Ю.К. Шлык, А.И. Плаксин

ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА В ТРУБОПРОВОДЕ С НЕГЕРМЕТИЧНОСТЬЮ

В качестве аналоговой модели трубопровода с негерметичностью предложена соответствующая электрическая цепь. Представлено решение задачи по определению функции переходного процесса в электрической модели трубопровода с негерметичностью при различных вариантах коммутации в зависимости от координаты расположения негерметичности.

Переходный процесс, коммутация, нестационарный режим, негерметичность.

Обнаружение негерметичности стенки магистрального трубопровода — одна из важнейших задач обеспечения его безаварийной эксплуатации. Негативные экологические и экономические последствия возможных разрывов трубопроводных систем очевидны.

В любых ситуациях, включая и несанкционированный режим отбора продукта из трубопровода, процесс происходит «мгновенно». Данный термин заимствован из теории электрических цепей [1] и в дальнейшем будет означать переход в момент времени $t = 0$ режима работы трубопровода из одного стационарного состояния в другое. Чаще всего этот процесс возникает в результате коррозии металла стенки трубы, нарушения герметичности сварных соединений, хотя не исключено и влияние внешних климатических факторов, связанных с сезонной подвижкой грунтов, окружающих тело трубы.

Любое изменение стационарного режима работы сложной динамической системы (трубопровода) неизменно сопровождается развитием переходного процесса [2]. Это и есть нестационарный режим работы данной системы.

Рассмотрим задачу возникновения переходного процесса в газопроводе при возникновении негерметичности в момент времени $t = 0$ применительно к модели, предложенной в работе [3].

На рис. 1 представлена электрическая схема — аналог линейной части газопровода с негерметичностью стенки трубы. Место ее возникновения соответствует включению сосредоточенной индуктивности L_0 [4], которая может располагаться в любом месте координаты длины трубопровода.

Для представленной на рис. 1 электрической модели это поэтапное включение L_0 соответствует ¼, ½ и ¾ общей длины трубопровода, что эквивалентно коммутации ключей K_1, K_2, K_3 соответственно.

Учитывая общеизвестные аналогии: «давление — электрическое напряжение», «расход (скорость движения среды) — электрический ток» [5, 6], отметим, что электрическая схема по рис. 1 соответствует работе линейного участка трубопровода, при которой на входе (1 – $1^{|}$) создается постоянное давление, а на выходе (2 – $2^{|}$) трубопровод заглушен. Это означает, что в нем отсутствует движение продукта, в то время как давление в каждом из сечений одинаково и соответствует величине напряжения $U = E$. В дальнейшем будем считать, что $U = U(t)$, т.е. является реальной временной функцией переходного процесса при поэтапном замыкании ключей в электрической схеме по рис. 1.

Классическое решение задачи по определению функции переходного процесса [1] сводится к выражению вида

$$U = U_{пр} + U_{св}\,, \qquad (1)$$

где $U_{пр}$ — напряжение в электрической цепи по окончании переходного процесса, т.е. принужденный режим;

$U_{св}$ — временная функция собственно переходного процесса, возникающая в момент коммутации (t = 0), т.е. свободный режим.

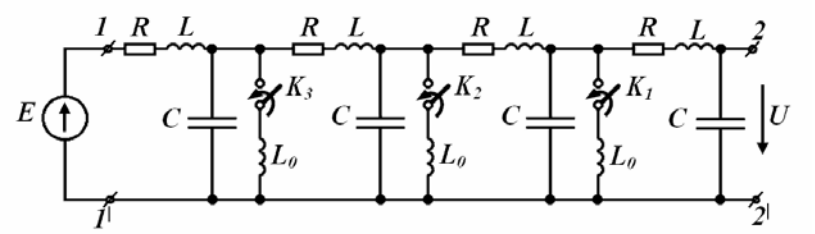

Рис. 1. Электрическая схема — аналог трубопровода с негерметичностью стенки:
E — источник постоянной электродвижущей силы (ЭДС) как аналог перекачивающей станции, создающей рабочее давление в трубопроводе;
Клеммы 1 – $1^{|}$ и 2 – $2^{|}$ — эквиваленты входного и выходного сечения трубопровода;
R, L, C — эквиваленты диссипативно-инерционноупругих свойств среды, заполняющей трубопровод заданной длины (газ, воздух, жидкость и т.д.);
L_0 — сосредоточенная индуктивность как аналог негерметичности заданного диаметра стенки;
K_1, K_2, K_3 — ключи, осуществляющие коммуникацию

Решение задачи о характере временной функции $U_{св}$ является абсолютно значимым, поскольку ее параметры однозначно определяют состояние любой электрической цепи (динамической системы) в плане таких ее основополагающих характеристик, как быстродействие, качество регулирования и устойчивость [2]. В свою очередь, данная задача неразрывно связана с исследованием структуры характеристического уравнения исходной электрической цепи после коммутации, а точнее, его корней. В свете вышеизложенного составим характеристические уравнения для электрической цепи по рис. 1 при замыкании ключей K_1, K_2 и K_3 соответственно.

В приводимых далее соотношениях структура характеристических уравнений представляет собой выражения для функций $Z_{вх}(p)$ относительно зажимов (1 – $1^{|}$) для каждого из названных вариантов коммутаций. При этом p являются корнями искомых характеристических уравнений [1].

Коммутация K_1 (K_2 и K_3 разомкнуты)

$$Z_{вх}^{(1)}(p) = \frac{Z_{11}(p)\cdot\dfrac{1}{pC}}{Z_{11}(p)+\dfrac{1}{pC}} + R + pL, \qquad (2)$$

где

$$Z_{11}(p) = \frac{Z_1(p)\cdot\dfrac{1}{pC}}{Z_1(p)+\dfrac{1}{pC}} + R + pL,$$

$$Z_1(p) = \frac{Z_0(p)\cdot pL_0\cdot\frac{1}{pC}}{Z_0(p)\cdot pL_0 + Z_0(p)\cdot\frac{1}{pC}+\frac{L_0}{C}} + R + pL,$$

$$Z_0(p) = R + pL + \frac{1}{pC}.$$

Коммутация K_2 (K_1 и K_3 разомкнуты)

$$Z_{\text{вх}}^{(2)}(p) = \frac{\frac{1}{pC}\cdot Z_{22}(p)}{Z_{22}(p)+\frac{1}{pC}} + R + pL, \qquad (3)$$

где

$$Z_{22}(p) = \frac{Z_2(p)\cdot pL_0\cdot\frac{1}{pC}}{Z_2(p)\cdot pL_0 + Z_2(p)\cdot\frac{1}{pC}+\frac{L_0}{C}} + R + pL,$$

$$Z_2(p) = \frac{Z_0(p)\cdot\frac{1}{pC}}{Z_0(p)+\frac{1}{pC}} + R + pL.$$

Коммутация K_3 (K_2 и K_1 разомкнуты)

$$Z_{\text{вх}}^{(3)}(p) = Z_{33}(p) + R + pL, \qquad (4)$$

где

$$Z_{33}(p) = \frac{Z_3(p)\cdot pL_0\cdot\frac{1}{pC}}{Z_3(p)\cdot pL_0 + Z_3(p)\cdot\frac{1}{pC}+\frac{L_0}{C}},$$

$$Z_3(p) = \frac{Z_2(p)\cdot\frac{1}{pC}}{Z_2(p)+\frac{1}{pC}} + R + pL.$$

Каждый из представленных алгоритмов свидетельствует, что решения (2), (3) и (4) существенным образом различаются. В свою очередь, это означает, что корни соответствующих им характеристических уравнений различны, как и сами функции $U_{\text{св}}$ при каждом варианте коммутаций, возникающих при замыкании ключей K_1, K_2, K_3.

Данное решение является, безусловно, приближенным, поскольку точность определения негерметичности по длине трубопровода сводится лишь к констатации факта ее возникновения на участке в ¼ длины трубопровода. Тем не менее представленный алгоритм расчета позволяет определить местоположение негерметичности стенки трубопровода с любой степенью точности (1 м и менее). В данном случае речь идет лишь об использовании возможностей современных компьютерных средств.

Проанализировав соотношения (2)–(4) с позиций возможных вариаций параметра L_0, получаем важный вывод. Если принять одно из его предельных значений, а именно $L_0 = \infty$, что соответствует абсолютно герметичному трубопроводу, то решения по каждому из представленных алгоритмов становятся абсолютно идентичными.

Предложенная в данной работе модель трубопровода с негерметичностью и алгоритм по ее расчету объединяют в себе два основополагающих понятия: время (переходный процесс в трубопроводе) и пространство (линейная координата негерметичности стенки трубы).

Очевидно, что изложенные выше теоретические соотношения, как и в работе [7], требуют соответствующего экспериментального подтверждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В.* Основы теории цепей. Изд. 4-е, перераб. М.: Энергия, 1975. 752 с.
2. *Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В.* Теория автоматического управления техническими системами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. 492 с.
3. *Шлык Ю.К., Васильев Д.А., Кречина Г.С.* Электроакустическое моделирование линейной части магистрального газопровода // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС РАН, 2005. № 4. С. 20–23.
4. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. М.: Высш. шк., 1978. 448 с.
5. *Olson H.F.* Dynamical analogies. N.Y.:, D. Van Nostrand Co., 1943. (Рус. пер.: Ольсон Г. Динамические аналогии. М.: ИЛ, 1997).
6. *Чарный И.А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1975. 296 с.
7. *Шлык Ю.К., Плаксин А.И.* Электромоделирование переходных процессов // Изв. вузов. Нефть и газ. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2011. № 4. С. 79–82.

Yu.K. Shlyk, A.I. Plaksin

ELECTRPMODELING OF A NONSTEADY PROCESS IN A PIPELINE WITH LEAKAGE

As an analog of a pipeline with leakage, the paper suggests a corresponding electric circuit. The authors present a solution of a problem on determining a function of a transient process in an electric model of a pipeline with leakage under different variants of commutation, depending on a leakage location.

Transient process, commutation, nonsteady state, leakage.