

НАПРЯЖЕНИЕ, НАВОДИМОЕ НА ЛИНИИ СВЯЗИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Дегтярев Н.М.¹, Цым А.Ю.²

¹ ЦНПО «КАСКАД», Москва, РФ

² ФГУП ЦНИИС, Москва, РФ

E-mail: bkt2010@yandex.ru, 4639528@mail.ru

Кабельные линии связи и воздушные линии электропередачи часто располагаются рядом друг с другом на значительной длине. Это обстоятельство определяет актуальность проблемы их электромагнитной совместимости. Опасное влияние воздушных линий электропередачи на линии связи возникает в режиме короткого замыкания воздушных линий электропередачи. В статье впервые рассмотрено влияние воздушных линий электропередачи на линии связи с учетом вероятности короткого замыкания. Показано, что в типичном случае на длине параллельного пробега 20 км вероятность короткого замыкания не более 0,012, или в среднем не более одного повреждения за 83 года эксплуатации линий связи. Отмечено, что при магнитном влиянии воздушных линий электропередачи на линии связи в качестве основного нормируемого параметра принимается расчетное значение энергии индуцированного импульса на единичном сопротивлении $W_{sp(max)}$ [$A^2 \cdot s$], а в качестве дополнительного – значение напряжения, наведенного на цепь, подверженную влиянию.

Ключевые слова: кабельная линия связи, воздушная линия электропередачи, магнитное поле, режим короткого замыкания

Введение

Выбор темы исследования обусловлен пониманием актуальности задачи – обеспечение опережающего развития инфраструктурных отраслей экономики: электросвязи и электроэнергетики. Такой подход соответствует духу Федерального закона от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации», подписанного президентом В.В. Путиным. В этом законе подчеркивается, что в ближайшие 10–15 лет приоритетами научно-технологического развития РФ следует считать те направления, которые позволят получить научные результаты и создать технологии, являющиеся основой инновационного развития России, и гарантируют, в том числе:

- переход к передовым цифровым технологиям, создание систем обработки больших объемов данных и искусственного интеллекта;
- связанность территории РФ за счет создания совершенных транспортных, энергетических и телекоммуникационных систем.

Необходимость развития инфраструктурных отраслей во всех странах иллюстрируется данными Организации экономического сотрудничества и развития (OCDE), приведенными в таблице 1.

Развитие информационной инфраструктуры страны в соответствии с Федеральной целевой программой «Цифровая экономика Российской Федерации» предполагает дальнейшее построение фиксированных сетей широкополосного доступа, создание сетей 5G/IMT-2020, Глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы (ГМИСС), узкополосных беспроводных сетей связи для некоторых прикладных решений.

Вопросы развития магистральных линий связи являются крайне актуальными, поскольку ожидается появление в ближайшей перспективе большого числа решений Интернета вещей с удаленным управлением на базе цифровых платформ, массовое применение приложений искусственного интеллекта, требующих высокотехнологичных решений.

Таблица 1. Инвестиции в развитие инфраструктуры

Тип инфраструктуры	Инвестиции в развитие инфраструктуры по годам					
	2001–2010		2011–2020		2021–2030	
	млрд. \$ США	% ВВП	млрд. \$ США	% ВВП	млрд. \$ США	% ВВП
Автодороги	220	0,38	245	0,32	292	0,29
Железные дороги	49	0,09	54	0,07	58	0,06
Телекоммуникации	654	1,14	646	0,85	171	0,17
Электроэнергетика	127	0,22	180	0,24	241	0,24
Инфраструктурные горизонты 2030 г. Телекоммуникации, транспорт, водные ресурсы и электроэнергетика/OCDE-2016						

скоростной и надежной передачи данных для получения оптимальных решений.

Сегодня основной средой передачи информации являются оптические кабели, отличающиеся широкополосностью, низкими потерями и высокой защищенностью от внешних электромагнитных влияний. Вместе с тем на единой сети электросвязи страны эксплуатируются сотни тысяч километров металлических симметричных кабелей связи, включая низкочастотные конструкции на сетях связи специального назначения.

Параллельно с развитием информационной инфраструктуры страны развивается инфраструктура электроэнергетики. Общая протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи магистрального электросетевого комплекса (ОАО «ФСК ЕЭС») напряжением до 1150 кВ (включая арендуемые) в 2013 г. составляла 131583,2 км, в том числе линий напряжением 1150 кВ – 948,8 км; 750 кВ – 3708,5 км (в том числе воздушных линий ВЛ-800 кВ); 500 кВ – 36722,4 км (в том числе ВЛ-400 кВ); 330 кВ – 10984,7 км; 220 кВ – 77541,0 км; 110 кВ – 1206,8 км; 0,4–35 кВ – 471,0 км.

В распределительных электрических сетях, находящихся на балансе операционных компаний, используются сети напряжением 0,4...220 кВ. Общая протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением 0,4...220 кВ составляет более 2 млн км.

Важно подчеркнуть, что, подчиняясь логике своего назначения, линии электросвязи и линии электроэнергетики очень часто располагаются на значительном расстоянии параллельно друг другу в относительно узком коридоре. Это обстоятельство определяет непреходящую актуальность вопросов их электромагнитной совместимости (ЭМС). Изучению вопросов ЭМС в данной области уделяли значительное внимание зарубежные и отечественные ученые E. Sunde, J. Garson, N. Kaden, И.И. Гроднев, В.М. Костенко, М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов, В.А. Андреев, В.А. Бурдин, И.Д. Деарт, Э.Л. Портнов, А.Ю. Цым.

Современный уровень знаний в области влияния линий электропередачи на линии связи наиболее полно отражен в Справочнике МСЭ-Т «Директивы по защите телекоммуникационных линий от вредного воздействия линий электропередачи и контактной сети электрифицированных железных дорог» и соответствующих рекомендациях 5-й Исследовательской комиссии МСЭ-Т. Директивы описывают опасные влияния для обслуживающего персонала и пользователей, а также для телекоммуникационного оборудования,

и мешающие влияния, создающие помехи для передачи информации. Эти явления возникают в результате близости линий связи к линиям электропередачи и к контактной сети электрифицированных железных дорог.

Директивы выявляют условия, которые могут привести к опасности для персонала электросвязи и пользователей, к повреждению оборудования или к помехам. Показано, что вероятность ухудшения передачи значительно возрастает за счет таких факторов, как длина параллельного пробега, коэффициент экранирования кабеля и затухание асимметрии цепи, подверженной влиянию. В Томе I приведены основные характеристики телекоммуникаций, линий электропередачи, контактной сети железных дорог и эффекты их взаимной связи; в Томах II и III (1998) представлены методы оценки напряжений и токов, возникающих в результате емкостной, индуктивной и гальванической связи в различных часто встречающихся ситуациях; в Томах IV и V (2008) – физическая и математическая модели и методы расчета влияния на линии связи сбалансированных и несбалансированных (по фазам) линий электропередачи в нормальном режиме работы и в условиях аварии; в Томе VI (2008) – рекомендуемые допустимые значения индуцированных напряжений и токов, заданные с учетом опасности для персонала и пользователей, повреждений средств связи и уровней помехи в телекоммуникационных каналах; в Томах VII и VIII – меры и устройства защиты, в Томе IX – методы и методики испытаний и измерений ЭМС.

В рекомендациях ITU-T K.9, K.10, K.11, K.20, K.26, K.34, K.37, K.44, K.46, K.81 [1–10] рассмотрены конкретные вопросы ЭМС: приведены указания по защите оборудования электросвязи, установок и кабелей, которые подвергаются перегрузкам по напряжению и току из-за ударов молнии или влияниям линий электропередачи и электрифицированных железных дорог; указаны методы, которые могут использовать телекоммуникационные операторы для предотвращения помех и повреждений, вызванных внешними электромагнитными полями; определены методы проведения испытаний и критерии стойкости оборудования электросвязи к действию перенапряжений и сверхтоков, возникающих вследствие разрядов молнии непосредственно в линейных сооружениях или вблизи них, краткосрочных наводок от расположенных рядом силовых линий переменного тока или электрифицированных железных дорог, повышения энергопотенциала относительно земли вследствие сбоя в системе

энергопитания, замыкания между линиями электросвязи и силовыми линиями.

Установлен порядок действий по защите линий связи с симметричными кабелями от перенапряжений и сверхтоков, наведенных в линиях при близких разрядах молний, а также по защите линий связи от скачков напряжения, индуцированных магнитным полем непрямых ударов молнии. Электромагнитные помехи, создаваемые в результате электромагнитной атаки высокой мощности (НРЕМ), и возможность перехвата информации вследствие непреднамеренных электромагнитных излучений оборудования достаточно эффективно подавляются при помощи мер, рекомендуемых К.81 [10].

Вместе с тем один из самых сложных вопросов ЭМС – анализ влияния магнитного поля воздушной линии электропередачи (ВЛ) в режиме короткого замыкания (КЗ) на параллельные линии связи (ЛС) рассматривался без учета случайного распределения места обрыва фазового провода.

Расчетные соотношения

При однофазном коротком замыкании ВЛ за влияющий ток ВЛ принимают 70 % от действующего значения переменной составляющей тока короткого замыкания (I_{KZ}), протекающего в земле на участке сближения в начальный момент; при нормальной работе несимметричных ВЛ – ток промышленной частоты, протекающий в земле на участке сближения (I_p).

Опасные напряжения в несимметричных цепях ЛС при аварийном режиме ВЛ подсчитывают на длине сближения с ВЛ для нескольких случаев расположения точки короткого замыкания с интервалами, соответствующими элементарным участкам сближения.

Обозначения, принятые в расчетных формулах: E – продольная ЭДС, возникающая в несимметричных цепях ЛС, при влиянии тока однофазного короткого замыкания ВЛ, В; I_{KZ}, I_p – влияющий ток ВЛ, А; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота промышленного тока, рад/с; $M_{(1-A)k}$ – модуль коэффициента взаимоиндукции между однопроводными цепями ВЛ и ЛС при частоте промышленного тока $f = 50$ Гц на километр участка сближения, Гн/км; $Z_{(1-A)k} = \omega M_{(1-A)k}$ – модуль взаимного сопротивления между однопроводными цепями ВЛ и ЛС при частоте $f = 50$ Гц на k -м участке сближения, Ом/км; $S_{\text{общ}, k}$ – общий коэффициент экранирования заземленных проводов (тросов, рельсов, оболочек кабелей и других протяженных металлических сооружений) при влия-

нии тока однофазного короткого замыкания ВЛ на частоте $f = 50$ Гц на k -м участке сближения; $l_{\text{об}}$ – общая длина сближения ЛС и ВЛ, км; n – число участков сближения ВЛ и ЛС в пределах подверженной влиянию гальванически неразделенной несимметричной цепи ЛС; $l_{\text{эк}}$ – расчетная длина k -го эквивалентного участка сближения ВЛ и ЛС, км.

Значение ЭДС, индуцированной в несимметричных цепях кабельных ЛС при коротком замыкании фазы ВЛ с заземленной нейтралью, вычисляют по формуле

$$E = \omega I_{\text{KZ}} \sum_{k=1}^n M_{(1-A)k} S_{\text{общ}, k} l_{\text{эк}} \quad (1)$$

Величины и коэффициенты, входящие в (1), определяются следующим образом:

а) величина влияющего тока I_{KZ} определяется с учетом перспективной нагрузки ВЛ и представляются владельцем ВЛ в виде графика зависимости $I = \phi(l)$;

б) величину модуля взаимного сопротивления $|Z_{(1-A)k}|$ или коэффициента взаимоиндукции $M_{(1-A)k}$ при $f = 50$ Гц определяют по номограмме $M = \phi(\sigma_3, \alpha)$ или по формуле, приведенной в [11]. Значение удельного сопротивления ρ_3 (удельной проводимости $\sigma_3 = 1/\rho_3$) земли определяют измерением при изысканиях трассы методом четырех электродов;

в) при расчетах влияния ВЛ на ЛС значение коэффициента экранирующего действия рельсов железных дорог (S_p) в районах с удельным сопротивлением грунта $\rho_3 = 10 \div 100$ Ом·м рекомендуется принимать равным величинам, указанным в таблице 2;

г) значения коэффициентов экранирования тросов S_t , подвешиваемых на линиях электропередачи, определяют расчетом. Ориентировочно для некоторых типов тросов коэффициенты экранирующего действия можно принимать равными величинам, указанным в таблице 3;

д) величины коэффициентов экранирующего действия металлических защитных покровов (оболочка, броня, металлические экраны) кабелей, проложенных в земле, определяют по формуле:

$$S_k = K_{\text{из}} S_u, \quad (2)$$

где S_k – реальный коэффициент экранирующего действия; S_u – идеальный коэффициент экранирующего действия металлического защитного покрова, зависящий от его электрических параметров и определяемый по известным формулам или путем непосредственного измерения (на

Таблица 2. Расчетные значения коэффициентов экранирующего действия рельсов

Тип железнодорожного пути	Расстояние от рельса до ВЛ или ЛС, м	
	до 50	50...100
Неэлектрифицированная железная дорога:		
– однопутная,	0,9	1
– двухпутная	0,8	0,9
Электрифицированная железная дорога:		
– однопутная,	0,56	0,8
– двухпутная	0,46	0,7

Таблица 3. Значения коэффициентов экранирующего действия

ρ_3 , Ом · м	Величина S_T для троса сечением, мм ²								
	50		57,5	120		147	150		147
	Cu	Al	Fe/Al	Cu	Al	Fe/Al	Cu	Al	Fe
5÷100	0,65	0,7	0,69	0,58	0,6	0,59	0,57	0,59	0,9
101÷500	0,58	0,63	0,62	0,52	0,53	0,52	0,5	0,351	0,83

рисунках 1–3 приведены графики идеального коэффициента защитного действия для кабелей со свинцовой и с алюминиевой оболочкой); $K_{из}$ – числовой коэффициент, учитывающий состояние изоляции оболочки и брони по отношению к земле и условия прокладки. Оболочка и броня кабелей с джутовым покрытием через незначительный срок эксплуатации оказываются хорошо заземленными по всей длине. Коэффициент $K_{из}$ принимается равным единице, если оболочка и броня кабеля по концам усилительного участка, подверженного влиянию, будут подключены к заземлениям с сопротивлением не более 2 Ом. Для кабелей со специальным изолирующим шлангом поверх брони (из хлорвинала или полиэтилена) коэффициент $K_{из}$ принимается равным 1,2, если оболочка и броня кабеля по концам усилительного участка будут подключены к заземлениям с сопротивлением не более 2 Ом, а в промежуточных точках через каждые 3 км – к заземлениям с сопротивлением не более 5 Ом;

е) значения коэффициентов экранирования оболочек кабелей и тросов для случаев, не указанных в пунктах г) и д), должны быть определены непосредственно измерением или расчетом;

ж) коэффициент экранирования нескольких кабелей с металлическими оболочками, расположенных рядом в одной траншее, определяется выражением:

$$S'_{общ} = S_1 \frac{R_2 + i\omega(L_2 - M_{1-2})}{z_2} \times \frac{R_3 + i\omega(L_3 - M_{1-3})}{z_3} \frac{R_k + i\omega(L_k - M_{1-k})}{z_k}, \quad (3)$$

где S_1 – коэффициент экранирующего действия первого кабеля; R_k – активное сопротивление металлических покровов k -го кабеля, Ом/км; L_k – самоиндукция металлических покровов k -го кабеля, Гн/км; M_{1-k} – коэффициент взаимоиндук-

ции между первым и k -м кабелем, Гн/км; z_k – полное сопротивление металлических покровов k -го кабеля, Ом/км.

Общий коэффициент экранирующего действия равен произведению коэффициентов экранирующего действия всех этих проводников

$$S_{общ} = S_p S_T S_K, \quad (4)$$

где S_p – коэффициент экранирующего действия рельсов; S_T – коэффициент экранирующего действия троса; S_K – коэффициент экранирующего действия оболочек кабеля, определяемый для продольных ЭДС, уменьшенных другими экранирующими проводниками.

В случае сложной трассы сближения при наличии нескольких участков косого сближения ЭДС в кабельной цепи подсчитывают по формуле

$$E = I \sum_{k=1}^n z_{(1-A)_k} l_{ек}, \quad (5)$$

где $Z_{(1-A)_k}$ – модуль взаимного сопротивления между ВЛ и ЛС, определяемый для эквивалентной ширины сближения на k -м участке; $l_{ек}$ – длина k -го эквивалентного участка сближения ВЛ и ЛС, км.

Вводя коэффициенты экранирования соответствующих заземленных проводов, получают расчетную формулу для продольной ЭДС

$$E = I \sum_{k=1}^n z_{(1-A)_k} l_{ек} S_{общ,k}, \quad (6)$$

При расчете влияния магнитного поля коэффициент взаимоиндукции и модуль взаимного сопротивления определяется на частоте 50 Гц по формулам:

$$M_{1-A} = 2 \left[\ln \frac{65,5\sqrt{\rho}}{a_3} - i \frac{\pi}{4} \right] 10^{-4}, \text{ Гн/км}, \quad (7)$$

$$z_{1-A} = \frac{1}{14} \ln \left[1 + \frac{\rho}{78a_3} \right], \text{ Ом/км}. \quad (8)$$

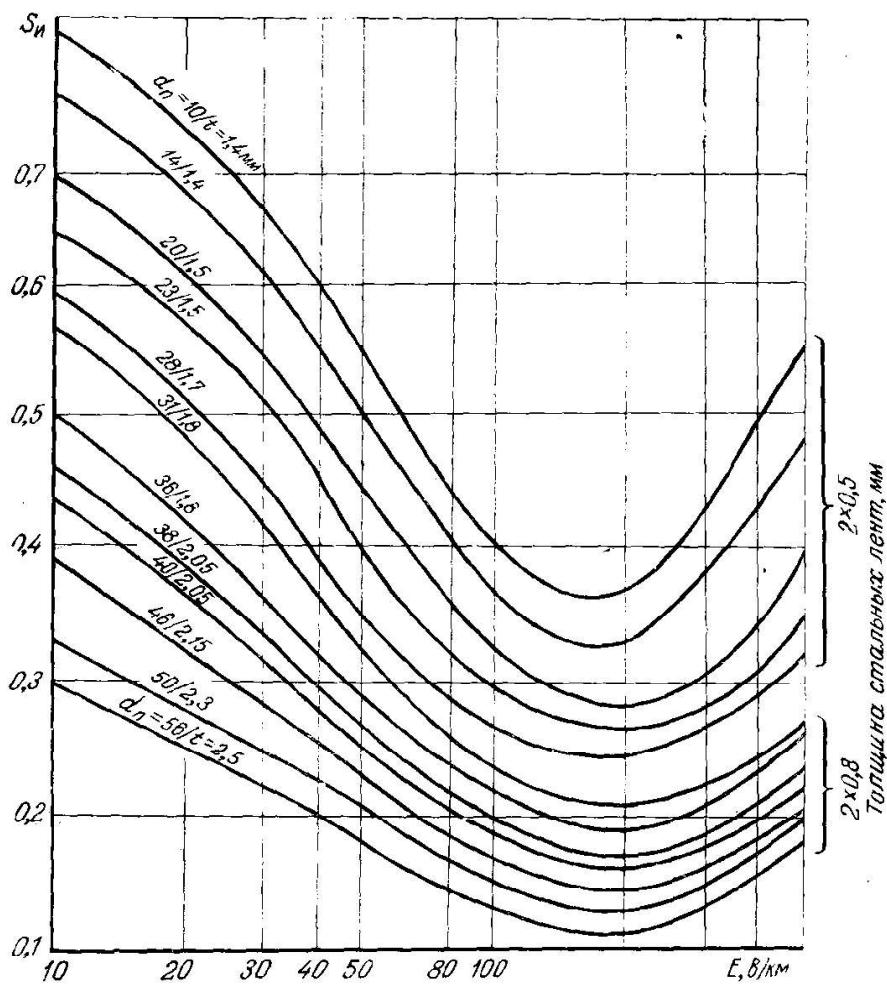


Рисунок 1. График зависимости идеального коэффициента экранирующего действия S_u бронированного кабеля со свинцовой оболочкой от ее толщины t , диаметра кабеля под свинцовой оболочкой d_0 и напряженности электрического поля E [11]

В приведенных формулах a_3 – эквивалентная ширина сближения, м, определяемая из выражения

$$a_3 = \sqrt{a_{\min} a_{\max}} \text{ при } \frac{a_{\max}}{a_{\min}} \leq 3,$$

$$a_3 = \frac{a_{\max} + 2a_{\min}}{3} \text{ при } \frac{a_{\max}}{a_{\min}} \leq 5;$$

ρ – удельное сопротивление земли, определяемое по карте проводимости земли, Ом · м.

Коэффициенты экранирования металлических оболочек кабеля

Коэффициентом экранирования металлических оболочек кабеля называют отношение результирующей ЭДС E_p , наведенной в жиле кабеля при наличии индуцированного тока в оболочке, к ЭДС E при отсутствии этого тока

$$S = \frac{E_p}{E}. \quad (9)$$

Данная величина может быть определена по формуле

$$S = S_u + (1 - S_u) \frac{1 - e^{-\gamma_0 l_A}}{\gamma_0 l_A} = K_{u3} S_u, \quad (10)$$

где S – реальный коэффициент защитного действия оболочки и брони кабеля; S_u – идеальный коэффициент экранирования оболочки и брони кабеля, зависящий только от первичных параметров самой оболочки (R_0 и L_0); γ_0 – коэффициент распространения цепи «оболочка – земля», 1/км; а также

$$K_{u3} = 1 + \frac{(1 - S_u)}{S_u} \frac{(1 - e^{-\gamma_0 l_A})}{\gamma_0 l_A}.$$

В области тональных частот величина S_u определяется по формуле

$$S_u = \left| \frac{R_0}{R_0 + i\omega(L_{\text{внут}} + L_{\text{внеш}})} \right|, \quad (11)$$

где R_0 – сопротивление оболочки и брони кабеля постоянному току, Ом/км; $L_{\text{внеш}}$ – внешняя индуктивность оболочки и брони кабеля в цепи «обо-

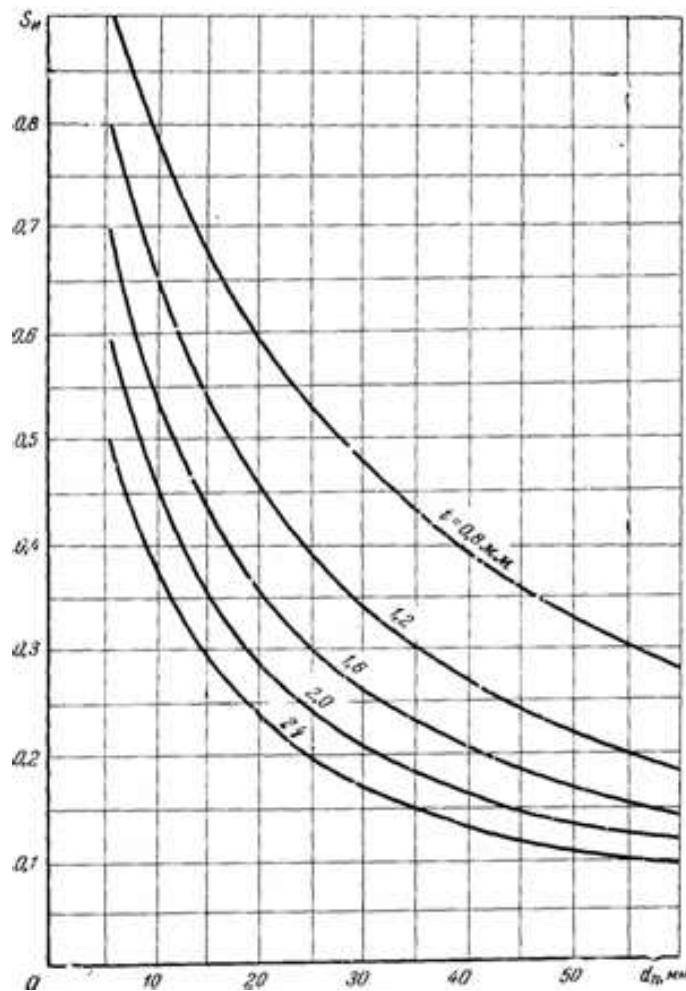


Рисунок 2. График зависимости идеального коэффициента экранирующего действия S_i кабеля с алюминиевой оболочкой от ее толщины t [11]

лочка – земля», Гн/км; $L_{\text{внут}}$ – внутренняя индуктивность оболочки и брони кабеля, Гн/км.

Величина $L_{\text{внеш}}$ для низких частот почти не зависит от тока, индуцированного в оболочке, а величина $L_{\text{внут}}$ зависит от поперечных размеров кабеля (диаметра, толщины оболочки и брони), а также от тока, проходящего по оболочке и броне. Величину S_i лучше всего определять экспериментальным путем при помощи специального прибора – измерителя коэффициента защитного действия оболочки кабеля, который дает возможность определить S_i при различных значениях наведенных ЭДС в оболочке и броне кабеля (при различных значениях тока в оболочке).

На рисунке 1 приведены экспериментальные значения S_i в зависимости от E (В/км) для типовых междугородных кабелей со свинцовой оболочкой и ленточной броней, которыми можно пользоваться при расчетах величин реального коэффициента экранирования. Можно подсчитать значения S_i , если заранее будет известна кривая зависимости изменения коэффициента магнитной проницаемости брони кабеля от тока через

оболочку и броню. Магнитная проницаемость μ стальной брони, как известно, зависит от величины индуцированного тока, проходящего по оболочке. Для существующих конструкций защитного покрова эта величина может быть определена путем непосредственных измерений $\mu = \varphi(I)$. Кривую $\mu = \varphi(I)$ получают при изменениях тока в пределах от 0 до 30...40 А.

На основании $\mu = \varphi(I)$ расчет производят в следующем порядке.

1. Значения $L_{\text{внут}}$ в зависимости от тока I в оболочке и броне определяют по формуле

$$L_{\text{внут}} = \frac{4\pi n_1 t \Delta \mu}{d_{\text{бр}}} 10^{-4}, \text{ Гн/км}, \quad (12)$$

куда подставляют значения μ из графика зависимости μ от $\varphi(I)$ для различных величин тока.

2. Удельное сопротивление ρ материала оболочки кабеля в расчетах принимают:

– для алюминия $\rho_a = 0,029 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$;

– для свинца $\rho_{\text{св}} = 0,21 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$;

– для стальной брони $\rho_{\text{бр}} = 0,12 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$.

3. Значения $L_{\text{внеш}}$ находят по приближенной формуле

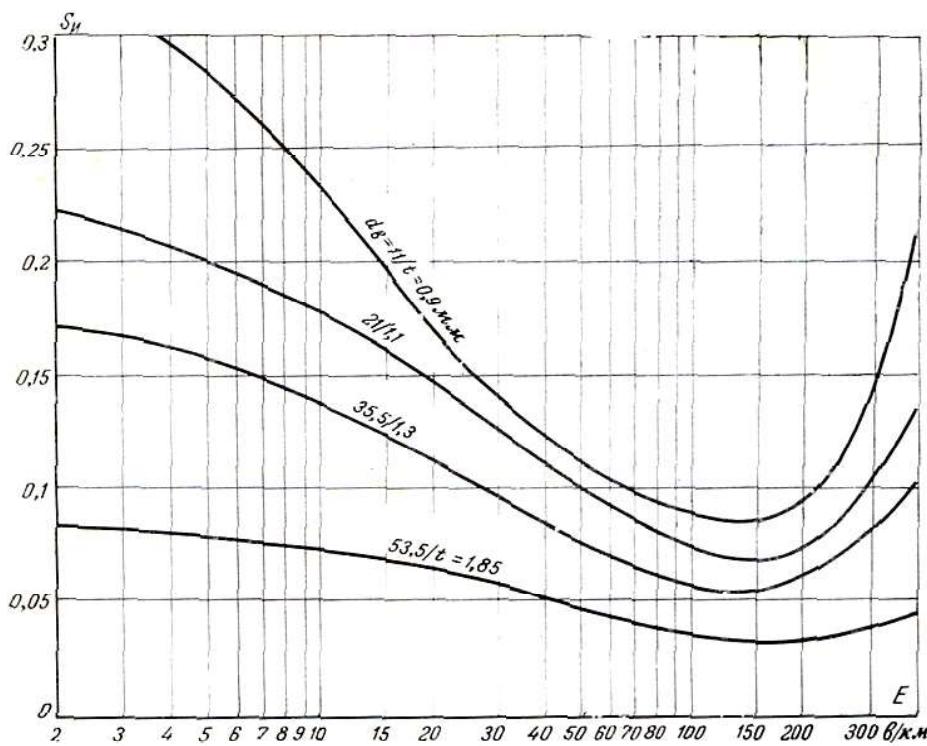


Рисунок 3. График зависимости идеального коэффициента экранирующего действия S_u кабелей с алюминиевой оболочкой и броней из двух лент (сталь низкоуглеродистая, $t = 0,5$ мм) от напряженности поля E при различной толщине оболочки t и $f = 50$ Гц [11]

$$L_{\text{внеш}} = 2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{36\sqrt{10\rho}}{d_{\text{бр}}} \right), \text{ Гн/км.} \quad (13)$$

3. Определяют результирующее сопротивление оболочки и брони R_0 постоянному току:

$$R_0 = \frac{R'_0 R_{\text{бр}}}{R'_0 + R_{\text{бр}}}, \text{ Ом/км,} \quad (14)$$

где R'_0 – сопротивление свинцовой или алюминиевой оболочки постоянному току, равное

$$R'_0 = \frac{4000\rho}{\pi(d_H^2 - d_B^2)}, \text{ Ом/км;} \quad (15)$$

$R_{\text{бр}}$ – сопротивление брони постоянному току:

$$R_{\text{бр}} = \frac{49\pi d_{\text{бр}}}{a^2 t}, \text{ Ом/км.} \quad (16)$$

4. Находят $z_0 = R_0 + i\omega(L_{\text{внут}} + L_{\text{внеш}})$ для различных значений тока в оболочке и броне, то есть $z_0 = \phi(I)$.

5. Подсчитывают величины коэффициентов защитного действия по формуле

$$S_u = \frac{R_0}{R_0 + i\omega(L_{\text{внут}} + L_{\text{внеш}})} = \frac{R_0}{z_0} \quad (17)$$

(для каждого значения тока в оболочке).

6. Определяют значения продольной ЭДС в оболочке и броне кабеля по формуле $E_0 = Iz_0$ для различных значений тока в оболочке и броне.

7. Строят кривую $S = F(E_0)$.

В приведенных формулах d_H и d_B – наружный и внутренний диаметры оболочки кабеля, м; $d_{\text{бр}}$ – средний диаметр брони, м; a – ширина ленты брони, м; t – толщина ленты брони, м; n_1 – число лент брони; Δ – отношение ширины ленты брони к шагу наложения брони. В формулу для реального коэффициента экранирующего действия оболочки, кроме S_u входит дополнительный множитель $1 + (1 - S_u)(1 - e^{-\gamma_0 l_A}) / S_u \gamma_0 l_A$, содержащий результирующий коэффициент распространения оболочки и брони γ_0 :

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{R_0 + i\omega L_0}{R_{\text{пер}}}}, \quad (18)$$

где $R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление между оболочкой и землей.

Значение этого сопротивления для кабелей без изолирующего покрытия поверх брони определяется по формуле

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{из}} + \frac{10^{-3}}{\pi} \rho \ln \frac{1,12}{\gamma_0 10^{-3} \sqrt{d_{\text{бр}} h}}, \quad (19)$$

где $R_{\text{из}}$ – сопротивление изолирующего слоя (джутовой оплетки), Ом/км. Эта величина колеблется от 0,1 до 1 Ом; в среднем для расчетов следует брать 0,3 Ом/км; h – глубина прокладки кабеля, м.

Переходное сопротивление для кабелей с изолирующим покрытием поверх брони (хлорвини-

ловая оболочка) и заземлениями вдоль кабеля через определенные промежутки определяется по формуле

$$R_{\text{неп}} = \frac{R_3 I_{\text{cp}} \sqrt{m_1 R_3}}{\sqrt{m_1 R_3} + 4,5 \sqrt{l_{\text{cp}}}}, \quad (20)$$

где l_{cp} – среднее расстояние между заземлениями оболочки, км; R_3 – сопротивление каждого заземления, Ом; m_1 – число заземлителей на длине усиливательного участка. При выполнении условия $\sqrt{m_1 R_3} \gg 4,5 \sqrt{l_{\text{cp}}}$ можно $R_{\text{неп}}$ определить по приближенной формуле $R_{\text{неп}} \approx R_3 I_{\text{cp}}$.

В реальности обычные бронированные кабели с джутовым покрытием при сопротивлении заземления концов кабеля на усиливательном участке $R_3 = 1\dots 2$ Ом имеют коэффициенты экранирующего действия, близкие к идеальному коэффициенту, и поэтому при подсчетах наведенной ЭДС в жилах таких кабелей нет необходимости вычислять дополнительный множитель

$$1 + (1 - S_u) \frac{1 - e^{-\gamma_0 l_A}}{S_u \gamma_0 l_A} = K_{\text{из}}, \quad (21)$$

поскольку $K_{\text{из}}$ будет близок к единице. В этих случаях значения S берутся из приведенных графиков $S = \varphi(E)$ для соответствующей марки кабеля. Для специальных кабелей с изолирующими покрытиями поверх брони при нахождении реального коэффициента экранирующего действия подсчитывается числовой коэффициент изоляции.

Для ориентировочных подсчетов рекомендуется принимать $K_{\text{из}} = 1,2S = 1,2S_u$, если заземления располагаются через каждые 3 км и если сопротивления по концам сближения не более 2 Ом, а в промежуточных точках – не более 5 Ом.

Коэффициент экранирующего действия рельсов железных дорог

Рельсы железных дорог, проложенные между влияющей линией и линией связи, являются заземленными проводами, в которых возникают индуктированные токи, уменьшающие влияние на линии связи. Коэффициенты экранирующего действия рельсов S_p , по существу, рассчитываются по тем же формулам, что и при определении коэффициента экранирующего действия оболочки и брони кабеля.

Расчеты и опыт показывают, что реальные коэффициенты экранирующего действия рельсов S_p близки к идеальным $S_{p,i}$ и что величина S_p для однопутной железной дороги в среднем может быть принята:

- при электрифицированной железной дороге 0,55;

- при неэлектрифицированной железной дороге 0,85.

Коэффициенты экранирующего действия заземленных тросов

Эти коэффициенты с точки зрения экранирующего действия от магнитного влияния, по существу, ничем не отличаются от коэффициентов экранирующего действия оболочек кабелей, имеющих изолирующие покрытия поверх брони и систематически заземленных через определенные промежутки.

Ввиду того что тросы на каждой опоре ВЛ заземляются, можно с достаточной точностью реальный коэффициент экранирующего действия S_T приравнять к идеальному коэффициенту экранирующего действия $S_{T,i}$. В случае изоляции тросов от опор (для специальных целей) экранирующее действие троса не учитывается.

Важно подчеркнуть, что традиционная официальная методика расчета значения напряжения в цепях линии связи при опасном влиянии ВЛ в режиме КЗ не учитывает вероятность этого события.

Нормирование энергии наведенного импульса и наведенного напряжения при магнитном влиянии воздушной линии электропередачи на линию связи

При магнитном влиянии ВЛ на ЛС в качестве основного нормируемого параметра принимается расчетное значение энергии индуцированного импульса на единичном сопротивлении $W_{\text{sp(max)}}$ ($A^2 \cdot c$), а в качестве дополнительного – значение напряжения, наведенного на цепь, подверженную влиянию.

Нормы энергии наведенного импульса

Нормы энергии индуцированного импульса, заданные в Рекомендациях МСЭ-Т К.20 и К.44 [4; 8], приведены в таблице 4.

В соответствии с данными, приведенными в таблице 4, норма энергии индуцированного импульса (на единичном сопротивлении) составляет 0,2 $A^2 \cdot c$, если жилы кабеля не оборудованы разрядниками, и 1,0 $A^2 \cdot c$, если жилы кабеля оборудованы разрядниками.

Норма напряжения наведенного импульса

При коротких замыканиях фазового провода на землю трехфазных симметричных ВЛ с заземленной нейтралью меры защиты не требуются, если индуцированное напряжение на длине гальванически неразделенного участка ЛС не будет превышать величин, приведенных в таблице 5.

Таблица 4. Допустимые значения энергии индуцированного импульса

№ п.п.	Влияние	Базовая норма	Первичная защита	Критерий	Примечание
1a	Опасное продольное или кондуктивное влияние	$W_{sp(max)} = 0,2 \text{ A}^2\text{s}$; частота 16 2/3, 50 или 60 Гц ; $U_{a.c.(max)} = 600 \text{ В}$; $R = 600 \text{ Ом}$; $t = 0,2 \text{ с}$	Нет	A	Это испытание применяется, когда оборудование не имеет первичной защиты (разрядников)
1b	Опасное поперечное влияние		Нет	A	
1a	Опасное продольное или кондуктивное влияние	$W_{sp(max)} = 1 \text{ A}^2\text{s}$; частота 16 2/3, 50 или 60 Гц; $U_{a.c.(max)} = 600 \text{ В}$; $R = 600 \text{ Ом}$; $t = 1,0 \text{ с}$	Есть (8.4/K.44)	A	Это испытание применяется, когда оборудование имеет первичную защиту (разрядники)
1b	Опасное поперечное влияние			A	

Таблица 5. Допустимые напряжения на цепях ЛС на длине гальванически неразделенного участка сближения, индуцируемые ВЛ с заземленной нейтралью при однополюсном коротком замыкании фазового провода на землю

Наименование цепей связи	Допустимое напряжение, $B_{\text{зфф}}$
Междугородные кабельные ЛС – без дистанционного питания усилителей или с дистанционным питанием их по системе «провод – провод» с незаземленным выходом источника питания; – с дистанционным питанием усилителей по системе «провод – земля» постоянным током – с дистанционным питанием усилителей по системе «провод – провод» переменным током с заземленной средней точкой источника питания в начале или в конце цепи дистанционного питания.	$\leq U_{\text{исп}}$ $\leq U_{\text{исп}} - \frac{U_{\text{д.п.}}}{\sqrt{2}}$ $\leq U_{\text{исп}} - \frac{U_{\text{д.п.}}}{2}$

Примечание. В приведенных формулах $U_{\text{исп}}$ – испытательное напряжение изоляции жил кабеля по отношению к экрану или металлической оболочке кабеля строительной длины, $U_{\text{д.п.}}$ – напряжение дистанционного питания

Заключение

1. Единая энергетическая система РФ обладает протяженной, разветвленной и надежной сетью ВЛ электропередачи. Нормативное среднее время восстановления повреждений на ВЛ напряжением 110 и 220 кВ составляет 12,4 час, а на ВЛ-330 и ВЛ-500 – 6,2 час. При этом плотность обрывов (повреждений) m фазовых проводов составляет 0,17...0,19 для ВЛ 110 кВ; 0,05...0,07 для ВЛ 220 кВ; 0,04...0,06 для ВЛ 330 кВ; 0,03...0,05 для ВЛ 500 кВ. Важно отметить, что если длина параллельного пробега влияющей ВЛ и ЛС, подверженной влиянию, менее 100 км, то вероятность аварии (коэффициент неготовности) несколько меньше. Например, если длина параллельного пробега ВЛ 330 кВ и ЛС, при которой возникают избыточные наведенные напряжения, составляет 20 км (типичный случай), то вероятность КЗ не более 0,012, или в среднем не более одного повреждения за 83 года эксплуатации ЛС.

2. Выполнен детальный анализ традиционной методики расчета напряжения, наводимого на несимметричные цепи линии связи магнитным полем ВЛ в режиме КЗ с учетом перспективной нагрузки ВЛ, коэффициента взаимоиндукции влияющей и подверженной влиянию цепей, удельной проводимости земли, защитного дей-

ствия наружных металлических покровов кабеля, а также экранирующего действия железнодорожных рельсов, специальных тросов, подвешенных на опорах ВЛ и заземленных грозотросов. Подчеркнуто, что традиционная официальная методика расчета значения напряжения в цепях линии связи при опасном влиянии ВЛ в режиме КЗ не учитывает вероятность этого события.

3. При магнитном влиянии ВЛ электропередачи на ЛС в качестве основного нормируемого параметра принимается расчетное значение энергии индуцированного импульса на единичном сопротивлении $W_{sp(max)}$ [$\text{A}^2 \cdot \text{с}$], а в качестве дополнительного – значение напряжения, наведенного на цепь, подверженную влиянию. Приведены нормы энергии индуцированного импульса на единичном сопротивлении и напряжения, наведенного на цепь, подверженную влиянию, заданные официальными нормативными документами.

Литература

- ITU-T Rec. K.9 (11/88) Protection of telecommunication staff and plant against a large earth potential due to a neighbouring electric traction line.
- ITU-T Rec. K.10 (10/96) Low frequency interference due to unbalance about earth of telecommunication equipment.

3. ITU-T Rec. K.11 (01/09) Principles of protection against overvoltage's and overcurrent's.
4. ITU-T Rec. K.20 (01/10) Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunication center to overvoltage's and overcurrent's.
5. ITU-T Rec. K.26 (04/08) Protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines.
6. ITU-T Rec. K.34 (07/03) Classification of electromagnetic environmental conditions for telecommunication equipment – Basic EMC Recommendation.
7. ITU-T Rec. K.37 (02/99) Low and high frequency EMC mitigation techniques for telecommunication installations and systems – Basic EMC Recommendation.
8. ITU-T Rec. K.44 (05/17) Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltage's and overcurrent's – Basic Recommendation.
9. ITU-T Rec. K.46 (05/12) Protection of telecommunication lines using metallic symmetric conductors against lightning-induced surges.
10. ITU-T Rec. K.81 (06/16) High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems.
11. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Часть 1. Общие положения. Опасные влияния. М.; Л.: Энергия, 1966. 43 с.
12. ITU-T Rec. K.20 (01/10) Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunication center to overvoltage's and overcurrent's.
13. ITU-T Rec. K.44 (05/17) Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltage's and overcurrent's. Basic Recommendation.

Получено 02.09.2019

Дегтярев Николай Михайлович, генеральный директор ЦНПО «КАСКАД». 125047, Российская Федерация, г. Москва, ул. 1-я Брестская, 35. Тел. +7 499 251-69-66. E-mail: bkt2010@yandex.ru

Цым Александр Юрьевич, д.т.н., с.н.с., начальник лаборатории ФГУП ЦНИИС. 111141, Российская Федерация, г. Москва, 1-й проезд Перова Поля, 8. Тел. +7 495 368-95-73. E-mail: 4639528@mail.ru

VOLTAGE INDUCED ON COMMUNICATION LINES BY MAGNETIC FIELD OF AN OVERHEAD ELECTRIC LINE IN SHORT-CIRCUIT CONDITIONS

Degtyarev N.M.¹, Tsym A.Yu.²

¹Central Scientific and Production Association «CASCADE», Moscow, Russian Federation

²FSUE ZNIIS, Moscow, Russian Federation

E-mail: bkt2010@yandex.ru, 4639528@mail.ru

Cable lines and overhead electric lines are often located near each other over a significant length. This circumstance determines the relevancy of the problem of their electromagnetic compatibility. A dangerous influence of overhead electric lines over communication lines occurs in short-circuit conditions of overhead electric lines. The influence of overhead electric lines over communication lines with taking the probability of a short circuit into account has been firstly examined in this article. It is shown that in a typical case, on a parallel path length of 20 km, the probability of short circuit is not more than 0.012, or, on average, no more than one damage in 83 years of operation of communication lines. It is noted that under the magnetic influence of overhead electric lines over communication lines, the calculated value of the induced pulse energy at the unit resistance $W_{sp(max)}$ [$A^2 \cdot s$] is taken as the main rate parameter, and as an additional one is taken the value of the voltage induced on the circuit subject to influence.

Keywords: cable communication line, overhead electric line, magnetic field, short-circuit conditions

DOI: 10.18469/ikt.2019.17.4.04

Degtyarev Nicolay Michaylovich, Central Scientific and Production Association «CASCADE», 35, 1-ya Brestskaya Street, Moscow, 125047, Russian Federation; General Manager. Tel. +7 499 251-69-66. E-mail: bkt2010@yandex.ru

Tsym Alexander Yur'evich, FSUE ZNIIS, 8, 1-iy proezd Perova Pole, Moscow, 111141, Russian Federation; Head of Scientific Laboratory, Doctor of Technical Science. Tel. +7 495 368-95-73. E-mail: 4639528@mail.ru

References

1. ITU-T Rec. K.9 (11/88) Protection of telecommunication staff and plant against a large earth potential due to a neighbouring electric traction line.
2. ITU-T Rec. K.10 (10/96) Low frequency interference due to unbalance about earth of telecommunication equipment.
3. ITU-T Rec. K.11 (01/09) Principles of protection against overvoltage's and overcurrent's.
4. ITU-T Rec. K.20 (01/10) Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunication center to overvoltage's and overcurrent's.
5. ITU-T Rec. K.26 (04/08) Protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines.
6. ITU-T Rec. K.34 (07/03) Classification of electromagnetic environmental conditions for telecommunication equipment – Basic EMC Recommendation.
7. ITU-T Rec. K.37 (02/99) Low and high frequency EMC mitigation techniques for telecommunication installations and systems – Basic EMC Recommendation.
8. ITU-T Rec. K.44 (05/17) Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltage's and overcurrent's – Basic Recommendation.
9. ITU-T Rec. K.46 (05/12) Protection of telecommunication lines using metallic symmetric conductors against lightning-induced surges.
10. ITU-T Rec. K.81 (06/16) High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems.
11. *Pravila zashchity ustrojstv provodnoj svyazi, zheleznodorozhnoj signalizacii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya linij elektroperedachi. Chast' 1. Obshchie polozheniya. Opasnye vliyaniya* [Protection Regulation of Communication Lines Equipment, Railway Signaling and Telecontrol from the Hazardous and Interfering Effects of Power Transmission Lines. Part 1. General. Hazardous Effects]. Moscow; Leningrad: Energiya Publ., 1966, 43 p. (In Russian).
12. ITU-T Rec. K.20 (01/10) Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunication center to overvoltage's and overcurrent's.
13. ITU-T Rec. K.44 (05/17) Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltage's and overcurrent's. Basic Recommendation.

Received 02.09.2019