взаимной компенсации магнитных полей двух проводов; емкостный элемент dC отображает запас энергии в электрическом поле между проводами, а проводимость dG соответствует утечке по изоляции между проводами.

Поскольку токи в верхнем и нижнем проводах одинаковы, можно объединить нижние элементы с верхними, оставив внизу только общий провод, при этом потенциалы проводов будут другими, но напряжения между проводами не изменятся, так что схема рис. 4б вполне пригодна для дальнейшего анализа. На этой схеме ток i и напряжение u являются функциями координаты и времени $i=i(x,t)$, $u=u(x,t)$ и при приросте переменной x на малую величину dx они прирастают на малые величины di и du . Можно считать, что параметры схемы замещения пропорциональны длине dx , то есть $dR = R_0 dx$, $dL = L_0 dx$, $dC = C_0 dx$, $dG = G_0 dx$, где величины R_0 (Ом/км), L_0 (Гн/км), C_0 (Ф/км), G_0 (См/км), называемые **первичными параметрами** линии, не зависят от координаты x в случае однородной линии, то есть такой линии, у которой провода и их взаимное расположение одинаковы по всей длине линии. Эти параметры не зависят обыкновенно также и от времени t . Смысл параметров следующий: R_0 , L_0 - это сопротивление и индуктивность линии длиной 1 км, замкнутой на конце, а C_0 , G_0 - емкость и проводимость утечки по изоляции для линии длиной 1 км с изолированными друг от друга проводами.

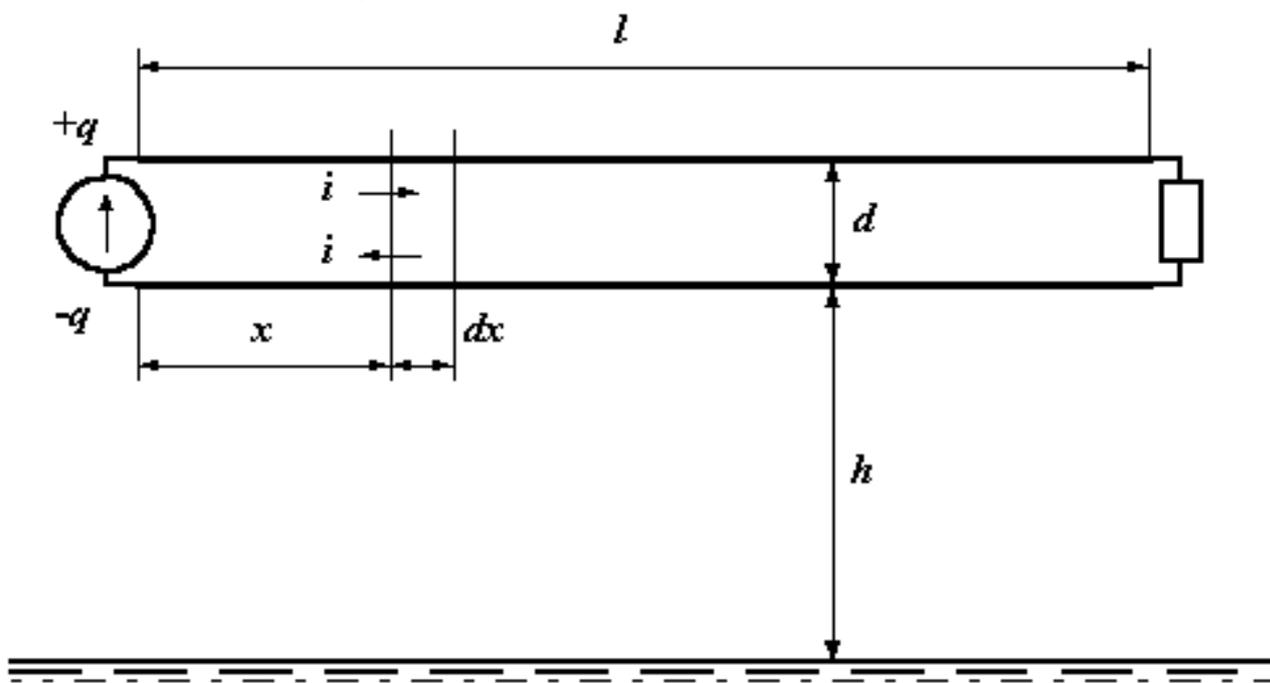


Рис. 3

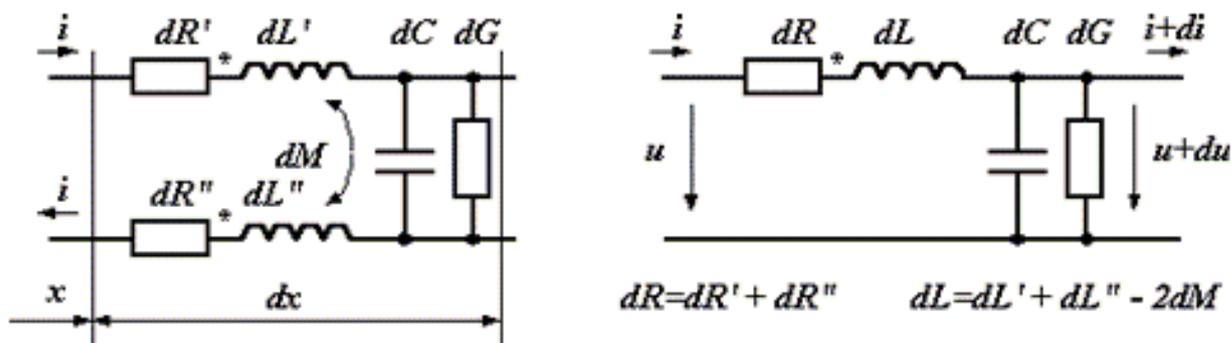


Рис. 4

Уравнения по законам Кирхгофа для малого участка dx по рис. 4б выглядят следующим образом:

$$u = i dR + dL \frac{\partial i}{\partial t} + u + du; \quad i = u dG + dC \frac{\partial u}{\partial t} + i + di,$$

что после простейших преобразований приводит к системе дифференциальных уравнений в частных производных, называемых телеграфными уравнениями длинной линии:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

Эти уравнения достаточно просто разрешаются для синусоидальных токов и напряжений, $u = U_m e^{j(\omega t + \psi)}$, $i = I_m e^{j(\omega t + \psi)}$, когда производные по времени заменяются произведением $j\omega$ на комплексное действующее значение напряжения или тока (j - мнимая единица, ω - круговая частота):

$$-\frac{d\dot{U}}{dx} = \underline{Z}_0 \dot{I}; \quad -\frac{d\dot{I}}{dx} = \underline{Y}_0 \dot{U} \quad (2)$$

где $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$; $\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$

После дифференцирования первого уравнения системы (2) по переменной x и подстановки в него второго уравнения получается уравнение вида

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \dot{U}; \quad \underline{\gamma}^2 = \underline{Z}_0 \underline{Y}_0$$

решением которого является выражение (3)

$$U = \underline{A}_1 e^{\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{-\underline{\gamma}x} \quad (3)$$

представляющее собою сумму отраженной $\underline{A}_1 e^{\underline{\gamma}x}$ и падающей $\underline{A}_2 e^{-\underline{\gamma}x}$ волн, распространяющихся в направлении убывания координаты x и в направлении нарастания соответственно. Величина $\underline{\gamma}$, определяющая этот процесс, называется **постоянной распространения**. Она составлена вещественной и мнимой частями, $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$, которые называют соответственно коэффициентом затухания (он определяет уменьшение амплитуды напряжения после

1 км распространения) и коэффициентом фазы (этот коэффициент определяет набег фазы напряжения через 1 км). Единицы их измерения - 1/км; иногда применяются для коэффициента затухания единица Нп/км (непер на километр), поскольку коэффициент стоит в показателе экспоненты, и Нп/км - это то же, что и 1/км. Для коэффициента фазы часто вместо 1/км указывают рад/км (что то же самое), поскольку этот коэффициент является показателем мнимой экспоненты, то есть аргументом синуса и косинуса в разложении мнимой экспоненты.

Для определения тока достаточно подставить решение (3) в первое уравнение системы (2), при этом получается выражение (4)

$$\dot{i} = \frac{1}{\underline{Z}_B} (-\underline{A}_1 e^{\gamma x} + \underline{A}_2 e^{-\gamma x}) = -\frac{1}{\underline{Z}_B} \dot{U}_O + \frac{1}{\underline{Z}_B} \dot{U}_N \quad (4)$$

в котором ток также представлен суперпозицией отраженной и падающей волн. В выражениях (3) и (4) $\underline{A}_1 \underline{A}_2$ - комплексные константы, определяемые источником энергии и нагрузкой в начале и в конце линии, а

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$$

называется **волновым сопротивлением** линии, поскольку определяет соотношение между волнами напряжения и тока.

Величины $\underline{\gamma}$ и \underline{Z}_B называют еще вторичными параметрами линии.

При задании граничных условий в линии будут определены константы в решении (3) - (4) и могут быть получены формулы с гиперболическими функциями. При рассмотрении процессов, происходящих на частоте 50 Гц, можно пока обойтись без этого, но в дальнейшем, при рассмотрении вопросов расчета мешающих влияний, придется иметь дело со вторичными параметрами линии и с гиперболическими функциями.

2.3. Модель однопроводной линии при сближении с контактной сетью

В этом разделе речь пойдет уже не о простейшей двухпроводной линии. Однако дело не столь уж сложное: однопроводную линию с возвратом тока через землю можно заменить эквивалентной двухпроводной линией, если высота подвеса провода над землей электрически мала (то есть много меньше длины волны электромагнитного поля в воздухе для синусоидальных напряжений и токов). При этом второй провод заменяет землю, и задача остается в рамках простейшей линии. Вопрос же о параметрах эквивалентной линии пока оставим в покое.

Необходимость подобного рассмотрения ясна: придется разбираться и с процессами в тяговой сети (контактная сеть - заземленные рельсы), и с напряжениями на проводе связи относительно земли (которые могут быть опасными для людей).

Кроме того, будем далее предполагать малой в электрическом смысле и ширину сближения, что выполняется всегда и на высших гармониках. Подобные предположения позволят воспользоваться статическими понятиями емкости, собственной и взаимной индуктивности элементов; вопрос, таким образом, будет заключаться в степени необходимого дробления схемы для возможности рассмотрения напряжений внутри распределенной системы.

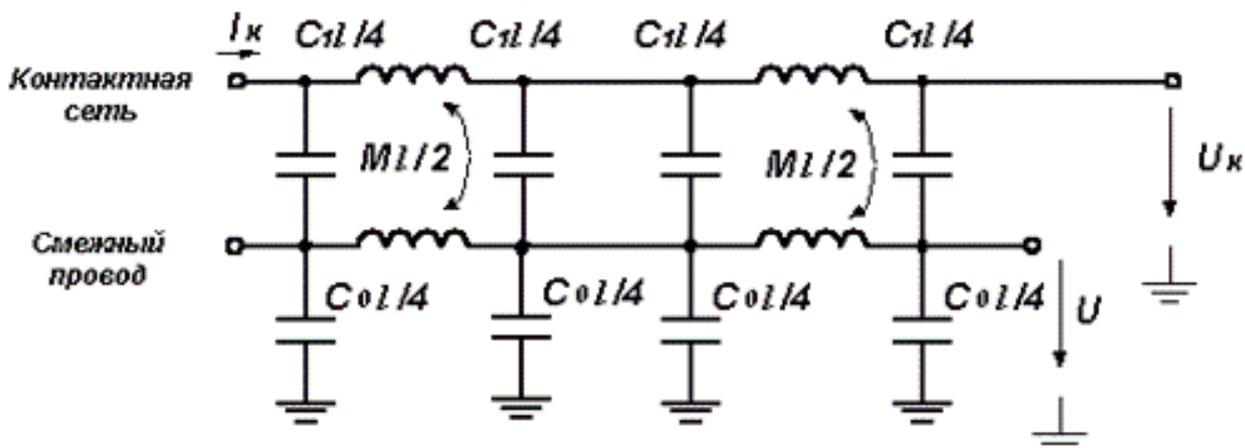


Рис. 5

Если вести речь только об опасных влияниях, сказывающихся на основной частоте, то и длина системы обычно электрически мала, и можно вполне обойтись схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Нужно, однако, иметь в виду, что для емкостного элемента предполагается эквипотенциальность обкладок, что потребует представления двухпроводной системы не одним, а несколькими конденсаторами. В целом же можно воспользоваться обычным приемом эквивалентирования длинной линии цепочечными схемами [10], выбрав для одной ячейки П-образную схему замещения и пренебрегая для простоты активными элементами. Чтобы иметь представление о напряжениях в середине линии, нужно взять по крайней мере две таких ячейки (рис. 5).

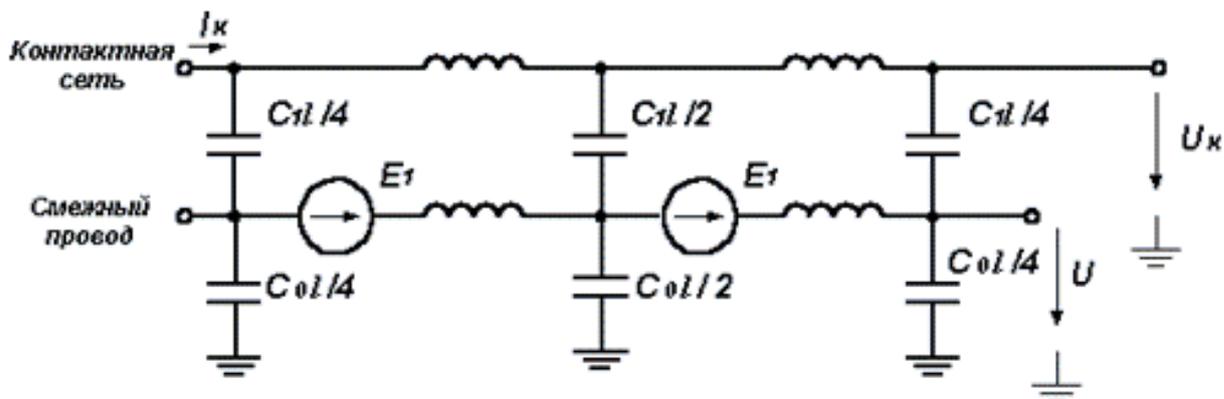


Рис. 6

На этом рисунке C_1 - емкость между контактной сетью и смежным проводом на 1 км длины системы, C_0 - емкость 1 км смежного провода по отношению к земле, M - взаимная индуктивность между контактной сетью и смежным проводом на 1 км длины смежного провода, l - длина

смежного провода. Взаимную индуктивность можно учесть либо вносимым в схему смежного провода сопротивлением, либо эквивалентным источником ЭДС, определяемым законом электромагнитной индукции. Далее будет использован последний метод, так что в схеме вместо взаимной индуктивности будет источник ЭДС в каждой ячейке для провода связи с направлением в соответствии с направлением тока I_k (слева направо для рис. 5).

Величина ЭДС равна для синусоидального тока $\dot{E} = -j\omega M \dot{I}_k l/2$ при двух ячейках, что изображено на рис. 6.

РЕЗЮМЕ

Для высших гармоник наводимых токов и напряжений смежную линию уже нельзя считать электрически короткой, поскольку за время распространения электромагнитного поля вдоль линии напряжение на ее входе успевает заметно измениться.

В простейшем случае для анализа влияний контактной сети на смежную линию можно воспользоваться П-образной схемой замещения смежного провода с LC-элементами, составленной из двух ячеек. Электрическое влияние контактной сети отображается емкостными элементами, включенными между контактной сетью и смежным проводом связи, а магнитное - источниками ЭДС. Величины ЭДС источников определяются взаимной индуктивностью между контактной сетью и смежным проводом и током контактной сети.

Возврат к оглавлению

Лекция 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

3.1. Электрическое влияние при разных режимах работы смежной линии

Если во влияющей линии (контактной сети) ток не протекает, то магнитного влияния на смежную линию нет, остается электрическое влияние за счет рабочего напряжения влияющей линии. Электрическое влияние создается только переменным напряжением, поскольку при постоянном напряжении не будут протекать емкостные токи и утечка по изоляции смежного провода на землю определит нулевое напряжение на смежном проводе по отношению к земле.

Наводимые при электрическом влиянии напряжения и токи в смежной линии сильно зависят от того, изолирована ли смежная линия от земли или заземлена. Рассматривая только наведенные токи и напряжения, можно говорить о трех характерных режимах работы смежного провода (рис. 7):

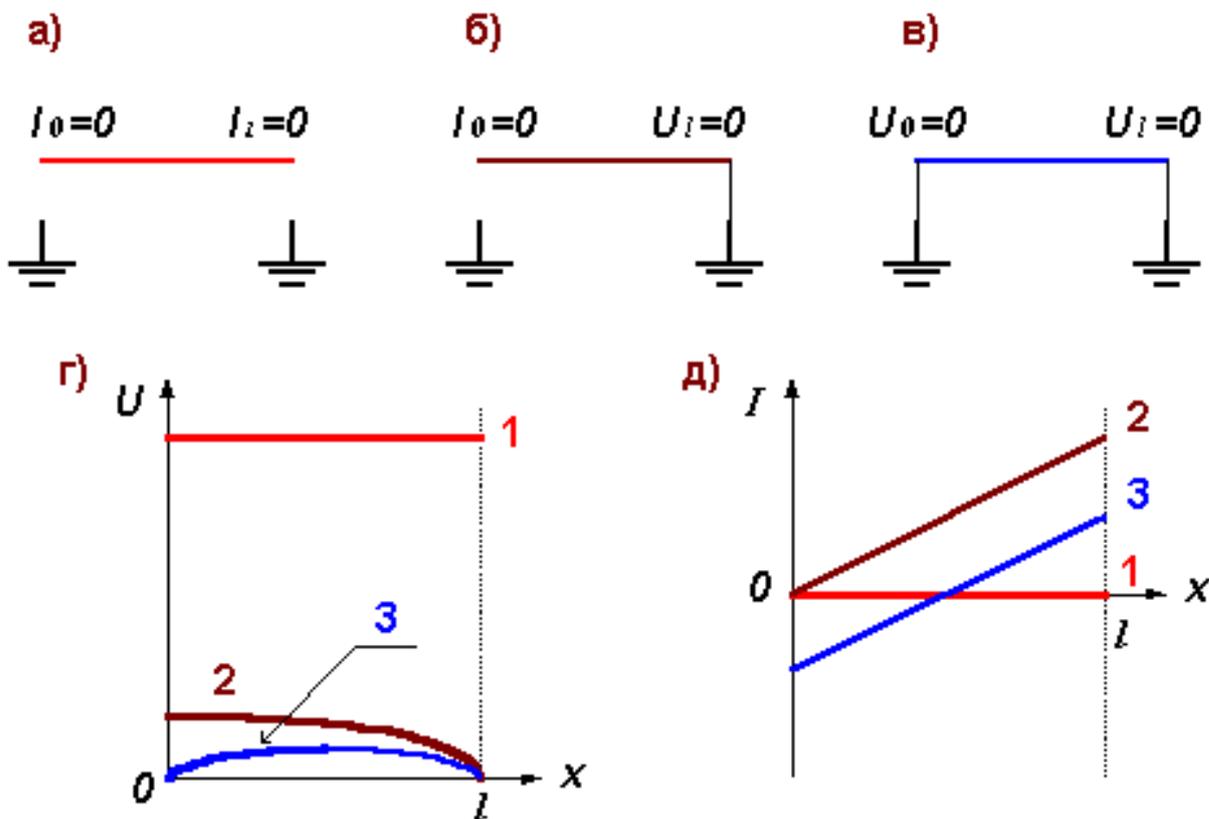


Рис. 7

1) изолированный от земли смежный провод, в начале и в конце провода ток в нем равен нулю (рис. 7а);

2) провод в начале изолирован, в конце заземлен на заземлитель с очень малым сопротивлением; ток в начале провода равен нулю, напряжение относительно земли в конце провода равно нулю (рис. 7б);

3) провод заземлен в начале и в конце, напряжения в начале и в конце относительно земли нулевые (рис. 7в).

На рис. 7г изображена зависимость наводимого на смежный провод напряжения по отношению к земле от расстояния от начала смежного провода для всех трех случаев. Поскольку индуктивное сопротивление провода мало по сравнению с емкостным сопротивлением системы провод-земля, то случай 3 (так же, как и случай 2) на самом деле будет характеризоваться гораздо меньшим напряжением, чем это показано на рис. 7г в предположении линейных осей координат. Рис. 7д отображает распределение тока по смежному проводу, причем нулевой ток случая 1 следует из того, что емкостный делитель по рис. 5 определяет одинаковость потенциалов разных точек вдоль провода; положительным изображен ток, протекающий слева направо, а случай 3 проиллюстрирован на рис. 8.

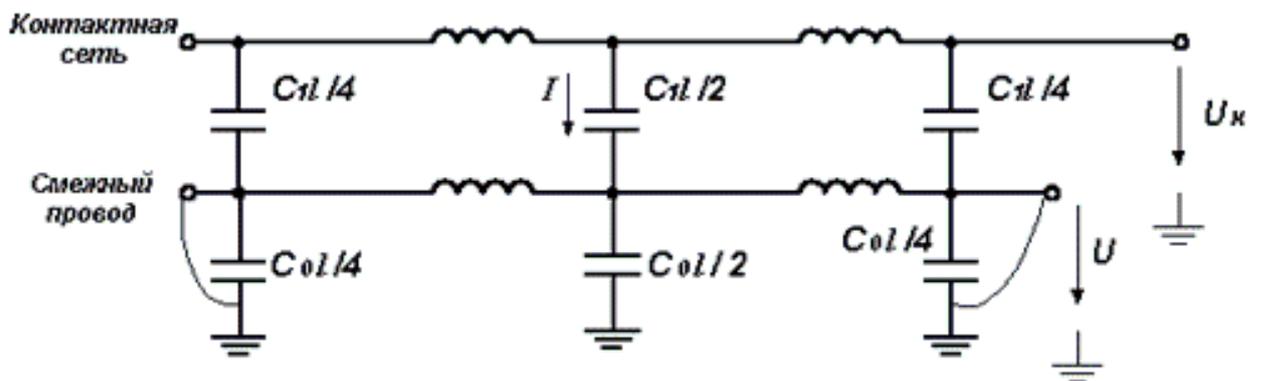


Рис. 8

Максимальное напряжение электрического влияния наводится в случае 1, то есть на изолированном от земли смежном проводе. Ток по проводу при этом нулевой, а наводимое напряжение определяется емкостным делителем (что было уже указано в разделе 1.1):

$$U = U_0 \frac{C_1 l}{C_1 l + C_0 l} = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_0}$$

если смежный провод параллелен контактной сети и полностью расположен в зоне влияния. Наводимое напряжение при этом не зависит от длины провода. Если же смежный провод частично выходит за пределы зоны влияния, то емкость его относительно земли пропорциональна его длине $l_э$:

$$U = U_0 \frac{C_1 l_э}{C_1 l_э + C_0 l} \approx U_0 \frac{C_1 l_э}{C_0 l} \quad (5)$$

Величины емкостей в формуле (5) могут быть найдены из первой группы формул Максвелла, определяющей распределение напряжений в системе изолированных заряженных тел.

3.2. Определение наводимых напряжений при электрическом влиянии

При изолированном смежном проводе можно говорить о системе двух проводящих тел (контактная сеть и смежный провод), расположенных над плоской поверхностью проводящей земли. Связи между потенциалами тел и их зарядами в электростатическом варианте описываются первой группой формул Максвелла, которая здесь и используется для определения наведенных напряжений.

Предполагается, что провода системы прямолинейные тонкие, параллельны друг другу и поверхности плоской проводящей земли. Контактную сеть представим одним проводом; можно подойти к задаче и в более строгом варианте с двумя проводами контактной подвески, что приведет только к уточнению коэффициентов.

Потенциалы от всех четырех проводов просто суммируются друг с другом в каждой точке, что дает для любой точки M выражение (6)

$$\varphi = \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{AM}}{r_{AM}} + \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{B'M}}{r_{BM}} \quad (6)$$

и постоянная интегрирования равна нулю, если принять $j=0$ на поверхности земли. Формула (6) верна и для поверхности проводов (но не внутри их), поэтому из нее можно записать два выражения для потенциалов контактной сети и смежного провода:

$$\left. \begin{aligned} U_k &= \tau_k \alpha_{11} + \tau \alpha_{12} \\ U &= \tau_k \alpha_{21} + \tau \alpha_{22} \end{aligned} \right\}, (7)$$

$$\text{где } \alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{A'A}}{r_k}; \quad \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{B'A}}{r_{BA}}; \quad \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{A'B}}{r_{AB}};$$

$\alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{B'B}}{r}$ - потенциальные коэффициенты, r и r_k - радиусы проводов (для контактной сети - эквивалентный радиус). Поскольку смежный провод считается не заряженным, то $t=0$; $r_{B'A} = r_{A'B} = D$, $r_{AB} = d$, $r_{A'A} = 2b$, так что уравнения (7) после деления их друг на друга дают формулу для вычисления напряжения электрического влияния в следующем виде:

$$U = U_k \frac{\ln(D/d)}{\ln(2b/r_k)}$$

которая после учета условия $a > b, c$ и получающегося отсюда упрощения

$$\ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \frac{2bc}{a^2 + b^2 + c^2}}{1 - \frac{2bc}{a^2 + b^2 + c^2}} \approx \frac{2bc}{a^2 + b^2 + c^2}$$

приводит к следующему расчетному выражению (с распространением вывода на переменное напряжение и записью для комплексов действующих значений напряжений):

$$\dot{U} = k \dot{U}_k \frac{bc}{a^2 + b^2 + c^2},$$

$$k = \frac{2}{\ln(2b/r_k)}$$

где k - константа. По аналогии с формулой (5) необходимо в общем случае добавить сомножитель l_j/l при выходе смежного провода за пределы зоны влияния, а при сложной трассе с n участками параллельного и косоугольного сближения нужно

просуммировать отдельные напряжения по участкам (поскольку напряжение провод-земля определяется падением напряжения на емкости провода от суммарного протекающего тока):

$$\dot{U} = \frac{k\dot{U}_k}{l} \sum_{i=1}^n \frac{bc}{a_i^2 + b^2 + c^2} l_{\partial i} \quad (8)$$

Для контактной сети переменного тока 1х25 кВ (контактный провод и несущий трос) $k=0.4$ для однопутных участков и $k=0.6$ для двухпутных участков.

Формула (8) позволяет рассчитать напряжение электрического влияния для наихудших условий с точки зрения режима смежного провода по отношению к земле. Надо заметить, что на кабельные линии электрического влияния нет из-за экранирующего действия заземленной оболочки или экрана кабеля.

Степень опасности наводимого напряжения для человека определяется двумя основными факторами. Первый фактор - разряд емкости смежный провод-земля при прикосновении человека, стоящего на земле или соприкасающегося с заземленным объектом, со смежным проводом. Эта емкость достаточно велика; так, изолированная секция контактной сети имеет емкость по отношению к земле порядка 0.014 мкФ/км. Второй фактор - длительное протекание емкостного тока частотой 50 Гц, определяемое в основном емкостью системы контактная сеть - смежный провод. Опасность наводимого напряжения особенно велика, когда смежный провод подвешен на опорах контактной сети или представляет собой отключенную секцию контактной сети.

При отключении питания контактной сети одного из путей двухпутного участка изолированную незаземленную контактную сеть можно рассматривать как провод, подверженный электрическому влиянию со стороны контактной сети второго пути. Расчет по формуле (8) в этом случае сильно занижает реальное значение наводимого напряжения. Более точные расчеты и реальные измерения показывают, что на отключенной секции контактной сети двухпутного участка наводится около 8 кВ со стороны контактной сети соседнего пути. При заземлении отключенной секции наводимое напряжение падает почти до нуля, а ток, протекающий через точку заземления, определяется емкостью C_1 (порядка 0.005 мкФ/км) и длиной l отключенной секции:

$$I = \omega C_1 U_k \approx 0.04l, \text{ A}$$

если длина l измеряется в километрах. С каждого километра отключенной секции будет стекать при заземлении ток порядка 40 мА. При неосторожном касании человеком незаземленной секции контактной сети ток будет практически таким же, поскольку сопротивление тела человека (порядка 1 кОм) много меньше

емкостного сопротивления ωC_1 системы отключенная секция контактной сети - контактная сеть второго пути.

РЕЗЮМЕ

Электрическое влияние контактной сети переменного тока на смежный провод наибольшее при изолированном от земли смежном проводе. Величина напряжения электрического влияния определяется при этом емкостным делителем контактная сеть - смежный провод и смежный провод - земля.

Расчетная формула для напряжения влияния получается из первой группы формул Максвелла при некоторых упрощающих предположениях.

На отключенную незаземленную секцию контактной сети двухпутного участка, электрифицированного по системе 1х25 кВ, наводится примерно 8 кВ со стороны контактной подвески, оставшейся под напряжением. При заземлении отключенной секции с нее будет стекать емкостный ток, составляющий величину около 40 мА с каждого километра отключенной секции.

Возврат к оглавлению

Лекция 4.

МАГНИТНОЕ ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

4.1. Магнитное влияние при разных режимах работы смежной линии
Для анализа влияния режима смежного провода по отношению к земле рассмотрим те же три случая, что и для электрического влияния (рис. 7а, 7б, 7в). Чтобы оставить только магнитное влияние, предположим, что напряжение в контактной сети отсутствует, $U_k=0$ (короткое замыкание). Емкости связи можно при этом не учитывать, поскольку они обычно существенно меньше емкостей провода на землю. На рис. 10 изображена двухячейковая схема для этого варианта, в которой нужно последовательно предполагать изолированный смежный провод, заземленный в начале смежный провод и заземленный с двух концов смежный провод.

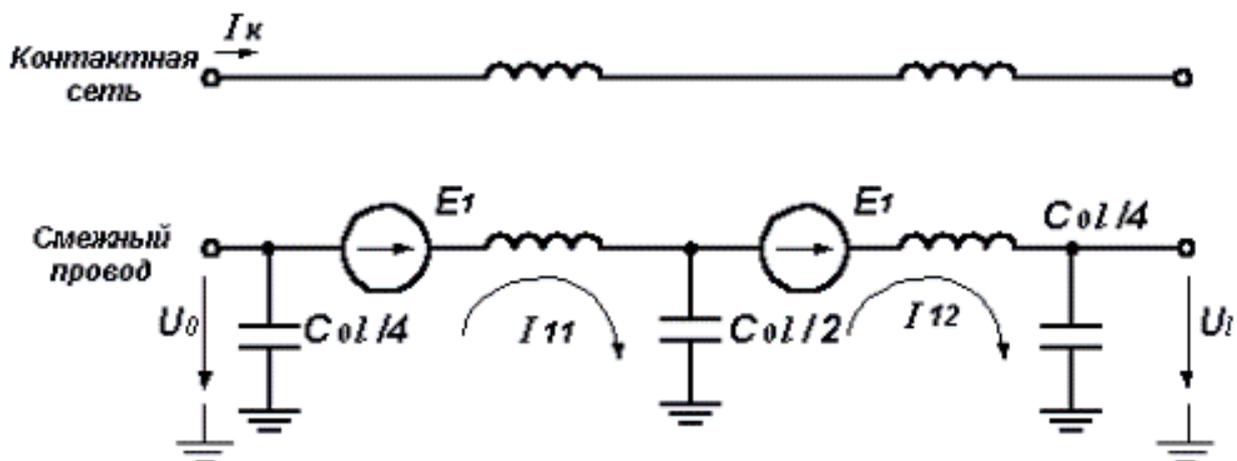


Рис. 10

При изолированном от земли проводе схема замещения рис. 10 составлена двумя одинаковыми ячейками с половинными источниками ЭДС величиной $\dot{E}_1 = -j\omega M \dot{I}_k l / 2$. Эти два источника создают два контурных тока, изображенные на рисунке. Как нетрудно видеть, на среднем емкостном элементе суммарный ток равен нулю, следовательно, напряжение на изолированном проводе относительно земли посередине него равно нулю! Этот несколько неожиданный вывод следует из распределенности создаваемой магнитным полем продольной ЭДС вдоль всего провода и может быть проиллюстрирован на примере витка провода на стержне трансформатора (рис. 11).

Контактная сеть и смежный провод связаны друг с другом через магнитное поле и вполне могут рассматриваться как обмотки трансформатора без сердечника, с количеством витков обмоток по одному. При заземлении одного из зажимов катушки напряжение на втором зажиме по отношению к земле равно ЭДС в катушке. При заземлении средней точки катушки на зажимах будут два половинных противофазных напряжения, и такая же картина будет в случае подключения двух конденсаторов на выводы катушки без заземления средней точки. В последнем случае все равно, будет ли что-либо присоединено между средним выводом катушки и землей. Смежный провод отличается от витка трансформатора только более слабой магнитной связью с первичным витком - контактной сетью.

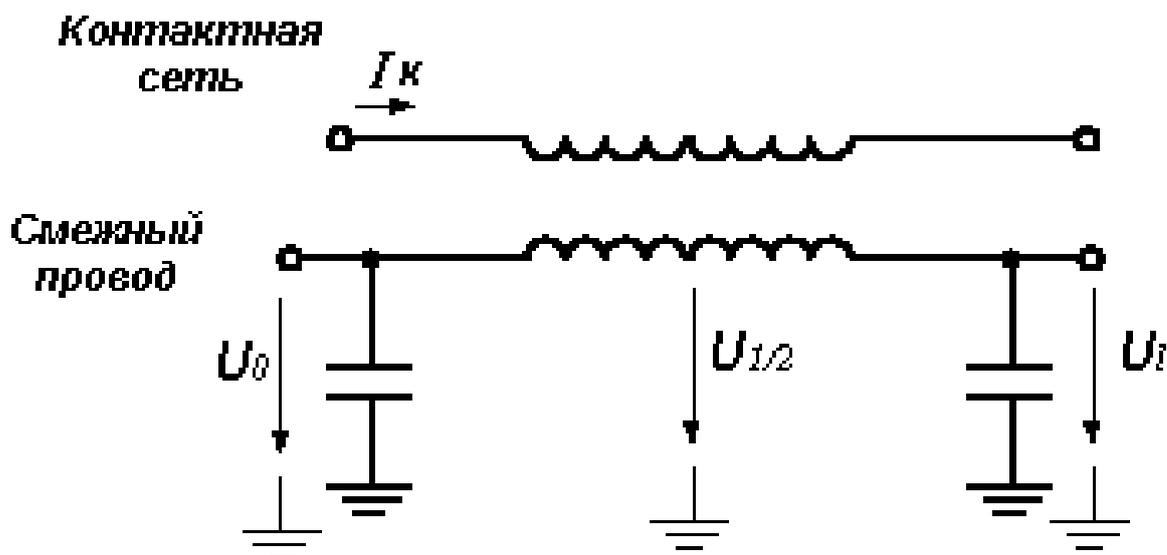


Рис. 11

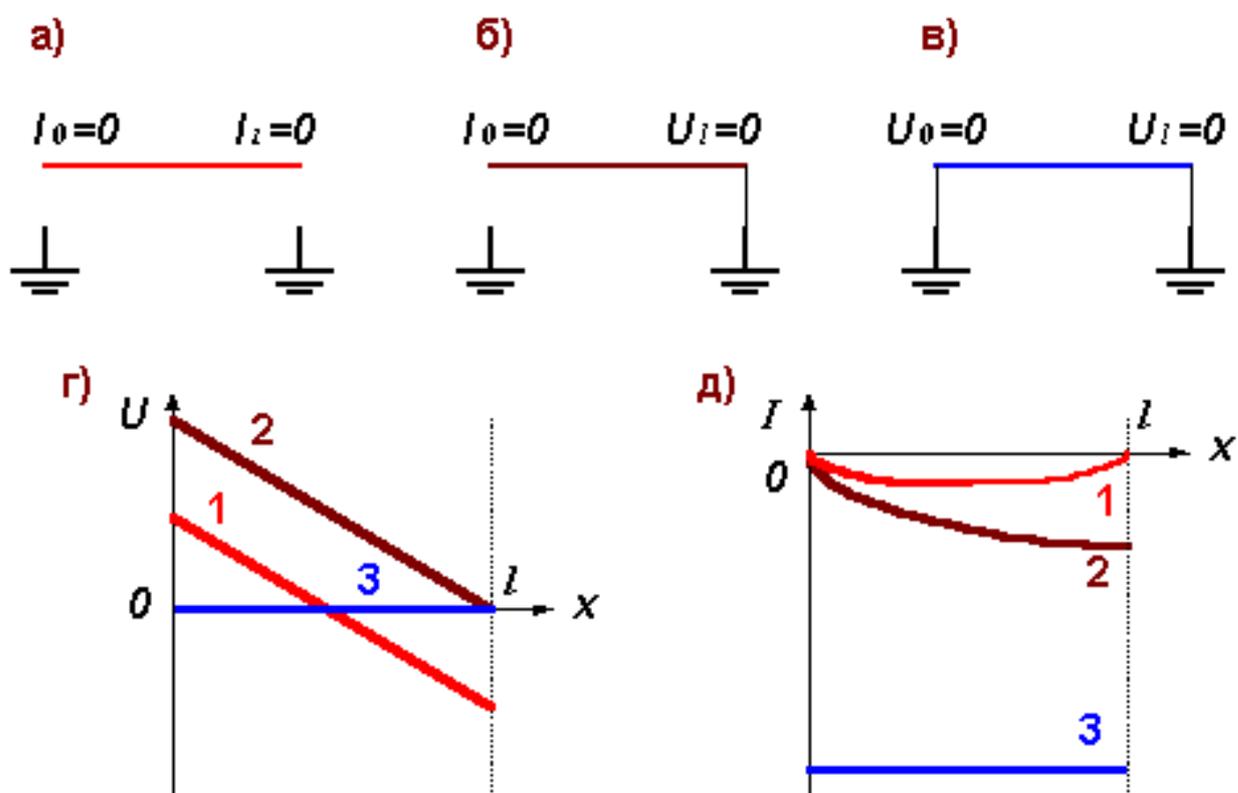


Рис. 12

Собственно, картина распределения напряжения вдоль провода уже ясна; если дополнить ее соображением о линейной связи наводимой ЭДС с длиной смежного провода (поскольку площадь этого витка и магнитный поток внутри него растут прямо пропорционально длине провода), то распределение напряжения провод-земля вдоль смежного провода по рис. 12г件но件но. Последний случай 3 (рис. 17в) соответствует нулевому напряжению относительно земли вдоль всего провода, если не учитывать сопротивление заземлений и активное сопротивление провода. Можно сослаться здесь на правило Ленца, согласно которому наведенные токи препятствуют изменению магнитного поля; можно снова взглянуть на рис. 11, представив

ситуацию короткого замыкания витка. При коротком замыкании возникающий в витке ток пытается полностью скомпенсировать магнитное поле в стержне магнитопровода, и только жесткая связь через магнитное поле с первичной катушкой не позволяет этому свершиться, приводя к резкому росту тока вплоть до ограничений его индуктивностью рассеяния и активным сопротивлением витка. Для провода в зоне влияния контактной сети ток растет только до компенсации вызывающего ЭДС магнитного поля, а ток контактной сети вовсе не станет компенсировать этот рост из-за слабой обратной связи по магнитному полю.

Хотя на рис. 12г изображен график действующего значения напряжения, которое должно быть всегда положительным, для обозначения переворота фазы напряжения на нем изображена часть линии в отрицательной полуплоскости. То же самое сделано и на рис. 12д для величины тока в смежном проводе, графики которого располагаются ниже оси абсцисс в связи с положительным направлением тока слева направо на рис. 12а, 12б, 12в и знаком минус в формуле для ЭДС по закону электромагнитной индукции. При заземлении провода с двух сторон ток одинаков по всей длине провода (линия 3), а в остальных случаях, как это следует из более корректного рассмотрения, ток зависит от координаты по квадратичному закону.

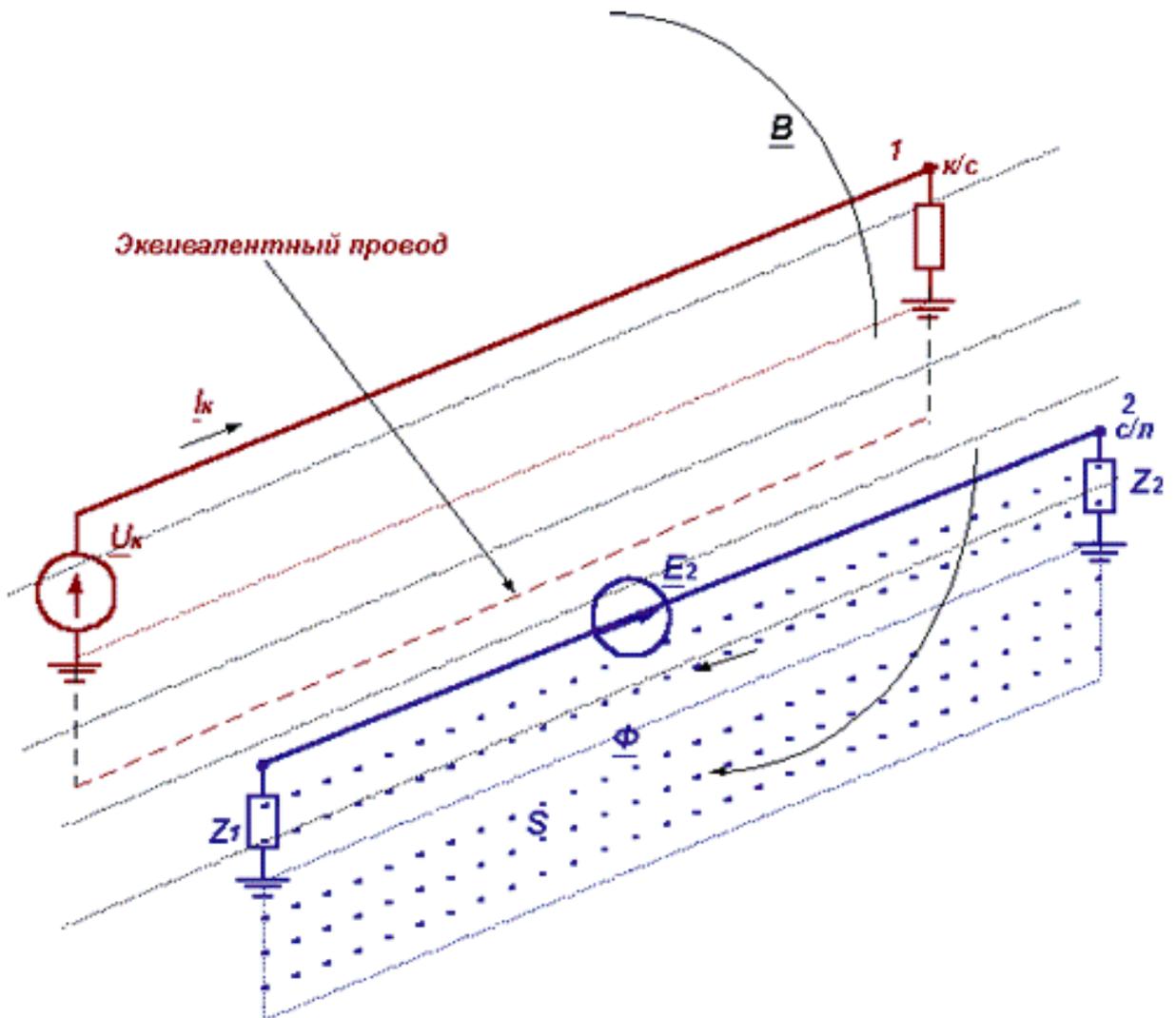
Расчетным вариантом для магнитного влияния является случай заземления провода на конце, при котором напряжение в начале равно полной ЭДС в проводе, взятой с противоположным знаком:

$$\dot{U}_0 = \underline{Z} \dot{I}_k l = j\omega M \dot{I}_k l \quad (9)$$

Формула (9) не учитывает экранирующего действия рельсов и других протяженных проводников.

При сложном сближении отдельные напряжения, наводимые на участках косоугольного или параллельного сближения, суммируются для вычисления напряжения в начале линии, поскольку соответствующие источники ЭДС включаются последовательно друг с другом.

4.2. Взаимная индуктивность между контактной сетью и смежным проводом. Понятие взаимной индуктивности вводится в электротехнике как следствие закона электромагнитной индукции и закона полного тока. Для двух замкнутых контуров из тонких проводов, один из которых (первый) создает магнитное поле, а второй находится в этом поле, так что его площадку пересекает магнитный поток Φ от первого контура, взаимной индуктивностью называют магнитный поток Φ внутри второго контура, создаваемый током 1 А первого контура. При синусоидальных токах во втором контуре при этом наводится ЭДС, равная $-j\omega\Phi$, то есть равная $-j\omega M I_k$ по определению взаимной индуктивности. Возможностью простого вычисления ЭДС и определяется ценность величины взаимной индуктивности M .



<> Рис. 13

Использование этого понятия для смежного провода над землей допустимо с точки зрения упоминавшейся ранее возможности замены земли эквивалентным обратным проводом. Глубина его расположения по отношению к поверхности (бывшей) земли тем больше, чем больше глубина проникновения в землю электрического тока и соответственно магнитного поля, которая увеличивается при уменьшении удельной проводимости земли и уменьшении частоты тока. Поэтому величина M тем больше, чем меньше проводимость земли, и уменьшается для высших гармоник несинусоидального тока, будучи определяема величиной магнитного потока, пересекающего эквивалентную площадку S под смежным проводом (рис. 13). Поскольку удобнее относить величину взаимной индуктивности к 1 км смежного провода (и ко всей создающей магнитное поле контактной сети), то ее корректное определение будет звучать для контактной сети и смежного провода так.

Взаимной индуктивностью между контактной сетью и 1 км смежного провода называют величину магнитного потока, пронизывающего площадку под 1 км смежного провода в воздухе и в земле, при намагничивающем токе контактной сети 1 А.

Формулы для расчета взаимной индуктивности впервые были получены Карсоном и Поллачеком на основе решения задачи об электромагнитном поле провода над плоской поверхностью однородной земли. "Правила защиты..." [1,2] предлагают номограммы и графики для определения взаимной индуктивности, а также приближенную формулу (10):

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

где a - ширина сближения, м; σ - удельная проводимость земли, См/м; f - частота влияющего тока, Гц.

РЕЗЮМЕ

Протекание тока в контактной сети вызывает появление на смежном проводе напряжения магнитного влияния, которое максимально на одном из концов провода при заземлении на другом конце.

Расчетные формулы для вычисления напряжения магнитного влияния получаются из понятия взаимной индуктивности контуров контактная сеть - земля и смежный провод – земля

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 5.

ЭКРАНИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ

5.1. Экранирующее действие параллельно расположенных проводников

В изложении двух предыдущих разделов речь шла только о влиянии контактной сети, хотя тяговая сеть составлена еще и рельсами, через которые ток протекает в обратном направлении, уменьшая магнитное влияние тяговой сети. Однако не только рельсы уменьшают магнитное влияние; подобным эффектом экранирующего действия обладают любые протяженные заземленные проводники вблизи железной

дороги, включая вторые провода двухпроводных линий, металлические покровы и жилы кабелей, металлические трубопроводы и т.п.

Для упрощения картины рассмотрим только электрически короткие провода (в смысле, обозначенном в разделе 1.3). Поскольку снижение общего магнитного поля за счет экранирующего действия проводников будет только при протекании тока в экранирующих проводниках, предположим далее хорошее заземление этих проводников по концам. Это условие равнозначно и распределенному заземлению, как у рельсов, поскольку при заземлении провода по концам, как это показано в разделах 3.1 и 4.1, напряжение провода относительно земли во всех точках нулевое (или очень малое), так что заземление провода в любой его точке не изменит электрический режим проводника.

Как и ранее, будем считать, что обратное влияние смежного провода на контактную сеть и на экранирующий проводник отсутствует; предположим, что подобной безответностью обладает и экранирующий проводник по отношению к контактной сети. Будем рассматривать тонкие прямолинейные провода. Длины экранирующих проводников пусть будут не менее длины смежных подверженных влиянию проводов.

При такой постановке задачи экранирующий проводник ничем не отличается от смежного провода: на нем за счет магнитного влияния

наводится ЭДС $\dot{E}_э = -j\omega M_{кэ} \dot{I}_к l$, вектор которого отстает от влияющего тока I_k на угол 90° . Эта ЭДС создает в проводнике ток $I_э$, отстающий от ЭДС на угол j , несколько меньший 90° , поскольку сопротивление проводника имеет активно-индуктивный характер (рис. 14). Величина тока равна

$$\dot{I}_э = \frac{\dot{E}_э}{Z_{оэ} l} = \frac{-\dot{I}_к Z_{кэ}}{Z_{оэ} l}, (11)$$

где $Z_{оэ} = R_{оэ} + j\omega L_{оэ}$ - сопротивление 1 км экранирующего проводника, $Z_{кэ} = j\omega M_{кэ}$ - сопротивление взаимной индуктивной связи между контактной сетью и экранирующим проводником. Этот ток вполне можно рассматривать как влияющий ток, он наводит в смежном проводе ЭДС, величина которой определяется так же, как и для контактной сети:

$$\dot{E}_{эс} = -Z_{эс} \dot{I}_э l, (12)$$

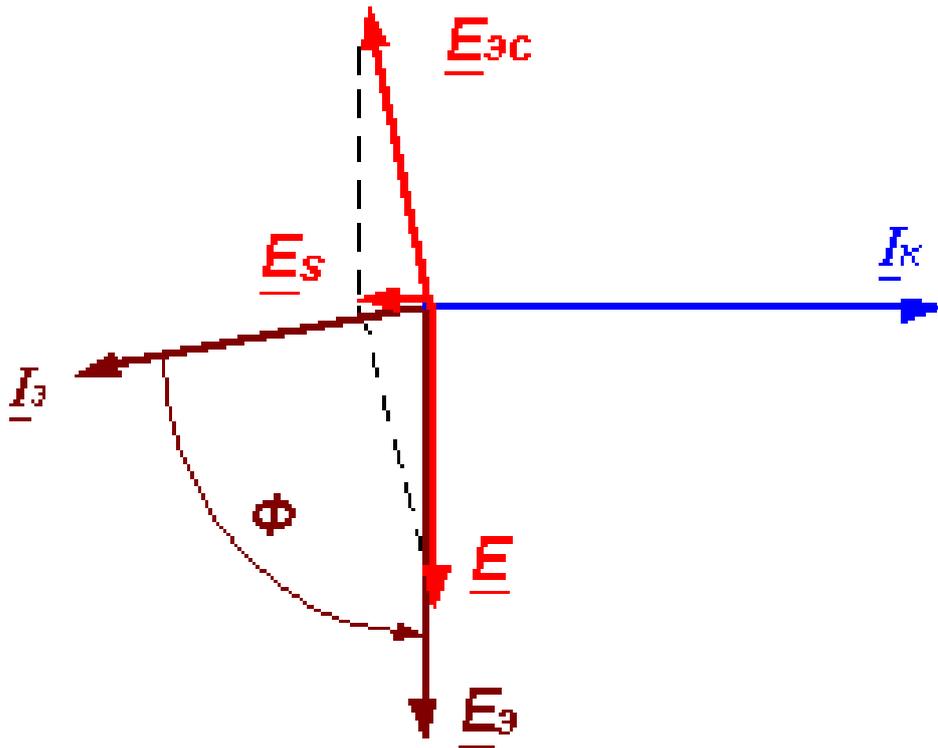


Рис. 14

где $Z_{эс} = j\omega M_{эс}$ - взаимоиндуктивное сопротивление между экранирующим проводником и смежным проводом на 1 км длины смежного провода. Суммарная ЭДС \underline{E}_s , как это видно из векторной диаграммы рис. 14, существенно меньше ЭДС без экранирующего проводника из-за почти 180-градусного сдвига фаз между двумя наводимыми ЭДС.

Количественной характеристикой экранирующего действия служит коэффициент экранирования, равный отношению суммарной ЭДС к ЭДС, наведенной током контактной сети (то есть к ЭДС без учета экранирования) $\underline{s} = \underline{E}_s / \underline{E}$. Его можно определить на основании соотношений (11) и (12), обозначив $\underline{Z} = j\omega M$:

$$\dot{E}_s = \dot{E} + \dot{E}_{эс} = -\underline{Z} \dot{I}_k l - \underline{Z}_{эс} \dot{I}_э l = -\underline{Z} \dot{I}_k l + \frac{\underline{Z}_{эс} \dot{I}_k l \underline{Z}_{кэ}}{\underline{Z}_{оэ}} ; (13)$$

$$\underline{s} = \frac{\underline{E}_s}{\underline{E}} = 1 - \frac{\underline{Z}_{эс} \underline{Z}_{кэ}}{\underline{Z}_{оэ} \underline{Z}} . (14)$$

Коэффициент экранирования по модулю лежит между нулем и единицей, и чем он меньше, тем лучше экранирование. Последнее случается, как это видно из формулы (14), когда больше влияние экранирующего проводника на смежный провод, больше влияние контактной сети на экранирующий проводник и когда меньше собственное сопротивление экранирующего проводника и влияние контактной сети на смежный провод.

5.2. Экранирующее действие рельсов Ток электровоза обычно стекает с рельсов в землю на сравнительно небольшом расстоянии от

электровоза - не более километра. Это позволяет говорить о том, что в рельсах протекает только индуктированный со стороны контактной сети ток, то есть рельсы можно рассматривать в качестве экранирующего проводника. Соответствующая картинка в поперечном сечении показана на рис. 15. Направления токов \underline{I}_k и \underline{I}_p - от наблюдателя (в одну сторону). По аналогии с формулой (13) суммарная ЭДС равна

$$\dot{E}_s = \dot{E} + \dot{E}_{pc} = -\underline{Z} \dot{I}_k l - \underline{Z}_{pc} \dot{I}_p l = -\underline{Z} \dot{I}_k l + \frac{\underline{Z}_{pc} \dot{I}_k l \underline{Z}_{kp}}{\underline{Z}_{op}}, \quad (15)$$

поскольку значения сопротивлений \underline{Z} и \underline{Z}_{pc} близки друг к другу (когда ширина сближения существенно больше высоты смежного провода над землей и высоты эквивалентного контактного провода), то формула (15) упрощается:

$$\dot{E}_s = -\underline{Z} \dot{I}_k l \left(1 - \frac{\underline{Z}_{kp}}{\underline{Z}_{op}}\right),$$

Контактная сеть

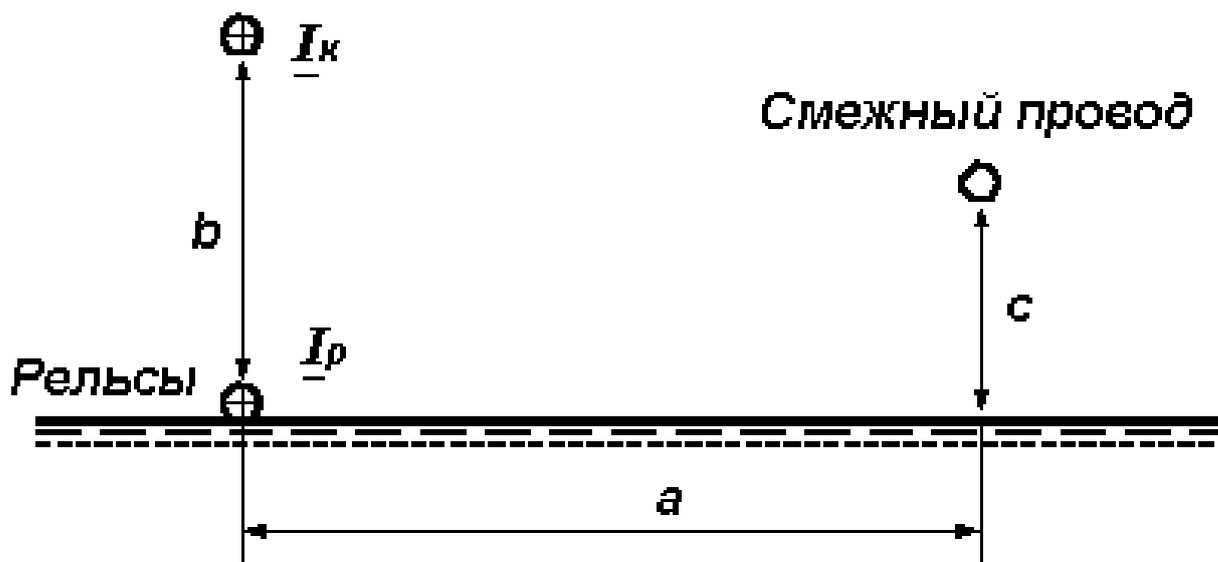


Рис. 15
откуда коэффициент экранирования рельсов определится формулой (16):

$$\underline{s}_p = 1 - \frac{\underline{Z}_{kp}}{\underline{Z}_{op}}, \quad (16)$$

где $\underline{Z}_{kp} = j\omega M_{kp}$ - сопротивление взаимоиндуктивной связи 1 км рельсов с контактной сетью, $\underline{Z}_{op} = R_{op} + j\omega L_{op}$ - сопротивление 1 км цепи рельсы-земля. Активное сопротивление рельсов сравнительно большое, а k_p меньше L_{op} , поэтому большого экранирующего эффекта рельсы не дают. При удельной проводимости земли от 0.001 См/м до 0.1 См/м значение \underline{s}_p составляет 0.45...0.6 для однопутных участков и 0.4...0.55 для двухпутных, и только при ширине сближения менее 10 м из-за

несимметрии рельсов и контактной сети относительно смежной линии экранирующее действие рельсов усиливается, значение s_p снижается до 0.35...0.1 при проводимости земли 0.04 См/м.

В итоге формула для расчета ЭДС магнитного влияния должна быть дополнена коэффициентом экранирования рельсов:

$$\dot{E}_s = -j\omega M \dot{I}_k l s_p. (17)$$

Можно рассматривать в качестве провода, находящегося в зоне влияния, обесточенную контактную сеть второго пути двухпутного участка, если по первому пути пропускаются поезда. Правила безопасности требуют навешивания двух заземляющих штанг с обеих сторон от места производства работ со снятием напряжения и заземлением на контактной сети. Если навесить только одну штангу, то электрического влияния практически не будет, но вот за счет магнитного влияния на удалении l от заземляющей штанги в соответствии с формулой (17) будет наводиться напряжение $U_M = \omega M I_k l s_p$, или в пересчете на 1 кА тока и на 1 км длины

$$\frac{U_M}{I_k l} = \omega M s_p,$$

что составит примерно 150 В/(кА*км) - 150 вольт на 1 килоампер тока на каждый километр расстояния от заземляющей штанги. По правилам безопасности расстояние между двумя заземляющими штангами не должно превышать 200 м, при этом в случае возможного плохого контакта одной из штанг наведенное напряжение магнитного влияния в месте установки штанги с плохим заземлением сравнительно невысокое.

5.3. Экранирующее действие оболочки кабеля Если в качестве отправной точки взять однопроводную линию, то кабель коренным образом отличается от нее наличием проводящей оболочки - то ли защитной оболочки и брони, то ли специальной экранирующей оболочки. В простейшем варианте кабель имеет одну жилу и коаксиальный экран, как это показано на рис. 16а в поперечном сечении. Для такой конструкции справедливо выражение (14) для коэффициента экранирования:

$$s = 1 - \frac{Z_{об-ж} Z_{к-об}}{Z_{о-об} Z}$$

где индекс "э" заменен на "об" - оболочка, индекс "с" (смежный провод) - на "ж" (жила), а Z означает сопротивление взаимной индукции между контактной сетью и жилой. Жила и оболочка кабеля находятся практически на одной линии, то есть $Z_{к-об} = Z$.

Кроме того, $L_{о-об} = M_{об-ж}$, поскольку собственная индуктивность оболочки (без внутренней индуктивности) определяется магнитным потоком в контуре, помеченном на рис. 16б пунктирными линиями, при токе в оболочке 1 А, а взаимная индуктивность между оболочкой и жилой определяется магнитным потоком, создаваемым током оболочки 1 А в

контуре жилы, помеченном точечными линиями. Эти два контура практически совпадают, поэтому

$$\underline{\varepsilon}_{об} = 1 - \frac{Z_{об-ж}}{Z_{о-об}} = 1 - \frac{j\omega M_{об-ж}}{R_{о-об} + j\omega L_{о-об}} = \frac{R_{о-об} + j\omega(L_{о-об} - M_{об-ж})}{R_{о-об} + j\omega L_{о-об}}$$

так что коэффициент экранирования кабеля (называемый еще коэффициентом защитного действия) определяется активным сопротивлением его оболочки:

$$\underline{\varepsilon}_{об} = \frac{R_{о-об}}{R_{о-об} + j\omega L_{о-об}} \quad (18)$$

К сожалению, для кабеля в земле принятое при выводе формулы (14) предположение об электрически коротком экранирующем проводнике уже неприемлемо, поскольку длина волны электромагнитного поля в земле как в проводнике много меньше, чем длина волны поля в воздухе. Кроме того, сопротивления заземления оболочки кабеля по концам реально не равны нулю. Поэтому коэффициент экранирования, определяемый формулой (18), называют идеальным коэффициентом экранирования. Реальный коэффициент экранирования для кабелей с ферромагнитными покровами зависит и от величины наводимой в нем ЭДС магнитного влияния из-за зависимости магнитной проницаемости оболочки от величины тока в ней. С ростом ЭДС магнитная проницаемость сначала увеличивается со снижением коэффициента экранирования, а затем, при насыщении ферромагнетика, падает с увеличением $\underline{\varepsilon}_{об}$ и ухудшением экранирования. "Правила защиты..." [1, 2] содержат информацию по определению реальных коэффициентов экранирования разных типов кабелей в зависимости от величины продольной ЭДС на оболочке на 1 км ее длины.

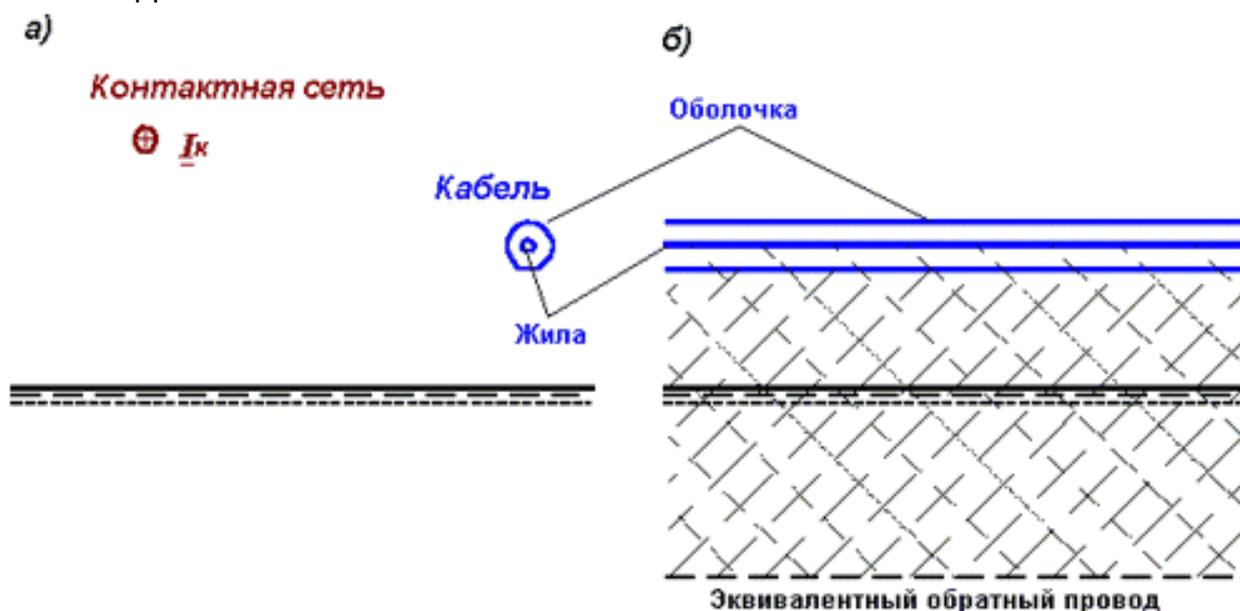


Рис. 16

Кроме оболочки кабеля, в многожильном кабеле экранирующим действием обладают и соседние жилы, у которых обычно $s_{ж} > 0.9 \dots 0.95$, то есть действие жил сравнительно мало.

Результирующая ЭДС в жиле кабеля будет определяться выражением (19)

$$\dot{E}_s = -j\omega M \dot{I}_k l \xi_p \xi_{об} \xi_{жс}. \quad (19)$$

РЕЗЮМЕ

Рельсы, оболочки кабелей и другие проводящие заземленные объекты снижают напряжение магнитного влияния. Учет экранирующего действия подобных объектов производится введением коэффициента экранирования, показывающего остающуюся долю наводимого напряжения из-за экранирования.

Лекция 6.

ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ

6.1. Особенности гальванического влияния

Закономерности гальванического влияния существенно отличаются от закономерностей электрического и магнитного влияний. Наиболее существенные отличия заключаются в следующем.

1. Гальваническому влиянию подвержены смежные линии, имеющие заземления (однопроводные цепи, проложенные в земле металлические сооружения и коммуникации, кабели). Очевидно, что для проявления влияния необходимо либо минимум две точки заземления, либо гальванический контакт с рельсом и минимум одна точка заземления.

2. Гальваническое влияние вызывается так называемыми блуждающими токами, возникающими вследствие утечки тока из рельсов в землю. Потенциалы отдельных точек земли зависят при этом от тока в контактной сети, сопротивления рельсов, переходного

сопротивления рельсы - земля, удельной проводимости земли. Из-за неоднородности земли и изменения тока в рельсах потенциалы точек земли вблизи рельсов изменяются нерегулярно во времени и по поверхности земли.

Контактная сеть

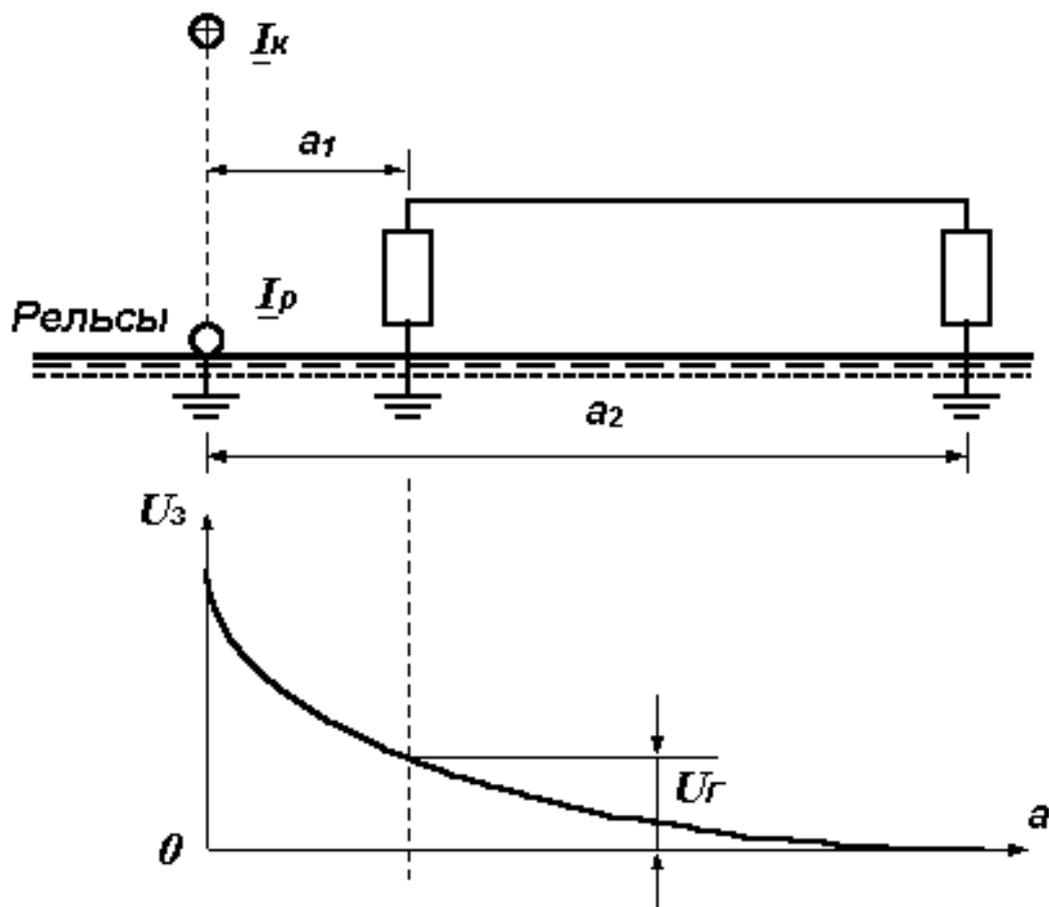


Рис. 17

3. Наибольшая величина напряжения при гальваническом влиянии наводится при расположении смежной линии перпендикулярно к оси железной дороги и в случае, когда один из заземлителей однопроводной линии находится в удаленной точке земли с нулевым потенциалом (рис. 17).

4. Оценку величины U_r в зависимости от ширины сближения, проводимости земли и глубины заземлителя для тока контактной сети 1000 А можно провести по графикам "Правил защиты..." [1,2]. Расчеты проводят для двух режимов работы тяговой сети: короткого замыкания и вынужденном. При переменном токе с гальваническим влиянием можно не считаться, если удельная проводимость земли более 0.1 См/м, а также при наличии в тяговой сети отсасывающих трансформаторов.

5. При электрификации на постоянном токе основную опасность гальванического влияния составляет электрокоррозия подземных сооружений.

В связи с указанной спецификой гальванического влияния в данном разделе будет рассматриваться влияние тяговой сети постоянного тока.

6.2. Качественная картина влияния блуждающих токов на подземные сооружения

Анализ закономерностей гальванического влияния сильно усложняется неоднородностью структуры земли, поэтому далее представлены лишь самые общие закономерности гальванического влияния на подземную коммуникацию, расположенную параллельно оси железной дороги. Качественная картина влияния рассмотрена на простейшей схеме рис. 18а, где представлены тяговая подстанция постоянного тока и один электровоз. Буквой Р обозначены рельсы, К - коммуникация (кабель или трубопровод), стрелками показаны пути протекания тока, расстояние между подстанцией и нагрузкой - l . Попробуем проследить процессы в этой системе с точки зрения возможной электрокоррозии.

В системе есть некоторое падение напряжения на контактной сети и в рельсах (вместе с землей), а в основном напряжение подстанции падает на электровозе. Из-за протекания тока в рельсах и в земле нулевой потенциал (соответствующий потенциалу удаленной земли) находится где-то посередине между подстанцией и электровозом, в точке заземления подстанции потенциал отрицателен, а у электровоза - положителен. На рис. 18б показано распределение потенциала по координате, отсчитываемой от тяговой подстанции, для рельса φ_p и для земли под рельсом φ_3 . За счет разности этих потенциалов ток с рельсов стекает в землю, убывая при уменьшении расстояния от подстанции до точки наблюдения вплоть до середины участка, а затем снова подрастая за счет подтекающего из земли тока (рис. 18в). Направление тока в рельсах вне участка подстанция - электровоз меняется на противоположное, в отличие от тока через поперечное сечение земли, который течет все время в одну сторону и увеличивается при уменьшении тока в рельсах (рис. 18г). Подтекающий к подстанции из рельсов с двух сторон ток (или стекающий в рельсы от электровоза) равен току в контактной сети I , а ток в земле равен разности токов контактной сети и рельса, $I_3 = I - I_p$.

Картина распределения потенциалов подземной коммуникации и земли вблизи нее (рис. 18д) повторяет в сглаженном виде распределение потенциала рельсов (причем с углублением в землю потенциалы уменьшаются), а разность потенциалов земля - коммуникация обуславливает втекающий в коммуникацию ток. На рис. 18е показано распределение тока утечки с подземной коммуникации, причем $I_{1\text{ут}}$ - это ток, стекающий с 1 км длины коммуникации в землю. Соответственно по поперечному сечению коммуникации течет ток, распределение которого показано на рис. 18ж.

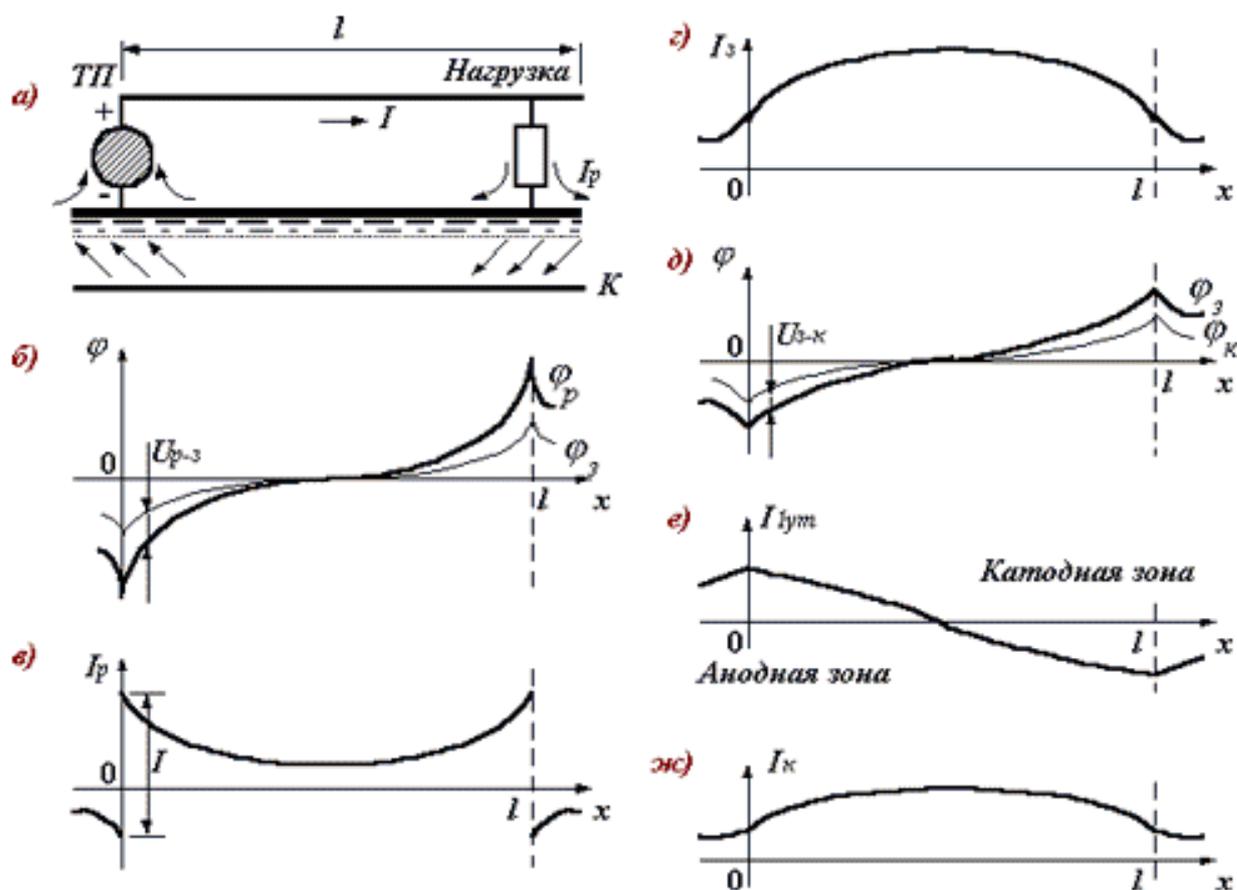


Рис. 18

Рис. 18е разбивает подземную коммуникацию на две зоны. Первая из них - зона входа тока в коммуникацию (ток утечки отрицателен). Она называется катодной зоной, поскольку потенциал коммуникации относительно окружающей земли здесь отрицателен; лежит эта зона вблизи электровоза. Вторая зона, называемая анодной зоной - это зона выхода тока из коммуникации, она лежит вблизи подстанции. Как видно, наибольшая плотность токов утечки наблюдается в точке наибольшего по модулю потенциала рельсов, и анодные зоны подземных сооружений расположены напротив катодных зон рельсового пути и наоборот.

Почва, в которой прокладываются коммуникации, с электрической точки зрения представляет собою электролит, в котором переносчиками электрического заряда при протекании тока служат ионы. В электролите металлический анод подвергается интенсивной электрокоррозии, причем убыль металла согласно первому закону электролиза Фарадея пропорциональна величине стекающего с анода тока. При больших токах происходит разрушение и в катодных зонах. Эти зоны на железной дороге из-за перемещения электровозов постоянно перемещаются, поэтому выбор мероприятий по защите от электрокоррозии производится на основе выполненных на линии измерений.

6.3. Гальваническое влияние на опоры контактной сети

Хотя влияние блуждающих токов, как показано в предыдущем разделе, происходит на протяженные коммуникации, однако с

эффектом электрокоррозии при электрификации на постоянном токе приходится считаться и для опор контактной сети. Возникающая проблема связана с необходимостью заземления металлических поддерживающих конструкций опоры на тяговые рельсы, поскольку в другом варианте возможное перекрытие изоляции контактной сети на опоре приведет к протеканию больших токов через самозаземление опоры. Эти токи еще не слишком велики, чтобы работала защита от коротких замыканий, но они очень быстро разрушат опору вплоть до ее падения. Заземляют опору обычно через искровые промежутки или защитные диоды (рис. 19). Необходимость установки последних и определяется тем, какая же зона преимущественно находится на рельсах - анодная или катодная. Заземлять арматуру опоры в катодной зоне можно прямо на рельс, а вот соединение на рельс в анодной зоне может привести к ускоренной коррозии арматуры опоры. Искровые промежутки и защитные диоды иногда выходят из строя, причиной чего служат в основном перенапряжения в рельсах. В таких случаях возникают токи утечки, зависящие от напряжения рельс - земля и сопротивления опоры. При групповых заземлениях опор возникают перетоки между опорами. Чтобы установить необходимость монтажа искровых промежутков или защитных диодов, установить первоочередность контроля искровых промежутков и фундаментных частей опор, проводят соответствующие измерения на линии. Непосредственно ток утечки с опоры контролировать сложно, поэтому измеряют значения потенциалов рельс - земля в месте нахождения заземления и сопротивление опоры.

Сопротивление железобетонной опоры складывается из двух составляющих: это сопротивление верхнего пояса (поддерживающие конструкции - арматура) и сопротивление арматура - земля. Последнее не превышает 60 Ом, а чаще находится в пределах 10...30 Ом. Сопротивление верхнего пояса зависит от контакта между хомутом и арматурой.

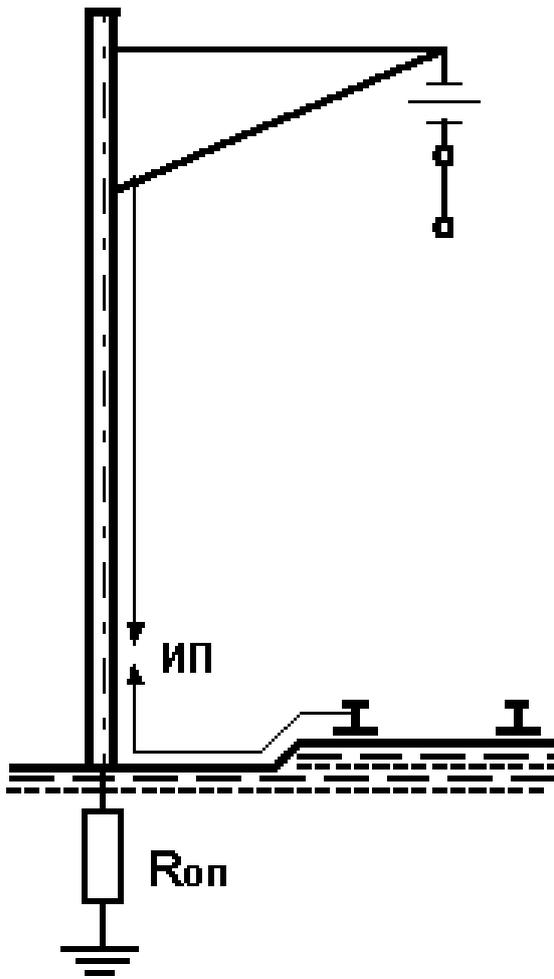


Рис. 19

Измерение разности потенциалов производят вольтметром с большим внутренним сопротивлением и нулем посередине шкалы, с верхним пределом 50 - 100 В. Вторым электродом служит стальной штырь или неполяризующийся медно-сульфатный электрод. Второй электрод устанавливается в грунт в середине пролета между опорами в створе опор, а контакт с рельсом осуществляется установкой рельсового зажима на подошву или присоединением проводника непосредственно к стыковому соединителю. Измерения проводят не реже чем через 1 км.

В каждой точке измеряют напряжения при нормальной работе электротяги в течение не менее 5 мин со снятием показаний через 10 с, за период измерения должно пройти не менее одного поезда [12]. При обработке отделяют положительные и отрицательные величины потенциалов и вычисляют средние положительные и средние отрицательные величины потенциалов за период измерений, усредняя их по общему числу отсчетов. Разделив средний положительный потенциал на сопротивление опоры, определяют ток утечки с опоры при нарушении изоляции цепи заземления. Для железобетонных опор этот ток не должен превышать 40 мА.

Кроме потенциалов рельсов, дополнительно контролируют утечку тягового тока с рельсов, сопротивление рельсовых стыков,

сопротивление заземления конструкций (не только опор), потенциалы подземных коммуникаций и другие параметры.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 7.

ЗАЩИТА ОТ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ. СУММИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗНЫХ ВИДОВ ВЛИЯНИЯ

7.1. Мероприятия по защите подземных сооружений от блуждающих токов

Применяемые защитные мероприятия подразделяют на две группы: во-первых, это снижение величин блуждающих токов, во-вторых, это защита непосредственно подземных сооружений.

К первой группе относятся следующие мероприятия.

1. **Уменьшение тока в рельсах и в земле.** При системе распределенного питания или при сокращенных расстояниях между подстанциями снижается утечка тока с рельсов в землю. В последнем варианте возможно появление уравнивающих токов, которые могут даже ухудшить положение.

2. **Уменьшение сопротивления рельсового пути.** Это мероприятие требует надежного соединения между стыками.

3. **Увеличение переходного сопротивления рельсы-земля.** Достигается путем пропитки шпал непроводящими составами, подсыпкой щебеночного балласта и устройством дренажа для осушения полотна.

4. **Регулируемый путевой источник тока (ПИТ).** ПИТ представляет собой вольтодобавочное устройство, включаемое в рассечку рельсов (рис. 20а). Его питание осуществляется от сети переменного тока, а выходное напряжение управляется током в контактной сети, при этом ток выпрямителя регулируется примерно равным току в контактной сети. ПИТ создает дополнительное напряжение (рис. 20б) и заставляет ток нагрузки течь по рельсам (рис. 20в). Увеличение напряжения на нагрузке при этом незначительно, а потребляемая им мощность сравнительно невелика.

Ко второй группе относятся следующие мероприятия по защите подземных сооружений.

1. **Катодная защита.** Суть катодной защиты заключается в искусственном создании на подземном сооружении в его анодной зоне катодной зоны от дополнительного источника напряжения (рис. 21,а). Очевидно, при этом будет интенсивно разрушаться дополнительное заземление катодной защиты. В катодных зонах подземного сооружения потенциал станет еще более отрицательным, что может привести к повреждению краски подземного сооружения из-за интенсивного выделения водорода между металлом и слоем краски. По этим причинам максимальный потенциал катодной защиты ограничивают.

При установке катодной защиты учитывают возможные изменения потенциалов соседних сооружений и усиление их коррозии.

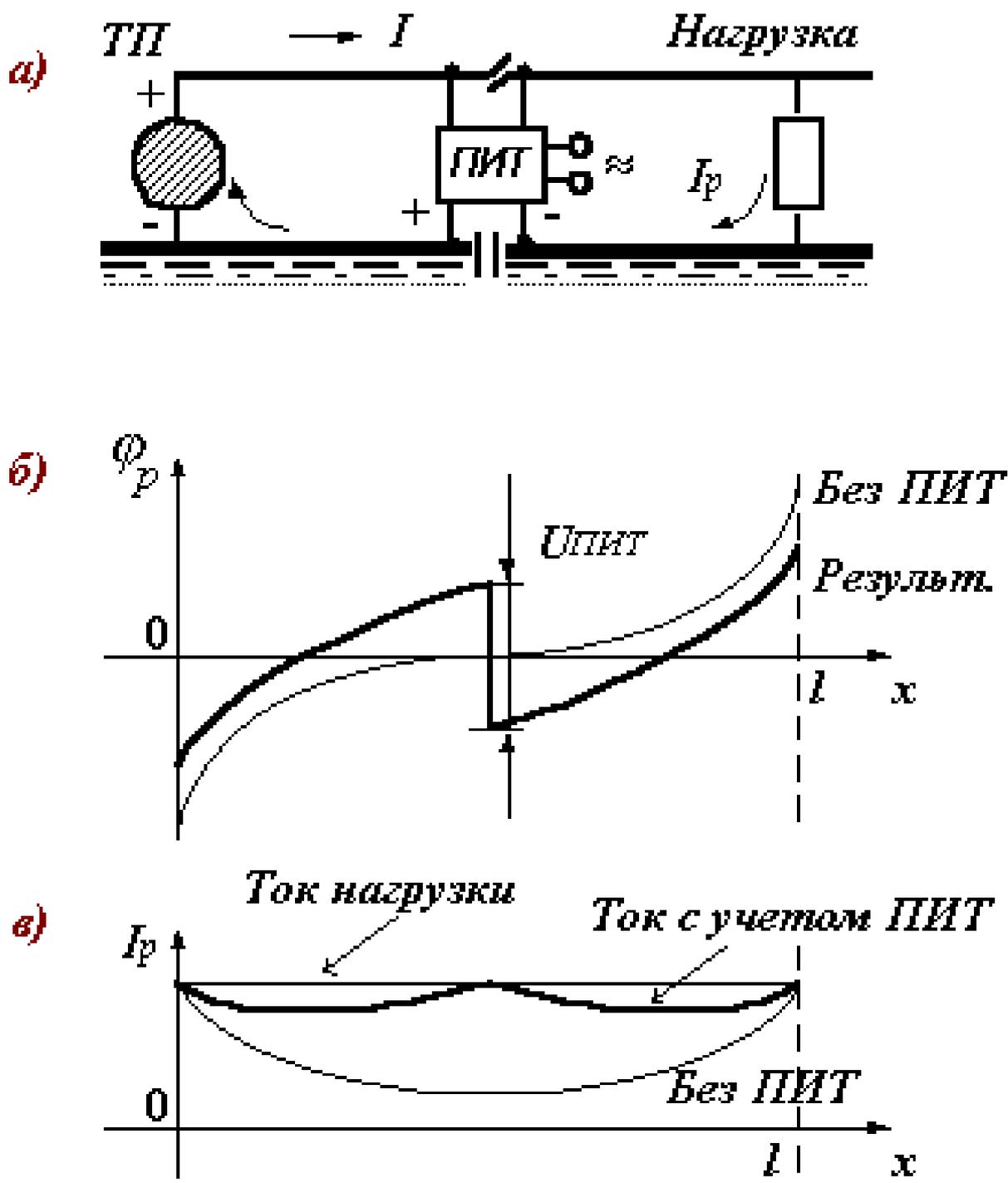


Рис. 20

2. **Протекторная защита.** Присоединение к подземному сооружению металла с более низким электрохимическим потенциалом создает источник ЭДС с анодом на присоединенном металле. Эта ЭДС, однако, мала и защита применима лишь при небольших потенциалах (обычная почвенная коррозия).

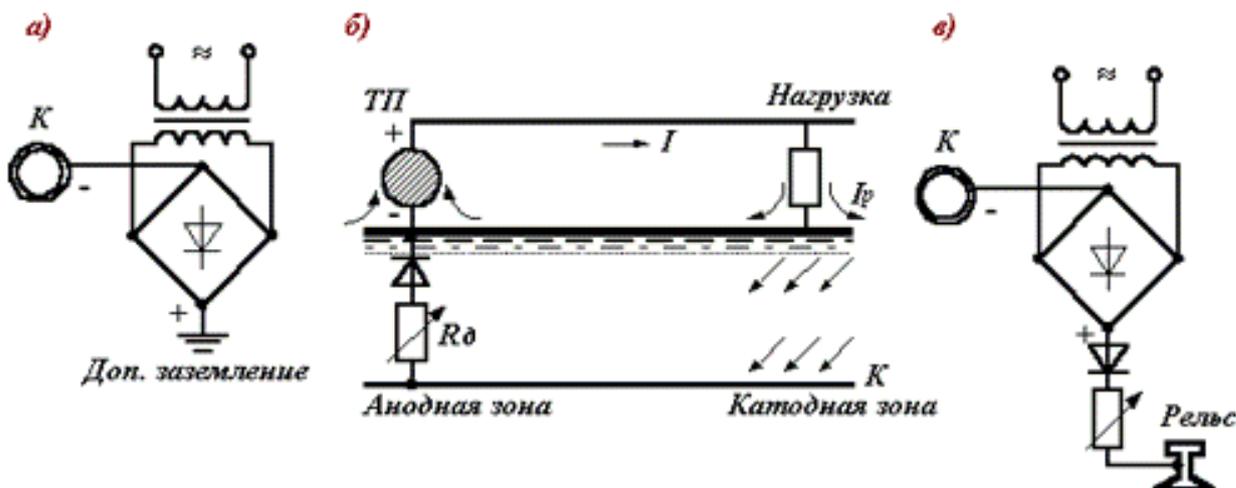


Рис. 21

3. **Дренажная защита.** Анодная зона подземного сооружения при такой защите соединяется с отрицательной шиной подстанции или с рельсами (рис. 21б). Происходит "осушение" электрических зарядов анодной зоны - дренаж. Резистор R_d позволяет регулировать потенциал подземного сооружения, а диод предотвращает протекание тока в обратном направлении при случайном повышении потенциала рельсов в точке соединения. Дренажная защита усиливает отток с рельсов у нагрузки и коррозию рельсов.

На рис. 21в показана схема усиленного дренажа, аналогичная катодной защите.

7.2. Суммирование напряжений разных видов влияния

С появлением целых трех разных видов влияния - электрического, магнитного и гальванического - возникает вопрос о том, как поступать при нескольких влияниях одновременно. Собственно, вопрос сводится к суммированию магнитного и гальванического влияний при заземненных объектах (когда электрическое влияние практически отсутствует) и к суммированию магнитного и электрического влияний для изолированных от земли линий. Исходным пунктом суммирования является возможность просто складывать потенциалы от разных источников в соответствии с законом сохранения энергии или в соответствии с наложением нескольких токов. Очевидно, что в каждом случае необходимо сначала аккуратно определиться со слагаемыми и только затем складывать их.

1. **Воздушные и кабельные однопроводные линии с рабочими заземлителями, подземные провода.** Напряжение магнитного влияния сдвинуто на угол 90 градусов относительно влияющего тока (при синусоидальных токах и напряжениях), а гальваническое влияние находится в фазе с током контактной сети. Из-за отсутствия электрического влияния суммарное напряжение будет равно

$$U_{\text{МГ}} = \sqrt{U_{\text{М}}^2 + U_{\text{Г}}^2} \quad (20)$$

2. **Изолированные от земли провода воздушных линий.** Эти провода подвержены как электрическому, так и магнитному влияниям.

Суммирование необходимо проводить с учетом разностей фаз напряжений $U_э$ и U_M . В соответствии с рис. 10 и формулой (17) напряжения магнитного влияния в начале U_{M0} и в конце U_{M1} определяются выражениями такого вида:

$$\dot{U}_{M0} = \frac{1}{2} j \omega M \dot{I}_k l s_p; \quad \dot{U}_{M1} = -\frac{1}{2} j \omega M \dot{I}_k l s_p.$$

Суммирование этих напряжений с напряжением электрического влияния, по фазе совпадающего с напряжением контактной сети, показано на рис. 22 с учетом запаздывания тока контактной сети от напряжения на угол около 37° и расположения векторов U_{M0} и U_{M1} перпендикулярно току.

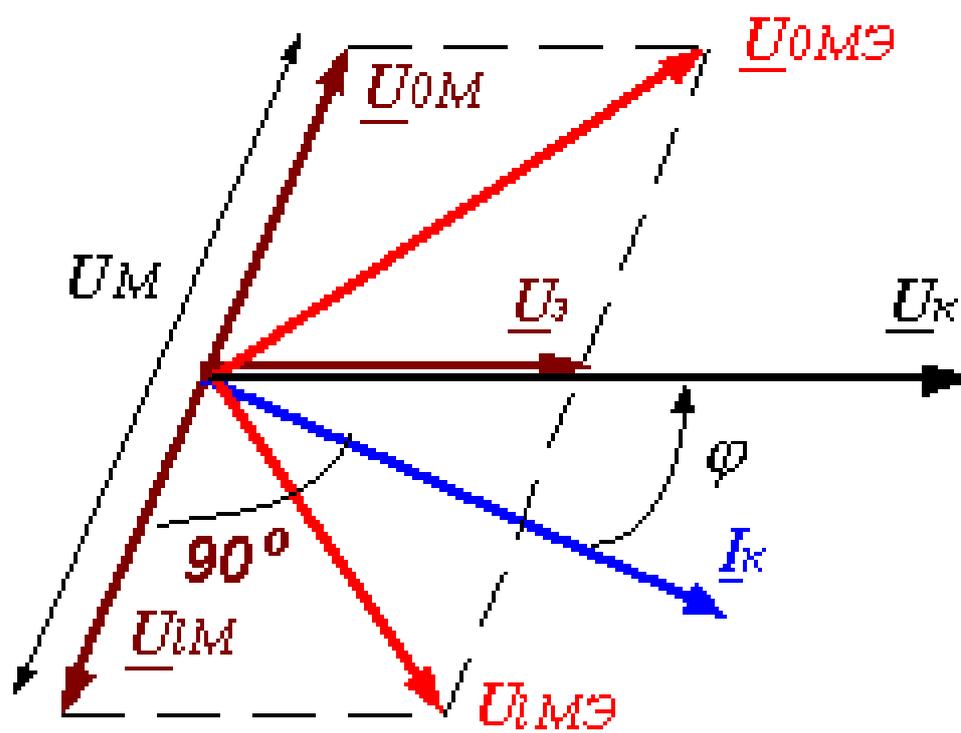


Рис. 22

Как видно из рис. 22, величины $U_{M0Э}$ и $U_{M1Э}$ не одинаковы по величине и по фазе. В соответствии с теоремой косинусов суммарное напряжение в начале и в конце линии определится выражением

$$U_{MЭ} = \sqrt{\left(\frac{U_M}{2}\right)^2 + U_э^2 \pm U_M U_э \sin \varphi}, \quad (21)$$

где U_M - полное напряжение магнитного влияния, равное величине ЭДС по выражению (17). "Правила защиты..." [1] допускают упрощенный расчет с суммированием напряжений в квадратурах (предполагающий угол 90° между векторами):

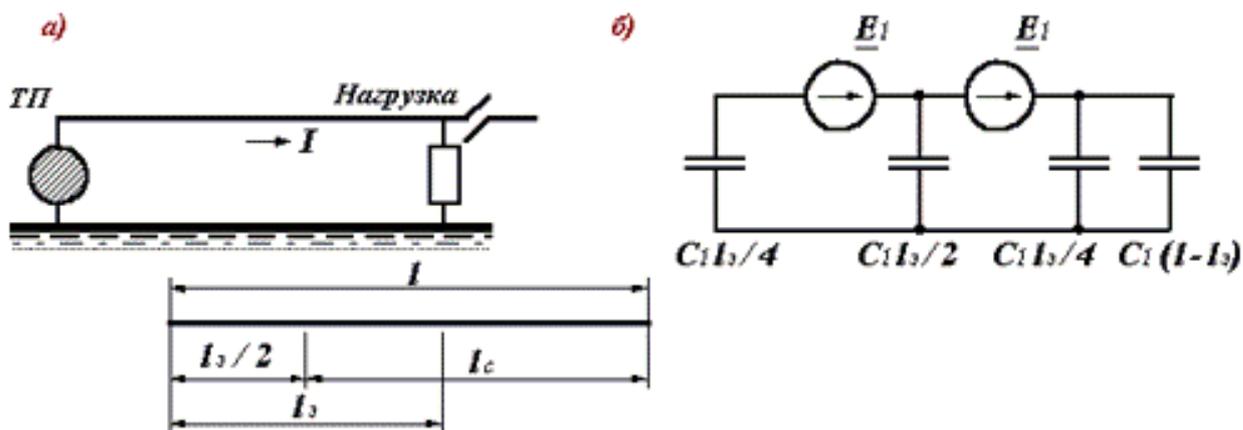


Рис. 23

$$U_{M\text{Э}} = \sqrt{\left(\frac{U_M}{2}\right)^2 + U_{\text{Э}}^2} \quad (22)$$

Формула (22) справедлива для случая, когда вся смежная линия находится в зоне влияния. Если же смежный провод выходит за пределы зоны влияния и его длина l больше длины участка в зоне влияния (длины сближения) l_3 , то расчет немного усложняется. Схема соответствующего случая изображена на рис. 23а. На рис. 23б приведена схема замещения для расчета напряжений, возникающих в начале линии для такого случая. Схема соответствует предложенному в разделе 2.1 варианту (по рис. 10), в котором пренебрегается малыми падениями напряжений на индуктивностях проводов. Эта схема составлена тремя ячейками, последняя из которых не содержит источника ЭДС магнитного влияния. Величины емкостей на землю пропорциональны длинам соответствующих отрезков. Расчет напряжения на левом конденсаторе схемы не составляет трудностей, и это напряжение равно $U_M l_c / l$, где $U_M = 2E_1$, а l_c - расстояние от середины зоны влияния до конца смежного провода. U_M при этом определяется эффективной длиной l_3 . Формула (22) для расчета суммарного напряжения в начале смежного провода теперь будет выглядеть таким образом:

$$U_{M0} = \sqrt{\left(\frac{U_M l_c}{l}\right)^2 + U_{\text{Э}}^2} \quad (22)$$

РЕЗЮМЕ

Различные методы защиты от гальванического влияния подразделяются на две группы, первая из которых сводится к снижению блуждающих токов в земле, а вторая - к непосредственной защите подземных сооружений.

На смежные линии возможно одновременное воздействие двух видов влияний: электрического и магнитного или гальванического и магнитного. В обоих случаях напряжения влияний можно суммировать в квадратурах.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 8.

РАСЧЕТЫ ВЛИЯЮЩИХ ТОКОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ И ВЫНУЖДЕННОМ РЕЖИМЕ

8.1. Общие положения

Для расчета наводимого напряжения за счет магнитного влияния необходимо определиться с влияющим током контактной сети. Сложившиеся подходы для определения тока и рассмотрены в этом разделе.

С опасными влияниями приходится иметь дело в основном в случае тяговой сети переменного тока 1х25 кВ, когда наводимые напряжения на порядок выше, чем для тяговой сети постоянного тока. Тяговые сети 2х25 кВ по степени опасности занимают промежуточное положение, но они отличаются усложненным расчетом наводимых напряжений, который лучше всего проводить с применением вычислительной техники. В данном случае речь пойдет о тяговой сети 1х25 кВ.

С точки зрения безопасности работы принято рассматривать наихудший возможный вариант, при котором наводимые напряжения будут наибольшими, и предпринимать защитные меры в его отношении.

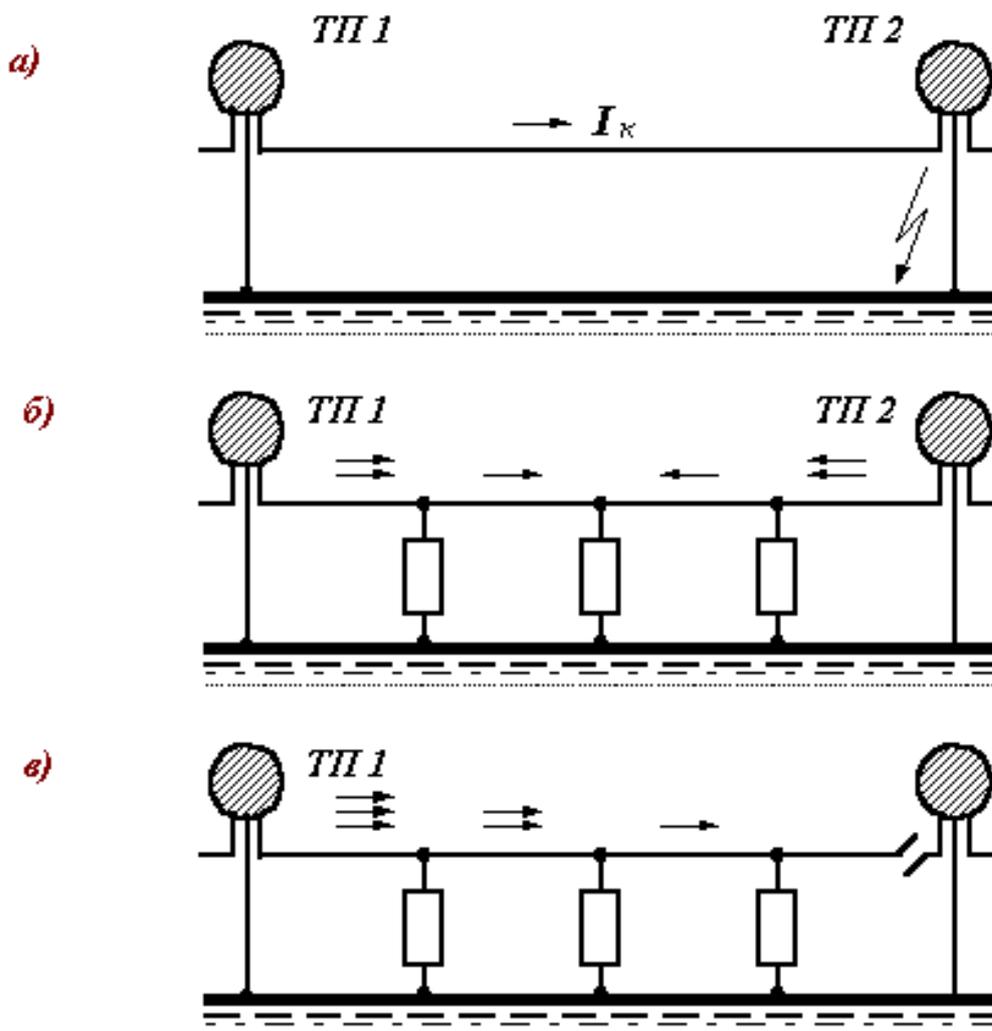


Рис. 24

В этом плане наиболее опасными являются два следующих режима в тяговой сети:

- короткое замыкание, при котором протекают наибольшие токи; в качестве расчетного рассматривают случай, когда создаются максимальные напряжения, что соответствует короткому замыканию на краю зоны влияния, как на рис. 24а; при коротком замыкании в середине зоны влияния наводимые напряжения меньше из-за меньшей длины сближения, да еще возможна компенсация при протекании тока короткого замыкания со стороны второй подстанции;
- вынужденный режим, при котором одна из тяговых подстанций, питающих межподстанционную зону, отключается, токи протекают по большей длине (по сравнению с нормальным режимом, рис. 24б) и в одном направлении (рис. 24в).

8.2. Расчет влияющего тока при коротком замыкании в тяговой сети

В наиболее распространенном случае питания тяговой сети от трехфазного трансформатора по схеме "звезда-треугольник" короткое замыкание в тяговой сети относится к двухфазному короткому замыканию и рассчитывается с удвоением сопротивлений прямой последовательности для ЛЭП и трансформатора:

$$\dot{I}_{кз} = \frac{\dot{U}_{НОМ}}{2Z_{ЛЭП} + 2Z_T + Z_{КС}}, \quad U_{НОМ} = 27500 \text{ В}$$

где $2Z_{ЛЭП} = 2jX_{ЛЭП}$ - сопротивление ЛЭП без учета активного

$$X_{ЛЭП} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{КЗ}}$$

сопротивления, приведенное к напряжению 27.5 кВ,

$S_{КЗ}$ - мощность трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции;

$2Z_T = 2jX_T$ - сопротивление тягового трансформатора без учета

$$X_T = \frac{u_K U_{НОМ}^2}{100 S_H}$$

активного сопротивления, приведенное к 27.5 кВ,

u_K - напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах, S_H - номинальная мощность трансформатора;

$Z_{КС} = (R_0 + jX_0) I_{кз}$ - сопротивление тяговой сети от подстанции до точки короткого замыкания.

Таким образом, ток короткого замыкания можно рассчитать по величине по формуле (24)

$$I_{кз} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{\left[2U_{НОМ}^2 \left(\frac{1}{S_{КЗ}} + \frac{u_K}{100S_H} \right) + X_0 I_{кз} \right]^2 + (R_0 I_{кз})^2}} \quad . (24)$$

8.3. Расчет влияющего тока при вынужденном режиме

В основе расчета лежит ряд довольно серьезных предположений, позволяющих рассчитать возможные токи наиболее неблагоприятного случая. Предположения эти таковы.

1. Максимально возможный ток определяется из максимально допустимой потери напряжения $\Delta U_{\text{кв-макс}}$ вдоль тяговой сети в предположении консольного питания межподстанционной зоны, когда еще возможно обеспечить пропуск поездов.

2. Количество поездов m считается заданным, эти поезда распределены равномерно вдоль межподстанционной зоны и все поезда потребляют одинаковый по величине и фазе ток I_1 (то есть малыми фазовыми сдвигами между разными токами пренебрегают).

3. Неравномерный (ступенчатый) ток контактной сети заменяется на эквивалентный влияющий ток $I_{\text{эКВ}}$, такой ток, который одинаков на всей длине сближения и индуцирует в проводе такое же напряжение, как и исходный ступенчатый ток.

Определимся вначале с током в контактной сети на основании первых двух предположений, а затем перейдем к эквивалентному току.

На рис. 25 показана расчетная схема, удовлетворяющая предположению 2, а также распределение тока по контактной сети. Падение напряжения в контактной сети равно

$$\Delta \dot{U}_{\text{кв}} = \dot{I}_1 Z_1 + 2\dot{I}_1 Z_1 + \dots + m\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_1 Z_1 \frac{m(m+1)}{2},$$

$Z_1 = \frac{Z}{m} = \frac{(R_0 + jX_0)l_{\text{т}}}{m}$ - сопротивление тяговой сети между соседними поездами. При отсчете фазы от напряжения на

токоприемнике $\dot{I}_1 = I_1 e^{-j\varphi} = I_1 (\cos \varphi - j \sin \varphi)$, $I_1 = \frac{I_{\text{рез}}}{m}$, $I_{\text{рез}}$ - ток плеча подстанции. Отсюда

$$\Delta \dot{U}_{\text{кв}} = \frac{m+1}{2m} I_{\text{рез}} [R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi + j(X_0 \cos \varphi - R_0 \sin \varphi)] l_{\text{т}}$$

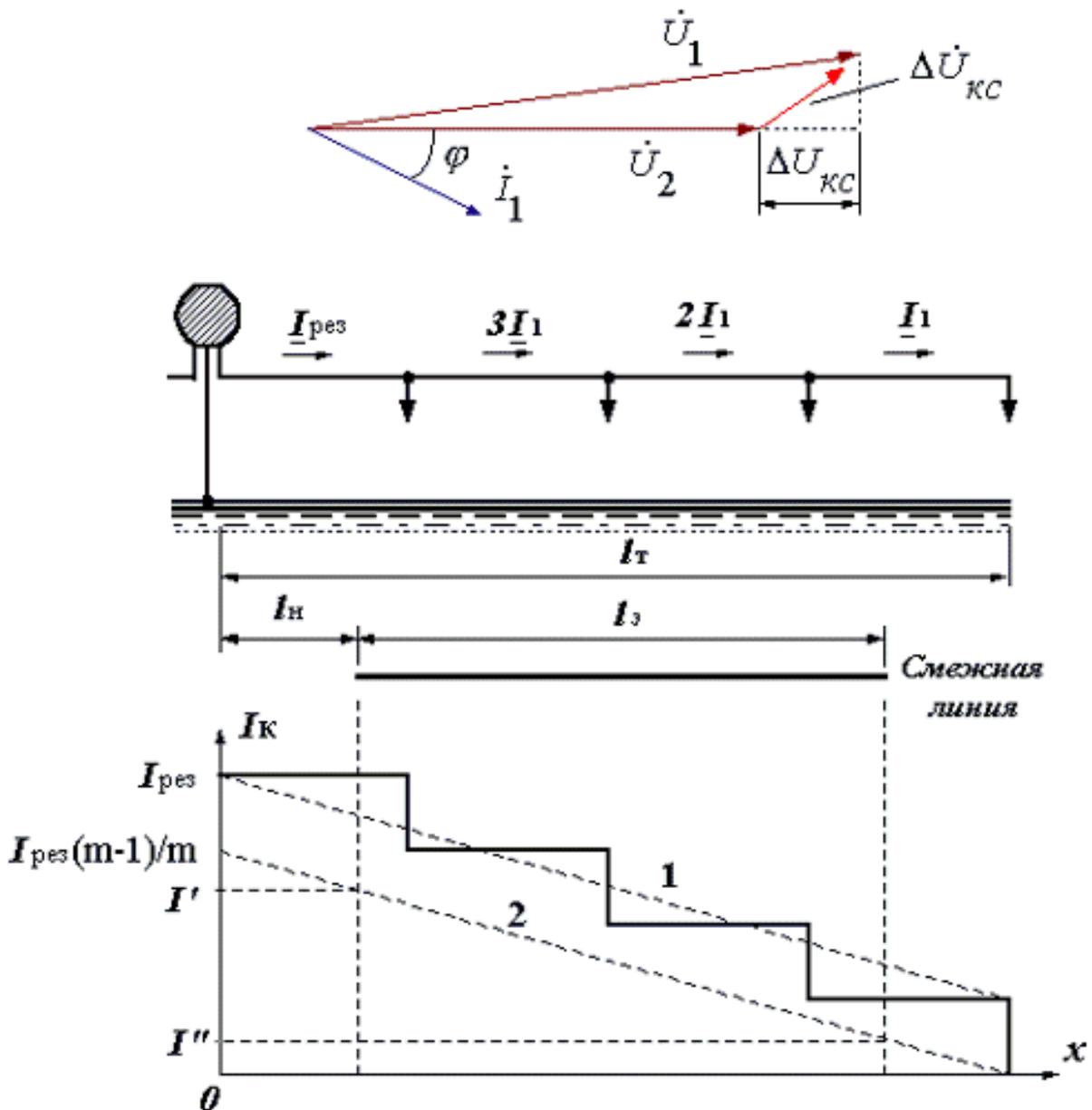


Рис. 25

Как это видно из векторной диаграммы рис. 25, **потеря напряжения** $\Delta U_{кc}$ на тяговой сети до последнего электровоза определяется с некоторым приближением (при небольшом отличии напряжений на шинах подстанции и на последнем электровозе) вещественной частью **падения напряжения** $\Delta \dot{U}_{кc}$

$$\Delta U_{кc} = \text{Re}(\Delta \dot{U}_{кc}) = \frac{m+1}{2m} I_{рез} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) l_T$$

откуда результирующий ток при максимальной потере напряжения определится выражением (25)

$$I_{рез} = \frac{2m}{m+1} \frac{\Delta U_{кc.макс}}{(R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) l_T} \quad (25)$$

Эквивалентный влияющий ток определим, исходя из некоторой похожести распределения тока по рис. 25 на треугольник. Наводимое

напряжение магнитного влияния определяется площадью под этим ступенчатым треугольником, которая равна площади под пунктирной линией 1 (это равенство немного нарушается, если начало и конец смежного провода располагаются не по серединам ступеней или не по их концам). Пунктирная линия 2 спущена относительно линии 1 на величину l_1 и составляет с осями координат треугольник, в котором можно определить токи I' и I'' на краях трапеции, площадь которой (с корректировкой на l_1) будет определять наводимое напряжение при длине сближения меньшей, чем длина межподстанционной зоны. $I_{\text{экв}}$ в таком случае будет средним между I' и I'' , увеличенным на l_1 :

$$I_{\text{экв}} l_{\text{э}} = \left(\frac{I' + I''}{2} + I_1 \right) l_{\text{э}}$$

Токи I' и I'' определяются по рис. 25 из подобных треугольников:

$$I' = \frac{(m-1) I_1 (l - l_{\text{н}})}{l_{\text{т}}}; \quad I'' = \frac{(m-1) I_1 (l_{\text{т}} - l_{\text{э}} - l_{\text{н}})}{l_{\text{т}}}$$

и формула для подсчета эквивалентного влияющего тока выглядит так:

$$I_{\text{экв}} = I_{\text{рез}} \frac{1}{m} \left[1 + (m-1) \left(1 - \frac{2l_{\text{н}} + l_{\text{э}}}{2l_{\text{т}}} \right) \right]$$

или

$$I_{\text{экв}} = I_{\text{рез}} K_m; \quad K_m = \frac{1}{m} \left[1 + (m-1) \left(1 - \frac{2l_{\text{н}} + l_{\text{э}}}{2l_{\text{т}}} \right) \right]$$

где K_m - коэффициент, характеризующий уменьшение эквивалентного тока по сравнению с результирующим в зависимости от количества поездов m , одновременно находящихся в пределах расчетного плеча питания при вынужденном режиме.

Максимальная потеря напряжения $\Delta U_{\text{кс. макс}}$ в тяговой сети между подстанцией и наиболее удаленным от нее электровозом принимается равной 8500 В при длине межподстанционной зоны $l_{\text{т}}$ более 30 км (19 кВ на токоприемнике наиболее удаленного электровоза) и 5500 В при $l_{\text{т}}$ от 15 до 30 км включительно (при этом потребляемая от подстанции мощность настолько велика, что подстанция просто не сможет обеспечить большее значение и потеря напряжения не может быть больше по этой причине); при $l_{\text{т}}$ менее 15 км принимают $m=1$, $I_{\text{рез}}=300$ А. Коэффициент мощности электровоза при расчетах принимают равным 0.8.

Формула для расчета напряжения магнитного влияния при вынужденном режиме несколько отличается от формулы (17) в связи с несинусоидальностью тока контактной сети и необходимостью как-то учесть эту несинусоидальность:

$$U_M = K_{\phi} \omega M I_{\text{экв}} l_{\text{э}} s_p$$

В формуле (27) K_{ϕ} - коэффициент, характеризующий увеличение наведенного напряжения вследствие несинусоидальности тока тяговой сети, обусловленной работой выпрямительных устройств электровозов. Для проводов воздушных линий принимают $K_{\phi}=1.15$.

РЕЗЮМЕ

Опасные напряжения магнитного влияния на смежных линиях создаются при двух режимах тяговой сети переменного тока: при коротком замыкании и при вынужденном режиме при одностороннем питании межподстанционной зоны.

Расчетный ток короткого замыкания определяется как ток двухфазного короткого замыкания и исходя из возможности наибольшего магнитного влияния.

Расчетный ток вынужденного режима определяется по максимально допустимой потере напряжения в тяговой сети при заданном числе поездов в зоне. Для упрощения расчетов ступенчатый ток контактной сети заменяется одинаковым по всей длине сближения эквивалентным током.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 9.

ВЛИЯНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

9.1. Общие проблемы влияния на смежные ЛЭП

При небольшой ширине сближения, особенно при расположении проводов линий на опорах контактной сети, наводимые на проводах смежных воздушных линий напряжения оказываются столь большими, что с ними приходится считаться и в случае линий электропередачи низкого напряжения в их рабочих режимах. По таким линиям производится питание линейно-путевых потребителей (освещение зданий, наружное освещение, цепи дистанционного управления и другие) с отбором мощности от системы продольного электроснабжения комплектными однофазными и трехфазными подстанциями. С влиянием приходится считаться даже в случае смежных линий напряжением 6-10 кВ с изолированной нейтралью и линий ПР и ДПР напряжением 27.5 кВ. Существенно меньше влияние на смежные линии со стороны тяговой сети 2x25 кВ.

Линии напряжением 0.23/0.4 кВ обычно работают с глухозаземленной нейтралью, что совместно с их сравнительно небольшой длиной позволяет говорить об отсутствии электрического влияния на них. Наводимое напряжение магнитного влияния для этих линий сопоставимо по величине с рабочим напряжением и может приводить к тому, что напряжения провод-земля на проводах двухпроводной линии в нормальном режиме работы будут существенно отличаться от ожидаемых величин.

Линии электропередачи напряжением 6-10 кВ принадлежат к системам с изолированной нейтралью, имеющим в нормальном режиме единственную гальваническую связь с землей - через первичную обмотку трансформатора напряжения НТМИ, весьма слабую для снижения напряжений электрического влияния. Наводимые на три провода линии напряжения образуют нулевую последовательность напряжений, что создает проблемы с защитой от однофазных коротких замыканий на землю.

Емкостные токи электрического влияния, возникающие между контактной сетью 1x25 кВ и смежными проводами линий ПР и ДПР, располагающихся на опорах контактной сети, создают дополнительные перетоки мощности в системе проводов. Эти перетоки приводят к возникновению небаланса между величиной электрической энергии, переданной в линию, и энергией, распределённой между потребителями, подключенными к линии.

Величины наводимых напряжений электрического и магнитного влияний сопоставимы по величине с рабочими напряжениями смежных линий. Появление в проводах смежной линии дополнительных ЭДС за счет магнитного влияния и дополнительное падение напряжения на емкостях проводов по отношению к земле за счет электрического влияния приводит к возможности простого

сложения наводимых напряжений и рабочих напряжений по отношению к земле (разумеется, с учетом их взаимных фазировок).

9.2. Влияние контактной сети на однофазные линии электропередачи
 При рассмотрении систем с глухозаземленной нейтралью достаточно принять во внимание магнитное влияние тяговой сети. Общий подход к расчету наводимых напряжений тот же, что и для случая отсутствия рабочего напряжения на смежном проводе, рассмотренный в предыдущих разделах.

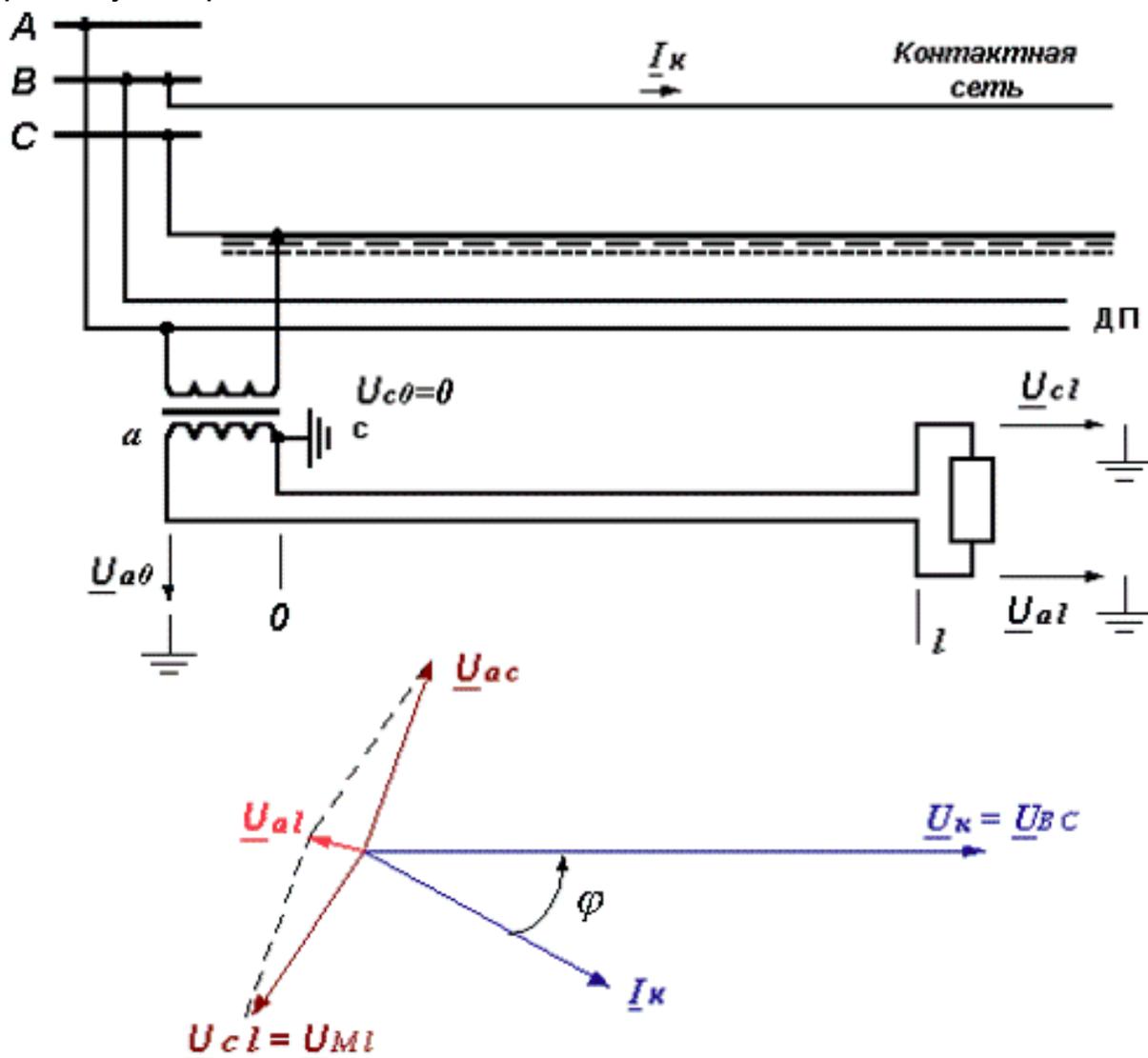


Рис. 26

Поскольку источник питания линии создает напряжение между проводами линии, то напряжение, наводимое на каждом проводе по отношению к земле, не зависит от напряжения источника питания и на фазном проводе складывается с этим напряжением. Кроме того, фазный провод для наведенного напряжения также должен считаться заземленным через малое внутреннее сопротивление источника. Сложение напряжения источника с наведенным напряжением для фазного провода должно производиться с учетом фазовых углов этих напряжений, предполагая их синусоидальность. Нейтральный провод, если не учитывать падение напряжения на нем за счет рабочего тока,

представляет собой заземленный с одного конца смежный провод, находящийся в зоне влияния тяговой сети.

На рис. 26 изображена расчетная схема и векторная диаграмма напряжений на смежной двухпроводной линии при подключении источника - трансформатора 27500/0.23 с фазой ac - в начале линии и заземлении фазы c . Ток контактной сети предполагается одинаковым по всей длине сближения и направленным от начала смежной линии вправо. Для определенности принят первый тип тяговой подстанции по фазировке (то есть трехфазная система напряжений образует прямую последовательность) и питание обмотки высшего напряжения трансформатора произведено от фазы AC . Формулировка задачи такова: необходимо определить напряжения проводов относительно земли в четырех точках: в начале ЛЭП у трансформатора и в конце ЛЭП у нагрузки.

Напряжение \dot{U}_{c0} равно нулю из-за заземления зажима трансформатора. \dot{U}_{a0} - это фазное напряжение трансформатора,

равное \dot{U}_{ac} и определяемое по направлению в соответствии с заданным типом подстанции и фазировке напряжения контактной

сети, взятом в качестве начала отсчета. \dot{U}_{c1} - это напряжение магнитного влияния в конце линии, сдвинутое на угол минус 90°

относительно тока контактной сети. \dot{U}_{a1} определяется суммированием фазного напряжения и напряжения магнитного влияния на проводе a , равное таковому на проводе c . Электрическое влияние отсутствует ввиду заземления провода c с одного конца (малым напряжением электрического влияния на конце провода c вполне можно пренебречь), а провод a заземлен через обмотку трансформатора (который можно рассматривать как источник ЭДС с малым внутренним сопротивлением).

Такой анализ показывает, что одни провода могут оказаться под увеличенным потенциалом, другие - под уменьшенным потенциалом относительно земли. В однофазных цепях возможно уменьшение потенциала проводов рациональным выбором фазы, заземлением соответствующего конца обмотки низшего напряжения или изменением направления вектора напряжения магнитного влияния путем изменения стороны питания подверженной влиянию линии.

9.3. Влияние контактной сети на трехфазные линии автоблокировки и продольного электроснабжения напряжением 6-10 кВ

Основная проблема влияния тяговой сети переменного тока при расположении проводов трехфазных линий автоблокировки и линейно-путевых потребителей на опорах контактной сети состоит в электрическом влиянии контактной сети переменного тока 1x25 кВ, создающем напряжение нулевой последовательности в смежной

линии. Используемая здесь система электроснабжения с изолированной нейтралью представляет собой систему, имеющую в нормальном режиме единственную гальваническую связь с землей - через первичную обмотку трансформатора напряжения НТМИ (рис. 27). На рис. 27 C_A , C_B , C_C - емкости проводов линии по отношению к земле, $C_{КА}$, $C_{КВ}$, $C_{КС}$ - емкости контактная сеть - провод смежной линии.

Трансформатор НТМИ работает в режиме, близком к холостому ходу, и мало нагружает источник питания из-за высокого индуктивно-активного сопротивления его первичной обмотки. Такая ситуация не только не устраняет проблему электрического влияния, но и приводит к возможности резонансных явлений в колебательном контуре с индуктивностью НТМИ и емкостью линии.

Схема электрического влияния контактной сети на ЛЭП

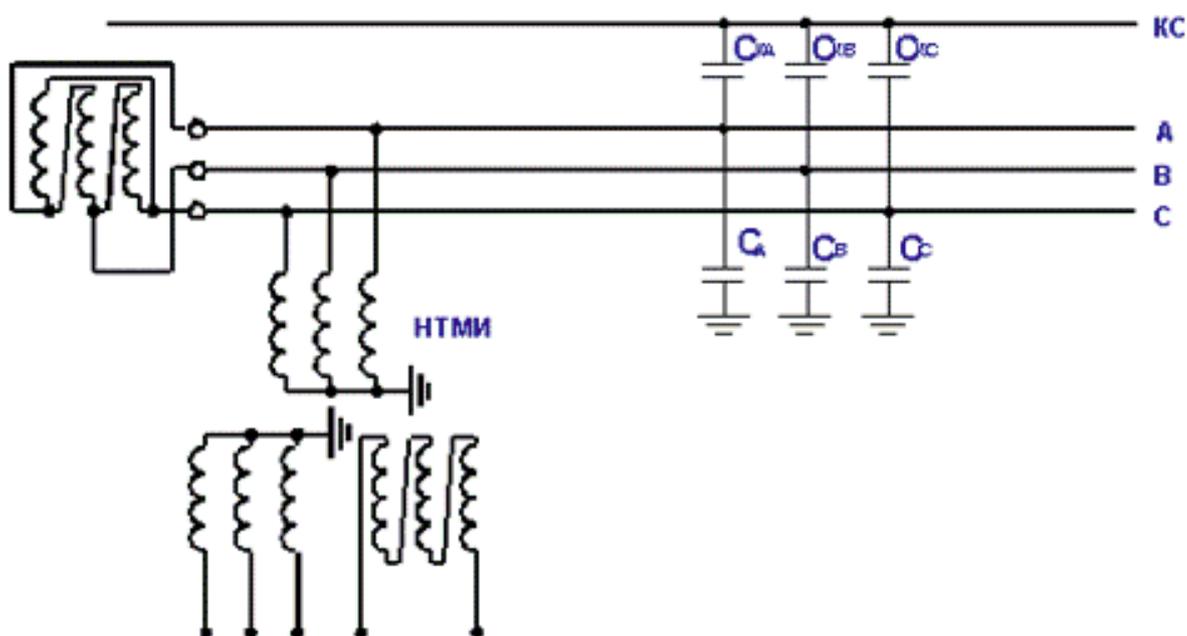


Рис. 27

Питание линии электропередачи производится от треугольника районной обмотки тягового трансформатора или от повышающего трансформатора СЦБ. При отсутствии влияния напряжения провод - земля линии определяются емкостями проводов и оборудования по отношению к земле и составляют звезду фазных напряжений трехфазной системы.

Близкое расположение контактной сети приводит к тому, что по емкостным элементам C_A , C_B , C_C протекают не только токи от источника питания ЛЭП, но и емкостные токи электрического влияния контактной сети, фаза которых определяется фазой напряжения контактной сети. Последняя совпадает с углом одного из линейных напряжений ЛЭП (рис. 28), так что на три рабочих напряжения провод - земля накладываются три одинаковых по величине и фазе напряжения электрического влияния, образующих нулевую последовательность. На рисунке 28 U_K - вектор напряжения

контактной сети, $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ - напряжения провод - земля нормального неискаженного режима, $\underline{U}_\varepsilon$ - вектор напряжения электрического влияния, $\underline{U}_{A\varepsilon}, \underline{U}_{B\varepsilon}, \underline{U}_{C\varepsilon}$ - результирующие напряжения провод - земля.

Векторная диаграмма напряжений ЛЭП

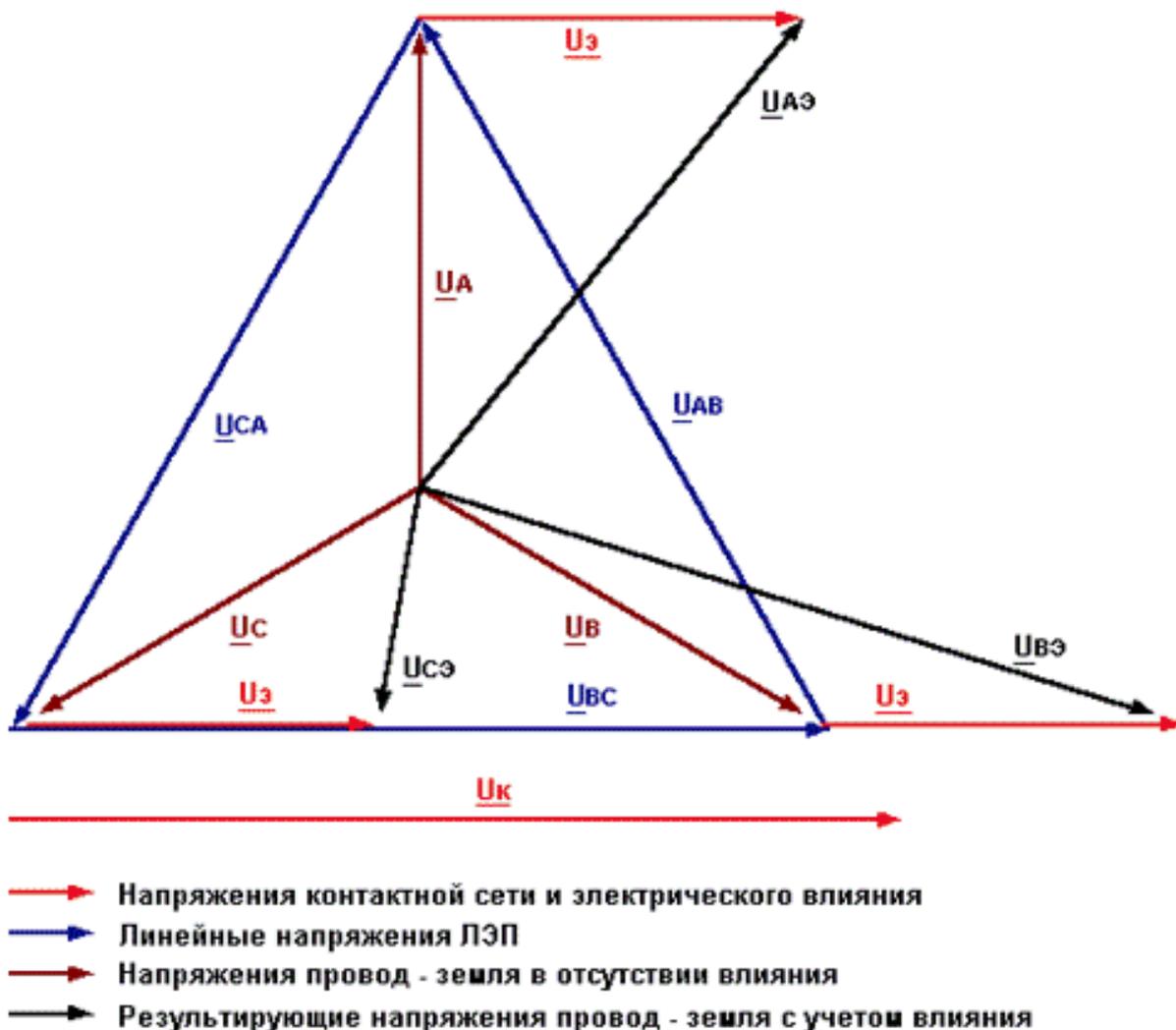


Рис. 28

Из рисунка 28 видно, что на одном из проводов напряжение провод - земля существенно меньше номинала, на другом проводе напряжение существенно больше номинала и на третьем проводе напряжение заметно больше номинального. На выходе разомкнутого треугольника трансформатора НТМИ напряжение соответствует величине напряжения электрического влияния, пересчитанного с учетом коэффициента трансформации на вторичную звезду (10000/100 В для вторичной звезды и 10000/100:3 В для треугольника НТМИ-10 с последующим утроением напряжения нулевой последовательности).

Влияние контактной сети совместно с усиливающими проводами на однопутном участке приводит к появлению на отключенной незаземленной линии 10 кВ напряжения около 7-8 кВ на каждом проводе по отношению к земле; на двухпутном участке напряжения на 1-2 кВ больше. При подаче рабочего напряжения на линию из-за

электрического влияния возникают перекосы напряжения провод - земля: вместо 6 кВ по отношению к земле на каждом проводе получается 9 кВ, 12 кВ и 4 кВ (без учета емкостей подключенного к линии оборудования и емкостей других линий, питающихся от распределительного устройства, не расположенных на опорах контактной сети). Такое электрическое влияние приведет к появлению на разомкнутом треугольнике трансформатора НТМИ напряжения 80 В, что больше напряжения 60 В, появляющегося при однофазном коротком замыкании на землю. Реально это напряжение обычно существенно меньше из-за влияния емкостей подключенного к линии оборудования и насыщения стержней перегруженных катушек НТМИ-10, однако все равно сигнализация об однофазных коротких замыканиях на землю будет заблокирована.

Эта ситуация приведет к необнаружению однофазных коротких замыканий и к возникновению двухфазных замыканий с отключениями линий. Кроме того, при работах со снятием напряжения и заземлением может возникнуть эффект ложного перехода на питание от отключенной ЛЭП на сигнальных точках, поскольку наложение заземляющих штанг производится одновременно. При наложении штанги на один из проводов, к которому подключен вывод ОМ-10, наведенного напряжения на еще не заземленном проводе может оказаться достаточным для переключения питания сигнальной точки.

Эффективным средством для снижения наводимого напряжения может быть установка на шинах 10 кВ подстанции конденсаторов порядка 0.3 - 0.7 мкФ на каждую фазу по отношению к земле; никакая транспозиция проводов здесь, разумеется, не поможет. Включение в цепь разомкнутого треугольника трансформатора напряжения НТМИ резистора сопротивлением 1-1.5 Ом также не даст эффекта (кроме возможного повреждения обмотки НТМИ и невозможности использования его для контроля однофазных замыканий на землю) из-за большой индуктивности рассеивания трансформатора. Можно считать, что емкости конденсаторов около 0.02 мкФ на 1 км длины линии (на каждом из трех проводов по отношению к земле), расположенной на опорах контактной сети, достаточно для устранения эффектов электрического влияния на линию; необходимая емкость пропорциональна длине линии.

Разумеется, наиболее радикальным средством устранения неприятностей электрического влияния является расположение линий на отдельных опорах. Уже на ширине сближения примерно 15 м наводимое напряжение не превышает 2 кВ и не будет приводить к эффектам блокировки сигнализации об однофазных коротких замыканиях. style='mso-tab-count:1'> В случае выбора линии для основного питания устройств СЦБ с преобладанием следует отдать предпочтение линии на отдельных опорах.

Линии продольного электроснабжения питаются от шин 6 или 10 кВ подстанции, к которым обычно подключены не только фидера

продольного электроснабжения, но и дополнительные фидера, удаленные от железной дороги. Емкости проводов этих фидеров по отношению к земле увеличивают общую емкость систем проводов по отношению к земле и снижают наводимое напряжение электрического влияния.

РЕЗЮМЕ

Влияние контактной сети переменного тока на однофазные двухпроводные линии низкого напряжения приводит к тому, что один из проводов линии оказывается под увеличенным потенциалом, другой - под уменьшенным потенциалом относительно земли. Возможно уменьшение потенциала проводов рациональным выбором фазы, заземлением соответствующего конца обмотки низшего напряжения или изменением направления вектора напряжения магнитного влияния путем изменения стороны питания подверженной влиянию линии.

Электрическое влияние на линии 6-10 кВ, расположенные на опорах контактной сети, приводит к появлению напряжения прямой последовательности, искажающего напряжения провод - земля линии и нарушающего нормальную работу сигнализации об однофазных коротких замыканиях.

Лекция 10. ВЛИЯНИЕ ТЯГОВОЙ СЕТИ НА ЛИНИИ ПР И ДПР

10.1. Особенности влияния тяговой сети переменного тока 2х25 кВ Наряду с более высокими энергетическими показателями (значительное снижение потерь напряжения и энергии в тяговой сети) и увеличением расстояния между тяговыми подстанциями использование системы 2х25 кВ приводит к существенному снижению всех видов влияния электрифицированной железной дороги на смежные линии. Это снижение связано с наличием двух противофазных напряжений и двух противофазных токов в тяговой сети (рис. 29).

Электрическое влияние обусловлено емкостными токами, протекающими по элементам C_k и C_n от контактного и питающего проводов с противофазными напряжениями с частичной компенсацией друг друга на емкости провода по отношению к земле C_0 . То же можно сказать и о магнитном влиянии, вызванном противоположно направленными токами контактной сети и питающего провода. Результирующее напряжение магнитного влияния определяется векторной суммой следующих составляющих:

- транзитная составляющая напряжения, обусловленная протеканием токов нагрузки всех автотрансформаторов по системе контактная сеть
- питающий провод, в рельсах эти токи вызывают сравнительно небольшой индуктированный ток;

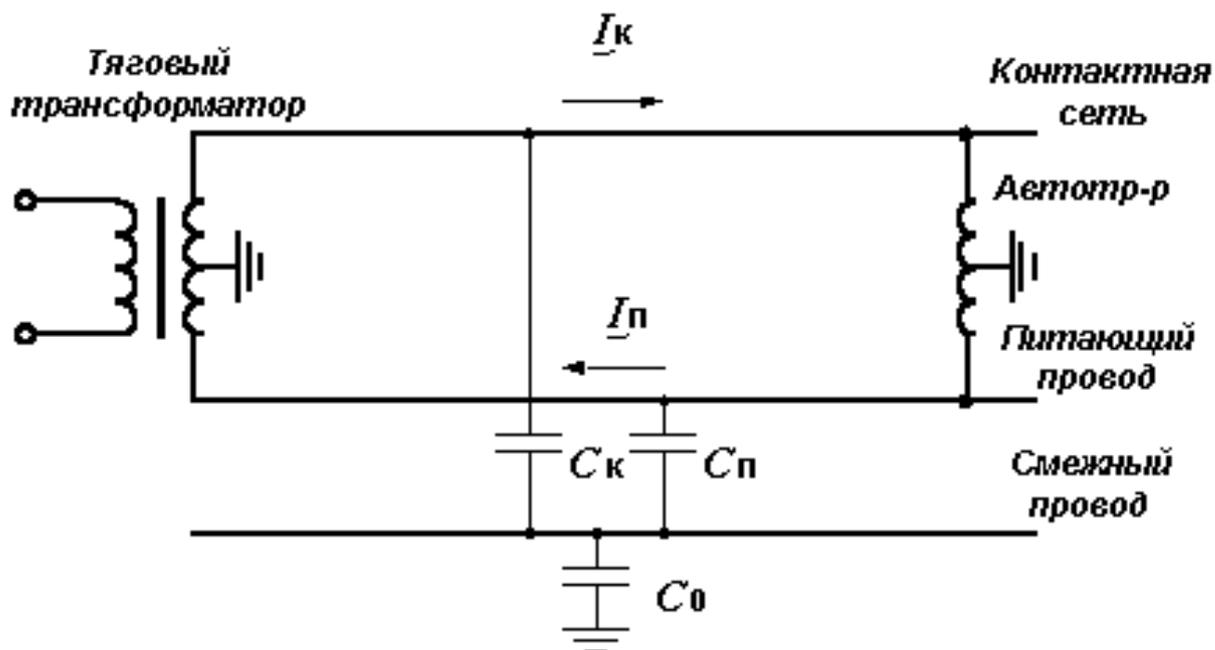


Рис. 29

- местная составляющая от токов, протекающих по контактной сети и рельсам во всех зонах автотрансформаторов, где находятся электровозы;
- нескомпенсированная составляющая, которая возникает при консольном питании фидерной зоны и расположении электровоза за последним автотрансформатором; на участке от последнего

автотрансформатора до электровоза влияние на смежную линию такое же, как и при обычной системе 1х25 кВ без отсасывающих трансформаторов.

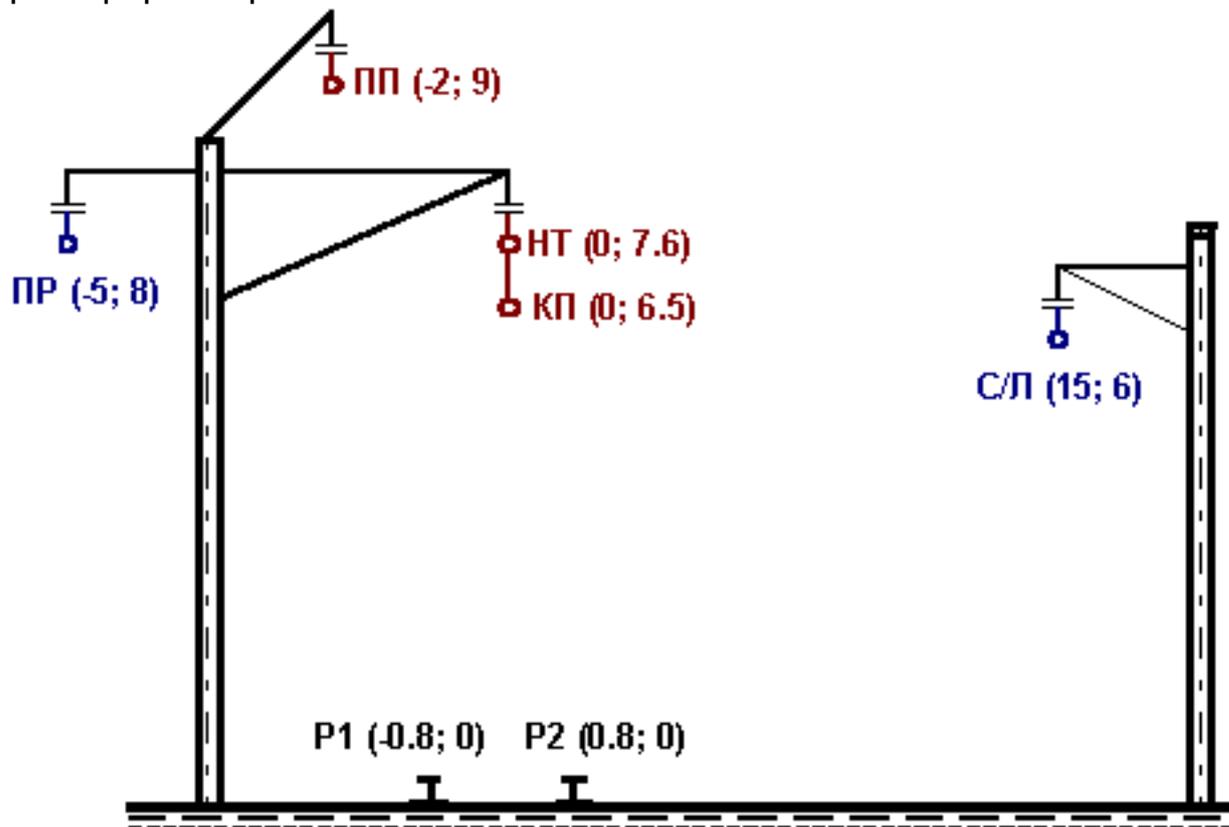


Рис. 30

Более определенно об уровне наводимых напряжений можно судить по следующему расчетному примеру, изображенному на рис. 30. На этом рисунке обозначены влияющие провода (контактный провод, несущий трос, питающий провод) и провода, подверженные влиянию (провод системы провод - рельс ПР и смежный провод на отдельной опоре С/Л). В скобках указаны координаты расположения проводов в метрах (расстояние от оси дороги и высота над землей).

В таблице 1 указаны рассчитанные для этой системы наведенные напряжения электрического и магнитного влияния в предположении длины проводов ПР и С/Л 10 км. Строки 1-3 таблицы соответствуют изолированным проводам ПР и С/Л и электрическому влиянию, строки 4-5 отвечают заземленным на удаленном конце проводам ПР и С/Л и напряжению в их начале из-за магнитного влияния.

Таблица 1

№ п/п	Напряжение к/с, кВ	Ток к/с, А	Напряжение ПП, кВ	Ток ПП, А	Напряжение ПР, В	Напряжение С/Л, кВ
1	$27.5 e^{j0}$	0	$27.5 e^{j180}$	0	1400	500
2	$27.5 e^{j0}$	0	0	0	6200	1500
3	$24.0 e^{j0}$	0	$27.5 e^{j180}$	0	2000	300
4	0	$100 e^{j0}$	0	$100 e^{j180}$	37.0	1.0
5	0	$100 e^{j0}$	0	0	160	110

В табл. 1 строки 2 и 5 отвечают влиянию только контактной сети, то есть совпадает со случаем тяговой сети 1x25 кВ. Строка 3 представляет ситуацию с отличающимися по величине напряжениями контактной сети и питающего провода. Данные таблицы показывают, что наводимое напряжение электрического влияния для тяговой сети 2x25 кВ в 3-4 раза меньше, чем для тяговой сети 1x25 кВ. Снижение напряжения магнитного влияния даже больше, но только в случае транзитной составляющей, когда по контактной сети и питающему проводу протекают одинаковые по величине и противофазные токи. Небольшая несимметрия системы 2x25 кВ не приводит к существенному увеличению наводимого напряжения.

10.2. Влияние контактной сети на линии ПР и ДПР

Несмотря на одинаковые уровни напряжения в тяговой сети 1x25 кВ, 2x25 кВ и в линиях провод - рельс, два провода - рельс, влияние тяговой сети приводит по меньшей мере к двум эффектам в смежных линиях ПР и ДПР: во-первых, из-за электрического влияния возникают перетоки мощности между линиями, сопоставимые с суммарной мощностью потребителей линии, во-вторых, из-за консольного питания линий ПР и ДПР и большой их длины магнитное влияние способно приводить к существенному изменению уровня напряжения в конце консоли.

Вследствие **электрического влияния** контактной сети, обусловленного наличием емкостной связи между проводами, на изолированные от земли воздушные линии наводится значительный потенциал. Если же линия питается от обмотки трансформатора, имеющего заземленный конец, как это имеет место у линий ПР и ДПР, то потенциал провода будет определяться напряжением трансформатора, а по проводу и по обмотке трансформатора будет протекать дополнительный ток емкостной связи с контактной сетью. Величина этого тока при расположении проводов на опорах контактной сети составляет десятки миллиампер на 1 км линии, и при длине межподстанционной зоны 50 км может достичь полутора ампер. Этот ток протекает по цепям учета электрической энергии, приводя к искажению показаний счетчиков.

В системе 2x25 кВ, где напряжения контактной сети и питающего провода противофазны, можно говорить в основном о взаимовлиянии проводов ДПР и ПР друг на друга. Схема рисунка 31, показывающая один из возможных вариантов фазировки, когда питание систем ПР и ДПР производится от отдельного трехфазного трансформатора, поясняет эту ситуацию. Емкостный ток $I_{\text{ДП2-ПР}}$, опережающий на 90° напряжение между проводами $U_{\text{ДП2-ПР}}$, для фидера ПР создает ситуацию потребления активной мощности из линии ПР в трансформатор, поскольку при угле $\varphi > 90^\circ$ произведение $U_{\text{ПР}} I_{\text{ПР}} \cos \varphi$ отрицательно. Тот же ток протекает через элемент счетчика учета электрической энергии фидера ДПР с появлением дополнительного потребления активной мощности, поскольку угол в этом случае составляет величину 30° . На самом деле эта мощность циркулирует в системе ДПР-ПР, и величина перетока мощности при токе 1 А будет составлять примерно 25 кВт, что приведет к дополнительному отрицательному расходу в системе ПР за месяц порядка 18000 кВт*час, а в счетчик системы ДПР насчитает больше электрической энергии на те же 18000 кВт*час.

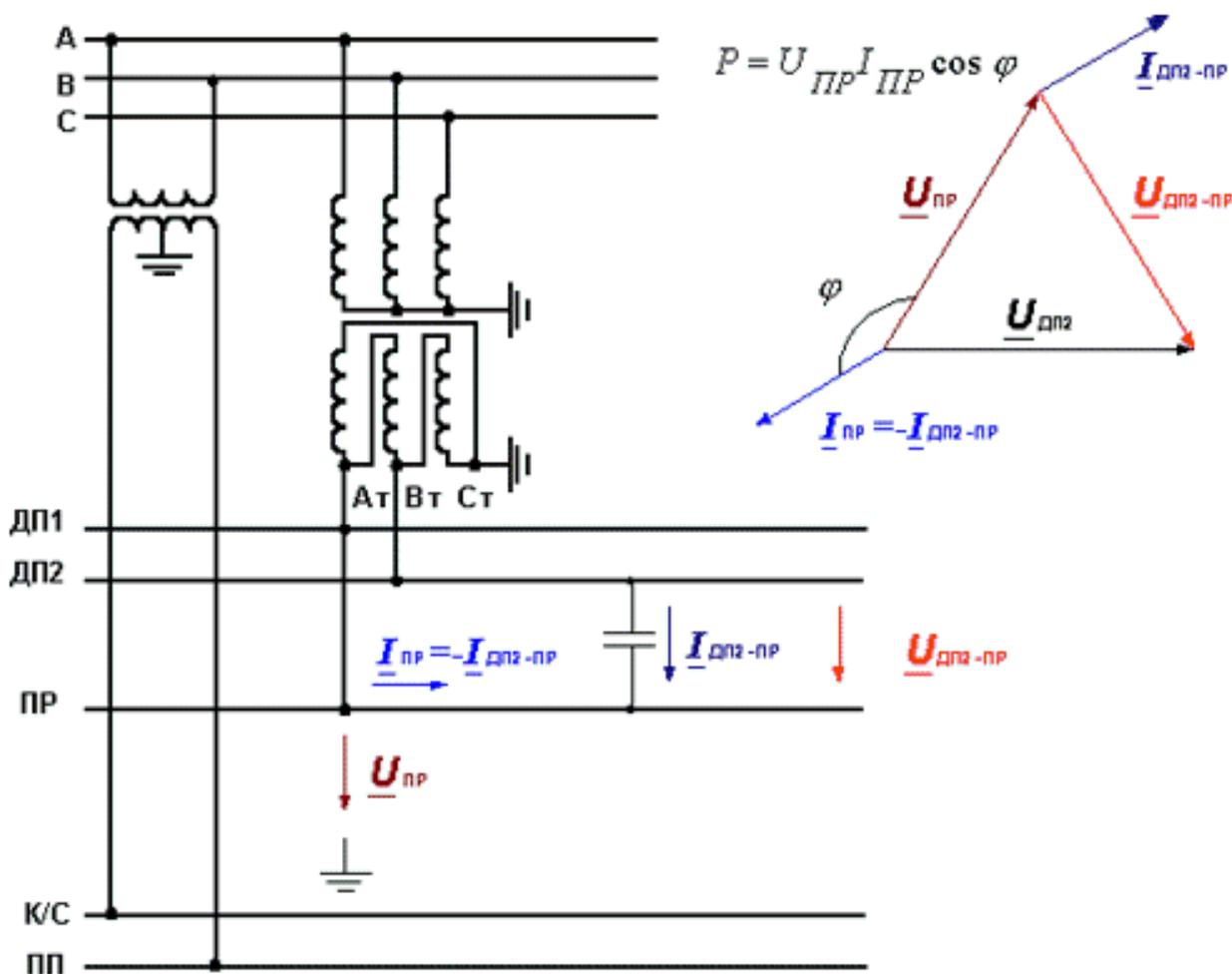


Рис. 31

К линии ПР на зоне длиной 50 км в среднем присоединено 25 сигнальных точек с суммарной потребляемой мощностью 15-20 кВт,

или 10-15 тыс. кВт*час за месяц, что сравнимо с перетоком по системе ДПР-ПР из-за электрического влияния.

Направление потока активной мощности зависит от взаимной фазировки напряжений проводов ПР и ДПР. Направление потока активной мощности из трансформатора в ПР положительное, если провод ДП, имеющий отличную от ПР фазу, питается от опережающей (по сравнению с ПР) фазы. Знак перетока мощности из ДПР в ПР отрицательный, если один из проводов ДПР запитать от отстающей (по сравнению с ПР) фазы вместо опережающей. Режим в тяговой сети на циркуляцию электрической энергии оказывает малое влияние.

В системе 1x25 кВ перетоки мощности могут быть существенно больше из-за некомпенсированного влияния контактной сети. Поток активной мощности по линии ПР может достичь 35 кВт, это 25000 кВт*час в месяц, что существенно превышает возможные перетоки в системе 2x25 кВ. Если фаза напряжения контактной сети совпадает с фазой напряжения ПР, то между проводом ПР и контактной сетью емкостные перетоки отсутствуют, а суммарный поток мощности в линию ДПР (то есть в провод, имеющий отличающуюся от контактной сети фазу) лежит в пределах от 9 кВт до 25 кВт в зависимости от того, с какой стороны запитана линия ДП, что либо меньше, чем в системе 2x25 кВ, либо значительно больше. Эти значения перетоков мощности по линиям ПР и ДПР почти не зависят от того, питается ли контактная сеть консольно или от двух смежных подстанций, и от наличия нагрузок в тяговой сети.

Магнитное влияние тяговой сети на консоль питания ПР или ДПР может приводить к существенному изменению напряжения на конце консоли линий ПР-ДПР при вынужденном одностороннем режиме питания тяговой сети. Знак этого изменения зависит от взаимной фазировки рабочего напряжения и напряжения магнитного влияния. Оценочный анализ приводит к следующим выводам.

1. В системе 2x25 кВ с питающим проводом и хотя бы одним автотрансформатором магнитное влияние практически не сказывается на режиме напряжения в ПР (изменение напряжения на ПР составляют 0.1 - 0.2 кВ при токах 300 А в контактной сети и длине консольной зоны 50 км).

2. При консольном питании тяговой сети в системе 1x25 кВ и в системе 2x25 кВ с отключенными автотрансформаторами магнитное влияние уменьшает напряжение в системе ПР посередине зоны примерно на столько же, насколько уменьшается напряжение на шинах подстанции (удваивая провал напряжения), если ПР питается от той же фазы, к которой подключена контактная сеть. При расположении нагрузки на конце консольной зоны без автотрансформаторов магнитное влияние еще больше: напряжение за счет магнитного влияния снижается в 1.7 раза больше снижения напряжения на шинах, суммарный эффект получается в 2.7 раза больше просадки напряжения на шинах. При токе 300 А на зоне 50 км

при внешнем электроснабжении 220 кВ, имеющем мощный источник в 100 км от подстанции, напряжение на шине, питающей контактную сеть и провод ПР, снижается на 1.4 кВ, а на конце ПР с нагрузкой 50 кВт напряжение ниже напряжения на шине еще на 2.4 кВ.

В общем же для каждой межподстанционной зоны участков дороги с питанием СЦБ от системы ПР при электрификации по системе 1х25 кВ требуется отдельный анализ ситуации и необходим рациональный выбор фазы подключения ПР.

РЕЗЮМЕ

Тяговая сеть 2х25 кВ характеризуется существенно меньшим уровнем наводимых на смежных линиях напряжений по сравнению с тяговой сетью 1х25 кВ. Основная причина этого эффекта - существование в системе проводов тяговой сети 2х25 кВ противофазных токов и напряжений.

В системе ДПР-ПР-контактная сеть происходит циркуляция электрической энергии из-за взаимного электрического влияния проводов.

Магнитное влияние на линии ПР-ДПР при консольном питании тяги способно сильно изменять напряжения линий ПР-ДПР на удаленном конце.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 11.

НОРМЫ ОПАСНЫХ И МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

11.1. О нормировании наведенных напряжений и токов

Влияние тяговой сети электрифицированной дороги приводит к появлению напряжений, представляющих опасность для людей и оборудования, или мешающих работе систем связи. Очевидно, существуют некоторые пороги этих двух сортов наведенных напряжений, ниже которых можно не считаться с влиянием тяговой сети. Эти критические значения зафиксированы в нормативных документах [1, 2] для хозяйства сигнализации и связи железной дороги, которые необходимо знать и работникам хозяйства электроснабжения. Специальных норм в отношении наведенных напряжений электрического и магнитного влияния для устройств электроснабжения нет, поскольку основная идеология нормирования опасных влияний основана на применении специальных мер защиты от наведенного напряжения, а специфика работы персонала хозяйства электроснабжения связана с постоянной опасностью высокого напряжения и специальные меры защиты персонала, работающего в низковольтных устройствах, являются общими мерами безопасности при работе в установках тягового электроснабжения. Специальные меры по защите персонала и абонентов систем сигнализации и связи устанавливают заземление металлических покровов кабелей, использование повсеместно изолирующих защитных средств и другие мероприятия.

данном разделе представлены нормы опасных и мешающих влияний для устройств сигнализации и связи.

11.2. Нормы допустимых опасных влияний

Нормы допустимых опасных влияний составлены на основе учета трех следующих факторов (в порядке снижения их важности):

- требования безопасности для обслуживающего персонала и пользователей;
- соотношение наводимых напряжений с уровнем изоляции линии и присоединенного к ней оборудования;
- величины рабочего (длительно допустимого) напряжения, указанного в технических условиях на кабель (в случае кабельных линий) или входное оборудование.

Требования безопасности основаны на следующих соображениях. Известно, что длительное протекание через тело человека переменного тока не более 2 мА не оказывает заметного влияния. Если ток через тело человека, коснувшегося в любом месте изолированного провода связи или вещания, не будет превышать 2 мА, то на таких линиях можно не применять специальных мер по защите обслуживающего персонала и абонентов от опасного влияния тяговой сети. Очевидно, что стекающий при этом ток определяется

электрическим влиянием контактной сети и длительность протекания тока не ограничена во времени.

При коротких замыканиях в тяговой сети в смежных линиях возникают кратковременные напряжения магнитного влияния, длительность которых определяется временем срабатывания защиты в устройствах тягового электроснабжения. Степень опасности кратковременного воздействия напряжения на человека меньше, чем длительного, и зависит от длительности приложения напряжения: чем короче импульс, тем он менее опасен. По этой причине нормируют напряжения этого вида влияния для наихудшего варианта смежной линии связи, когда линия заземлена на удаленном конце, и учитывают длительность наведенного напряжения, определяемую временем срабатывания защит от короткого замыкания. При длительном приложении напряжения, отвечающем вынужденному режиму питания межподстанционной зоны (консольное питание от одной подстанции), степень опасности наведенного напряжения наибольшая.

Специальные меры по защите персонала и абонентов не применяются в случаях, если при заземлении провода на противоположном конце в линии относительно земли возникают напряжения, не превышающие приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Допустимые индуцируемые напряжения по отношению к земле в проводах линии связи и проводного вещания

Линия связи	Допустимое напряжение, вольт, в режиме работы тяговой сети		Время отключения тяговой сети при к.з., с, не более
	вынужденный	к.з.	
Воздушная с деревянными опорами, в том числе с железобетонными приставками	60	2000	0.15
	60	1500	0.3
	60	1000	0.6
Воздушная с железобетонными или металлическими опорами; кабельная, в том числе волоконно-оптическая с металлическими жилами для дистанционного питания	36	500	0.1
	36	450	0.15
	36	310	0.3
	36	160	0.6

Для соблюдения соответствия наведенного напряжения с уровнем изоляции линии и присоединенного к ней оборудования необходимо, чтобы амплитудное значение результирующего напряжения между проводом и землей, обусловленное электрическим и длительным магнитным влияниями, не превышало минимального статического напряжения пробоя установленных на проводе разрядников. Кроме

того, опасные напряжения не должны превышать 60% испытательного напряжения изоляции жил кабеля или вводного оборудования по отношению к земле при коротком замыкании в тяговой сети.

Для соблюдения соответствия наведенного напряжения и рабочего (длительно допустимого) напряжения при вынужденном режиме работы тяговой сети наведенное напряжение не должно превышать рабочего напряжения в линии связи.

11.2. Нормы допустимых мешающих влияний

Нормирование мешающих влияний производится для проводных линий связи, работающих на звуковых частотах. При нормировании приходится учитывать несинусоидальность токов и напряжений в тяговой сети и несинусоидальность наводимых напряжений шумов, спектр которых содержит различные частоты. Наиболее представительной характеристикой несинусоидального наведенного напряжения является его энергетическая характеристика - эффективное значение, которое, однако, должно быть скорректировано с учетом следующих соображений.

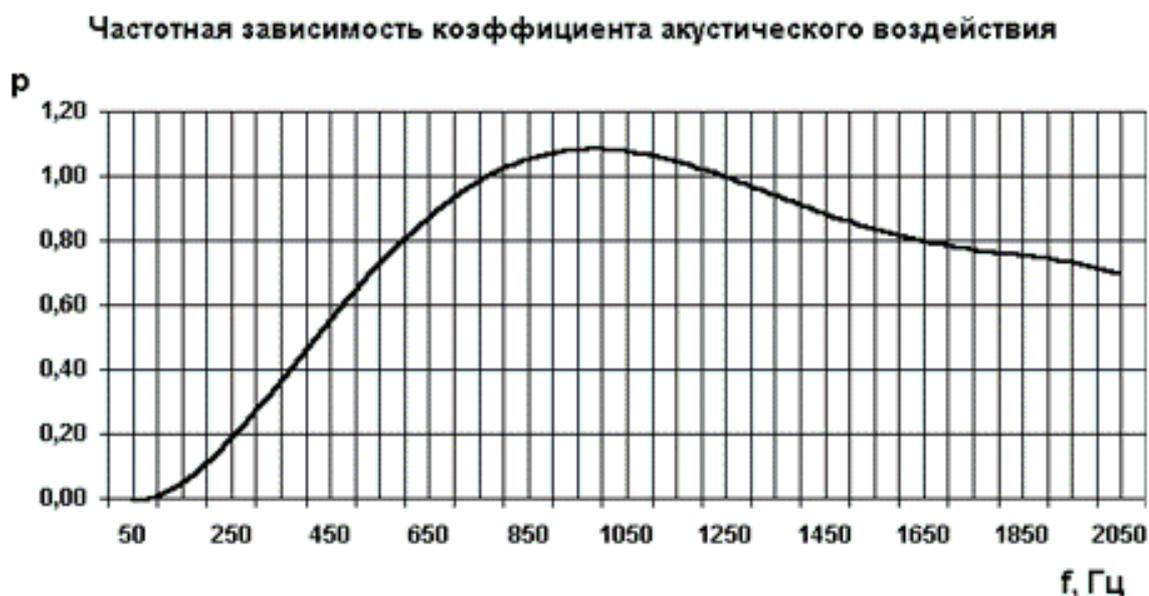


Рис. 32

При передаче сигналов по каналам низкой частоты телефонной связи нужно иметь в виду, что в таких системах, во-первых, действуют эффективные фильтры звуковых частот, пропускающие сигнал в относительно узком частотном диапазоне, а во-вторых, система телефон-человек сама по себе обладает частотно-избирательным действием. Максимум чувствительности этой системы лежит на частоте порядка 1 кГц, и в основном по последней причине принято сравнение акустического воздействия токов разных частот с током частоты 800 Гц с помощью коэффициента акустического воздействия, определяемого соотношением $\rho_k = U_{800}/U_k$, где U_{800} , U_k - напряжения сигнала частотой 800 Гц и частотой k (k - номер рассматриваемой гармоники), воспринимаемые с одинаковой громкостью. Примерный характер частотной зависимости ρ_k показан на рис. 32. Максимум

зависимости приходится на частоту 1 кГц, где p_k несколько больше единицы.

Таким образом, вместо $U_{ш} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$, где U_i - действующее значение напряжения гармоника i , используется напряжение

$$U_{ш} = \sqrt{(p_1 U_1)^2 + (p_2 U_2)^2 + \dots + (p_n U_n)^2},$$

которое называется **псофометрическим напряжением шума**. Именно это напряжение нормируется "Правилами защиты..." [1,2]; в качестве примера в табл. 3 приведено несколько нормативных значений псофометрического напряжения шума. Эти нормы определяются в основном уровнем передаваемого сигнала.

Таблица 3

Допустимые значения индуцируемых напряжений шума в каналах низкой частоты

Цепь (канал) связи	Участок сближения	Точка цепи	Уровень полезного сигнала, дБ	Напряжение шума, мВ
Магистральной и зоной связи Минсвязи	Усилительный участок	Вход усилителя	-6.95	1.5
Групповой канал низкой частоты МПС	Участок избирательной связи	Линейные зажимы телефонного аппарата	-13.9	1.0

Указанные в табл. 3 напряжения шума относятся к линейным зажимам цепей с волновым сопротивлением 600 Ом, замкнутым по концам на согласованную нагрузку. В случае отличия волнового сопротивления цепи Z_v от 600 Ом норму напряжения шума пересчитывают для сохранения величины нормируемой мощности по формуле

$U_{ш}' = U_{ш} \sqrt{\frac{Z_v}{600}}$, где Z_v - модуль волнового сопротивления цепи, Ом, на частоте 800 Гц.

При измерениях псофометрического напряжения шума используют специальный фильтр, имеющий соответствующую частотную характеристику, и вольтметр действующих значений.

РЕЗЮМЕ

Нормы допустимых опасных влияний определяются в основном степенью опасности наведенного напряжения для человека, а также уровнем изоляции линии и рабочим напряжением линии связи.

Нормы допустимых мешающих влияний определяются допустимым соотношением между напряжением шума и напряжением полезного сигнала в линии связи.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 12. МЕШАЮЩИЕ ВЛИЯНИЯ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

12.1. Основные положения и допущения для расчета мешающих влияний

Расчет напряжений мешающих влияний на линии связи, работающие на звуковых частотах, гораздо сложнее расчета напряжений опасных влияний. Основные трудности связаны с несинусоидальностью влияющего тока контактной сети и большой электрической длиной цепей. Для расчета напряжений мешающих влияний в основном используются похожие выражения, что и для расчета опасных влияний, усложненные указанными обстоятельствами. Основные положения расчета и некоторые отличия таковы.

1. В тяговой сети протекают несинусоидальные токи, приводящие к несинусоидальным наводимым напряжениям магнитного влияния. Расчеты наводимых напряжений в такой ситуации проводят, используя синусоидальные составляющие токов и напряжений, переходя к расчетам на гармониках. Основными источниками гармоник в тяговой сети являются выпрямители и инверторы тяговых подстанций при электрификации на постоянном токе, а на переменном токе - преобразователи электроподвижного состава.

2. На аппаратуру связи воздействует напряжение, которое, как правило, поступает с двух проводов. Поэтому далее чаще всего речь будет идти о двухпроводной цепи, в которой напряжение между проводами много меньше напряжения каждого провода относительно земли.

В двухпроводной линии оба провода оказываются под напряжениями \underline{U}_1 и \underline{U}_2 относительно земли, а на нагрузке линии напряжение равно $\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$. Напряжение это не равно нулю, во-первых, из-за разных расстояний от тяговой сети до каждого из проводов (поперечная асимметрия), во-вторых, из-за неодинаковости двух проводов по длине (продольная асимметрия). Ввиду малого расстояния между проводами, их скручивания или скрещивания преобладает обычно продольная асимметрия. Для расчета напряжения этой составляющей используют так называемый **коэффициент чувствительности** $\eta = U_{12}/U_0$, где $\underline{U}_0 \approx \underline{U}_1 \approx \underline{U}_2$. Таким образом, расчет напряжения мешающего влияния сводится к расчету напряжения на проводе относительно земли: $U = \eta U_0$. Значения коэффициента чувствительности обычно определяют путем экспериментальных измерений.

3. Длина цепи, на которую рассчитывается влияние, велика в том смысле, что тяговая влияющая цепь составлена из нескольких межподстанционных зон. Напряжения от разных межподстанционных зон суммируются с использованием синусоидальных составляющих токов и напряжений. Длина цепи велика еще и в другом смысле: для высших гармоник нельзя считать цепь электрически короткой, поэтому

необходимо пользоваться общими выражениями для процессов в цепях с распределенными параметрами.

4. Обычно напряжение электрического влияния оказывается много меньше, чем напряжение магнитного влияния, поскольку влияния обусловлены главным образом гармониками тока в тяговой сети, и далее рассмотрен расчет только напряжения магнитного влияния. При необходимости оба напряжения можно складывать по ранее приведенной методике.

12.2. Разложение периодических токов и напряжений в ряд Фурье

Расчет линейной цепи с несинусоидальными напряжениями и токами, в том числе и расчет влияний, в общем случае сводится к решению систем линейных дифференциальных уравнений, составленных на основании законов Кирхгофа или на основе производных из законов Кирхгофа методов. Но если разложить периодические токи и напряжения на сумму синусоидальных величин, то возможен расчет отдельно для каждой гармоники, то есть решение системы линейных алгебраических уравнений, с последующим сложением решений для гармоник. Такой подход проще, но требует предварительного разложения несинусоидальных источников на синусоидальные составляющие, то есть в ряд Фурье. Разложение в ряд Фурье базируется на теореме Фурье, которая формулируется следующим образом.

Всякая периодическая функция, удовлетворяющая условиям Дирихле, то есть имеющая за полный период конечное число разрывов первого рода и конечное число максимумов и минимумов, может быть разложена в ряд Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + \dots$$

Необходимо заметить, что в задачах электротехники все периодические токи и напряжения удовлетворяют условиям Дирихле (в которых разрывом первого рода называют скачок функции на конечную величину; тангенсоида, например, имеет разрывы второго рода). Поэтому можно сказать, что всякое периодическое напряжение или всякий периодический ток могут быть разложены в ряд Фурье.

В разложении в ряд Фурье A_0 - постоянная составляющая, $A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ - основная волна или первая гармоника, которая имеет тот же период $T = 2\pi/\omega$, что и исходная несинусоидальная функция; остальные слагаемые называют высшими гармониками. Частоты высших гармоник кратны основной частоте, определяемой периодом исходной функции.

Отдельное слагаемое ряда Фурье можно представить и в несколько ином виде:

$$A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) = B_k \sin k\omega t + C_k \cos k\omega t,$$

где $B_k = A_k \cos \varphi_k$; $C_k = A_k \sin \varphi_k$ Коэффициенты ряда Фурье вычисляются из исходной функции следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} B_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t); & C_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(k\omega t) d(\omega t); \\ A_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t). \end{aligned} \right\} (28)$$

Довольно часто встречается ситуация, когда токи и напряжения удовлетворяют условию $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$ то есть кривая симметрична относительно оси абсцисс (рис. 33). Для такой кривой в разложении Фурье отсутствуют четные гармоники и постоянная составляющая:

$$f(\omega t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + A_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) + \dots (29)$$

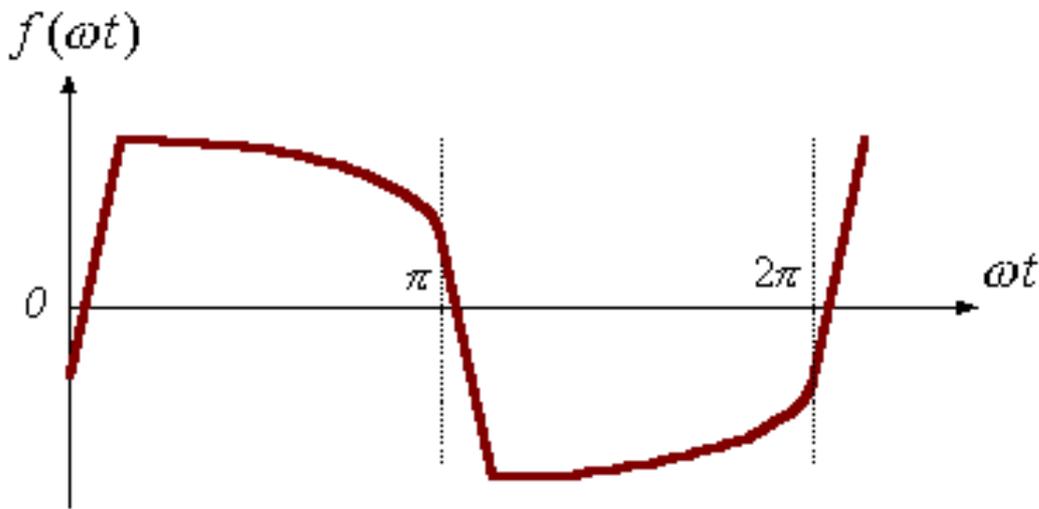


Рис. 33

$f(\omega t) = f(-\omega t)$, все $B_k = 0$; для нечетных функций, $f(\omega t) = -f(-\omega t)$, все $C_k = 0$ и $A_0 = 0$.

Существует большое количество различных приближенных методов разложения на гармонические составляющие. Одним из простейших является метод прямоугольников, названный так потому, что в нем использован метод прямоугольников для вычисления интегралов в формулах (28). Этот метод предполагает замену с некоторым приближением интеграла суммой:

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t) \approx \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n y_i \sin\left(k \frac{2\pi T i}{T n}\right) \frac{2\pi}{n}$$

или

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin \frac{2\pi k i}{n}; \quad C_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cos \frac{2\pi k i}{n}; \quad A_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

В представленных формулах n - число разбиений периода исходной функции на равные части, y_i - значение функции в конце интервала разбиения. Поскольку замена синусоидальной подынтегральной

функции прямоугольником требует, чтобы на ширине прямоугольника синус слишком серьезно не изменялся, в методе прямоугольников число разбиений периода функции n должно не менее чем в два раза превышать максимальный номер вычисляемой гармоники. При этом вопрос о точности определения параметров гармоник не ставится; теорема Котельникова утверждает только, что при числе разбиений периода напряжения или тока, равном удвоенному номеру высшей гармоники, можно найти такие значения модулей и фаз гармоник, что в точках разбиения сумма членов конечного ряда Фурье будет точно равна значениям исходной функции.

Для кривой, симметричной относительно оси абсцисс, можно ограничиться суммированием только за полупериод, а полученный результат удвоить.

12.3. Расчет магнитного мешающего влияния

Поскольку влияющая цепь составлена несколькими межподстанционными зонами, то можно говорить о расчетной схеме по рис. 34, где показан усилительный участок линии связи между двумя усилительными пунктами. Этот участок соответствует n влияющим участкам тяговой сети с подключенными по их краям m генераторами гармонических составляющих тока и напряжения. Количество участков и генераторов в общем случае разное за счет возможного консольного питания некоторых участков, за счет того, что на переменном токе каждый электровоз является генератором гармоник, и за счет других причин. Расчет выполняют применительно к ближнему (дальному) концу усилительного участка, например, УП1, полагая, что тяговая сеть состоит из плеч одностороннего питания, на конце каждого из которых находится один или несколько электровозов (при кратной тяге).

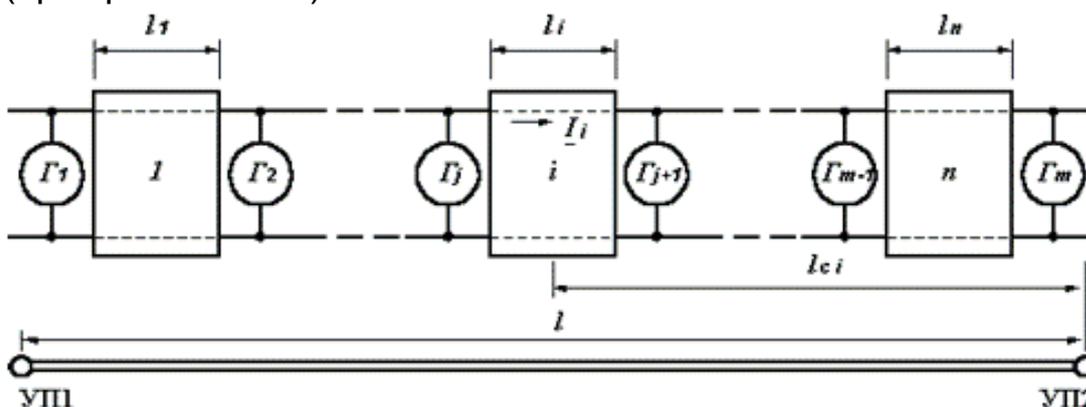


Рис. 34

Расчеты наведенного психофизического напряжения шума производят путем расчета напряжения, наводимого от каждого участка на отдельной гармонике, с последующим квадратичным суммированием по всем гармоникам и квадратичным суммированием наводимых напряжений от всех участков.

Мешающее напряжение для k -ой гармоники от влияющего участка i вычисляют по формуле (30), учитывающей коэффициент

акустического воздействия, коэффициент чувствительности, различие экранирующего действия параллельных проводников на разных частотах и большую электрическую длину провода связи:

$$U_{ik} = 2\omega_k M_k I_k p_k \eta_k s_k \left| \frac{\text{sh}(\gamma_{-k}^l c) \text{sh}\left(\frac{\gamma_{-k}^l \varepsilon}{2}\right)}{\gamma_{-k} \text{sh}(\gamma_{-k}^l)} \right| 10^3, \text{ мВ} \quad (30)$$

В формуле (30) $\omega_k = 314k$ рад/с - угловая частота k -ой гармоники тягового тока;

M_k - модуль взаимной индуктивности между контактной сетью и проводом связи для гармоники k , Гн/км;

I_k - эквивалентный ток k -ой гармоники тягового тока, А;

p_k - коэффициент акустического воздействия для k -ой гармоники;

η_k - коэффициент чувствительности двухпроводной телефонной цепи к помехам для k -ой гармоники тягового тока;

s_k - результирующий коэффициент экранирующего действия для k -ой гармоники тягового тока;

γ_{-k} - коэффициент распространения канала провод линии связи -

земля для k -ой гармоники, $\gamma_{-k} = \alpha_k + j\beta_k$ - комплексное число, составленное коэффициентом затухания и коэффициентом фазы;

10^3 - коэффициент перевода вольт в милливольты.

Формула (30) получается из уравнений, аналогичных уравнениям (3) и (4) раздела 2.1. Нетрудно заметить, что для электрически коротких

линий, когда $|\gamma_{-k}^l| \ll 1$, формула (30) становится аналогичной формуле (19) для частоты 50 Гц с добавкой коэффициента акустического воздействия и коэффициента чувствительности.

Для коротких межподстанционных зон тяговой сети постоянного тока 3.3 кВ формулу (30) можно несколько упростить, полагая

$$\text{sh}\left(\frac{\gamma_{-k}^l \varepsilon}{2}\right) \approx \frac{\gamma_{-k}^l \varepsilon}{2} \quad \text{тогда}$$

$$U_{ik} = \omega_k M_k I_k p_k \eta_k s_k \left| \frac{\text{sh}(\gamma_{-k}^l c)}{\text{sh}(\gamma_{-k}^l)} \right| 10^3, \text{ мВ}$$

Для двухпроводных телефонных цепей определяют психофотометрическое напряжение в диапазоне тональных частот (300 - 3400 Гц), суммируя гармоники от 7-й до 69-й при электрификации на переменном токе и от 2-й до 24-й при электрификации на постоянном токе:

$$U_{mi} \approx \sqrt{\sum_{k=7}^{69} (U_{ik})^2}; \quad U_{mi} = \sqrt{\sum_{k=2}^{24} (U_{ik})^2}$$

Напряжения шума от нескольких влияющих плеч складывают по квадратичному закону

$$U_{ш} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{ши})^2},$$

где $U_{ши}$ - напряжение шума, наводимое в линии связи от участка i .

РЕЗЮМЕ

При расчете напряжения мешающего влияния приходится учитывать большую длину линии связи и несинусоидальность влияющего тока, что приводит к необходимости суммирования напряжений влияния на разных участках и к расчету на гармониках. Учитывается обычно только магнитное влияние, а суммирование производится в квадратурах.

Возможность расчета на гармониках определяется теоремой Фурье и линейностью цепи, подверженной влиянию.

[Возврат к оглавлению](#)

Лекция 13.

ИСТОЧНИКИ МЕШАЮЩИХ ВЛИЯНИЙ

13.1. Определение влияющих токов тяговой сети переменного тока<
В случае тяговой сети переменного тока межподстанционные зоны для высших гармоник являются электрически длинными и расчеты тока контактной сети должны учитывать это обстоятельство.

<Правила защиты:> [1] предлагают рассматривать все тяговые плечи как плечи одностороннего питания. Все токи участков по рис. 34 при этом рассчитываются независимо друг от друга. Гармонические составляющие тягового тока для каждого из участков определяются из выражения $I_k = K_{\theta} I_k'$, где I_k' - гармоника тока электровоза,

работающего в конце плеча питания при нормальном режиме; K_{θ} - волновой коэффициент, учитывающий изменение тягового тока по длине тяговой сети и вычисляемый по методике "Правил защиты..." [1]; в случае короткого участка его можно принять равным единице.

Гармоники тока электровоза можно определить тремя следующими путями:

- приближенно по выражениям, приведенным в разделе 13.2, где учитывается основной источник несинусоидальности в тяговой сети переменного тока - выпрямитель электровоза, нагруженный активно-индуктивной цепью;
- по таблице "Правил защиты..." [1] (выдержки из нее представлены в табл. 4), в которой предполагается, что каждая секция восьмиосного электровоза потребляет ток 150 А в режиме тяги; при работе n секций диодного или тиристорного электровоза расчетное значение влияющего тока следует увеличить в \sqrt{n} раз; значения гармоник тока предполагаются пропорциональными действующему значению тока электровоза;
- путем практического измерения гармоник тягового тока.

Таблица 4

Ток в удаленном от тяговой подстанции конце тягового плеча одностороннего питания однопутного участка для одной секции восьмиосного электровоза, потребляющего ток 150 А в режиме тяги

Номер гармоники	Частота, Гц	Ток гармоники, А	Номер гармоники	Частота, Гц	Ток гармоники, А
7	350	5.0	25	1250	0.34
9	450	3.5	27	1350	0.28
11	550	2.3	29	1450	0.25
13	650	1.6	31	1550	0.23
15	750	1.2	33	1650	0.21
17	850	0.80	35	1750	0.19
19	950	0.71	37	1850	0.18
21	1050	0.54	39	1950	0.16
23	1150	0.40	41	2050	0.15

13.2. Спектральный состав тока выпрямительного электровоза

Источником несинусоидальности в тяговой сети переменного тока является выпрямительный электровоз. В простейшем варианте можно рассмотреть закономерности возникновения гармоник тока при применении для питания тяговых двигателей мостовой схемы выпрямления (рис. 35а).

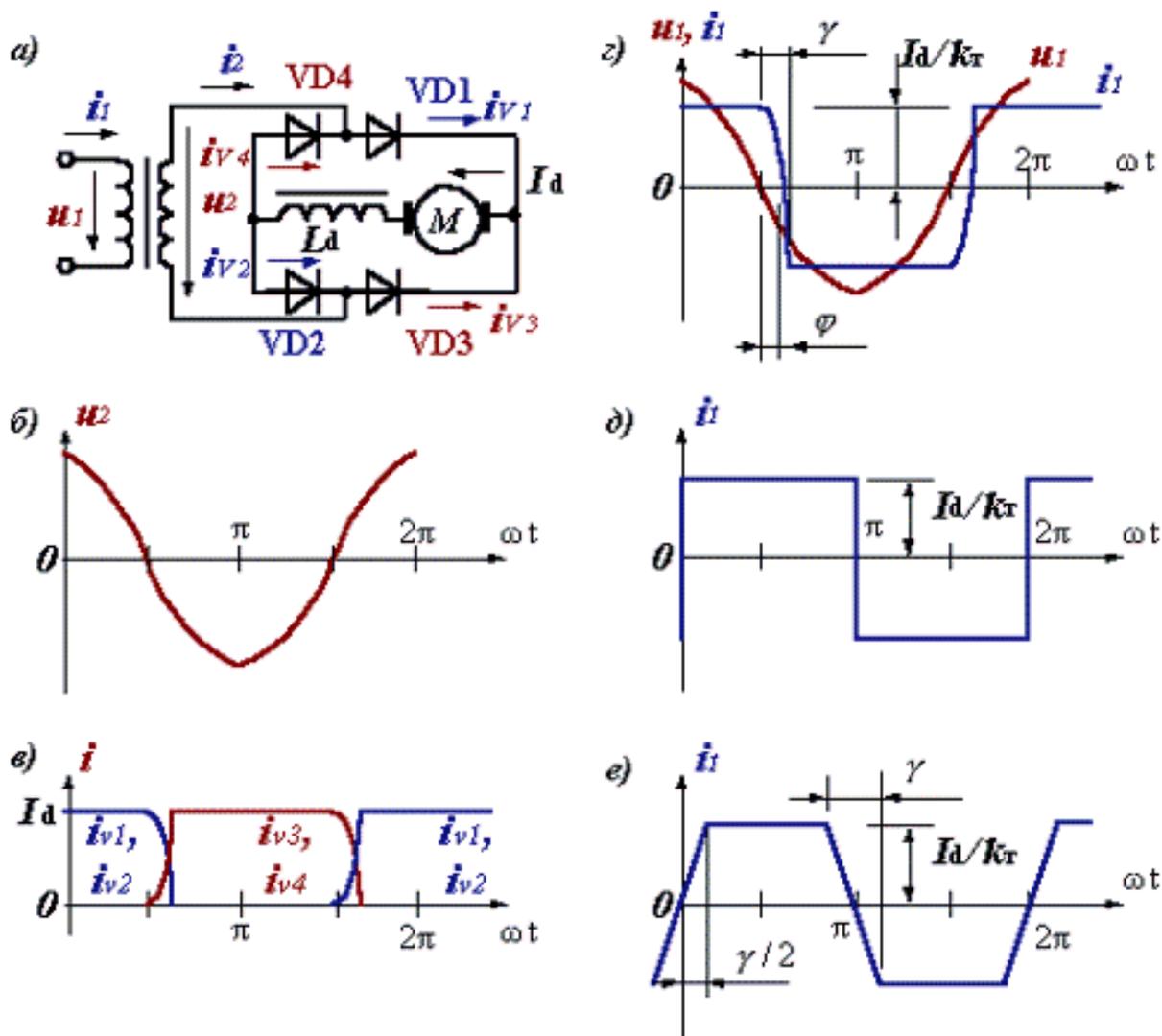


Рис. 35

За счет катушки L_d происходит сглаживание пульсаций выпрямленного тока, и можно считать в первом приближении, что через двигатели течет не изменяющийся во времени ток I_d . В положительный полупериод напряжения u_2 ток протекает по цепи $VD1-M-VD2$, а в отрицательный - по цепи $VD3-M-VD4$. За счет наличия индуктивности рассеяния переключение происходит за конечное время, соответствующее углу коммутации γ . На рис. 34в изображены формы тока через вентили в зависимости от напряжения вторичной обмотки (рис. 34б); поскольку ток вторичной обмотки равен $i_2 = i_{v1} - i_{v4}$, то форма тока первичной обмотки (рис. 34г) определяется вычитанием соответствующих импульсов тока вентилей $VD1$ и $VD4$. Первичный ток имеет форму, близкую к трапецеидальной; в реальных условиях форма тока зависит от ходовой позиции электровоза, скорости движения, уровня напряжения, наличия других электровозов на фидерной зоне.

При оценочных расчетах можно заменить реальную форму кривой тока прямоугольными импульсами или импульсами трапецеидальной формы.

Для прямоугольных импульсов (рис.34д)

$$i_1(\omega t) = \frac{4I_d}{\pi k_T} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

где k_T - коэффициент трансформации преобразовательного трансформатора, а для трапецеидальных импульсов (рис.34е)

$$i_1(\omega t) = \frac{4I_d}{\pi k_T \gamma/2} \left(\sin \frac{\gamma}{2} \sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin \frac{3\gamma}{2} \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin \frac{5\gamma}{2} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

13.3. Определение влияющих токов тяговой сети постоянного тока

Обычно в тяговой сети постоянного тока основными источниками гармоник являются тяговые подстанции, что позволяет говорить о наличии в тяговой сети источника ЭДС гармоник, поскольку наличие конденсатора в сглаживающем устройстве тяговой подстанции обуславливает малое ее внутреннее сопротивление. По последней причине входное сопротивление межподстанционной зоны можно считать равным сопротивлению тяговой сети.

После разложения несинусоидального напряжения тяговой подстанции на гармоники можно легко определить ток от подстанции на гармонике k . Сопротивления электроподвижного состава имеют индуктивный характер и довольно большие на гармониках, так что токи гармоник не зависят от наличия электровозов на зоне, а при одинаковых подстанциях входные сопротивления тяговой сети с двух сторон межподстанционной зоны одинаковы, $Z_{вх,i}$. Влияющий ток тяговой сети равен

$$\dot{I}_{ik} = \dot{I}'_{ik} - \dot{I}''_{ik} = \frac{\dot{U}_{\Gamma jk}}{Z_{ex,i}} - \frac{\dot{U}_{\Gamma j+1,k}}{Z_{ex,i}} = \frac{\Delta \dot{U}_{\Gamma jk}}{Z_{ex,i}}$$

$\Delta \dot{U}_{\Gamma jk} = \dot{U}_{\Gamma jk} - \dot{U}_{\Gamma j+1,k}$ - векторная разность напряжений смежных подстанций на гармонике k . Гармоники напряжения тяговой подстанции определяются напряжением на выходе выпрямителя и сглаживающим эффектом фильтра тяговой подстанции. В следующем разделе рассматривается гармонический состав напряжения на выходе выпрямителя, а сглаживающее действие фильтра рассмотрено в разделе 14.4.

13.4. Спектральный состав напряжения на входе сглаживающих фильтров тяговых подстанций постоянного тока

Наиболее часто для выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций постоянного тока применяются шестипульсовые схемы. Простейшая мостовая схема шестипульсового выпрямителя показана на рис. 36, где преобразовательный трансформатор с внешней сетью представлены источниками ЭДС и индуктивностями рассеивания X_s , а тяговые двигатели со сглаживающей катушкой замещены -цепочкой.

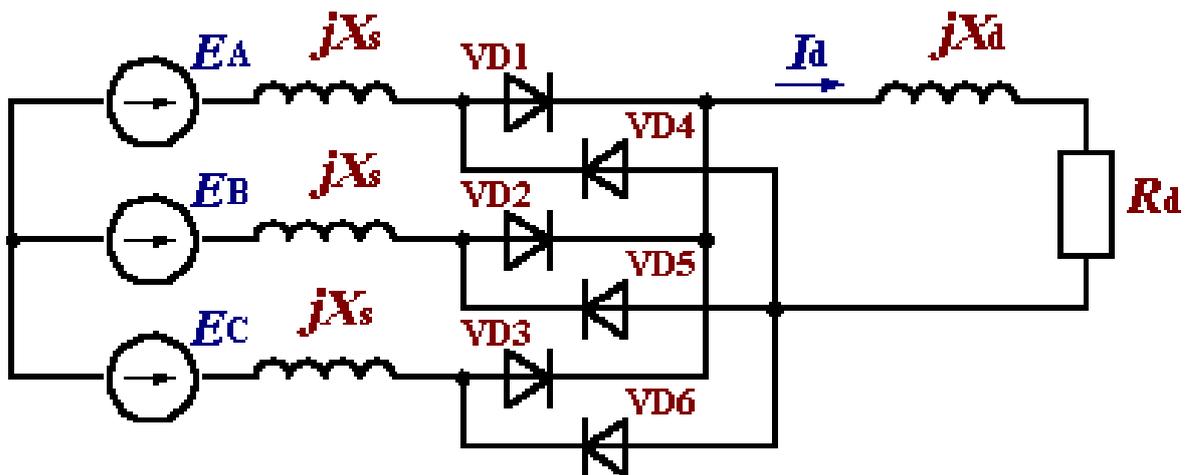


Рис. 36

При работе выпрямителя происходит поочередное переключение вентилях, причем переход тока с одного вентиля на другой происходит в середине интервала времени включения третьего вентиля. Например, переход тока с вентиля VD1 на вентиль VD2 при превышении напряжения на вентиле VD2 происходит в середине интервала времени работы вентиля VD6. Этот процесс переключения вентилях называется коммутацией, и при отсутствии тока нагрузки он происходит практически мгновенно. В итоге на холостом ходе при симметричном входном трехфазном напряжении выпрямитель выдает пульсирующее напряжение, выделяя максимальные значения из шести половинок синусоиды (рис. 37а).

Согласно теореме Фурье периодическое напряжение характеризуется набором гармоник, у которого основная частота определяется периодом исходного напряжения. На рис. 37а период выпрямленного напряжения равен 3.33 мс, так что это напряжение имеет постоянную составляющую и гармоники с частотами, кратными 300 Гц. Поскольку питание выпрямителя производится от сети 50 Гц, при некоторых условиях частоты гармоник могут оказаться кратными 100 Гц и даже 50 Гц. По этой причине за базовую частоту принимают 50 Гц и говорят о частоте 300 Гц как о шестой гармонике. По переменной ω t период напряжения по рис. 37а равен $\pi/3$, так как $\omega = 2\pi/T$, $T = 20$ мс. В гармоническом составе выпрямленного напряжения присутствуют гармоники с номерами 6, 12, 18 и так далее.

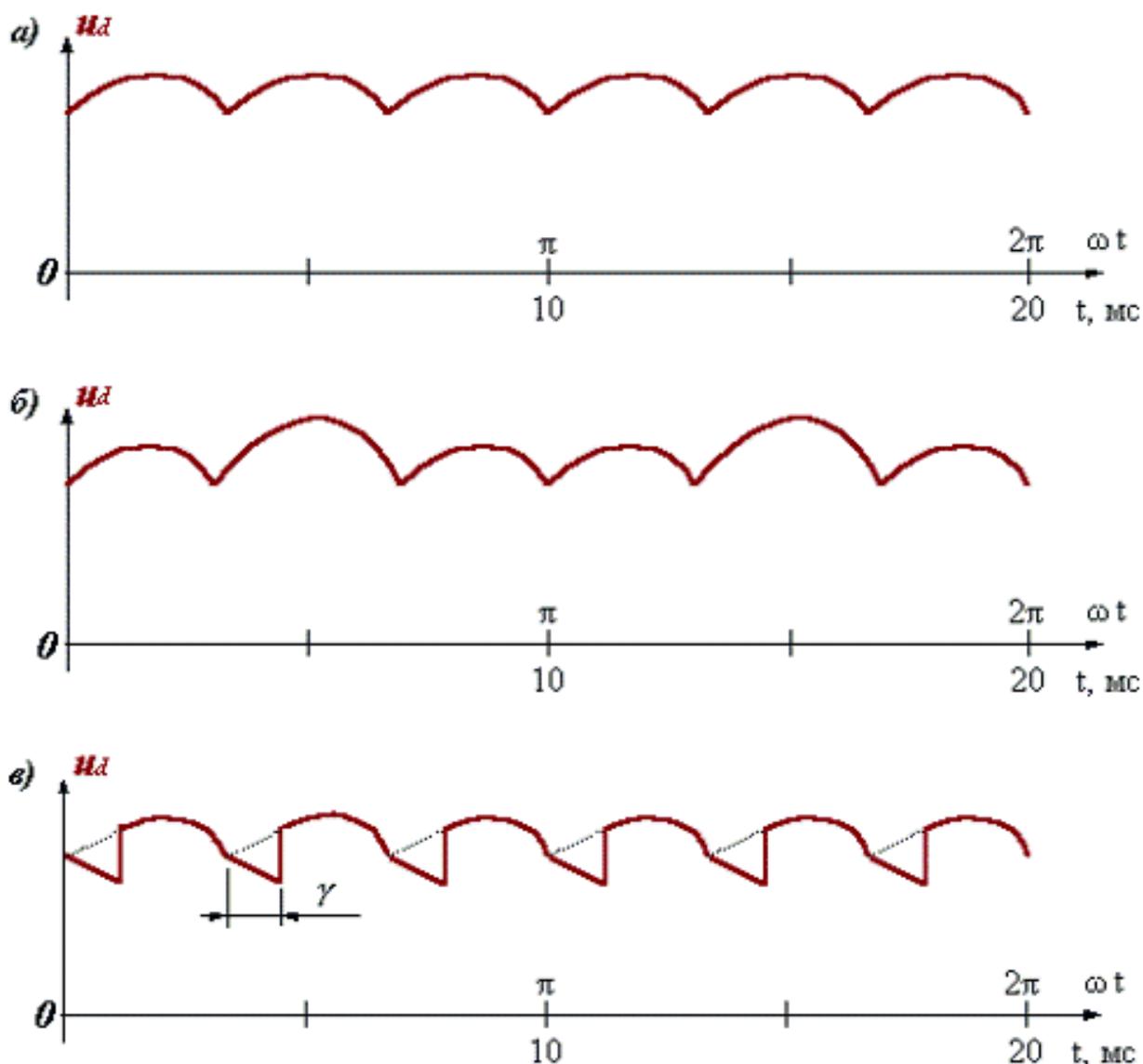


Рис. 37

На рис. 37б показана кривая выпрямленного напряжения при несимметрии входного напряжения, когда амплитуда синусоиды второй фазы больше амплитуд первой и третьей фазы. Второй и пятый (соответствующий нижней части синусоиды) импульсы оказываются больше соседних импульсов. Период выпрямленного напряжения равен $T=10$ мс, а частота первой гармоники $f_1=1/T=100$ Гц. Если отсчитывать время в единицах ωt , то период выпрямленного напряжения в этом случае равен π .

При появлении у выпрямителя нагрузки начинают играть роль процессы, определяемые наличием в цепи целого ряда индуктивных элементов, препятствующих резким изменениям тока. При токе в нагрузке ее индуктивность X_d поддерживает ток на почти постоянном уровне, и на запирающемся вентиле ток должен скачком упасть до нуля, а на вновь отпертом возрасти до уровня тока I_d . Разумеется, этого не происходит из-за наличия в цепи вентиля индуктивных элементов X_s , так что некоторое время после отпирания подхватывающего вентиля запирающийся вентиль еще отперт; этот отрезок времени, в течение которого схема выглядит ненормально - в

ней целых три отпертых вентиля - называется временем коммутации, а в единицах ωt - углом коммутации γ вентиляей. Рис. 37в отображает ситуацию с коммутацией вентиляей. Угол коммутации сильно влияет на спектральный состав выпрямленного напряжения, в целом увеличивая уровень высших гармоник.

При управляемых вентилях начало коммутации может быть задержано относительно естественного момента отпирания.

Величина угла коммутации γ в шестипульсовой схеме определяется известным выражением:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_d X_s}{\sqrt{2} E_2 \sin(\pi/3)},$$

где I_d - величина выпрямленного тока, X_s - индуктивное сопротивление трансформатора и питающей сети переменного тока, отнесенное к числу витков вентиляльной обмотки; E_2 - действующее значение фазного напряжения вентиляльной обмотки.

$$\cos \gamma \approx 1 - \frac{\gamma^2}{2}$$

При малых $\gamma < \pi/6$, и при учете соотношения

$$X_s = \frac{E_2^2}{S_{кз}} + \frac{u_k E_2^2}{100 S_H} = E_2^2 \left(\frac{1}{S_{кз}} + \frac{u_k}{100 S_H} \right),$$

где $S_{кз}$ - мощность короткого замыкания на шинах питающего напряжения подстанции, S_H - номинальная мощность трансформатора, $E_2=2.62$ кВ, u_k - напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах, получим

$$\gamma = 15.8 \sqrt{I_d \left(\frac{1}{10 S_{кз}} + \frac{u_k}{S_H} \right)}, \text{ град.},$$

где $S_{кз}$ подставляется в мегавольтамперах, S_H - в киловольтамперах, I_d - в амперах. При двух трансформаторах - тяговом и преобразовательном - вместо u_k/S_H берется сумма $u_{к\tau}/S_{H\tau} + u_{кпр}/S_{Hпр}$.

С увеличением нагрузки выпрямителя растет угол коммутации и амплитуды гармоник, и обычно при расчете напряжения шума на отдельной фидерной зоне двухстороннего питания нагрузку одной тяговой подстанции берут равной номинальной нагрузке, а другой - половине от номинальной нагрузки.

Если питающее тяговую подстанцию напряжение строго симметрично, то на выходе неуправляемого выпрямителя появляются гармоники с номерами k , равными 6, 12, 18 и так далее, коэффициенты разложения которых в ряд Фурье могут быть определены по графикам "Правил защиты..." [2] или вычислены по следующим формулам [8]:

$$B_k = \frac{U_{d0}}{\sqrt{2}(k^2 - 1)} (1 + k \sin k\gamma \sin \gamma + \cos k\gamma \cos \gamma),$$

$$C_k = \frac{U_{d0}}{\sqrt{2}(k^2 - 1)} (k \cos k\gamma \sin \gamma + \sin k\gamma \cos \gamma).$$

При несимметрии питающего трехфазного напряжения в выходном напряжении выпрямителя появляются четные гармоники под номерами 2, 4, 8 и т.д. Напряжения этих гармоник, величины которых обычно существенно меньше гармоник, кратных 6, можно определить из графиков "Правил защиты..." [2].

Гармоники выпрямителя тяговой подстанции снижаются сглаживающими фильтрами тяговых подстанций, учет которых рассмотрен в разделе 14.4.

РЕЗЮМЕ

Величины гармоник влияющего тока при расчетах мешающих влияний определяются таблицами и формулами нормативных документов. Для некоторых отдельных случаев расчет гармоник влияющего тока может быть проведен по упрощенным формулам, приведенным в данном разделе.

Лекция 14.

АКТИВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

14.1. Классификация способов снижения влияний

Мероприятия по уменьшению влияния могут осуществляться как в подверженной влиянию смежной линии, так и в тяговой сети - источнике влияний. Мероприятия, осуществляемые в смежной линии, защищают только данную линию, и поэтому их относят к пассивным. Таким мероприятием является отсос смежной линии от железной дороги, а для линии связи возможно применение кабельных линий, скрещивание проводов, установка разрядников, установка разделительных трансформаторов, включение дренажных катушек с заземленной средней точкой и ограничивающих фильтров, повышение уровня передачи, использование редуционных трансформаторов.

К активным защитным мероприятиям для линий связи относят применение отсасывающих трансформаторов на дорогах переменного тока и фильтр-устройств на тяговых подстанциях постоянного тока для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Эти мероприятия действуют на все смежные линии и эффективность их тем выше, чем больше число одновременно защищаемых линий.

14.2. Применение отсасывающих трансформаторов

При электрификации на переменном токе для снижения напряжения магнитного влияния применяют отсасывающие трансформаторы. Основная идея метода - увеличение экранирующего действия рельсов, которые в обычных условиях уменьшают влияние примерно в два раза. С этой целью увеличивают взаимосвязь между контактной сетью и рельсами; можно еще уменьшить собственное продольное сопротивление рельсов, но этого трудно достичь. Взаимосвязь увеличивают применением специальных трансформаторов, названных отсасывающими, поскольку они заставляют ток нагрузки течь по рельсам, как бы отсасывая ток из земли.

Два варианта включения отсасывающих трансформаторов иллюстрируются схемами рис. 38. На рис. 38а показана схема с включением вторичной обмотки трансформатора в рассечку рельса, а на рис. 38б - с включением в рассечку дополнительно монтируемого провода, называемого обратным проводом.

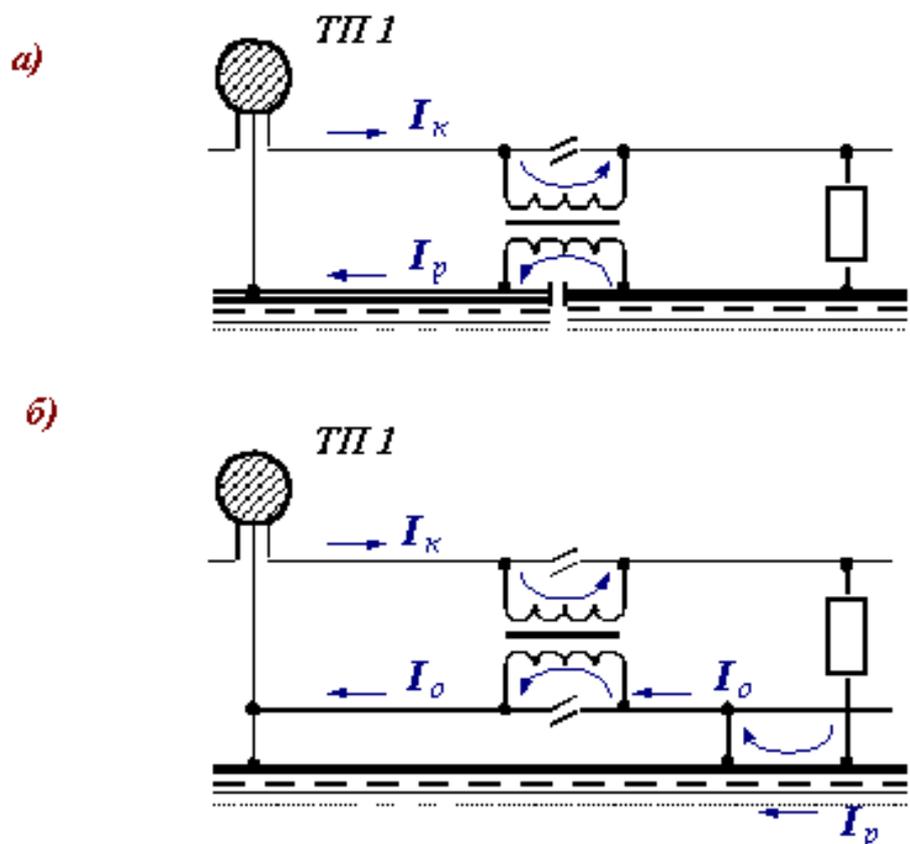


Рис. 38

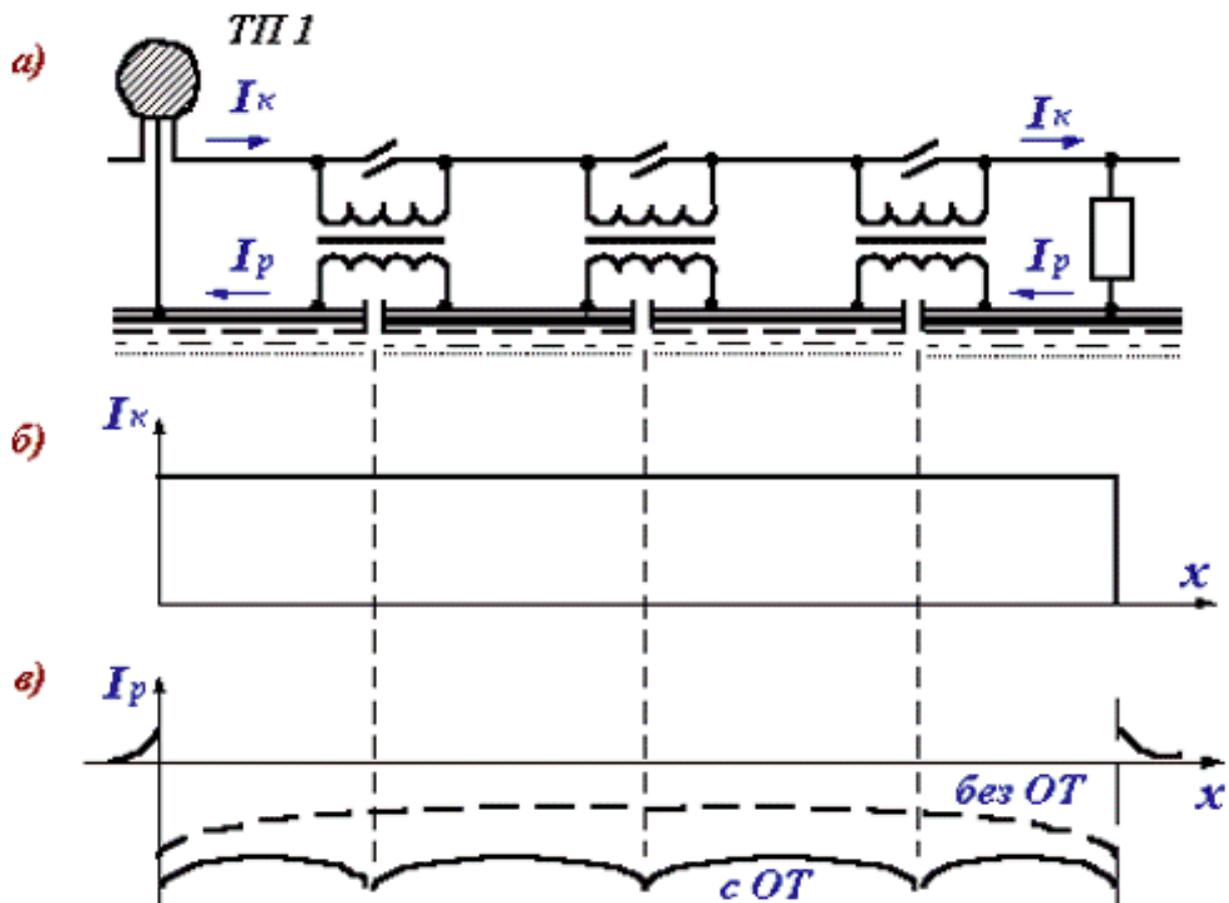


Рис. 39
 Коэффициент трансформации отсасывающих трансформаторов обычно равен единице или по крайней мере близок к единице.

Величина сопротивления нагрузки вторичной обмотки составляет в схеме рис. 38а доли Ома, в схеме рис. 38б - 1-3 Ома, то есть режим работы отсасывающего трансформатора близок к короткому замыканию, как у трансформатора тока. Роль отсасывающего трансформатора в схеме рис. 38а такая же, как у путевого источника тока в системе постоянного тока. В обеих схемах токи в обмотках трансформатора практически противофазны, а напряжения на обмотках сравнительно небольшие. На рис. 39а показана схема работы группы отсасывающих трансформаторов, включенных в рассечку рельса, при расположении одного электровоза на участке. Как видно из графика распределения тока в рельсах (рис. 39в), ток в рельсах с трансформаторами гораздо больше тока без трансформаторов и экранирующее действие рельсов сильнее.

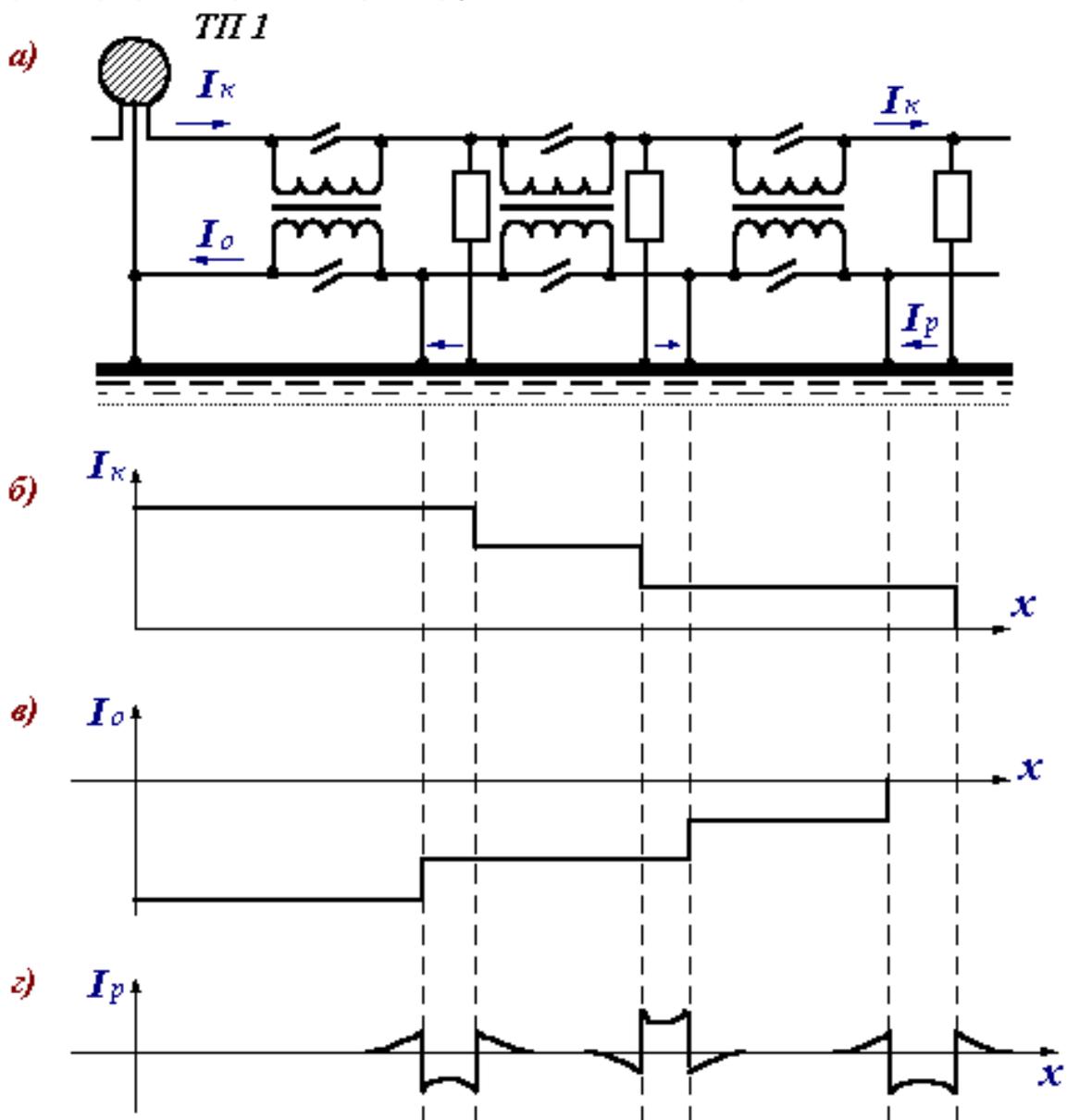


Рис. 40

На рис. 40 представлена схема включения на участке нескольких отсасывающих трансформаторов с обратным проводом, а также распределения токов в контактной сети, обратном проводе и рельсах

при трех электровозах на участке. Для этой схемы ток в контактной сети и ток в обратном проводе индуцируют в рельсах соответствующие ЭДС, которые в общем случае не компенсируют друг друга, вызывая протекание в рельсах индуктированного тока. В смежной линии наводятся ЭДС от токов контактной сети, обратного провода и рельсов почти по всей длине сближения, и суммарная ЭДС такого типа называется транзитной составляющей. Другая составляющая, называемая местной, обусловлена влиянием тягового тока электровозов на нескольких участках сравнительно небольшой длины, расположенных между каждым электровозом и ближайшей к нему перемычкой. На этих участках протекают токи в контактной сети, обратном проводе и ток в рельсах с частичной утечкой в землю. Характер влияния этих участков на смежную линию такой же, как от обычной тяговой сети без отсасывающих трансформаторов.

Отсасывающие трансформаторы целесообразно включать в тяговую сеть в местах сопряжения анкерных участков, где удобно секционировать контактную сеть, выполнив сопряжение изолирующим. Поэтому расстояние между отсасывающими трансформаторами кратно длине анкерного участка, составляющей около 1.5 км. Наиболее оптимальное расстояние между отсасывающими трансформаторами составляет для схемы рис. 39а примерно 3 км, при этом коэффициент экранирования рельсов в 2-5 раз меньше, чем в случае без отсасывающих трансформаторов, а удорожание тяговой сети еще не слишком большое.

Отсасывающие трансформаторы с обратным проводом при оптимальном расстоянии между трансформаторами 4.5 км снижают опасные влияния в 4-10 раз.

Недостатком применения отсасывающих трансформаторов являются большие затраты на их приобретение, установку и обслуживание.

14.3. Применение демпфирующих контуров

Тяговая сеть, имеющая распределенные емкость и индуктивность, может рассматриваться как колебательный контур. В момент завершения коммутации вентилей выпрямителя в нем возникают затухающие колебания на частотах резонанса контура. При большой добротности контура гармоники этих частот резко выделяются над остальными, приходится к тому же на участок вблизи максимума частот наибольшего влияния (1 кГц).

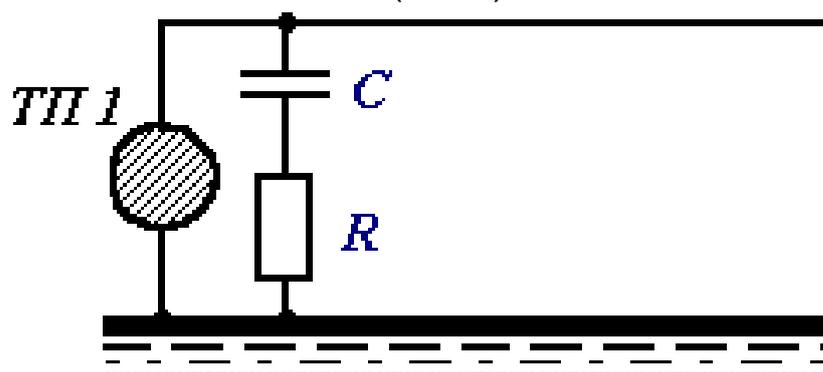


Рис. 41

Для снижения добротности контура и амплитуд резонирующих гармоник применяют демпфирующий RC-контур (рис. 38). Выбором величин R и C обеспечивают гашение резонансных колебаний в широком диапазоне частот и относительно небольшое увеличение гармоник низких частот.

14.4. Сглаживающие фильтры тяговых подстанций постоянного тока

Для снижения переменной составляющей выпрямленного напряжения на шинах 3.3 кВ на каждой тяговой подстанции постоянного тока монтируется специальное сглаживающее устройство, представляющее собою фильтр, построенный по Г-образной схеме.

Фильтры тяговых подстанций состоят из реактора и ряда включенных параллельно друг другу индуктивно-емкостных контуров (рис. 42),

$$\omega_k L_i = \frac{1}{\omega_k C_i}$$

настроенных на разные частоты, так что для них

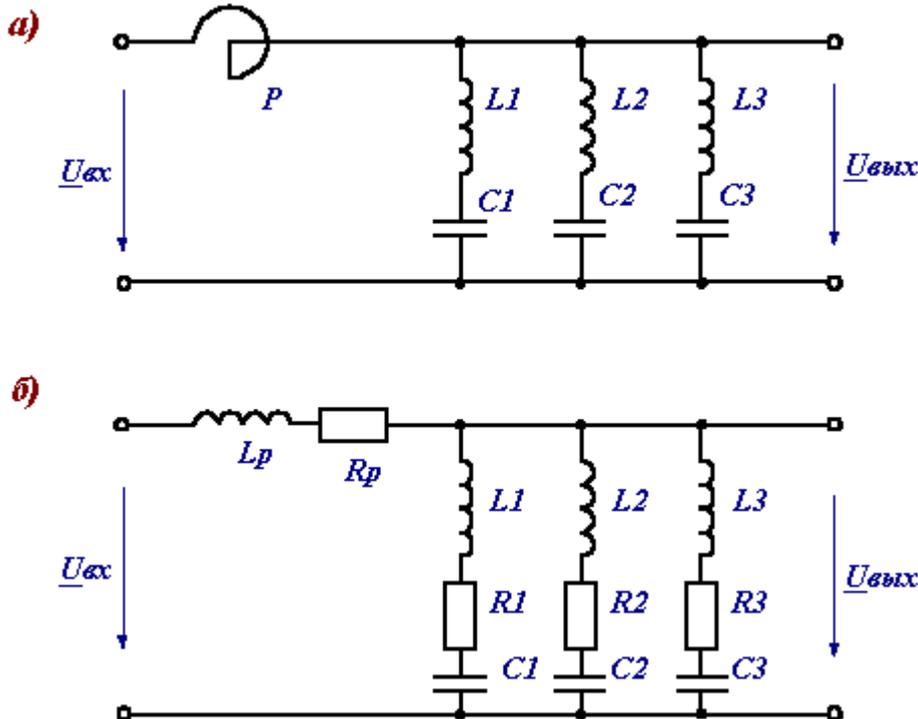


Рис. 42

Количественной характеристикой эффективности действия фильтра

$$k_{сгл} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{U}_{вых}}$$

является коэффициент сглаживания

$\frac{\dot{U}_k}{k_{сгл}}$, где \dot{U}_k - напряжение гармоники на входе фильтра.

Собственно, на рис. 42а изображено одно звено фильтра; на рис. 42б показана схема замещения звена с учетом потерь в катушках. По последней схеме несложно определить коэффициент сглаживания.

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_{ex} \frac{Z_{\phi k}}{Z_{\phi k} + Z_{pk}}, \quad \text{то} \quad k_{сгл} = 1 + \frac{Z_{pk}}{Z_{\phi k}}, \quad \text{где} \quad Z_{pk} = R_p + j\omega_k L_p,$$

$$\frac{1}{Z_{\phi k}} = \frac{1}{Z_{1k}} + \frac{1}{Z_{2k}} + \frac{1}{Z_{3k}}, \quad Z_{ik} = R_i + j\omega_k L_i + \frac{1}{j\omega_k C_i}.$$

При расчете $k_{сгл}$ для частоты, на которую настроен один из контуров, можно считать, что $Z_{\phi k}$ определяется только настроенным контуром $L_k C_k$, поскольку его сопротивление мало по сравнению с

сопротивлениями других ветвей. При этом $Z_{\phi k} \approx R_k$ и $k_{сгл} \approx \frac{\omega_k L_p}{R_k}$.

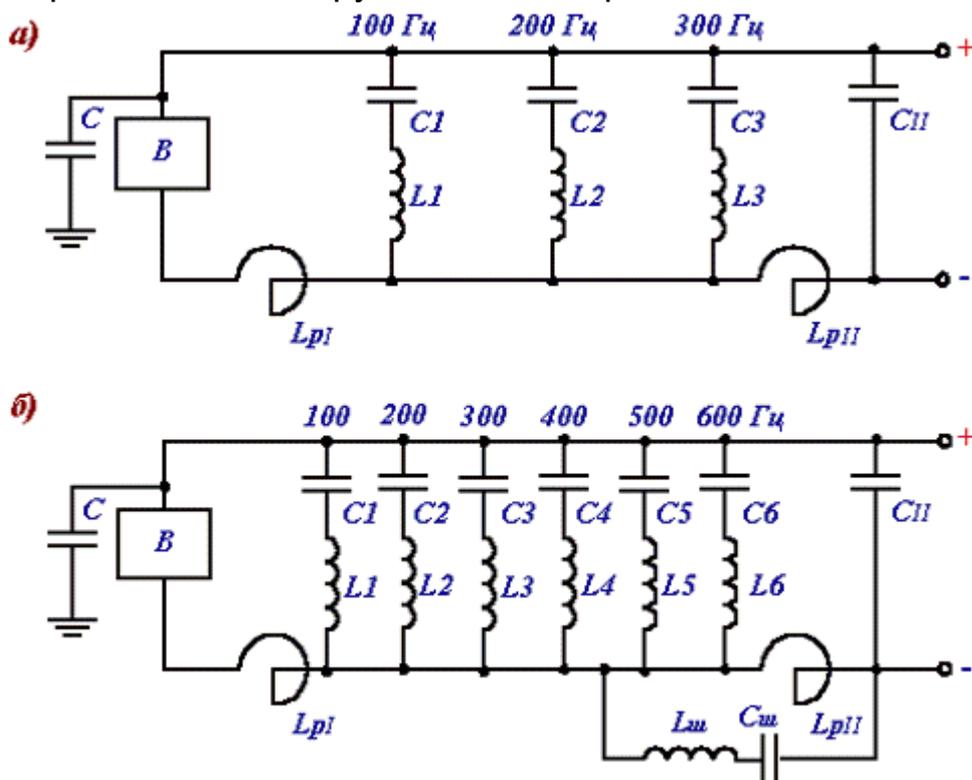


Рис. 43

"Правила защиты..." [2] рекомендуют к использованию два типа фильтров, схемы которых показаны на рис. 43. В этих схемах конденсатор C емкостью 10 мкФ установлен для снижения помех высокой частоты (выше нескольких килогерц), а индуктивности реакторов могут меняться от 3 до 11 мГн. Сравнительно низковольтный фильтр $L_{ш} C_{ш} L_{рII}$ в схеме рис. 43,б настроен на частоту 300 Гц и играет роль дополнительного фильтра, увеличивающего коэффициент сглаживания на этой частоте. Значение дополнительной

$$L_{ш} = \frac{281.5}{C_{ш}} - L_{рII}, \text{ мГн}$$

индуктивности $L_{ш}$ определяется формулой, если $C_{ш}$ подставлять в микрофарадах, $L_{рII}$ - в миллигенри. Как указано в "Правилах защиты..." [2], при $C_{ш}=10$ мкФ этот фильтр увеличивает коэффициент сглаживания на частоте 300 Гц в 10 раз.

В табл. 5 приведены значения коэффициентов сглаживания фильтров для некоторых частот по данным "Правил защиты..." [2] при $C_1=140$ мкФ, $C_2=100$ мкФ, $C_3=90$ мкФ, $C_4=60$ мкФ, $C_5=45$ мкФ, $C_6=40$ мкФ, $L_1=18.1$ мГн, $L_2=6.3$ мГн, $L_3=3.15$ мГн, $L_4=2.25$ мГн, $L_5=2.05$ мГн, $L_6=1.76$ мГн, $L_{ш}=23.15$ мГн, $C_{ш}=10$ мкФ, $C_{II}=280$ мкФ для схемы типового фильтра № 1 (рис. 43а) и $C_{II}=200$ мкФ для схемы типового фильтра № 2 (рис. 43б).

Таблица 5

Значения коэффициентов сглаживания типовых фильтров

$f,$ Гц	Типовой фильтр № 1		Типовой фильтр № 2	
	$L_p=4.5$ мГн, $L_{pII}=4.5$ мГн,	$L_{pI}=11$ мГн, $L_{pII}=3.0$ мГн,	$L_{pI}=4.5$ мГн, $L_{pII}=4.5$ мГн,	$L_{pI}=11$ мГн, $L_{pII}=5.0$ мГн,
100	3.3	7.85	3.1	7.1
300	46	109	498	1400
600	58	138	540	1470

Помимо применения сглаживающих устройств, значительного снижения гармонических составляющих в тяговой сети достигают при использовании на тяговых подстанциях двенадцатипульсовых выпрямителей. В этом случае при симметричном питающем напряжении выпрямленное напряжение содержит только гармоники, кратные 600 Гц, и амплитуды соответствующих гармоник получаются меньше, чем при шестипульсовых выпрямителях.

РЕЗЮМЕ

Мероприятия по защите от влияний разделяются на две группы: активные и пассивные.

Активные мероприятия действуют на все смежные линии. К ним относятся применение отсасывающих трансформаторов на дорогах переменного тока и фильтр-устройств и демпфирующих контуров на тяговых подстанциях постоянного тока для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Лекция 15.

ПАССИВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ

15.1. Относ смежных линий от электрифицированной железной дороги и применение кабельных линий

Самая простая идея по снижению влияний очевидна - отнести смежную линию подальше от железной дороги. Увеличение ширины сближения уменьшает электрическую и магнитную связь и снижает напряжение влияния, при этом электрическое влияние уменьшается с расстоянием намного быстрее магнитного, а последнее зависит еще от проводимости земли. В зависимости от удельной проводимости земли минимальная допустимая ширина сближения воздушной линии с тяговой сетью переменного тока может достигать значений от сотен метров до нескольких километров.

Относ железнодорожных линий связи значительно удорожает их строительство и эксплуатацию, поэтому для снижения влияний часто используют кабельные линии, что особенно эффективно при применении специальной оболочки и брони с повышенными проводимостями. Для уменьшения напряжения влияния до требуемого уровня магистральные кабели связи обычно относят на расстояние 25-100 м от железной дороги. Для уменьшения взаимных и внешних влияний изолированные жилы скручиваются в группы, а также проводятся мероприятия по симметрированию пар в кабелях.

15.2. Защита от влияния грозовых разрядов

Разряды молнии вызывают большие напряжения на воздушных и кабельных линиях связи и на рельсовых цепях автоблокировки. Наиболее опасны прямые удары молнии, которые чаще поражают высокие предметы - опоры воздушных линий, контактную сеть. Поражаются прямыми ударами молнии и кабели в земле, поскольку при протекании в земле большого - до 200 кА - тока молнии образуются ионизированные плазменные каналы, распространяющиеся в области с большой проводимостью. Этими каналами в земле пропахиваются борозды длиной до 30-40 м, и наиболее часто повреждаются кабели в грунтах с малой электропроводностью. При повреждении наблюдаются расплавления оболочки кабеля, повреждения жил, образование вмятин, пробой изоляции жил.

Прямые удары молнии в провода воздушных линий, а также близкие к линиям разряды сопровождаются возникновением и распространением в обе стороны волн перенапряжений небольшой длительности (в десятки микросекунд) с амплитудой, ограниченной электрической прочностью опор и изоляторов (50-200 кВ). Возможен обрыв проводов из-за расплавления металла, повреждения аппаратуры и изоляции кабельных вставок и другие повреждения.

Основные защитные мероприятия этого случая сводятся к следующему:

- выбор трассы с наименьшим количеством ожидаемых повреждений;
- применение кабелей с повышенной проводимостью оболочки;
- отвод тока молнии от подземных кабелей путем прокладки в земле тросов параллельно кабелю на некотором расстоянии от него;
- включение разрядников перед кабельными вставками, аппаратурой, в рельсовых цепях;
- защита молниеотводами отдельных наиболее ответственных опор воздушных линий.

Для защиты линий связи применяются специальные низковольтные разрядники, основные типы которых рассмотрены в следующем разделе.

15.3. Низковольтные разрядники для цепей связи

Разрядник представляет собою устройство минимум с двумя электродами, разделенными газовым промежутком. Один из электродов подключается к проводу защищаемой линии, а другой - к заземлению. Защитное действие разрядника основано на пробое газового промежутка волной перенапряжения, при котором провод соединяется с заземлителем. Очевидно, пробивное напряжение разрядника для эффективной защиты должно быть на 30-50% ниже уровня изоляции защищаемого оборудования. После окончания воздействия перенапряжения разрядник должен разорвать соединение защищаемой цепи с заземлителем.

В низковольтных цепях связи применяют угольные, газонаполненные и вентильные разрядники и искровые промежутки.

Угольные разрядники УР-500 применяют в цепях местной связи. Они представляют собой две угольные колодки, разделенные диэлектрической прокладкой с вырезом, образующим разрядный промежуток. Его пробивное напряжение равно $500+100$ В.

Газонаполненный разрядник Р-350 - это стеклянный баллон с двумя электродами, заполненный аргоном. Пробивное напряжение его составляет $350+40$ В.

Газонаполненный разрядник Р-35 отличается от Р-350 наличием третьего электрода в баллоне. Два электрода служат для подключения двух проводов линии, третий - для заземления. Такая конструкция обеспечивает хорошее симметрирование пары проводов. Пробивное напряжение $350+40$ В.

Газонаполненный двухэлектродный низковольтный разрядник Р-4 имеет пробивное напряжение 70..80 В.

Перечисленные разрядники применяются в цепях, где рабочее напряжение относительно земли не превышает 40 В. При напряжениях выше 40 В между электродами возникает дуга сопровождающего тока и провод оказывается постоянно заземленным. Чтобы этого не случилось, в таких цепях устанавливают **низковольтные вентильные разрядники** типов РВН-250 (этот

разрядник крепится зажимами на гайках), РВНШ-250 (колодка со штепселем), РВНН-250 (разъем ножевого типа), все эти разрядники для цепей напряжением 110/220 В. В цепях напряжением 220/380 В устанавливают разрядники РВН-500. Пробивное напряжение низковольтных вентильных разрядников составляет 700..900 В эффективных (при 50 Гц). Гашение дуги в разрядных промежутках вентильных разрядников происходит потому, что последовательно с разрядными промежутками в них установлены нелинейные вилитовые резисторы, сопротивление которых при рабочем напряжении весьма велико, но сильно снижается при перенапряжении.

Искровые промежутки представляют собою самый незатейливый вид защитного элемента, обладающий весьма плохими характеристиками. Их выполняют на изоляторах воздушных линий из того же провода, что и сами линии.

15.4. Защита от кратковременного индуктивного влияния контактной сети

Перечисленные в предыдущем разделе разрядники (кроме вентильных) обладают довольно низкой пропускной способностью и при сравнительно долговременных (по сравнению с грозовыми перенапряжениями) коротких замыканиях в тяговой сети часто выходят из строя. Для защиты от магнитного влияния при коротком замыкании применяют более мощные газонаполненные разрядники типов РБ-280, РБ-350. Кроме того, используют плавкие предохранители, дренажные катушки, кремниевые стабилитроны, защитные фильтры из дросселей и конденсаторов, а для защиты рельсовых цепей применяют нелинейные выравнители типов ВК-220, ВК-10, ВС-90 (цифры обозначают номинальное напряжение выравнителя). Выравнители - это нелинейные резисторы, резко уменьшающие свои сопротивления при больших напряжениях.

Предохранители типов СН-1.0, СК-1.0 (номинальный ток 1 А) используют в цепях связи для защиты разрядников Р-350, Р-35 от длительно протекающего тока, который может возникнуть при падении на линию связи провода ВЛ 380/220 В, если есть пересечение с такой линией. Пропускная способность предохранителей по грозовым импульсам составляет 1200 А.

Дренажные катушки применяют в высокочастотных цепях для исключения короткого замыкания и потери информации при работе разрядников. Эти катушки представляют собой две одинаковые полуобмотки, намотанные на ферромагнитный сердечник, и включенные так, чтобы они обладали большим сопротивлением для противофазного тока сигнала и легко пропускали бы синфазные токи перенапряжений. Принцип их работы сходен с принципом работы дроссель-трансформатора сигнальной установки автоблокировки, схема защиты которой показана на рис. 44. В этой схеме основными защитными элементами являются вентильные разрядники, заземляемые на рельсы через средние точки дроссель-

трансформаторов, а выравниватели ВК-220 защищают оборудование при коротком замыкании в тяговой сети или при асимметрии рельсовой цепи.

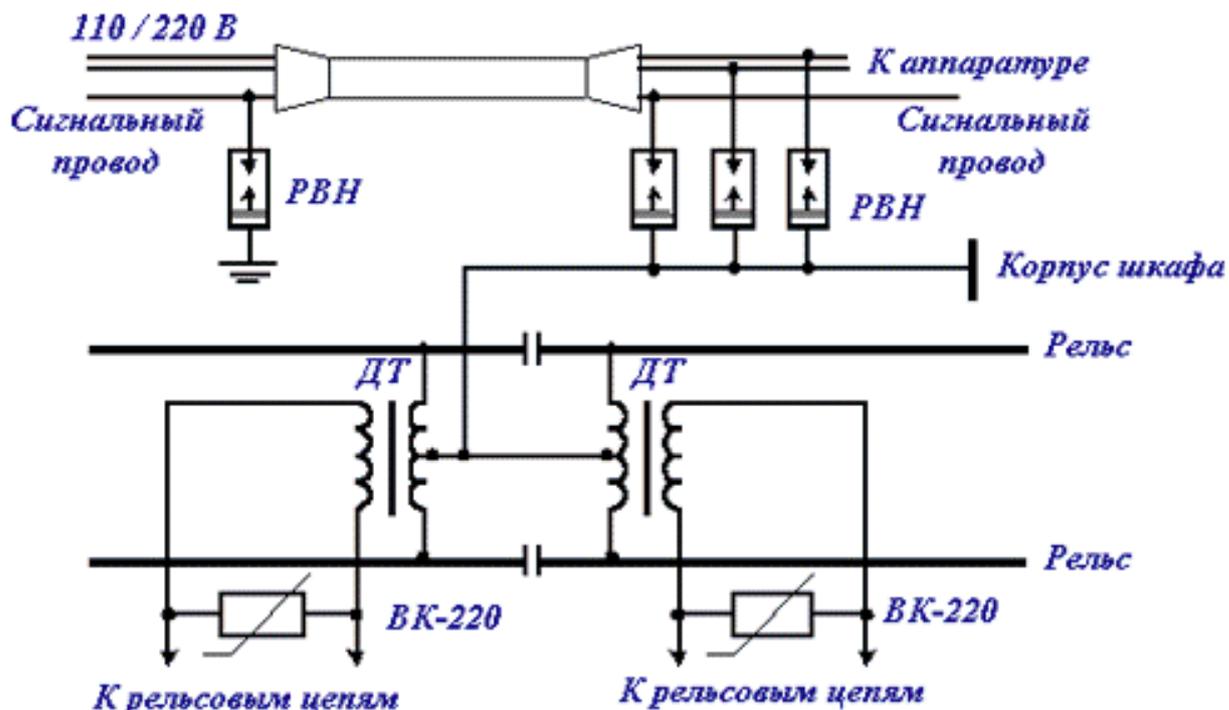


Рис. 44

Кремниевые стабилитроны используют для защиты устройств с полупроводниковыми приборами, имеющими электрическую прочность значительно ниже, чем разрядное напряжение разрядников Р-350 или РВН.

15.5. Защита кабельных линий от опасного влияния электрифицированной железной дороги редуционными трансформаторами

Этот способ защиты относится к пассивным способам, уменьшающим влияние на кабельные линии связи за счет увеличения коэффициента экранирования оболочки кабеля. Как показано в разделе 5.2, коэффициент экранирования кабеля определяется выражением (18)

$$\varepsilon_{об} = \frac{R_{о-об}}{R_{о-об} + j\omega L_{о-об}}$$

и если увеличить индуктивное сопротивление оболочки кабеля, то его экранирующее действие улучшится. Подобное мероприятие осуществляется включением в разрыв кабельной линии так называемого редуционного трансформатора (рис. 45).

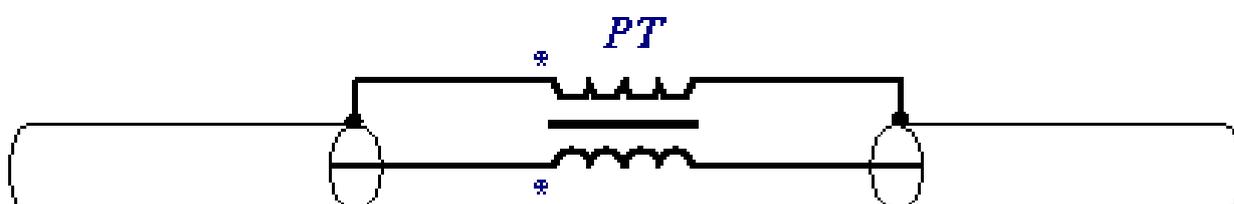


Рис. 45

Трансформатор по рис. 45 включен началами своих обмоток в одну сторону, так что ток полезного сигнала протекает по его обмоткам в противоположных направлениях, а наведенный ток течет и по оболочке, и по жиле в одну сторону, так что в последнем варианте в цепь наведенного тока оказывается включенным большое индуктивное сопротивление трансформатора. Можно пояснить этот эффект и по-другому: при протекании по верхней обмотке трансформатора наведенного тока заземленной оболочки в нижней обмотке возникает напряжение, противофазное наведенному напряжению контура жила - земля. Формула (18) позволяет оценить и вклад дополнительной индуктивности в экранирование:

$$\varepsilon_{об} = \frac{R_{o-об}}{R_{o-об} + j\omega L_{o-об} + j\omega L_{от}}$$

Установка редуцированных трансформаторов через 5-10 км снижает коэффициент экранирования примерно в десять раз.

15.6. Применение разделительных трансформаторов

Разбиение двухпроводной линии связи на несколько гальванически не связанных участков с помощью трансформаторов позволяет снизить как опасные, так и мешающие влияния на линию связи. Схема реализации метода показана на рис. 46, на котором показан участок линии связи, разделенный n трансформаторами. Очевидно, что опасные магнитные влияния тяговой сети снижаются в n раз в соответствии с уменьшением длины отдельных участков. Поскольку разделительные трансформаторы вносят дополнительные фазовые сдвиги в наводимые напряжения, улучшают симметрирование цепи и соответственно снижают коэффициент чувствительности, то снижаются и мешающие влияния. С учетом разбросов фаз напряжения, наводимые на отдельных участках, складываются в квадратурах, то есть результирующее напряжение шума, приведенное к началу изображенного на рис. 46 участка, при пренебрежении затуханием вдоль цепи может быть записано так:

$$U_{ш\text{рез}} = \sqrt{U_{ш1}^2 + U_{ш2}^2 + \dots + U_{шn}^2} \approx U_{ш1} \sqrt{n}$$

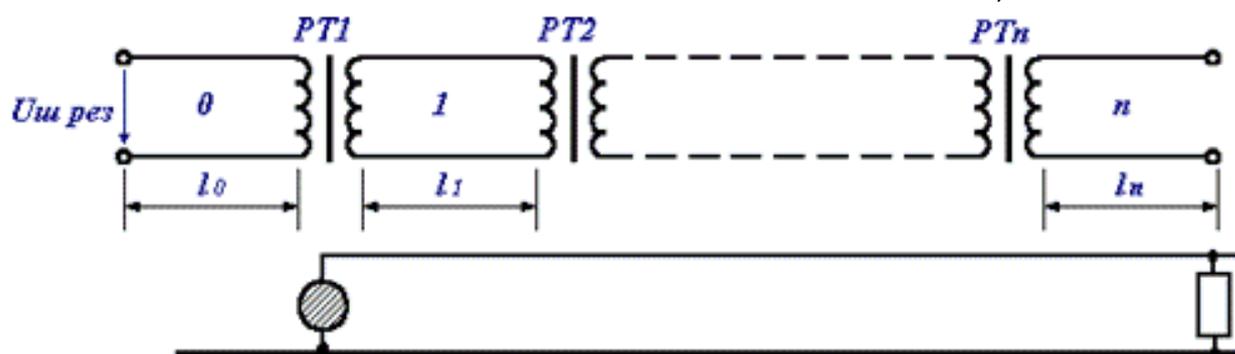


Рис. 46

если наводимые на отдельных участках напряжения близки друг к другу по величине. При отсутствии трансформаторов наводимое напряжение пропорционально общей длине участка, то есть примерно равно $U_{ш1} * n$, так что разделительные трансформаторы снижают напряжение шума примерно в \sqrt{n} раз.

РЕЗЮМЕ

Мероприятия, осуществляемые в смежной линии, защищают только данную линию, и поэтому их относят к пассивным. Такими мероприятиями являются относ смежной линии от железной дороги, каблирование линии связи, скрещивание проводов, установка разрядников в цепях связи, установка разделительных трансформаторов, включение дренажных катушек с заземленной средней точкой и ограничивающих фильтров, использование редуционных трансформаторов.

[Возврат к оглавлению](#)

Заключение

1. Тяговая сеть электрифицированной железной дороги оказывает электрическое, магнитное и гальваническое влияния на смежные линии. Электрическое влияние обусловлено емкостными связями между контактной сетью и смежным проводом, магнитное влияние возникает из-за переменного магнитного поля, создаваемого током контактной сети, а гальваническому влиянию подвержены цепи, имеющие заземления.

2. В простейшем случае для анализа влияний контактной сети на смежную линию можно воспользоваться П-образной схемой замещения смежного провода с LC-элементами, составленной из двух ячеек. Электрическое влияние контактной сети отображается емкостными элементами, включенными между контактной сетью и смежным проводом, а магнитное - источниками ЭДС. Величины ЭДС источников определяются взаимной индуктивностью между контактной сетью и смежным проводом и током контактной сети.

3. Электрическое влияние контактной сети переменного тока на смежный провод наибольшее при изолированном от земли смежном проводе. Величина напряжения электрического влияния определяется при этом емкостным делителем контактная сеть - смежный провод и смежный провод - земля.

На отключенную незаземленную секцию контактной сети двухпутного участка, электрифицированного по системе 1х25 кВ, наводится примерно 8 кВ со стороны контактной подвески, оставшейся под напряжением. При заземлении отключенной секции с нее будет стекать емкостный ток, составляющий величину около 40 мА с каждого километра отключенной секции.

4. Протекание тока в контактной сети вызывает появление на смежном проводе напряжения магнитного влияния, которое максимально на одном из концов провода при заземлении на другом конце. Рельсы, оболочки кабелей и другие проводящие заземленные объекты снижают напряжение магнитного влияния. Учет экранирующего действия подобных объектов производится введением коэффициента экранирования, показывающего остающуюся долю наводимого напряжения из-за экранирования.

5. Гальванические влияния возникают при контакте протяженных объектов с землей или при наличии металлической связи сосредоточенного объекта с рельсами. Наибольшие неприятности доставляет гальваническое влияние тяговой сети постоянного тока из-за электрокоррозии. Подверженные коррозии анодные зоны подземных сооружений располагаются обычно вблизи тяговых подстанций. Электрокоррозионная опасность существует и для опор контактной сети постоянного тока из-за заземления на рельсы металлических поддерживающих конструкций опоры.

6. Опасные напряжения магнитного влияния на смежных линиях создаются при двух режимах тяговой сети переменного тока: при коротком замыкании и при вынужденном режиме при одностороннем питании межподстанционной зоны. Расчетный ток короткого замыкания определяется как ток двухфазного короткого замыкания и исходя из возможности наибольшего магнитного влияния. Расчетный ток вынужденного режима определяется по максимально допустимой потере напряжения в тяговой сети при заданном числе поездов в зоне. Для упрощения расчетов ступенчатый ток контактной сети заменяется одинаковым по всей длине сближения эквивалентным током.

7. Тяговая сеть 2x25 кВ характеризуется существенно меньшим уровнем наводимых на смежных линиях напряжений по сравнению с тяговой сетью 1x25 кВ. Основная причина этого эффекта - существование в системе проводов тяговой сети 2x25 кВ противофазных токов и напряжений.

8. В системе ДПР-ПР-контактная сеть происходит циркуляция электрической энергии из-за взаимного электрического влияния проводов. Магнитное влияние на линии ПР-ДПР при консольном питании тяги способно сильно изменять напряжения линий ПР-ДПР на удаленном конце.

9. Нормы допустимых опасных влияний определяются в основном степенью опасности наведенного напряжения для человека, а также уровнем изоляции линии и рабочим напряжением линии. Нормы допустимых мешающих влияний определяются допустимым соотношением между напряжением шума и напряжением полезного сигнала в линии связи.

10. При расчете напряжения мешающего влияния на линии связи приходится учитывать большую электрическую длину линии и несинусоидальность влияющего тока, что приводит к необходимости суммирования напряжений влияния на разных участках и к расчету на гармониках. Учитывается обычно только магнитное влияние, а суммирование производится в квадратурах. Возможность расчета на гармониках определяется теоремой Фурье и линейностью цепи, подверженной влиянию. Величины гармоник влияющего тока при расчетах мешающих влияний определяются таблицами и формулами нормативных документов. Для некоторых отдельных случаев расчет гармоник влияющего тока может быть проведен по упрощенным формулам.

11. Мероприятия по защите от влияний разделяются на две группы: пассивные и активные. Активные мероприятия действуют на все смежные линии. К ним относятся применение отсасывающих трансформаторов на дорогах переменного тока и фильтр-устройств на тяговых подстанциях постоянного тока для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Мероприятия, осуществляемые в смежной линии, защищают только данную линию, и поэтому их относят к пассивным. Такими мероприятиями являются относ смежной

линии от железной дороги, каблирование линии связи, скрещивание проводов, установка разрядников в цепях связи, установка разделительных трансформаторов, включение дренажных катушек с заземленной средней точкой и ограничивающих фильтров, использование редуционных трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. – М.:УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. - М.: Транспорт, 1989. - 134 с.
3. Правила защиты устройств проводной связи от влияния тяговой сети электрических железных дорог постоянного тока. - М.: Транспорт, 1977. - 44 с.
4. ЦЭ-518. Инструкция по защите железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами. - М.: Трансиздат, 1999. - 128 с.
5. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. - М.: Транспорт, 1965. - 464 с.
6. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1982. - 7. Шаров В.И. Влияние электрических железных дорог на смежные линии связи: Методические указания для студентов V-VI курсов и дипломников. - М.: ВЗИИТ, 1986. - Ч.2. - 35 с.
7. Бабаева В.М., Минин Г.А., Семенчук В.П. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине "Влияние электрических железных дорог на смежные устройства". - М.: МИИТ, 1987. - 46 с.
8. Виноградов В.В., Кузьмин В.И., Гончаров А.Я. Линии автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. - М.: Транспорт, 1990. - 231 с.
9. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. В 2 т. - М.: Высшая школа, 1981. - 408 с.
10. Ратнер М.П., Могилевский Е.Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. - М.: Транспорт, 1985. - 295 с.
11. К-146-96. Указания по техническому обслуживанию и ремонту железобетонных опорных конструкций контактной сети. МПС РФ. - М.: Трансиздат. - 120 с.