

УДК 537.877

Герасименко Н.В.
(Белорусско-Российский университет, Могилев)

Gerasimenko N.V.
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

Импульсная рефлектометрия в системах оперативного дистанционного контроля предварительно изолированных труб

Pulsed reflectometry measurements in leak detection systems of pre-insulated pipes

Показано, что линия системы оперативного дистанционного контроля является длинной линией (ТЕМ структурой), классической математической моделью которой является система телеграфных уравнений. На основе численной математической модели выполнен ряд исследований, в ходе которых установлено влияние электрического сопротивления изоляционного слоя, а также ширины дефектного участка (увлажнение вследствие повреждения трубы или нарушение геометрии линии) увлажненной области на форму и амплитуду отраженных импульсов.

It is shown that the transmission line of remote control system is a TEM structure, the classical mathematical base of which is the telegrapher's equations. Based on the developed numerical mathematical model, the influence of electrical resistance of the insulating layer, as well as the width of the humidified or inhomogeneous area on the shape and amplitude of the reflected signals has been studied.

Введение

Система оперативного дистанционного контроля (СОДК) в составе трубопроводов, предварительно изолированных пенополиуретаном (ППУ) предназначена для непрерывного мониторинга состояния теплоизоляционного слоя и оперативного выявления участков с повышенной влажностью ППУ изоляции, вызванной проникновением влаги через поврежденную защитную оболочку или за счет протечки теплоносителя изнутри в результате повреждения основной трубы. Как правило, эта система используется в двух режимах: пороговая оценка электрического сопротивления ППУ изоляции и локация участков с повышенной влажностью методом импульсной рефлектометрии.

Часть системы, расположенная в трубе (рис. 1), состоит из двух проводников (основного и транзитного), проходящих по всей длине трубопровода. В качестве проводников, образующих линию СОДК, используют медный провод сечением 1,5 мм². Основной проводник располагается справа по ходу движения теплоносителя внутри ППУ изоляции параллельно стальной трубе на расстоянии 16-25 мм от ее поверхности. Проводники СОДК боковых и параллельных ответвлений включают в разрыв основного сигнального проводника. Проводники фиксируются в слое ППУ при помощи центраторов, качество и корректность установки которых оказывают существенное влияние на работу СОДК [1].

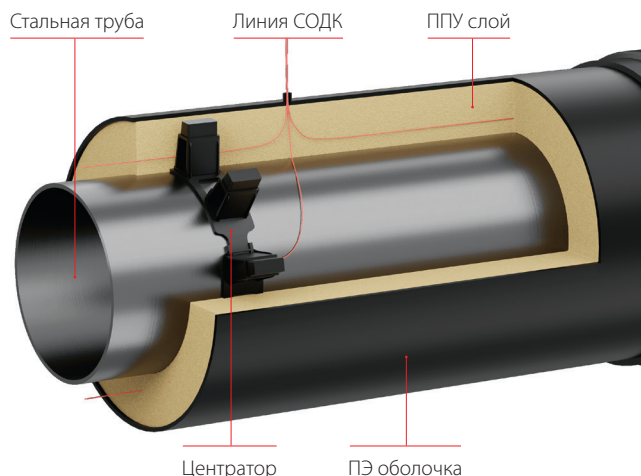


Рис. 1. Система проводников СОДК, расположенная в ППУ слое трубы

Оценку расстояния выполняют в режиме импульсной рефлектометрии. В этом режиме процедура схожа с локацией неоднородностей и повреждений кабельных линий связи [2-4], однако существенные отличия линии СОДК от кабельных линий связи не позволяет напрямую перенести существующие методики контроля и модели кабельных линий.

Метод импульсной рефлектометрии базируется на физических свойствах «длинной линии» – распределенной электрической колебательной системе. Предполагается, что существует величина $Z_b = U/I$, традиционно именуемая волновым сопротивлением, характеризующая взаимосвязь между напряжением и током в любой точке линии. Последняя предполагается однородной. При наличии неоднородности указанное соотношение нарушается, в результате чего появляется отраженная волна, распространяющаяся в обратном направлении. В качестве характеристики отраженной волны, как правило, используют коэффициент отражения

$$k_r = \frac{Z_b - Z}{Z_b + Z}, \quad (1)$$

где Z – импеданс линии в точке, где происходит отражение.

Из (1) следует, что отраженные сигналы появляются в тех местах, где импеданс линии СОДК резко отличается от ее волнового сопротивления. Сюда можно отнести увлажненные участки, обрывы линии, места пайки проводников, муфты, сжатия и перегибы проводников, короткое замыкание.

Однако имеется ряд проблем [5-8], возникающих в процессе эксплуатации СОДК. Анализ показывает, что наиболее актуальные из них, по всей видимости, вызваны попыткой перенести существующие методики диагно-

стики кабельных линий на линии, входящие в СОДК. Сюда можно отнести несовершенство самой измерительной линии и соединительных кабелей, находящихся в неоднородном диэлектрике – ППУ, значение коэффициента укорочения k (аналогичен показателю преломления в оптике) соединительных кабелей и линии сигнальных проводников существенно отличаются, а также применение приборов-рефлектометров, которые предназначены для кабельных линий. Можно заключить, что разработка математической модели линии СОДК с учетом ее особенностей, а также анализ распространения, отражения и трансформации зондирующего импульса с целью развития методов повышения точности локации повреждений, являются актуальными задачами.

1. Линия СОДК как ТЕМ-структура.

Основные уравнения

Как известно [9], линией передачи электромагнитной энергии (иначе, длинной линией или электрической цепью с распределенными параметрами) называют электродинамическую систему, однородную вдоль некоторой оси. Длинная линия является распределенной направляющей структурой: напряжение и ток в ней изменяются как во времени, так и в пространстве, а конфигурация электрического и магнитного полей линии аналогична таковой в свободно распространяющейся электромагнитной волне. По этой причине длинные линии и все эквивалентные ей системы являются ТЕМ структурами [10] (сокращение от Transverse Electromagnetic).

Рассмотрим линию СОДК, основной проводник которой совпадает с координатной осью z декартовой системы координат. Полагая, что такая конфигурация проводников (проводник и цилиндрическая проводящая поверхность) является линией ТЕМ, будем считать, что электрическое и магнитное поля имеют такую же конфигурацию, как и волны в пустом пространстве. Следовательно, $\vec{E}$ и $\vec{H}$ можно считать гармоническими функциями, причем пространственную зависимость можно представить в виде $\exp(-\gamma z)$, где γ – комплексный коэффициент распространения волн.

С учетом введенной зависимости, система уравнений Максвелла будет иметь вид

$$\begin{aligned} -i\omega\mu H_x &= \gamma E_y, & i\omega\epsilon E_x &= \gamma H_y, \\ -i\omega\mu H_y &= -\gamma E_x, & i\omega\epsilon E_y &= -\gamma H_x, \end{aligned} \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость материала, окружающего проводник;

μ – магнитная проницаемость, для ППУ $\mu = 1$.

Подставляя в (2) компоненты полей как функции координаты вида $\exp(-\gamma z)$, получаем две независимые системы однородных алгебраических уравнений, причем

для получения нетривиального решения каждой из них необходимо удовлетворить характеристическому уравнению вида

$$\gamma^2 + \omega^2 \varepsilon = 0. \quad (3)$$

Корнями уравнения (3) является $\gamma = \pm i\omega\sqrt{\varepsilon}$, причем чисто мнимый коэффициент γ означает возможность распространения волн вдоль линии без затухания. В действительности, сопротивление проводников, сопротивления контактов в местах соединения выводов рефлектометров и линии СОДК, а также неоднородность состава ППУ приводят к затуханию сигналов.

Поскольку поле в сечении линии ТЕМ должно быть потенциальным [9], существует функция $\Phi(x, y)$, удовлетворяющая уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0.$$

Согласно теории зеркальных изображений, линию СОДК можно рассмотреть как систему из заряженной нити и заземленного проводящего цилиндра (рис. 2). Введем фиктивную заряженную нить с линейной плотностью заряда λ' , расположенную в точке B на расстоянии b от оси цилиндра. При этом из подобия $\triangle OCB$ и $\triangle OAC$ следует, что

$$\frac{BC}{AC} = \frac{OC}{OA} = \frac{R}{a} \Rightarrow BC = AC \frac{R}{a}.$$

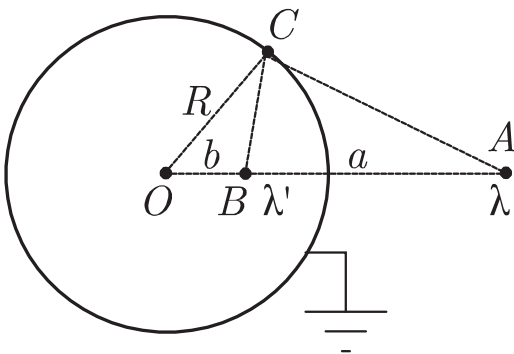


Рис. 2. Электростатическая модель системы проводников СОДК в сечении: заряженная нить над проводящим заземленным цилиндром

Применяя теперь известную формулу потенциала электрического поля заряженной оси, получаем

$$\Phi(C) = 2\lambda \ln\left(\frac{R}{a}\right),$$

Обеспечить нулевой потенциал заземленного цилиндра можно надлежащим выбором линейной плотности заряда фиктивной заряженной оси λ' . Полагая $\lambda' = -\lambda$, $b = R^2/a$, можно обеспечить выполнение этого требования. При этом поле линии с такой конфигурацией проводников оказывается тождественным полю двух заряженных осей, которая является классической ТЕМ структурой. Следовательно, линия СОДК также может рассматриваться с точки зрения теории длинных линий, в которой пользуются понятиями тока и напряжения как интегральными характеристиками полей в сечениях линии. Связь между напряжением и током в длинной линии дается телеграфными уравнениями [10, 11]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial U}{\partial z} &= L_0 \frac{\partial I}{\partial t} + R_0 I; \\ -\frac{\partial I}{\partial z} &= C_0 \frac{\partial U}{\partial t} + G_0 U, \end{aligned} \quad (4)$$

где L_0 , R_0 , C_0 , G_0 – индуктивность, сопротивление, емкость и проводимость изоляционного слоя между проводниками соответственно, рассчитанная на единицу длины проводника. Эти параметры также называют первичными параметрами линии.

При этом элемент длины линии dz моделируют эквивалентной электрической цепью, представляющей собой четырехполюсник (линейный в рассматриваемом контексте), схема которого представлена на рис. 3 [10].

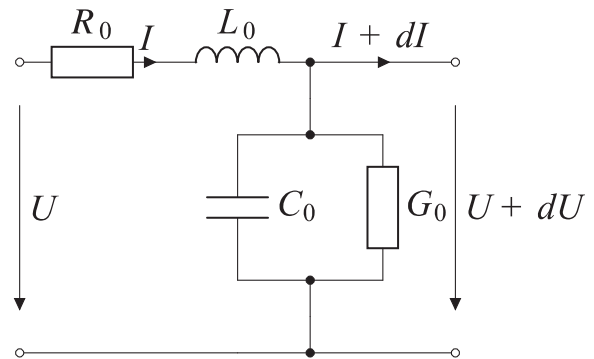


Рис. 3. Эквивалентная схема участка dz линии

Система телеграфных уравнений является классическим объектом исследования математической физики, для которого известен алгоритм построения функции Грина, следовательно, имеется возможность построения точных аналитических решений. Тем не менее аналитические решения имеют сравнительно простой вид лишь в случаях однородной (с неизменными первичными параметрами вдоль всей длины) и неискажающей линии

(в которой все гармонические составляющие сигнала распространяются с одинаковой частотой). В произвольном случае построение аналитического решения хоть и представляет собой важную фундаментальную задачу, часто оказывается довольно трудоемким и накладывает значительные ограничения на вид функций, описывающих действующие в линии источники сигналов и шумов, а также сами первичные параметры. В дальнейшем будет использоваться разработанная автором численная модель, основанная на адаптированном методе конечных разностей во временной области (алгоритм Йи [12]) и успешно примененном алгоритме оптимизации вычислений, позволившем значительно сократить время моделирования нелинейного волнового взаимодействия в плазме [13, 14]. Анализ устойчивости численной модели выполнен в рамках критерия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви (КФЛ) [13].

2. Моделирование процесса эволюции зондирующего импульса при рефлектометрии линии СОДК

Моделирование работы системы оперативного дистанционного контроля в режиме рефлектометрии нач-

нем с описания процесса формирования отраженных импульсов. Разработанная модель позволяет исследовать эволюцию волн в линии с течением времени, иными словами, допускает анализ как в установившемся, так и в переходном режиме.

В качестве иллюстрации рассмотрим следующий процесс. В произвольной линии СОДК длиной $z = 500$ (используются нормированные единицы длины), распространяется зондирующий прямоугольный импульс длительностью $t_0 = 0,3$ мкс и амплитудой $U_0 = 10$ В (в силу линейности рассматриваемой системы, выбор амплитуды произволен). В точке $z_0 = 250$ расположен локализованный дефект, имеющий характер увлажненного участка теплоизоляции ($G_0 \neq 0$). Затухание и утечку в остальных точках линии будем полагать равной нулю, $G_0 = 0$, $R_0 = 0$.

Процесс распространения и отражения зондирующего импульса (эволюция во времени) представлен на рис. 4.

На рис. 4а изображен прямоугольный зондирующий импульс 1. В данный момент времени, импульс уже успел распространиться на некоторое расстояние в линии, однако в силу отсутствия затухания и постоянства параметров линии (данные упрощения приняты для лучшей наглядности примера), импульс сохраняет свою форму

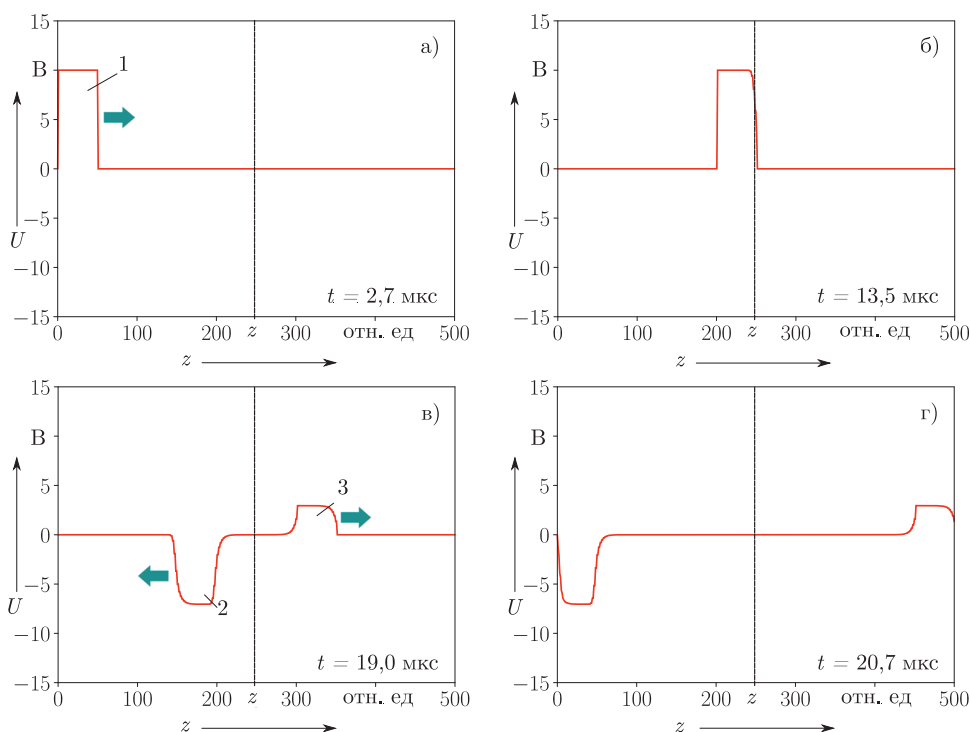


Рис. 4. Процесс распространения зондирующего импульса и формирования отраженного импульса в линии СОДК при наличии локализованного дефекта, имеющего характер увлажненного участка теплоизоляции. Отправка зондирующего импульса в линию (а); трансформация импульса в зоне неоднородности (б); распад исходного импульса на преломленную и отраженную части (в); прием отраженного импульса (г)

и амплитуду неизменными. Неоднородность параметров линии, обусловленная свойствами ППУ, а также затухание, которое особенно сильно проявляется при использовании проводников низкого качества и (или) некорректного монтажа, приводит к искажению (увеличению ширины) зондирующего импульса и снижает точность локации.

На рис. 4б зондирующий импульс 1 проходит через дефектную точку. Для демонстрации был выбран дефект, имитирующий участок с повышенной влажностью, однако в этом контексте можно было рассмотреть и дефект, представляющий повышенное переходное сопротивление (например, при некачественном соединении проводников в местах стыков труб), различие заключается лишь в полярности отраженного импульса. Можно отметить, что при попадании в область, в которой один из параметров линии отличается, фронт зондирующего импульса искажается, что в конечном итоге приводит к распаду зондирующего импульса на две составляющие 2 и 3, распространяющиеся в противоположных направлениях.

Составляющая 2 является отраженным импульсом, и при диагностике играет роль информативного параметра, согласно которому оценивают тип дефекта, степень увлажнения (или величину переходного сопротивления), а также расстояние до него. Импульс 3 в конечном итоге отражается от конца линии (в данном случае $z = 500$) и либо сохраняет полярность или же изменяет полярность в соответствии с (1). В случае, когда сопротивление в конце $\approx Z_b$, отраженных от конца линии импульсов не возникает. Последнее условие сохраняет силу и для точки подключения рефлектометра ($z = 0$), входное сопротивление которого должно быть согласовано с линией. На практике достичь этого трудно, поскольку линия СОДК подключается к рефлектометрам не напрямую, а с помощью соединительных NYM проводов, первичные параметры которых существенно отличаются.

Наконец, на рис. 4г изображен отраженный сигнал 3, пришедший в точку $z = 0$, где находится источник зондирующих импульсов (импульсный рефлектометр).

3. Моделирование процесса рефлектометрии при наличии увлажненного участка теплоизоляции

Исследуем теперь процесс отражения зондирующего импульса при наличии области с повышенной проводимостью утечки G_0 , что соответствует увлажненному вследствие повреждения основной металлической трубы участку теплоизоляции.

В рамках численного эксперимента будем использовать модель со следующими параметрами: амплитуда зондирующего импульса $U_0 = 10$ В; характеристики линии $L_0 = 1,18$ мкГн; $C_0 = 12,47$ пФ; коэффициент укорочения при заданных параметрах линии составляет $k \approx 1,15$; дли-

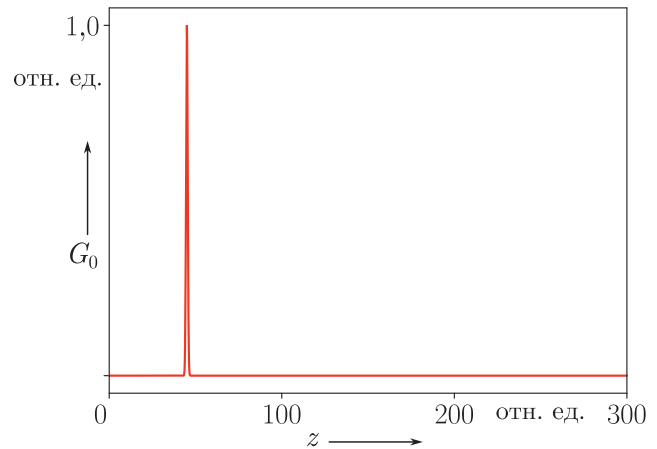


Рис. 5. Модель неоднородности параметра G_0 линии СОДК

на линии $l = 300$; область неоднородности задана в виде гауссовой кривой (рис. 5).

Действительно, утечка теплоносителя приводит к постепенному увлажнению изоляционного слоя в некоторой окрестности повреждения и, как следствие, изменению электрического сопротивления, что приводит к неоднородности параметров линии СОДК и появлению отраженных импульсов. Для различных значений сопротивления изоляции получены отраженные импульсы, представленные на рис. 6.

Анализ рис. 6а показывает, что при снижении электрического сопротивления теплоизоляции (что тождественно увеличению проводимости G_0 в некоторой окрестности источника увлажнения), отраженный импульс испытывает изменение как формы, так и амплитуды. Кроме этого отражение от участков с высокой проводимостью приводит к изменению полярности импульса: эта особенность позволяет отличать на рефлектограмме увлажненные участки теплоизоляции от дефектов монтажа, характеризующихся высоким электрическим сопротивлением контакта. Отметим, что при отражении фронт и срез импульса растягиваются, причем, конечная форма отраженного импульса зависит от ширины области увлажнения (области неоднородности электрического сопротивления изоляции, рис. 5). Математической моделью точечного дефекта является Дельта функция, и лишь в таком предельном случае импульс не меняет формы при отражении, что, однако, невозможно на практике.

На рис. 6б представлена зависимость амплитуды отраженного импульса от величины электрического сопротивления теплоизоляции. Численному решению соответствуют символы «х». Можно отметить, что $U/U_0 \propto 1/kR_{из}$, где k – некоторая вещественная константа, зависящая от ширины дефектного участка, параметров линии

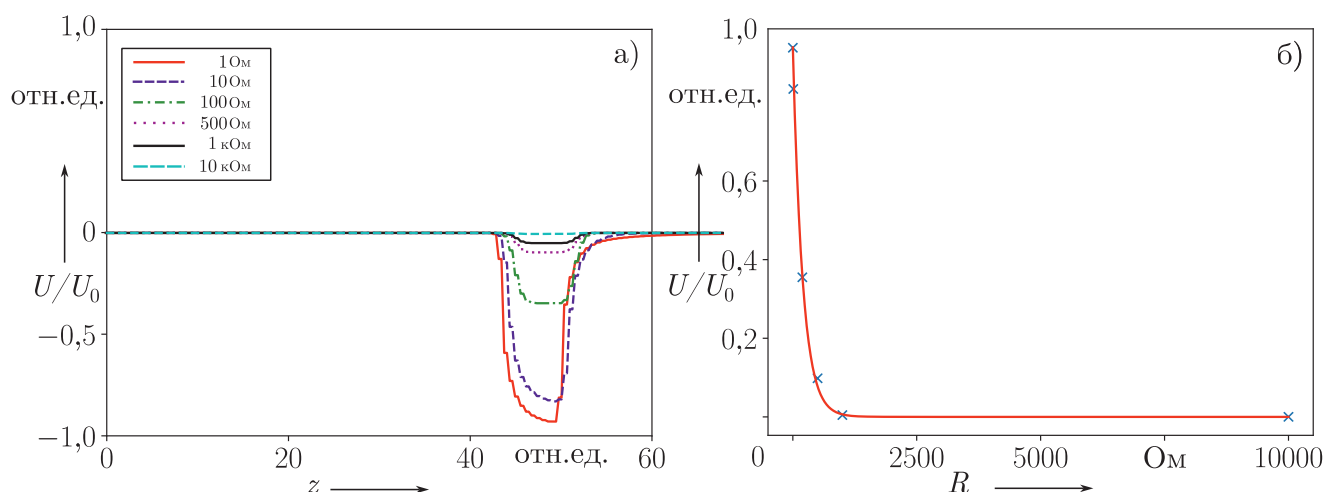


Рис. 6. Результат моделирования процесса импульсной рефлектометрии линии СОДК при наличии локализованной области с повышенной влажностью теплоизоляции и, как следствие, сниженным значением электрического сопротивления изоляции; виды отраженных импульсов при различных значениях сопротивления изоляции (а); зависимость амплитуды отраженного импульса от сопротивления изоляции (б).

и настроек прибора. Наибольшая чувствительность метода достигается при $R_{из} < 1$ кОм, что наблюдается лишь при длительном воздействии источника увлажнения, поскольку электрическое сопротивление слоя теплоизоляции в нормальном состоянии составляет $\approx 2...3$ МОм.

Указанную зависимость можно объяснить требованием равенства напряжений в точке сопряжения двух отрезков ТЕМ линии, в которой присутствует отличная от нуля проводимость утечки G_0 [10]. Если считать параметры линий справа и слева от дефектной области однородными, отношение амплитуды отраженного импульса к зондирующему можно найти по приближенной формуле

$$\left| \frac{U}{U_0} \right| \approx \frac{Z_B^2}{Z_B^2 + 2Z_B \kappa R_{из}}. \quad (5)$$

При помощи (5) получен график зависимости амплитуды отраженного импульса от величины электрического сопротивления слоя теплоизоляции $R_{из}$ (сплошная кривая на рис. 6б), который хорошо согласуется с численными расчетами. Данная аналитическая формула является приближенной и становится непригодной в случаях обширных участков увлажнения. В таких случаях наилучший результат дает численное моделирование, на основании которого могут быть получены эмпирические формулы, позволяющие оценить ширину поврежденного участка. Например, виды отраженных импульсов при различной ширине увлажненного участка, полученные путем численного моделирования, представлены на рис. 7.

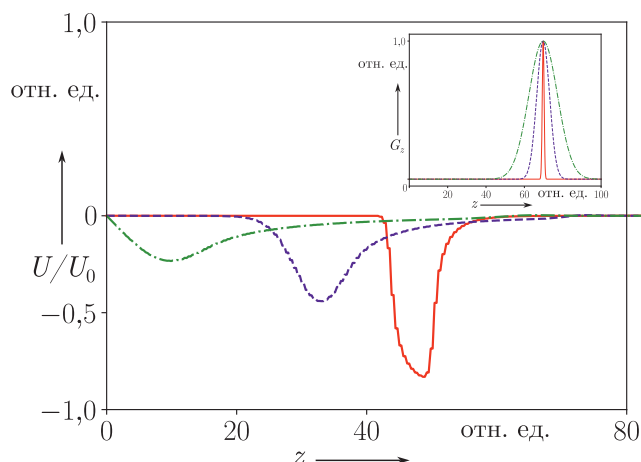


Рис. 7. Виды отраженных импульсов при различной ширине увлажненного участка теплоизоляции (участка со сниженным электрическим сопротивлением). Модели неоднородности электрического сопротивления теплоизоляции представлены на вставке к рисунку

Анализ рис. 7 показывает, что при отражении от обширных дефектных областей зондирующий импульс претерпевает сильное искажение и его ширина увеличивается, что приводит к снижению точности определения места повреждения. Эти данные однако можно использовать для оценки ширины поврежденного участка теплоизоляции.

Заключение

В результате исследований структуры линии СОДК, входящей в состав большинства типов труб, предварительно изолированных пенополиуретанов было показано, что в качестве основы для построения математической модели могут быть использованы телеграфные уравнения, поскольку линия относится к ТЕМ структурам. Разработанная численная модель, численная модель, основанная на адаптированном методе конечных разностей во временной области и наработках, полученных в процессе моделирования нелинейных волновых процессов в плазме, позволила изучить механизм возникновения отраженных импульсов, исследовать особенности формирования отраженных импульсов при наличии поврежденных (увлажненных участков) теплоизоляции, оценить влияние проводимости изоляционного слоя на амплитуду и форму отраженных сигналов. Также исследована форма отраженных сигналов при различной ширине поврежденного участка. Разработанная модель и данные могут быть использованы в процессе обработки рефлектограмм и развитии способов повышения точности обнаружения дефектов.

Литература

1. Руководство по проектированию трубопроводов тепловых сетей подземной и надземной прокладки с применением труб и фасонных изделий стальных с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой [Электрон. ресурс]. – Смоленск: СМИТ-Ярцево. – 2020. – 78 с.: ил. Режим доступа: https://f149bed9-1412-40b3-f25d3bd621c2e48.filesusr.com/ugd/70b26a_fcb9f24703d6407abb462c6078c5598.pdf. – Дата доступа: 09.08.2022
2. Дюбов, А. С. Разработка и исследование методики количественной оценки внутренних неоднородностей кабельных цепей методом импульсной рефлектометрии : дис. канд. техн. наук : 05.12.13 / А.С. Дюбов. – Санкт-Петербург. – 2011. – 144 с.
3. Былина, М. С. Исследование импульсного метода измерений параметров двухпроводных цепей: дис. канд. техн. наук: 05.12.13 / М.С. Былина. – Санкт-Петербург. – 2006. – 310 с.
4. Воронцов, А. С. Импульсные измерения коаксиальных кабелей связи / А.С. Воронцов, П.А. Фролов. – Москва: Радио и связь. – 1985. – 96 с.: ил.
5. Александров, А. А. Оперативный дистанционный контроль трубопроводов ППУ – эффективное средство контроля или бесполезное приложение? [Электрон. ресурс] /А.А. Александров, В.Л. Переверзев // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 2(78). – Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2448. – Дата доступа: 12.07.2022
6. Голубков, С. К. Опыт эксплуатации труб в ППУ-изоляции с системой оперативного дистанционного контроля (ОДК) [Электрон. ресурс] / С. К.Голубков // Материалы Конференции "Тепловые сети. Современные решения"17 по 19 мая 2005 г. НП "Российское теплоснабжение". – 2005. – Режим доступа https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=599. – Дата доступа: 12.07.2022
7. Болотов, С. В. Повышение точности обнаружения повреждений пенополиуретановой изоляции предварительно изолированных труб методом импульсной рефлектометрии / С.В. Болотов, Н.В. Герасименко // Материалы I-й международной научно-практической конференции. Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве. – Минск, – 2019. – Т. 2. – С. 240–244.
8. Болотов, С. В. Повышение точности локации повреждений ПИ-труб методом импульсной рефлектометрии / С.В. Болотов, Н.В. Герасименко // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве. Сборник трудов. – Минск, – 2020. – Т. 1. – С. 75–81.
9. Huard, S. Polarisation of light / Serge Huard. – Wiley-VCH– 1997. PP – 348.
10. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники в 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман [и др.]. – Санкт-Петербург.: Питер. – 2003. – 572 с.: ил.
11. Герасименко, Н. В. Математическая модель ПИ-трубопровода тепловой сети для контроля мест повреждения методом рефлектометрии / Н.В. Герасименко // Сб. трудов XIV международной научно – технической конференции студентов и аспирантов «Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика». – Смоленск, – 2020. – Т. 3. – С. 29–33.
12. Yee, Kane. Numerical solution of the initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [online access] / Kane Yee // IEEE Transactions of Antennas and Propagation, 1966. – Vol.14 № 3. – С. 302–307. Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1138693>. – Access date: 12.08.2021
13. Gerasimenko, N. V. One-dimensional nonlinear parametric instability of inhomogeneous plasma: Time Domain Problem / N.V. Gerasimenko, F.M. Trukhachev, E.Z. Gusakov, L.V. Simonchik, A.V. Tomov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2021. – Т. 24(3). – С. 272–279.
14. Трухачев, Ф. М. Численное моделирование одномерной нестационарной нелинейной параметрической неустойчивости /Ф.М. Трухачев, Е.З. Гусаков, Л.В. Симончик, Н.В. Герасименко // VI Конгресс физиков Беларуси. — Минск, — 2017. — С. 281.