

Ю. К. Шлык, Д. А. Васильев, Г. С. Кречина

Электроакустическое моделирование линейной части магистрального газопровода

Используя матричный метод, предложен алгоритм расчета параметров волновода при появлении негерметичности. По данному алгоритму можно определить место расположения негерметичности по длине волновода и ее условный диаметр.

Утечки газа в результате нарушения герметичности магистрального газопровода могут иметь отрицательные последствия как для окружающей среды, так и для финансового состояния предприятия. С точки зрения физической модели газопровод представляет собой единую систему, параметры которой тесно взаимосвязаны, и нарушение устоявшегося режима работы газопровода в одной точке откликается на всем его протяжении. В частности, возникновение утечки сопровождается изменением ряда технологических параметров его работы.

Данная проблема является актуальной, о чем свидетельствует постоянный рост публикаций по этой тематике [1–6]. В результате исследований [7, 8] было установлено, что появление негерметичности стенки газопровода («свища») приводит к изменению частотного состава спектра акустических шумов в трубопроводе. Моделируя его волноводной системой с «абсолютно жесткими» стенками [9, 10], поставим задачу определения линейной координаты «свища» на стенке газопровода и его условного диаметра.

Решение данной задачи будем вести с использованием метода электродинамических аналогий [11], который позволяет смоделировать акустическую волноводную систему линейной части трубопровода эквивалентной электрической цепью с применением теории линий с распределенными параметрами и теории 4-полюсников. При этом будем считать, что эквивалентная линия питается от источника синусоидальной ЭДС заданной частоты ω . Данное условие представляется вполне обоснованным, поскольку в установившемся режиме движения газа в трубопроводе соответствующий ему спектр акустических шумов будет иметь некоторую преобладающую частоту. Это, в свою очередь, позволяет использовать в расчетах метод комплексных амплитуд [12].

Основываясь на положениях теории 4-полюсников, представим линейный участок магистрального газопровода эквивалентной электрической T-образной схемой замещения (рис. 1).

Представленный 4-полюсник является обратимым и симметричным.

Базовая система уравнений A-формы для схемы на рис. 1 будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где A , B , C и D — комплексные постоянные, определяемые исходными Z_1 и Z_2 .

Симметрия рассматриваемого 4-полюсника выражается равенством

$A = D$, а его обратимость — выражением:

$$AD - BC = 1. \quad (2)$$

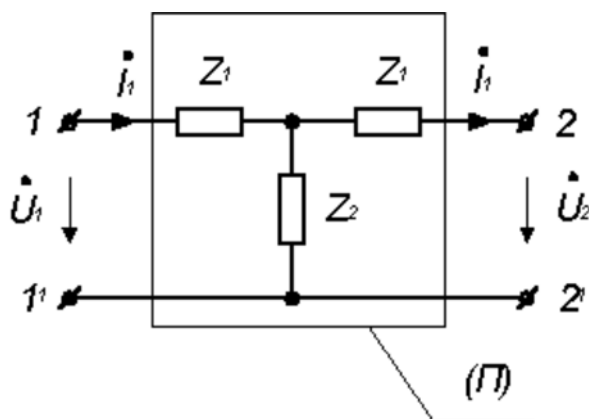


Рис. 1. Пассивный (П) T-образный 4-полюсник как электрический аналог линейной части газопровода:

Z_1 и Z_2 — комплексные сопротивления, замещающие упругоинерционно-диссипативные

параметры среды, заполняющей волновод; \dot{U}_1 , \dot{I}_1 и \dot{U}_2 , \dot{I}_2 — комплексные входные и выходные напряжения и токи как аналоги давлений и скоростей акустических волн в среде

Руководствуясь известными соотношениями, которые имеют место в теории 4-полюсников и длинных линий, запишем систему (1) с использованием гиперболических функций:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch} \gamma \ell + I_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma \ell, \\ I_1 &= \frac{U_2}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma \ell + I_2 \operatorname{ch} \gamma \ell, \end{aligned} \quad (3)$$

где γ — комплексная постоянная распространения тока и напряжения в длинной линии; ℓ — ее общая длина; Z_B — волновое сопротивление линии.

Для каждой из систем (1) и (3) может быть составлена матрица коэффициентов А-формы:

$$|A| = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \operatorname{ch} \gamma \ell & Z_B \operatorname{sh} \gamma \ell \\ \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma \ell & \operatorname{ch} \gamma \ell \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Перейдем к анализу системы уравнений (3) и параметров матриц (4) с учетом возникшей негерметичности стенки трубопровода.

Моделируя локальную негерметичность стенки волновода сосредоточенной индуктивностью [8], представим ее самостоятельным пассивным 4-полюсником. Тогда исходная электрическая схема замещения по рис. 1 видоизменится и превратится в каскадное соединение (рис. 2).

Для общего случая, когда $\ell_1 \neq \ell_2$, имеем $Z_1^{(1)} \neq Z_1^{(2)}$ и $Z_2^{(1)} \neq Z_2^{(2)}$.

Сопоставляя схемы, представленные на рис. 1 и рис. 2, можно сделать вывод о том, что при неизменности входных параметров (\dot{U}_1 и \dot{I}_1) для (Π) и ($\Pi^{(3)}$), выходные напряжения и токи для обеих цепей будут различными. При этом очевидны следующие неравенства: $\dot{U}_2^{(3)} < \dot{U}_2$ и $\dot{I}_2^{(3)} < \dot{I}_2$.

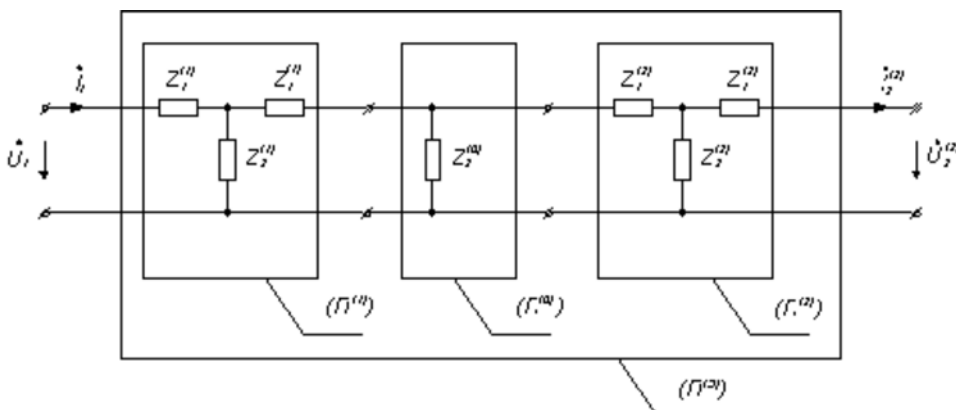


Рис. 2. Электрическая схема-аналог газопровода с негерметичностью стенки:

($\Pi^{(1)}$) — пассивный 4-полюсник как аналог волновода длины ℓ_1 (от начала волновода до места негерметичности); ($\Pi^{(0)}$) — пассивный 4-полюсник, замещающий негерметичность (отверстие); $Z_2^{(0)} = j\omega L$ — индуктивное сопротивление, в котором индуктивность L замещает акустическую массу отверстия; ($\Pi^{(2)}$) — пассивный 4-полюсник как аналог волновода длины ℓ_2 (от места негерметичности до конца волновода); ($\Pi^{(3)}$) — эквивалентный пассивный 4-полюсник, замещающий волновод длины $\ell = \ell_1 + \ell_2$ с негерметичностью

Используя матричный метод расчета цепной схемы по рис. 2, можно определить обобщенные параметры ($\Pi^{(3)}$), учитывающие как место расположения негерметичности по длине волновода, так и ее условный диаметр.

Для 4-полюсников ($\Pi^{(1)}$), ($\Pi^{(0)}$) и ($\Pi^{(2)}$) составим матрицы коэффициентов А-формы:

$$|A^{(1)}| = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix}, \quad |A^{(0)}| = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_2^{(0)}} & 1 \end{vmatrix}, \quad |A^{(2)}| = \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Осуществляя поэтапное перемножение матриц коэффициентов цепной схемы, т. е. двигаясь слева направо, будем иметь:

$$|A^{(2)}| = |A^{(1)}| |A^{(2)}| \quad \text{и} \quad |A^{(3)}| = |A^{(1)}| |A^{(2)}|, \quad (6)$$

что в итоге даст искомую матрицу коэффициентов эквивалентного пассивного 4-полюсника ($\Pi^{(3)}$):

$$|A^{(3)}| = \begin{vmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_3 &= A_1 A_2 + \frac{B_1 A_2}{Z_2^{(1)}} + B_1 C_2, & B_3 &= A_1 B_2 + \frac{B_1 B_2}{Z_2^{(1)}} + B_1 D_2, \\ C_3 &= C_1 A_2 + \frac{D_1 A_2}{Z_2^{(1)}} + D_1 C_2, & D_3 &= C_1 B_2 + \frac{D_1 B_2}{Z_2^{(1)}} + D_1 D_2 \end{aligned}$$

коэффициенты матрицы ($\Pi^{(3)}$).

По-прежнему будем считать, что данные коэффициенты, в соответствии с выражением (4), могут быть представлены гиперболическими функциями аргумента γl . При этом A_1, B_1, C_1 и D_1 — получены для участка волновода длиной l_1 , а соответствующие A_2, B_2, C_2 и D_2 — длиной l_2 .

Для определения новых выходных параметров ($\dot{U}_2^{(3)}$ и $i_2^{(3)}$) эквивалентного 4-полюсника ($\Pi^{(3)}$), которые характеризуют появление негерметичности стенки газопровода, базовую систему уравнений для этих новых условий рационально записать, используя B -форму, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{U}_2^{(3)} &= D_3 \dot{U}_1 + B_3 i_1, \\ i_2^{(3)} &= C_3 \dot{U}_1 + A_3 i_1. \end{aligned} \quad (8)$$

По существу, (8) является обобщенным алгоритмом расчета параметров волновода с негерметичностью. С его помощью можно определить сам факт возникновения негерметичности ($Z_2^{(3)}$), ее условный диаметр (вариации $Z_2^{(3)}$) и ее координату на линейном участке газопровода, расположенного между двумя соседними компрессорными станциями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосенков А. С., Русаков А. Н., Трефилов А. Г. и др. Система обнаружения утечек по волне давления // Трубопроводный транспорт нефти. М.: Транспресс, 1998. № 12. С. 27–30.
2. Белоусова В. А., Гурьев В. А., Казаков А. А., Липанова Н. И. Математическое моделирование процессов в магистральных нефтепроводах // Трубопроводный транспорт нефти. М.: Транспресс, 2001. № 12. С. 27–31.
3. Ромашов В. П. Спектрально-акустический метод диагностики: Опыт внедрения и перспективы // Трубопроводный транспорт нефти. М.: Транспресс, 2002. № 6. С. 11–14.
4. Шаммазов А. М., Козачук Б. А., Пирогов Н. Е. и др. Моделирование стационарных режимов работы нефтепроводных систем // Трубопроводный транспорт нефти. М.: Транспресс, 2003. № 9. С. 21–22.
5. Ковардаков А. В. Система обнаружения утечек на базе стандартных программных средств СДКУ // Трубопроводный транспорт нефти. М.: Транспресс, 2004. № 6. С. 3–6.
6. Диагностика повреждений и утечек при трубопроводном транспорте многофазных углеводородов / Под общ. ред. Ю. Д. Земенкова. Тюмень: Вектор Бук, 2002. 432 с.
7. Шлык Ю. К., Каменских И. А. Способ диагностики трубопровода. Пат. РФ № 2241174, 7F17D5/05. Оpubл. 27.11.2004, Бюл. № 33.
8. Васильев Д. А., Шлык Ю. К. Диагностика герметичности магистрального газопровода // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС РАН, 2004. Вып. 3. С. 121–124.
9. Атавин А. А., Карасевич А. М., Сухарев М. Г. и др. Трубопроводные системы энергетики: Модели, приложения, информационные технологии / РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. М.: Нефть и газ, 2000. 320 с.
10. Исакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
11. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1978. 448 с., ил.
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учеб. для электротехн., энерг., приборостроит. спецвузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1984. 559 с., ил.

Yu. K. Shlyk, D. A. Vasilyev, G. S. Kretchina

ELECTROACOUSTIC SIMULATION OF THE MAIN PIPELINE LINEAR PART

Creation of a computing algorithm of waveguide values under leakage, using a matrix method. The algorithm

could be of use in localizing leakage by waveguide length, and its nominal diameter.