

Методика оценки опасного влияния высоковольтных линий электропередачи переменного тока на подземный трубопровод и технические решения по устранению этого влияния

А.И. Яблучанский, В.М. Лейба (ОАО «Гипроспецгаз»), В.Р. Олексейчук (ООО «Газпром трансгаз С.-Петербург»)

Необходимость разработки методики по оценке влияния высоковольтных линий электропередачи переменного тока (ЛЭП) на подземный трубопровод неоднократно поднималась на совещаниях ОАО «Газпром» [1, 2].

В период 2007-2008 гг. рабочей группой специалистов ОАО «Газпром» и Е.ОН Рургаз были разработаны «Рекомендации по вопросам противокоррозионной защиты газопроводов», в которых устанавливались допустимые напряжения прикосновения и критерии коррозионной опасности на газопроводе, вызванные влиянием ЛЭП.

В 2009 г. была введена в действие «Временная методика оценки опасности влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый трубопровод и технические решения по его защите», основывающаяся на данных изысканий.

В 2009 г. СТО Газпром 9.0-001-2009, СТО Газпром 9.2-003-2009 установлены отраслевые нормы по критериям опасности коррозионного воздействия ЛЭП переменного тока на трубопровод и предельные величины напряжения прикосновения, требующие безусловного исполнения (табл. 1, 2).

Таблица 1

Показатели коррозионной опасности, вызываемой влиянием переменного тока		
Ток утечки j , А/м ²	Опасность коррозии	Примечание
До 30	Отсутствует	Дополнительные меры не требуются
От 30 до 100	Вероятна	Требуется контроль
Более 100	Присутствует	Требуется ограничение воздействия

Таблица 2

Допустимое напряжение прикосновения на трубопроводе, вызванное влиянием ЛЭП	
Напряжение прикосновения U , В	Режим работы ЛЭП
До 60	Длительный режим
До 1000	Короткое замыкание

Здесь следует отметить, что приказом Минэнерго России от 29.12.2001 № 375 принят и введен в действие документ, в котором действие переменным током на стальные трубопроводы (кроме газопроводов с давлением газа более 1,2 МПа и теплопроводов) признается опасным при средней плотности тока утечки более 10 А/м².

В то же время единой методики оценки величины влияния ЛЭП на подземный магистральный газопровод (МГ) при их сближении в отрасли не разработано.

В 2009 г. сотрудниками ОАО «Гипроспецгаз» и ООО «Газпром трансгаз С.-Петербург» проводились работы по изучению влияния высоковольтных ЛЭП переменного тока промышленной частоты на подземный трубопровод с целью:

- разработать и экспериментально обосновать методику расчета влияния ЛЭП на подземный трубопровод для определения уровней безопасности его обслуживания и возможного воздействия на его коррозионное состояние;
- определить и обосновать схемные решения и мероприятия по снижению опасного влияния ЛЭП на трубопровод.

Краткие сведения о влияющих линиях

Влияющие цепи высокого напряжения можно разделить на симметричные и несимметричные.

Симметричные цепи - цепи, у которых токи протекают по проводам и по величине равны между собой. К таким цепям можно отнести, например, трехфазные линии с заземленной (или изолированной) нейтралью при нормальном (рабочем) режиме эксплуатации (рис. 1а). При этом в трехфазных линиях электропередачи напряжения и токи в проводах сдвинуты по фазе на 120°.

Несимметричные цепи частично или полностью используют землю в качестве одного из проводов. К ним можно отнести, например, трехфазную ЛЭП с заземленной нейтралью при коротком замыкании одной фазы на землю (рис. 1б).

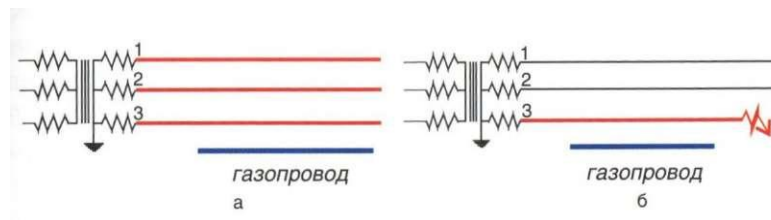


Рис. 1. Схемы влияющих линий: а - симметричная цепь - трехфазная ЛЭП с заземленной нейтралью в рабочем режиме (а); б - несимметричная цепь - трехфазная ЛЭП с заземленной нейтралью в аварийном режиме работы при коротком замыкании фазы на землю (б)

На трехфазных высоковольтных ЛЭП переменного тока можно выделить четыре основных типовых профиля опор (рис. 2).

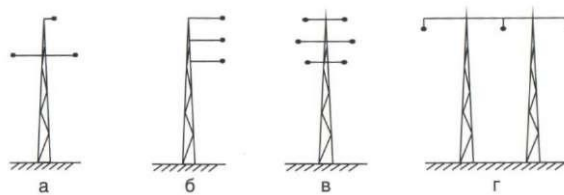


Рис. 2. Типовые профили опор ЛЭП с треугольным (а), вертикальным (б, в) и горизонтальным (г) расположением фазовых проводов

В процессе исследований разрабатывалась методика оценки величины влияния трехфазных ЛЭП переменного тока на подземный трубопровод в двух режимах работы: рабочем (трехпроводная симметричная линия) и аварийном режиме при коротком замыкании фазы на землю (однопроводная линия).

Виды электромагнитного влияния

Если около проводника с переменным напряжением $U = \varphi(x, t)$ и током $I = \varphi(x, t)$ поместить другой проводник, то под влиянием электромагнитной индукции во втором проводнике возникнут индуцированные напряжения $u = \varphi(x, t)$ и токи $I = \varphi(x, t)$. Теоретическое решение задачи взаимного электромагнитного влияния двух линий дано в работах [3-7]. Комплексную величину взаимного влияния ξ между линиями обычно приводят в виде взаимной индуктивности M или взаимного магнитного сопротивления Z (отношение продольной э.д.с. взаимоиндукции E в подверженной влиянию линии к току I во влияющей линии $-Z = E/I$).

Магнитное влияние. С учетом того, что подверженная влиянию линия представляет собой трубопровод в проводящем полупространстве (земля), влиянием электрической индукции (электрическое влияние) можно пренебречь и рассматривать только влияние магнитной индукции (магнитное влияние). Методика определения магнитного влияния на подземный трубопровод сводится к двум этапам:

- количественному определению комплексной величины взаимовлияния ξ между элементарными линиями;
- расчету, по известной величине ξ распределения электромагнитного поля в трубопроводе с конкретными физико-техническими характеристиками.

Гальваническое влияние имеет место в том случае, когда влияющий провод образует ток через землю и в расположенном в земле проводнике, помимо напряжений и токов, вызванных электромагнитной индукцией, возникают токи и напряжения гальванической связи (гальваническое или кондуктивное влияние). Теоретическое решение задачи гальванического влияния дано в работах [5, 6].

Линии электропередачи в момент короткого замыкания фазы на землю до отключения защитных автоматов на подстанции оказывают кратковременное гальваническое влияние на проложенные рядом подземные металлические коммуникации. Методика определения гальванического влияния ЛЭП на проложенные рядом подземные металлические коммуникации также сводится к двум этапам:

- расчету электрического потенциала земли, вызванного точечным источником переменного тока;
- расчету потенциала и продольного тока в любой точке трубопровода, возникающих в нем под воздействием точечного источника переменного тока, размещенного на поверхности проводящего полупространства.

Теоретическая оценка магнитного влияния ЛЭП на элементарную линию

Оценка магнитного влияния линий выполнялась для различных вариантов их пространственного расположения относительно друг друга: параллельного и косого сближения и пересечения под различными углами (рис. 3).

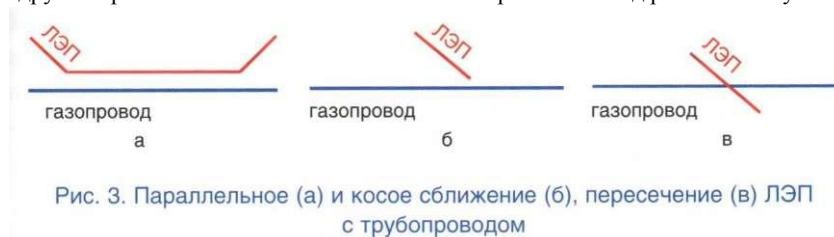


Рис. 3. Параллельное (а) и косое сближение (б), пересечение (в) ЛЭП с трубопроводом

Магнитное влияние ЛЭП на элементарную линию в виде идеально изолированного тонкого проводника, расположенного в проводящем полупространстве, представляется как модуль отношения комплексных величин E/I - э.д.с. взаимной индукции E в подверженной влиянию линии к току I во влияющей линии.

Использовались приближенные формулы [7], позволяющие выполнить расчеты взаимного влияния между одно- и многопроводными линиями при различных вариантах их сближения и пересечения.

Расчетные схемы различных вариантов сближения и пересечения представлены на рис. 4.

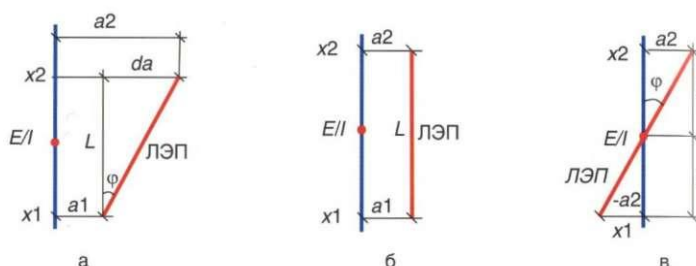


Рис. 4. Схемы участков сближения линии электропередачи и трассы трубопровода на длине L при $\varphi = \text{tg}(da/L)$ и $da = a2 - a1$: а - косое сближение на длине L ($a2 \neq a1$); б - параллельное сближение на длине L ($a2 = a1$); в - косое пересечение на длине $2L$ ($a1 = -a2$)

Были выполнены расчеты значения модуля E/I , В/(кА·км), для различных схем сближения в зависимости от расстояний $a1$ и da в диапазоне $a1 = 0 \div 10000$ м и $da = 0 \div 1000$ м при различных значениях удельного электрического сопротивления земли $\rho = 10 \div 10000$ Ом·м как для однопроводной влияющей линии (аварийный режим работы ЛЭП), так и для трехпроводной симметричной влияющей линии (рабочий режим работы ЛЭП) с различными типовыми профилями опор, показанными на рис. 2.

Расчеты модуля E/I представлялись в виде номограмм, отдельные примеры которых показаны на рис. 5.

При использовании указанных диаграмм должны быть известны: электрическое сопротивление земли, предельный ток нагрузки в ЛЭП при рабочих режимах, ток короткого замыкания фазы на землю, габариты опор ЛЭП - высота опоры, межфазное расстояние, схема расположения фаз (треугольная, в вертикальной или горизонтальной плоскостях) и схема сближения с трубопроводом с размерами $a1$, $a2$, L .

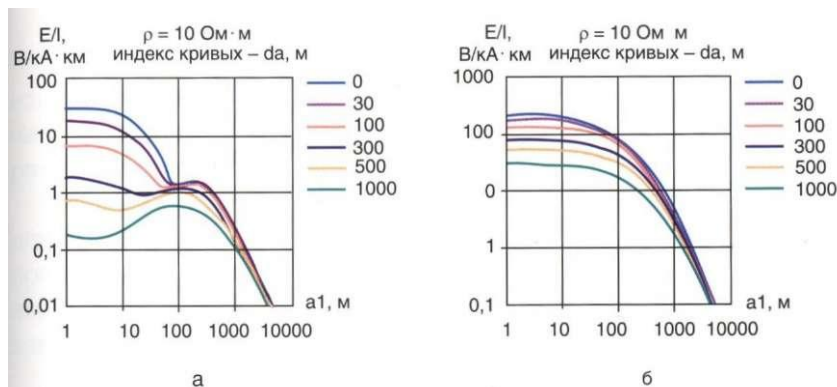


Рис. 5. Модуль E/I , наведенный в элементарной линии на глубине 1 м в земле $\rho = 10$ Ом·м участком трехфазной ЛЭП с вертикальным расположением фазовых проводов при рабочих режимах (а) и коротком замыкании фазы на землю (б) при различных углах сближения

Экспериментальная проверка теоретических расчетов

Измерения напряженности электрического поля E в земле, вызванного влиянием ЛЭП переменного тока, проводились на различных участках в Ленинградской области. Ниже приводятся результаты измерений на одном из них, в Тосненском районе, в коридоре прохождения ЛЭП Л-701 (рис. 6а): трехфазная линия с глухозаземленной нейтралью; расположение фаз горизонтальное; межфазное расстояние - 10 м; средняя высота подвеса проводов - 15 м; средний действующий ток - 0,3 кА.

Измерения напряженности электрического поля в земле выполнялись по профилю, ориентированному к ЛЭП примерно под углом около 45° . Измерялись разности потенциалов dU между заземленными электродами M и N ($MN = 40$ м) аппаратурой ЭРА-МАХ на промышленной частоте 50 Гц. Одновременно выполнялись и замеры удельного электрического сопротивления грунтов с этой же аппаратурой на частоте 4,88 Гц для расчета теоретической кривой E/I .

Графическое сравнение экспериментальных и расчетных величин E/I свидетельствует о достаточной для практического применения

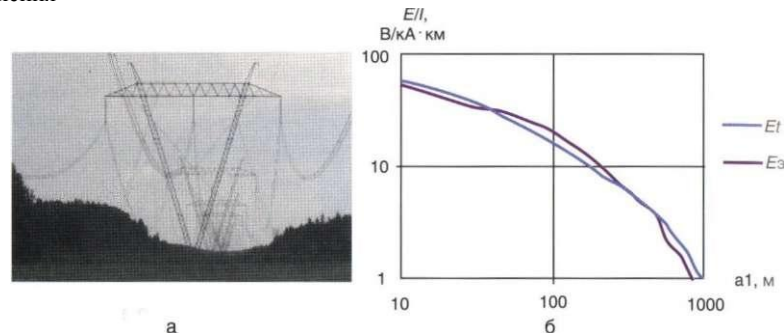


Рис. 6. Общий вид ЛЭП Л-701 (а) и значения напряженности электрического поля E/I , наведенной в земле ЛЭП в рабочем режиме в зависимости от расстояния a_1 : теоретические значения E/I - индекс кривой E_t ; экспериментальные значения E/I - индекс кривой E_z

точности расчетных величин (рис. 6б). Среднее значение погрешностей составляет менее 10 % за исключением отдельных точек с погрешностью 11-12 % с явным трендом к увеличению от точки $a_1 > 500$ м, что, по-видимому, вызвано некоторым увеличением тока нагрузки ЛЭП в этот период измерений.

Магнитное влияние ЛЭП на подземный трубопровод

Напряжение прикосновения. При определении величины магнитного влияния ЛЭП на трубопровод достаточно оценить максимально возможное напряжение прикосновения и при необходимости предусмотреть мероприятия по его снижению.

Для оценки максимально возможного напряжения прикосновения на газопроводе в пределах зоны сближения L используется выражение [2, 8]:

$$U_{\max} = \underline{E} \cdot I \cdot K \text{ [В]}, \quad (1)$$

где $\underline{E} = E/I$, В/(кА·км); I - максимально возможный ток в ЛЭП, кА; K - параметр, зависящий от характеристик трубопровода, длины сближения L и ρ земли, км^{-1} .

Здесь $\underline{E}$ может быть получена как по результатам геофизических изысканий при наличии ЛЭП [1, 2, 8], так и по номограммам $E/I = f(a_1, da, \rho)$ для различных типов ЛЭП и схем сближения, выполненных в рамках рассматриваемой работы.

Зависимость параметра K от длины L сближения ЛЭП и трубопровода рассчитана для стандартных диаметров магистрального трубопровода от 219 до 1420 мм, уложенного в землю с различным электрическим сопротивлением $\rho = 10 \div 1 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при различных значениях сопротивления изоляции в диапазоне $1 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

Для примера на рис. 7 приведены номограммы для трубопровода диаметром 1420 мм при сопротивлении изоляции $1 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ и ρ земли от 10 до $10000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

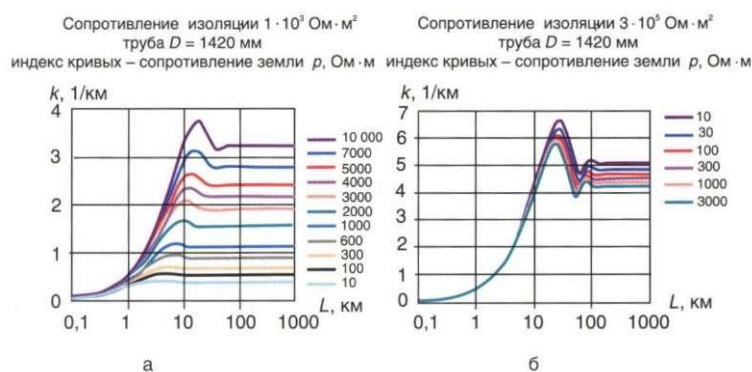


Рис. 7. Зависимости параметра k от длины сближения L ЛЭП и подземного трубопровода с различным сопротивлением изоляции в земле различного сопротивления (индекс кривых)

Плотность тока утечки с дефектов изоляции на трубопроводе описывается выражением

$$j = U_r / (R_d \cdot S_d), [A/m^2],$$

где U_r - наведенный электрический потенциал трубопровода, В; R_d - сопротивление растеканию тока с дефекта, Ом; S_d - площадь дефекта, м².

Учитывая, что $R_d = \rho / (2d)$, $S_d = \pi (d/2)^2$, выражение для j запишем в виде

$$j = 2,55 \cdot U_r / (d \cdot \rho), [A/m^2], \text{ где } \rho - \text{сопротивление земли, Ом} \cdot \text{м; } d - \text{диаметр дефекта, м.}$$

Для стандартного дефекта, принятого в НТД, при площади $S_d = 625 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ $d = 0,0282 \text{ м}$, и выражение для плотности тока утечки на таком дефекте запишется в виде

$$j_c = 90,293 \cdot U_r / \rho, [A/m^2].$$

При известном наведенном на трубопроводе потенциале U_r можно рассчитать плотность тока утечки с дефекта в изоляции в пределах зоны сближения L .

Приняв сопротивление земли ρ на участке сближения L однородным, получим, используя выражение (1), что максимальная плотность тока утечки на стандартном дефекте может быть определена выражением:

$$j_{c, \max} = 90,293 \cdot U_{\max} / \rho = 90,293 \cdot \underline{E} \cdot I \cdot \kappa / \rho, [A/m^2], \text{ где } U_{\max} - \text{максимальное напряжение прикосновения, В; } \underline{E} = E/L, \text{ В/(кА} \cdot \text{км)}; I - \text{рабочий ток в ЛЭП, кА; } \kappa - \text{параметр, км}^{-1}; \rho - \text{сопротивление земли, Ом} \cdot \text{м.}$$

Критерий коррозионной опасности подземного трубопровода по величине напряжения прикосновения при заданной критической плотности тока утечки j_k с дефектов в изоляции трубопровода определится выражением

$$U_k \geq 0,0111 \cdot j_k \cdot \rho.$$

По этому критерию можно выделить участки сближений ЛЭП с трубопроводами, потенциально опасные в коррозионном отношении, как расчетным путем, так и путем электрометрических измерений на контрольно-измерительных пунктах (КИП).

Так, например, приняв $j_k \geq 30 \text{ A/m}^2$, получим, что при сопротивлении земли по трассе газопровода $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ напряжение прикосновения $3,33 \text{ В}$ может вызвать коррозионные процессы на трубопроводе в дефектах изоляционного покрытия при их наличии

(рис. 8).

Критическая плотность тока утечки $j_k, A/m^2$	Критическое напряжение прикосновения U_k, B
От 10 и более	$U_k 0,111$
От 30 и более	$U_k 0,333$
100 и более	$U_k 1,110$

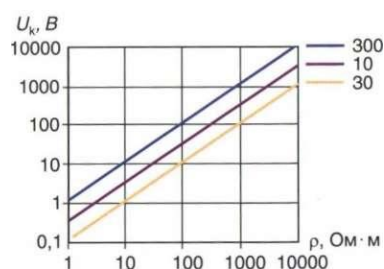


Рис. 8. Зависимость напряжения прикосновения U_k на трубопроводе от удельного электрического сопротивления земли ρ при заданной критически опасной плотности тока утечки $j_k, A/m^2$ (индекс прямых на графике)

Экспериментальная проверка критериев коррозионной опасности трубопровода при электромагнитном влиянии ЛЭП выполнялась на МГ в зоне ответственности ООО «Газпром трансгаз С.-Петербург». Измерения проводились на стандартных КИП на частоте 50 Гц по схемам, представленным на рис. 9.

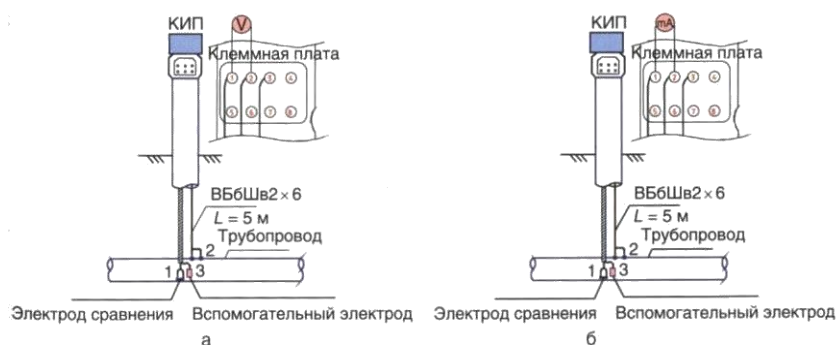


Рис. 9. Схемы измерений влияния ЛЭП на подземный трубопровод: а - измерение напряжения прикосновения с использованием неполяризуемого медно-сульфатного электрода сравнения; б - измерение плотности переменного тока на вспомогательном электроде

Результаты измерения в КИП-23 и -24 на одном из участков МГ в районе сближения с высоковольтными ЛЭП (рис. 10) представлены в табл. 3.



Рис. 10. Участок электрометрических измерений

По результатам ранее проведенных электрометрических обследований удельное электрическое сопротивление грунтов в районе измерений составляет в среднем $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, изменяясь в диапазоне $5 \div 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Электрометрические измерения величины влияния ЛЭП на трубопровод

Таблица 3

Вид измерений	Размерность	КИП-23	КИП-24
Напряжение прикосновения U	В	2,8	3,6
Ток через вспомогательный электрод I	А	0,012	0,041
Сопротивление растеканию ВЭ, $R_o = U/I$	Ом	233,3	87,8
Сопротивление грунтов в точке измерения $\rho = 2d \cdot R_d = 0,0564 \cdot Y_d$	$\text{Ом} \cdot \text{м}$	13,0	4,95
Измеренная плотность тока утечки на ВЭ $j = I/S_o = 1,6 \cdot 10^3 \cdot I$	А/м^2	19,2	65,6
Расчетная плотность тока утечки $j_c = 90,29 \cdot U/\rho$	А/м^2	19,4	65,0

Различия между расчетными значениями плотности тока утечки с дефекта стандартного размера в изоляции трубопровода и измеренными на вспомогательном электроде не превышают 1 %. При наличии дефектов в изоляции трубопровода в районе КИП-24 плотность тока утечки может более чем в 2 раза превысить допустимую $j = 30 \text{ А/м}^2$ при напряжении прикосновения $U = 3,6 \text{ В}$, что свидетельствует о повышенной коррозионной опасности на данном участке газопровода.

Гальваническое влияние ЛЭП на трубопровод

Линии электропередачи оказывают кратковременное гальваническое влияние на проложенные рядом подземные трубопроводы в момент короткого замыкания фазы на землю до отключения защитных автоматов на линии (рис. 11а). Максимально возможное напряжение прикосновения $U_{r, \max}$ на трубопроводе, вызванное гальваническим влиянием, рассчитывается по формуле

$U_{r, \max} = U_{r, \max} \cdot I_{k3} \cdot P \cdot [B]$, где $U_{r, \max}$ - значения из номограммы (рис. 11б), В/(кА·Ом·м); I_{k3} - ток короткого замыкания ЛЭП, кА; P - удельное электрическое сопротивление земли, Ом·м.

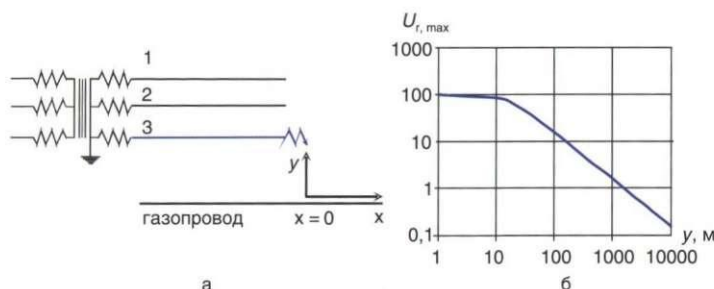


Рис. 11. Схема влияния ЛЭП в аварийном режиме при замыкании одной фазы на землю (а) и номограмма для определения максимального напряжения прикосновения на трубопроводе $U_{r, \max}$ в зависимости от расстояния y (б)

При незначительных расстояниях y от места короткого замыкания фазы ЛЭП на землю до трубопровода напряжение прикосновения определяется, в основном, электрическим потенциалом близлежащей к трубопроводу земли и может достигать значительных величин. Высокие электрические потенциалы земли, возникающие при коротких замыканиях фазы ЛЭП на землю, особенно на пересечении с трубопроводом, делают затруднительным осуществление защиты от кратковременного перенапряжения на трубопроводе применением защитных заземлений, как при исключении магнитного влияния. Соединение заземлений с трубопроводом передаст высокий потенциал земли на трубопровод как напряжение прикосновения, которое распространяется далее вне зоны сближения. Поэтому применение обычных защитных заземлений в местах, где опасные напряжения прикосновения на трубопроводе могут возникать за счет высоких электрических потенциалов земли, необходимо исключить, а работу по обслуживанию трубопровода выполнять персоналу в индивидуальных средствах защиты от поражения переменным током высокого напряжения (изолирующая обувь, резиновые перчатки, использование изолирующих ковриков и др.). В методике разработан и предложен алгоритм расчета длины трубопровода, в пределах которой работа обслуживающего персонала должна выполняться только в индивидуальных средствах

Защитные заземления и устройства, применяемые на трубопроводах для устранения опасного влияния ЛЭП

Снижение напряжения прикосновения на трубопроводе или плотности тока утечки через дефекты в изоляции, вызванные влиянием ЛЭП переменного тока, осуществляется подключением к трубопроводу в области влияния ЛЭП специальных защитных заземлений. В методике разработаны схемы специальных заземляющих устройств, алгоритмы расчета их параметров и различные варианты подключений к трубопроводу для устранения опасного влияния переменного тока.

Тип защитных заземлений и устройств выбирается исходя из характера электромагнитного влияния ЛЭП на трубопровод (магнитное или гальваническое), времени его воздействия (длительное или кратковременное), геоэлектрической обстановки по трассе трубопровода, параметров катодной защиты трубопровода и обосновывается технико-экономическим расчетом.

В настоящее время предприятиями ООО «Технопром» по ТУ 4318-002-87598003-2010 и ООО «Трубопроводные системы и технологии» по ТУ 3435-005-93719333-2010 уже разработан и налажен выпуск специализированных КИП, укомплектованных заземляющим оборудованием и специальными устройствами для устранения опасного влияния ЛЭП на трубопровод.

Краткие сведения о методике оценки опасного влияния ЛЭП на трубопровод

Требуемые исходные данные:

- схема сближения трубопровода и линии электропередачи в коридоре шириной 2000 м (1000 м с каждой стороны от трубопровода);
- удельное электрическое сопротивление земли по линии трубопровода;
- параметры (первичные и вторичные) трубопровода;
- максимальный ток нагрузки ЛЭП в рабочем и аварийном режимах в зоне сближения;
- геометрические параметры опор ЛЭП (профили опор);
- тип ЛЭП (одно- или двухцепная, наличие грозозащитного троса);
- схема питания (односторонняя, двухсторонняя).

Расчет величины влияния ЛЭП на трубопровод с оценкой его опасности для обслуживающего персонала выполняется для двух режимов работы ЛЭП - рабочего и аварийного. В рабочем режиме оценивается влияние, вызванное магнитной индукцией, в аварийном режиме (короткое замыкание фазы ЛЭП на землю) - магнитное и гальваническое.

Расчет величины плотности переменного тока утечки через дефекты в изоляционном покрытии с оценкой коррозионной опасности на трубопровод выполняется только при рабочем режиме работы ЛЭП (режим длительного влияния).

После определения величины влияния ЛЭП на трубопровод предусматриваются мероприятия по снижению этого влияния в случае его опасного воздействия, как на обслуживающий персонал, так и на коррозионное состояние трубопровода.

При сближении ЛЭП с трубопроводом влияние, оказываемое токами короткого замыкания фазы на землю, рекомендовано оценивать на участке шириной 1 км, а влияние, оказываемое рабочими токами ЛЭП, - на участке шириной 0,5 км по обе стороны от трубопровода [10, 11].

Список литературы

1. Яблучанский А.И. Оценка влияния высоковольтных ЛЭП переменного тока на проектируемый газопровод и технические решения по его устранению: Матер. отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии (г. Зеленоград, 15-18 мая 2007 г.). - М: ИРЦ Газпром, 2008. - С. 48-56.
2. Яблучанский А.И. Методика оценки опасного влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый газопровод: Матер. отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии (г. Барнаул, 21-26 апреля 2008 г.). - М: ИРЦ Газпром, 2008. С.110-123.
3. Pollaczek F. Uber das Feld einer unendlich langen wechselstrom- durchflossehen Einfachleitung. ENT, 1926, № 3, s. 339-359.
4. Garson J. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return.-R.S.T.J., 1926, v. 5, № 10, p. 539-554.
5. Sunde E. Earth Conduction Effects in Transmission System.-Van- Nostrand, Toronto-New York, London: 1949.
6. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. - М.: Связь, 1979. -264 с.
7. Костенко В.М. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле. - Электричество, 1955. -№ 10.-С. 29-34.
8. Временная методика оценки опасности влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый трубопровод и технические решения по его защите. - М.: ОАО «Газпром», 2009. - 25 с.
9. Sfb-Empfehlung Nr.1, Schiedsstelle fur Beeinflussungsfragen VWEW, Frankfurt 1972.
10. Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии: Справ. Изд. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1984. - 496 с.