

Ю. К. Шлык, А. П. Пожитков, Г. С. Кречина

### Электродинамическое моделирование перекачивающей станции как объекта системы трубопроводного транспорта

*Представлено описание электродинамической модели перекачивающей станции. Моделирование велось с использованием метода электродинамических аналогий. Данный метод позволяет применить доступный арсенал методов расчета электрических цепей как аналогов сложных динамических систем, к классу которых относятся системы современных магистральных трубопроводов.*

Теория транспортировки углеводородного сырья по магистральным трубопроводам довольно хорошо разработана. Она позволила установить взаимосвязь между такими основополагающими параметрами данного процесса, как давление, расход, уровень потерь, общие затраты энергии на его реализацию и др. [1]. Реализация мер по снижению энергозатрат — важная научная и практическая задача трубопроводного транспорта.

При несомненной значимости практических результатов, полученных в данном направлении, следует сказать, что роль волновых явлений в трубопроводной системе изучена недостаточно [2, 3, 9, 11].

Обладая высокой степенью информативности, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) спектра гидродинамических шумов позволяет оценить такие важнейшие технико-технологические параметры перекачки среды, как появление негерметичности стенки самого трубопровода; сужение его проходного сечения, вызванного, например, отложениями парафина; износ или поломка деталей и узлов электромеханического комплекса самой перекачивающей станции, а также ряд других обстоятельств. Таким образом, можно предположить, что в составе спектра гидродинамических колебаний (шумов) содержится объективная информация об эффективности выбранного технологического режима работы системы в целом.

В этом смысле исследование АЧХ спектра гидродинамических шумов в трубопроводе приобретает особую значимость.

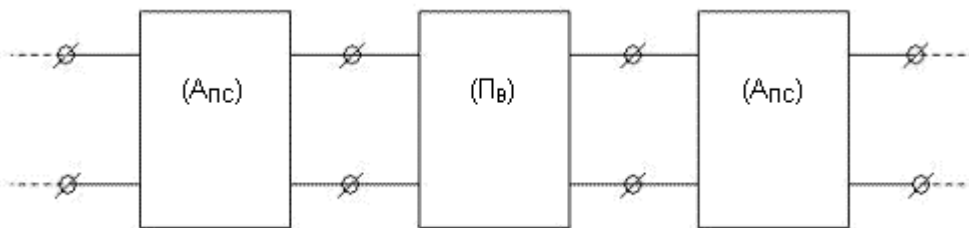
Согласованный режим волноводной системы трубопровода и нагрузки будет означать отсутствие отраженных волн давления и скорости. В этих условиях реализуется максимум мощности, передаваемой в нагрузку, и, как следствие, достигается максимальный КПД системы в целом. При этом затраты энергии на реализацию процесса перекачки нефтепродуктов минимизируются [8].

Электрическая модель трубопровода общеизвестна — это линия с распределенными параметрами. Рассчитать его волновое сопротивление не составляет особого труда. Для согласования требуется знать сопротивление нагрузки трубопровода. Им будет входное сопротивление перекачивающей станции, расчет которого более сложен, чем расчет волнового сопротивления собственно трубопровода.

Данную задачу можно исследовать, используя метод электродинамических аналогий [10]. Фундаментальность метода состоит в том, что одни и те же дифференциальные уравнения описывают процессы гидродинамики, акустики и электричества, различаясь лишь значениями постоянных коэффициентов, входящих в их состав.

Предложенное электромоделирование позволяет применить доступный набор методов расчета электрических цепей [4] как аналогов сложных динамических систем.

С позиции теории электрических цепей такая система будет представлена каскадным соединением активных и пассивных 4-полюсников (рис. 1).



**Рис. 1.** Электрическая модель обобщенной системы магистрального трубопровода:

— пассивный 4-полюсник, аналог собственно трубы (волновода);  
 ный 4-полюсник, представляющий собой перекачивающую станцию (ПС)

Для простоты в цепной схеме не обозначены входные и выходные токи и напряжения 4-полюсников. Модель является двуединой. Она требует самостоятельного решения применительно к каждому из двух

основных блоков, входящих в состав каскадного соединения, ( $\Pi_B$ ) и ( $A_{\text{ПС}}$ ) 4-полюсников.

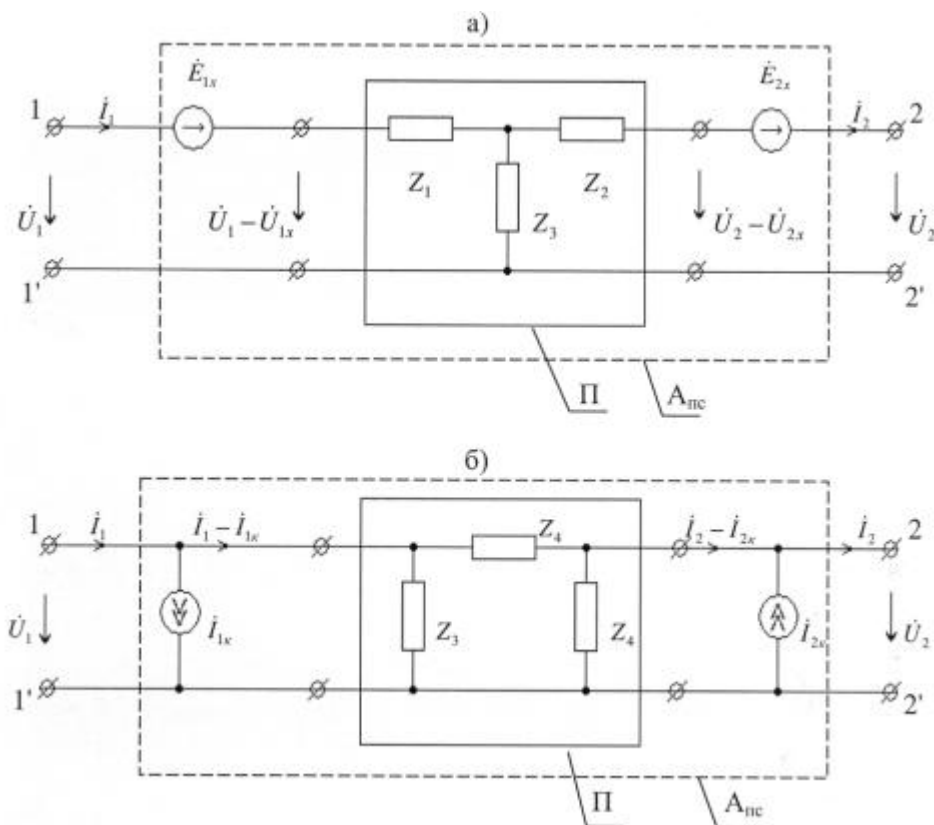
Сопоставляя значимость результатов исследования ( $\Pi_B$ ) и ( $A_{\text{ПС}}$ ) 4-полюсников, можно утверждать, что ( $A_{\text{ПС}}$ ) имеет определяющее влияние. Он моделирует обеспечение процесса движения среды в трубопроводе, в то же время с позиции акустики является наиболее сложным звеном всей системы.

Использование данной модели предполагает следующую систему аналогий: «давление — напряжение», «скорость — электрический ток».

С учетом сказанного выше ( $A_{\text{ПС}}$ ) может быть представлен одной из двух схем замещения [4, 5], изображенных на рис. 2.

На рис. 2:  $Z_1 - Z_4$  — комплексные сопротивления;  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  — комплексные входные, а  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$  — комплексные выходные напряжения и токи для обеих схем; параметры комплексных ЭДС и напряжений с индексами 1х и 2х получены при реализации опытов холостого хода со стороны как входных (1–1'), так и выходных (2–2') зажимов для схемы а); параметры комплексных токов с индексами 1к и 2к получены в ходе опытов короткого замыкания со стороны тех же зажимов для схемы б).

Данные схемы взаимозаменяемы при условии равенства входных ( $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$ ) и выходных ( $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$ ) токов и напряжений. Более того, эквивалентными будут Т- и П-образные схемы замещения пассивных 4-полюсников ( $\Pi$ ), входящие в состав представленных схем активных 4-полюсников ( $A_{\text{ПС}}$ ). В основе этой эквивалентности лежит известное в теории электрических цепей преобразование «звезда — треугольник» [4, 5].



**Рис. 2.** Схемы замещения активного 4-полюсника:

а) — Т-образная с источниками ЭДС; б) — П-образная с источниками тока

Активные 4-полюсники (рис. 2) относятся к классу автономных источников. Для них характерно наличие входных и выходных токов и напряжений даже при отсутствии подключенных к входным и выходным зажимам внешних источников энергии [5].

Базовые системы уравнений А-формы для каждой из представленных схем будут иметь соответствующий вид:

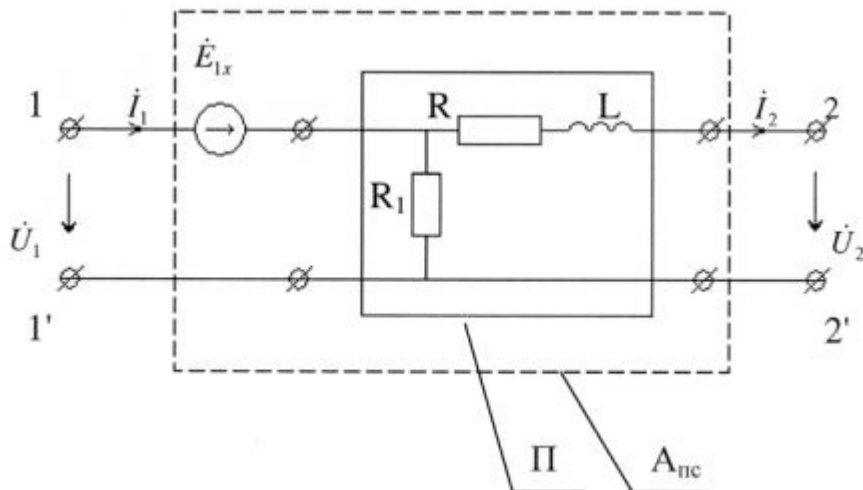
$$\begin{cases} \dot{U}_1 - \dot{U}_{1x} = A(\dot{U}_2 - \dot{U}_{2x}) + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = C(\dot{U}_2 - \dot{U}_{2x}) + D\dot{I}_2, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B(i_2 - i_{2к}), \\ i_1 - i_{1к} = C\dot{U}_2 + D(i_2 - i_{2к}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  — комплексные коэффициенты, определяемые структурой пассивных 4-полюсников ( $\Pi$ ) для каждой из схем.

Базовые схемы замещения некоторого активного 4-полюсника могут видоизменяться при моделировании конкретного динамического объекта.

В рамках поставленной задачи реализуем это применительно к перекачивающей станции (ПС) современного магистрального трубопровода. Соответствующая электрическая схема-аналог изображена на рис. 3.



**Рис. 3.** Эквивалентная схема замещения перекачивающей станции:

$\dot{E}_{tx}$  — обобщенный источник энергии (электропривод с насосом), осуществляющий процесс перекачки среды по трубопроводу;  $R$  — обобщенный параметр потерь энергии в центробежном насосе как гидравлического, так и акустического характера;

$L$  — индуктивность как аналог сужения проходного сечения трубопровода (волновой системы) в насосе [7];  $R_1$  — диссипативный параметр потерь энергии, обусловленный вязкими свойствами среды [6]

На схеме источник ЭДС  $\dot{E}_{tx}$  принимается идеализированным, для него внутреннее сопротивление равно нулю.

Сопоставляя параметры входных и выходных токов и напряжений для схемы рис. 3, заключаем:

$$\dot{U}_2 > \dot{U}_1 \text{ и } i_1 > i_2,$$

что полностью соответствует роли ПС как объекта, выполняющего функции ретранслятора. Работающая станция обеспечивает перепад давления, необходимый для перекачки среды в трубопроводе, реализуя соответствующее неравенство:  $P_2 > P_1$ .

С учетом сказанного запишем систему уравнений  $A$ -формы для схемы, представленной на рис. 3:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_{tx} = A\dot{U}_2 + B i_2 = \dot{U}_2 + (j\omega L + R)i_2, \\ i_1 = C\dot{U}_2 + D i_2 = \frac{\dot{U}_2}{R_1} + i_2 \left(1 + \frac{R + j\omega L}{R_1}\right), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega$  — угловая частота волнового процесса в трубопроводе, задаваемая источником  $\dot{E}_{tx}$ ;  $j = \sqrt{-1}$ .

При этом матрица коэффициентов системы (3) в  $A$ -форме будет выглядеть следующим образом:

$$|A| = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & R + j\omega L \\ \frac{1}{R_1} & 1 + \frac{R + j\omega L}{R_1} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Для матрицы коэффициентов (4) выполняется главное соотношение:

$$AD - BC = 1,$$

которое подтверждает факт автономности активного 4-полюсника для схемы, представленной на рис. 3.

Полученный результат (4) может быть использован при расчете исходной цепной схемы-аналога системы магистрального трубопровода (см. рис. 1). При заданных геометрических параметрах линейной части трубопровода и акустических свойствах среды, которая его заполняет, можно получить аналогичную матрицу коэффициентов эквивалентного пассивного 4-полюсника. После чего задача по расчету всего каскадного соединения цепи (см. рис. 1) решается с использованием известного матричного метода [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Р. А., Немудров А. Г. и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа. М.: Недра, 1988.
2. 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.
3. Бондаренко П. М., Григорьев П. А. Новые методы и средства контроля состояния подземных трубопроводов без их вскрытия. М.: ВНИИОНГ, 1971.
4. Жуховицкий Б. Я., Негневицкий И. Б. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1972. Т. 2. 200 с.
5. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. и др. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 752 с.
6. Исакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
7. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высш. шк., 1976. 448 с.
8. Пожитков А. П., Шлык Ю. К. Влияние волновых процессов в трубопроводе на энергозатраты при транспорте углеводородного сырья // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2004. Вып. 3. С. 125–127.
9. Ромашов В. П. Спектрально-акустический метод диагностики: Опыт внедрения и перспективы // Трубопроводный транспорт нефти. М.: Транспресс, 2002. № 6. С. 11–14.
10. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960. 336 с.
11. Седых А. Д., Велиюлин И. И., Григорьев П. А. Диагностирование и планирование ремонта на магистральных газопроводах. Обзорная информ. Серия: «Транспорт и подземное хранение газа». М.: ВНИИЭГазпром, 1989. 80 с.

*Yu. K. Shlyk, A. P. Pozhitkov, G. S. Kretchina*

#### **ELECTRODYNAMIC SIMULATION OF A BOOSTER STATION AS AN OBJECT OF PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEM**

*The suggested article describes an electrodynamic model of a booster station. The simulation was done using a method of electrodynamic analogs. This method allows to apply the whole classical arsenal of computing methods with regard to electric circuits as analogs of complex dynamic systems covering those of modern main pipelines.*