

В последнее время при определении места утечки в различного рода продуктопроводах широко используют цифровую обработку сигналов, позволяющую более полно и детально использовать информацию, получаемую от акустических датчиков. Привлечение для ее анализа ЭВМ устраняет необратимые информационные потери, дает возможность неоднократно обращаться к результатам измерений, обрабатывать их разными способами. Кроме того, переход к цифровой обработке позволяет применить статистические методы оценивания, синтезируемые на основе метода максимального правдоподобия или наименьших квадратов. При этом в значительной мере упрощается нахождение параметров, характеризующих случайные акустические процессы: дисперсии, корреляционных моментов, математического ожидания.

Среди последних работ, использующих указанные возможности цифровой обработки, заслуживает внимания корреляционный течеискатель "Коршун", разработанный в ИМПЭ АН Украины (г. Киев - 164, ул. генерала Наумова, 15). Методика его применения подробно изложена Годлевским В.С. и Владимирским А.А. в препринте [1].

В числе недостатков данного метода следует указать большую погрешность определения местоположения акустических источников (рекламные данные ± 0.2 м), обусловленную, на наш взгляд, низким темпом оцифровки сигналов, недостатками самой корреляционной процедуры. Существенно, что данный показатель приведен без учета погрешности в определении расстояния между датчиками, которое предполагается определять по паспортным данным диагностируемого участка продуктопровода, с помощью рулетки или мерного колеса. Большие трудности представляет защита от мешающих воздействий в виду недостаточной частотной селекции выходных сигналов акустических датчиков в аналоговом тракте. Кроме того, довольно продолжительным является сам корреляционный анализ, статическая обработка его результатов.

Все это делает актуальными дальнейшие исследования по разработке более эффективных измерительных процедур.

Возможные варианты решения данной задачи представлены ниже.

I. Фазовый метод определения места утечки в продуктопроводе

Рассмотрим участок продуктопровода однородной структуры длиной L , на концах которого установлены широкополосные датчики приема акустических колебаний I и II.

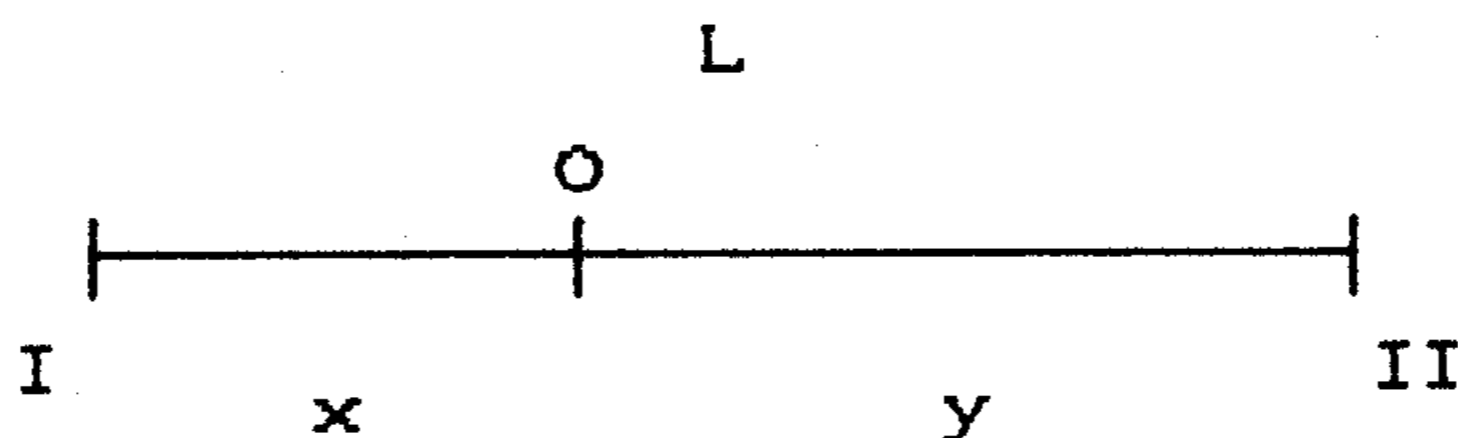


Рис. 1

Напряжение с выходов датчиков поступает после соответствующего усиления на входы двух АЦП с единой системой синхронизации (запуск осуществляется от одного синхрогенератора).

Предположим, что источник акустических колебаний, находится в точке O , на расстояниях x и y от датчиков I, II соответственно (см. рис. I), то есть $L=x+y$.

Оцифруем $N \cdot S$ значений напряжений на выходах датчиков I и II. Затем, используя преобразователь Гильберта [2], выделим ортогональные составляющие для каждой N отсчетов. При этом получим S комплексных значений напряжений, которые подвергнем преобразованию Фурье во временной области. Выбрав два синтезированных фильтра с частотами f_1 и f_2 , построим для них фильтры Хемминга, в результате чего для последующей обработки получим два сигнала с частотами f_1 и f_2 , длины волн которых $\lambda_1 = \frac{V}{f_1}$ и $\lambda_2 = \frac{V}{f_2}$.
Здесь V – скорость звука в продуктопроводе.

Напряжение датчика I на частоте f_1 можно записать в виде:

$$U_1^c = a_1 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot x + \varphi_1 \right),$$

$$U_1^s = a_1 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot x + \varphi_1 \right),$$

где a_m – амплитуда сигнала на частоте f_m ,
 φ_m – фаза сигнала указанной частоты, $m = 1; 2$.

$$\text{Определим } \hat{\varphi}_{11} = \text{arctg} \frac{U_1^s}{U_1^c}.$$

Напряжение датчика II на частоте f_1 представим следующим образом:

$$U_2^c = a_1 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot y + \varphi_1 \right) .$$

$$U_2^s = a_1 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot y + \varphi_1 \right) .$$

Отсюда $\hat{\varphi}_{12} = \operatorname{arctg} \frac{U_2^s}{U_2^c} .$

Аналогично на частоте f_2 имеем:

для датчика I:

$$\tilde{U}_1^c = a_2 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \cdot x + \varphi_2 \right) .$$

$$\tilde{U}_1^s = a_2 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \cdot x + \varphi_2 \right) .$$

$$\hat{\varphi}_{21} = \operatorname{arctg} \frac{\tilde{U}_1^s}{\tilde{U}_1^c} .$$

для датчика II:

$$\tilde{U}_2^c = a_2 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \cdot y + \varphi_2 \right) .$$

$$\tilde{U}_2^s = a_2 \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} \cdot y + \varphi_2 \right) .$$

$$\hat{\varphi}_{22} = \operatorname{arctg} \frac{\tilde{U}_2^s}{\tilde{U}_2^c} .$$

Заметим, что значения фаз в зависимости от знаков квадратурных составляющих следует определять по правилу:

а) в первой четверти

$$\varphi_{ij} = \hat{\varphi}_{ij} ,$$

б) во второй четверти

$$\varphi_{ij} = -\hat{\varphi}_{ij} + \pi ,$$

в) в третьей четверти

$$\varphi_{ij} = \hat{\varphi}_{ij} + \pi ,$$

г) в четвертой четверти

$$\varphi_{ij} = 2\pi - \hat{\varphi}_{ij} .$$

Для последующего определения места утечки интерес представляют разности:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_{11} - \varphi_{12} = \frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot (x-y) ,$$

$$\Delta\varphi_2 = \varphi_{21} - \varphi_{22} = \frac{2\pi}{\lambda_2} \cdot (x-y) ,$$

$$x=L-y$$

Вычтя $\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$ получим:

$$x=0.5 \left[L + \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left(\frac{\varphi_{11} - \varphi_{12} - \varphi_{21} + \varphi_{22}}{2\pi} + \Delta k_1 \right) \right] ,$$

где $\Delta k_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Если $\left| \frac{L}{\lambda_1} - \frac{L}{\lambda_2} \right| < 0.5$, то $\Delta k_1 = 0$.

Для решения задачи измерения x при $\left| \frac{L}{\lambda_1} - \frac{L}{\lambda_2} \right| > 1$ необходимо на дополнительно взятых частотах λ_3 и λ_4 также определить x при тех же Δk_1 . Совпадающие значения для λ_1, λ_2 и λ_3, λ_4 будут являться искомым параметром x .

II. Метод определения места утечки в продуктопроводе по интенсивности затухания акустических колебаний

Представленная на рис. I ситуация позволяет использовать при поиске места утечки в продуктопроводе информацию об интенсивности затухания акустических колебаний. Условимся, что на частоте $f_1 (\lambda_1)$ коэффициент затухания звука имеет величину α_1 , а на частоте $f_2 (\lambda_2)$ соответственно - α_2 . С учетом этого после аналого-цифрового преобразования выделим ортогональные составляющие сигналов акустических датчиков, используя процедуру Гильберта, и далее по S комплексным парам чисел, синтезируем фильтры Хэмминга на частотах f_1 и f_2 .

При этом на частоте f_1 датчики I и II позволяют получить напряжения:

$$\dot{U}_1 = a_1 \cdot e^{j\varphi_{11}} \cdot e^{-\alpha_1 x} ;$$

$$\dot{U}_2 = a_1 \cdot e^{j\varphi_{12}} \cdot e^{-\alpha_1 y} .$$

На частоте f_2 имеем:

$$\tilde{U}_1 = \tilde{a}_2 \cdot e^{j\varphi_{21}} \cdot e^{-\alpha_2 x} ;$$

$$\tilde{U}_2 = \tilde{a}_2 \cdot e^{j\varphi_{22}} \cdot e^{-\alpha_2 y} .$$

Перейдем от комплексного представления напряжений к их модулям:

$$|\dot{U}_1| = a_1 \cdot e^{-\alpha_1 x} ; \quad |\dot{U}_2| = a_1 \cdot e^{-\alpha_1 y} ;$$

$$|\tilde{U}_1| = a_2 \cdot e^{-\alpha_2 x} ; \quad |\tilde{U}_2| = a_2 \cdot e^{-\alpha_2 y} .$$

Отсюда, при определении места утечки возможны следующие варианты решений:

$$в) \quad \frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = e^{-\alpha_1(x-y)} ; \quad \frac{|\tilde{U}_1|}{|\tilde{U}_2|} = e^{-\alpha_2(x-y)} ;$$

$$\frac{|\dot{U}_1| \cdot |\tilde{U}_1|}{|\dot{U}_2| \cdot |\tilde{U}_2|} = e^{-(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot (x-y)} = e^{-(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot (2x-L)} , \text{ поскольку}$$

$$y = L - x ;$$

$$\ln \frac{|\dot{U}_1| \cdot |\tilde{U}_1|}{|\dot{U}_2| \cdot |\tilde{U}_2|} = 5(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot (2x - L)$$

$$x = \left\{ L + \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot \ln \frac{|\dot{U}_1| \cdot |\tilde{U}_1|}{|\dot{U}_2| \cdot |\tilde{U}_2|} \right\} \cdot 0.5 .$$

При этом необходимо знание затуханий α_1 и α_2 на частотах f_1 и f_2 .

б) Если предположить, что амплитуды сигналов на частоте f_1 и f_2 близки, т.е. $|\tilde{a}_1| \approx |\tilde{a}_2|$, то справедливы следующие выкладки:

$$\frac{|\dot{U}_1|}{|\tilde{U}_1|} = \frac{a_1}{a_2} \cdot e^{(\alpha_2 - \alpha_1)x} \approx e^{(\alpha_2 - \alpha_1)x} ;$$

$$\frac{|\dot{U}_2|}{|\tilde{U}_2|} = \frac{a_1}{a_2} \cdot e^{(\alpha_2 - \alpha_1)y} \approx e^{(\alpha_2 - \alpha_1)y} .$$

$$\beta_1 = \ln \frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_1|} = (\alpha_2 - \alpha_1)x ; \quad \beta_2 = \ln \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_2|} = (\alpha_2 - \alpha_1)y .$$

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{x}{y} = \frac{x}{L-x} , \quad \text{где } y=L-x .$$

$$\beta_1(L-x) = \beta_2 \cdot x ;$$

$$\beta_1 \cdot L = (\beta_1 + \beta_2)x$$

$$x = \frac{\beta_1 \cdot L}{\beta_1 + \beta_2} .$$

В этом случае знание коэффициентов затухания не требуется. Для измерения коэффициентов затухания α_1 и α_2 (вариант а) установим два датчика I и II на расстоянии L друг от друга с одной стороны от источника сигнала:

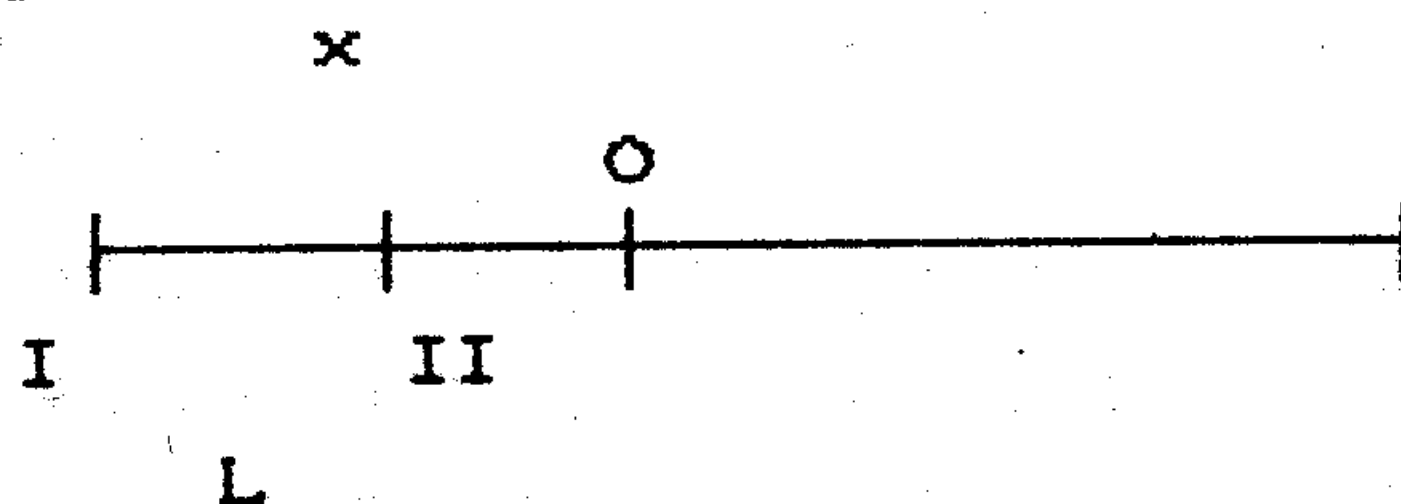


Рис. 2

На частоте f_1 имеем:

$$\dot{U}_I = \dot{a}_1 \cdot e^{-\alpha_1 x} ;$$

$$\dot{U}_{II} = \dot{a}_1 \cdot e^{-\alpha_1(x-L)} \cdot e^{j\varphi_1} .$$

Аналогично на частоте f_2 получим:

$$\dot{U}_I = \dot{a}_2 \cdot e^{-\alpha_2 x} ;$$

$$\dot{U}_{II} = \dot{a}_2 \cdot e^{-\alpha_2(x-L)} \cdot e^{j\varphi_2} .$$

Составим отношения:

$$\frac{|\dot{U}_I|}{|\dot{U}_{II}|} = e^{-\alpha_1 L} ; \quad \frac{|\dot{U}_I|}{|\dot{U}_{II}|} = e^{-\alpha_2 L} .$$

Откуда, $\alpha_1 = \frac{\ln|\dot{U}_{II}| - \ln|\dot{U}_I|}{L} , \quad \alpha_2 = \frac{\ln|\dot{U}_{II}| - \ln|\dot{U}_I|}{L} .$

Что касается определения расстояния между датчиками L , то для этого может использоваться рассмотренный выше фазовый метод. При этом датчики также следует установить по одну сторону от источника колебаний, в том числе и искусственного, например, возникающего при механическом ударе. Пользуясь рис. 2, напряжение на первом датчике выразим в виде:

$$U_I = a \cdot \cos \left[\omega_1 \cdot \frac{X}{V} + \varphi_1 \right],$$

на втором:
$$U_{II} = a \cdot \cos \left[\omega_1 \cdot \frac{X-L}{V} + \varphi_1 \right].$$

Если с помощью преобразования Гильберта по выходу БПФ-фильтров определить значения фаз сигналов частоты ω_1 , то получим:

$$F_1 = \omega_1 \cdot \frac{X}{V} + \varphi_1, \quad F_2 = \omega_1 \cdot \frac{X-L}{V} + \varphi_1.$$

Отсюда,

$$F_1 - F_2 = \omega_1 \cdot \frac{X}{V} - \omega_1 \cdot \frac{X-L}{V} = \omega_1 \cdot \frac{L}{V} \quad \text{или} \quad L = \frac{(F_1 - F_2) \cdot V}{\omega_1}, \quad \text{что}$$

и требовалось показать.

Заметим, что все рассмотренные измерительные процедуры могут быть оптимизированы по методу максимального правдоподобия или наименьших квадратов. Рациональный выбор конкретных технических решений из числа возможных должен опираться на всесторонний анализ реальных сигналов для различных источников акустических колебаний. При этом вместо односигнальных моделей могут рассматриваться многосигнальные ситуации с проверкой альтернативных гипотез по статистическим критериям.

В заключение следует подчеркнуть, что предложенные измерительные алгоритмы являются эффективным дополнением к корреляционным методам контроля и могут быть использованы как автономно, так и совместно с корреляционными методами для повышения информативности последних.

Литература

1. Годлевский В. С., Владимирский А. А. Методика применения корреляционного течеискателя "Коршун". - Киев. 1991. 32 с. (препринт /АН Украины. Ин-т проблем моделирования в энергетике; 91-51)
2. Хохлов Б. Н. Декодирующие устройства цветных телевизоров. - М.: Радио и связь, 1992. С. 90-94.