

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ

Мусаев В.Г.

Азербайджанский технический университет, г. Баку

Структурные архитектурные модели, построенные на основе решений исходных уравнений с совмещением дискретного и системно-структурного методов, расчленяются на информативные элементарные звенья. Далее, изучив операторы этих звеньев, не обращаясь к исходным уравнениям, находят операторные передаточные функции и рекуррентные соотношения между характерными координатами структурной архитектурной модели, проводится анализ и синтез структуры системы.

Показано, что построенные структурные архитектурные модели являются удобным способом описания и анализа взаимосвязанных процессов в сложных системах с распределенными параметрами.

Интенсивное развитие различных отраслей промышленности сопровождается активным внедрением систем с распределенными параметрами со сложной технологической и геометрической топологией. К этим системам, в первую очередь, следует отнести трубопроводные системы транспорта нефти, нефтепродуктов и газа, линии электропередачи, колонны бурильных труб и штанг глубинных насосов и т.д.

Многоуровневость данных систем предъявляет особые требования по выработке тактики и стратегии принятия решений на всех уровнях иерархической структуры управления с целью обеспечения надежности выполнения технологических задач, предотвращения нештатных ситуаций, идентификации и диагностирования состояния объектов и самой системы в целом, а также обеспечение требуемых параметров изменяющихся технологических режимов работы системы.

Решение данной проблемы в основном сводилось к изучению отдельных объектов системы безотносительно их коррелированности, практическое применение которых показало, что они искажают не только количественные характеристики протекающих процессов, но и качественные картины [1]. Поэтому результаты исследований были ненадежны и несли больше рекомендательный характер, что требовало коррекции принятия решения в каждой ситуации, которое во многом зависело от профессиональных навыков оператора.

Большая роль при принятии решения с другой стороны, отводится диагностированию состояния системы, ее объектов, идентификации их параметров, адаптации их к реальным условиям эксплуатации. При этом решение в основном сводилось к восстановлению параметров по поведению системы, наблюдаемых в прошлом. Очевидно, что принятие решений по обеспечению требуемых параметров системы или отдельных ее объектов, адаптированных к прошлому состоянию системы, ненадежно.

В настоящее время развивающиеся методы системно-структурного анализа [2,3] успешно используются в получение детальной и обобщенной информации об исследуемых процессах в разработке путей по целенаправленному синтезированию структуры сложных систем, а также методов нестационарных измерений с целью реконструкции постоянных систем.

Данная проблема сводится к адаптации математических моделей к реальным условиям посредством идентификации параметров системы с целью выбора правильных решений, а также к решению ряда обратных и псевдообратных задач на основе разработанных нами расчетных архитектурных моделей управления.

Существующая схема анализа и расчета функционирования нефтепроводных систем базируется на решении дифференциальных уравнений движения жидкости при соответствующих краевых условиях, которые позволяют вычислить стационарное, нестационарное давление и расход нефти [4]. Однако, во многих случаях этого недостаточно. Они не всегда позволяют провести детальный анализ происходящих физических процессов, малопригодны для решения таких задач, как коррекция и синтез систем с наперед заданными процессами формирования полей давления, а также некоторых задач, связанных с управлением процесса, решением прямых, обратных и псевдообратных задач [5].

Исходя из вышеизложенного, разработка обобщенной идеологии расчета и анализа поведения систем с распределенными параметрами, идентификация систем с распределенными параметрами, с распределенными базами данных к импульсным системам, с применением дискретного и системно-структурного метода, выработка технологии адаптации расчетных моделей к реальным условиям эксплуатации рассматриваемых систем безотносительно к

геометрической и динамической топологии, является актуальной проблемой для исследования и анализа динамических процессов в магистральных трубопроводных системах.

В связи с этим, в данной статье рассмотрено применение системно-структурного анализа [2] совместно с дискретным методом [6] для структурного анализа динамических процессов в магистральных нефтепроводах при разработке технологических основ управления сложными магистральными трубопроводными (МНП) системами. Совмещение дискретного и системно-структурного метода позволяет унифицировать задачи в сложных системах с распределенными параметрами с целью выработки единых схем анализа и расчета параметров потока. При этом решение задачи динамики рассматривается как некоторая система, представленная структурной схемой. Элементами структурной схемы являются математические операторы, устанавливающие правила преобразования некоторых воздействий на объект в порождаемую ими реакцию.

В данной работе в качестве математического аппарата используются двукратное и дискретное преобразование Лапласа. При переходе от изображения к оригиналу функций применяются рекуррентные соотношения [6].

Рассмотрим некоторые задачи, связанные со структурным анализом динамических процессов в магистральных нефтепроводных системах с различными начальными и граничными условиями.

Для построения структурных архитектурных моделей динамических процессов в магистральном нефтепроводе с известным изменением давления в конечной точке можно пользоваться уравнением, полученным на основе дискретного метода [1].

При этом структурная архитектурная модель будет иметь вид:

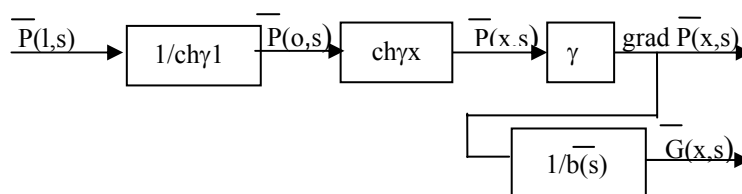


Рисунок 1. Структурная модель трубопровода при известном распределении давления в конечной точке

В структурной схеме, приведенной на рис.1, информативное звено, показанное на рис.2, устанавливает жесткую связь между градиентом давления и расходом.

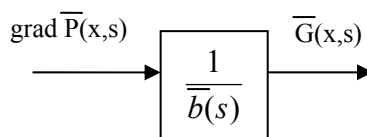


Рисунок 2. Информативное звено, устанавливающее связь между $\text{grad } P(x,s)$ и $G(x,s)$

Согласно рис.2

$$\bar{G}(x,s) = \frac{1}{\bar{b}(s)} \text{grad } \bar{P}(x,s), \quad (1)$$

где $\bar{b}(s) = \sqrt{\frac{sk_1 + k_2}{sk_3}}$.

Уравнения (1) в дискретной форме, согласно [1]

$$\frac{e^q}{e^q - 1} G^*(\delta, q) = \alpha_3 K_3^*(q) \text{grad } \bar{P}(\delta, q),$$

или в области оригиналов

$$G[\delta, n] = \alpha_3 \sum_{m=0}^n K_3[m] \text{grad } P[\delta, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} G[\delta, m] \cdot 1[n-m], \quad (2)$$

где $K_3[n] = e^{-\alpha_2 \frac{nT}{\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2}{2} n \frac{T}{\lambda}\right)$ - оригинал функции $\bar{K}_3(s) = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s}{s + \alpha_2}}$,

определяемой по [7],

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{k_3}{k_1}}, \alpha_2 = \frac{k_2}{k_1}, \alpha_3 = \frac{1}{\alpha_1}.$$

Связь между давлением в некотором сечении x_1 и любом другом сечении x определяется операторной функцией звена, показанного на рис.3.

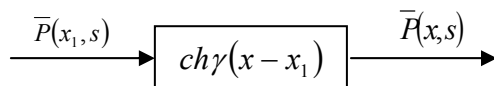


Рисунок 3. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями в точках x и x_1 .

Согласно рис. 3

$$\bar{P}(x,s) = \text{ch } \gamma(x - x_1) \bar{P}(x_1,s) \quad (3)$$

Уравнение (3) согласно теореме свертки [7], в области оригиналов имеет вид:

$$P[\delta_1, n] = 2 \sum_{m=0, 5\lambda(\delta-\delta_1)}^n K_1[m] P[(\delta-\delta_1), n-m] - \sum_{m=\lambda\delta}^n K_2[m] P[\delta_1, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P[\delta_1, m] \cdot 1[n-m], \quad (4)$$

где $K_1[n], K_2[n]$ оригиналы функций $\bar{K}_1(s) = \frac{1}{s} e^{-\alpha_1 \sqrt{(s+\alpha_2)s}(x-x_1)}$ и $\bar{K}_2(s) = \frac{1}{s} e^{-2\alpha_1 \sqrt{(s+\alpha_2)s}(x-x_1)}$.

Оригиналы функций $\bar{K}_1(s), \bar{K}_2(s)$ согласно [8] будет

$$K_{12}[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < (\delta - \delta_1)\lambda \\ e^{-\frac{\alpha T}{2}} + \frac{\alpha T}{2} \sum_{m=\lambda(\delta-\delta_1)}^n e^{-\frac{\alpha T m}{2\lambda}} \frac{I_1\left(\frac{\alpha T}{2\lambda}\right) \sqrt{m^2 - [(\delta - \delta_1)\lambda]^2}}{\sqrt{m^2 - [(\delta - \delta_1)\lambda]^2}} & \text{при } n \geq (\delta - \delta_1) \end{cases}$$

$$K_{21}[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < (\delta - \delta_1)\lambda \\ e^{-\alpha T} + \alpha T \sum_{m=\lambda(\delta-\delta_1)}^n e^{-\frac{\alpha T m}{\lambda}} \frac{I_1\left(\frac{\alpha T}{\lambda}\right) \sqrt{m^2 - [(\delta - \delta_1)\lambda]^2}}{\sqrt{m^2 - [(\delta - \delta_1)\lambda]^2}} & \text{при } n \geq (\delta - \delta_1) \end{cases}$$

$$\alpha = \alpha_1, \alpha_2.$$

Связь между градиентом давления в некотором сечении x и давлением в этом сечении выражается передаточной функцией звена, показанного на рис.4.

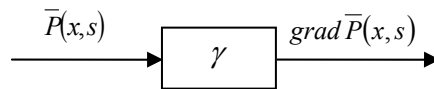


Рисунок 4. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями и градиентом давления.

Согласно рис. 4

$$\text{grad } \bar{P}(x, s) = \gamma \bar{P}(x, s), \quad (5)$$

где $\bar{K}_5(s) = \frac{1}{s} \sqrt{(s+\alpha_2)s}$.

Применяя дискретное преобразование Лапласа к уравнению (5), согласно теореме свертки [7] получим

$$\text{grad } P[n] = \sum_{m=0}^n K_5[m] P[n-m, \delta] - \sum_{m=0}^{n-1} \text{grad } P[\delta, m] \cdot 1[n-m], \quad (6)$$

где $K_5[n] = e^{-\frac{\alpha n T}{2\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha n T}{2\lambda}\right) + \alpha \sum_{m=0}^n e^{-\frac{\alpha m T}{2\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha m T}{2\lambda}\right)$ - оригинал функции $\bar{K}_5(s)$.

На рис.5. приведено звено структурной схемы рис.1, передаточная функция которого устанавливает связь между $\bar{P}(0, s)$ и $\bar{P}(l, s)$.

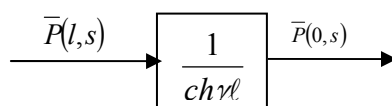


Рисунок 5. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями на участке $x=0$ и $x=l$

Из рис.5 получим, что

$$\bar{P}(0, s) = \frac{1}{ch\gamma l} \bar{P}(l, s). \quad (7)$$

Согласно дискретному преобразованию и теореме свертки уравнение (7) в области оригиналов будет иметь вид:

$$P[0, n] = 2 \sum_{m=0,5\lambda}^n K'_5[m] P[\delta, n-m] \sum_{m=\lambda}^n K'_4[m] P[0, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P[0, m] 1[n-m], \quad (8)$$

Где

$$K'_4[n] = \begin{cases} 0, \text{ и } \delta \text{ } n < \lambda \\ e^{-\alpha T} + \alpha T \sum_{m=\lambda}^n e^{-\frac{\alpha T}{n} m} \frac{I_1(\alpha T \sqrt{m^2 - \lambda^2})}{\sqrt{m^2 - \lambda^2}}, & n > \lambda \end{cases}$$

$$K'_5[m] = \begin{cases} 0, \text{ и } \delta \text{ } n < 0,5\lambda \\ e^{-\frac{1}{2}\alpha T} + \frac{1}{2}\alpha T \sum_{m=\lambda}^n e^{-\frac{1}{2}\frac{\alpha T}{n} m} \frac{I_1\left(\frac{1}{2}\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{m^2 - 0,5\lambda^2}\right)}{\sqrt{m^2 - 0,5\lambda^2}}, & n < 0,5\lambda' \end{cases}$$

оригиналы функций $K'_4(s) = \frac{1}{s} e^{-2\gamma l}$, $K'_5(s) = \frac{1}{s} e^{-\gamma l}$.

Известно, что $ch\gamma l = \frac{1}{2}(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l})$, тогда $\frac{1}{ch\gamma l} = \frac{2e^{-\gamma l}}{1 + e^{-2\gamma l}}$ и с учетом рис. 5 можно

представить, что давление в начальной точке связано с давлением в конечной точке оператором $2e^{-\gamma l} / (1 + e^{-2\gamma l})$. Звено, характеризуемое таким образом, может быть преобразовано в более простое звено, охваченной обратной связью, которое показано на рис. 6. Такой подход позволяет увеличивать информативность структурной схемы.

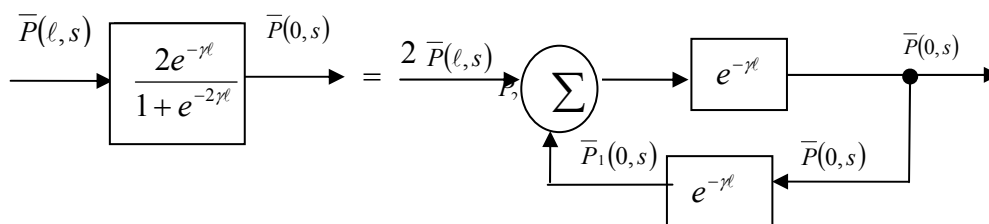


Рисунок 6. Эквивалентное преобразование звена

Согласно рис. 6 можно написать:

$$\bar{P}_2(0, s) = 2\bar{P}(\ell, s) + \bar{P}_1(0, s) \quad (9)$$

$$\bar{P}_1(0, s) = e^{-\gamma\ell} \cdot \bar{P}(0, s)$$

или в дискретной форме:

$$\frac{e^q}{e^q - 1} P_1^*(0, q) = \bar{K}_s^{-1}(s) \bar{P}(0, s),$$

а в области оригиналов

$$P_1[0, n] = \sum_{m=0, 5\lambda\delta}^n K'_s[m] P[0, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_1[0, m] \cdot 1[n-m] \cdot \quad (10)$$

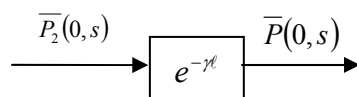


Рисунок 7. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями $\bar{P}(0, s)$ и $\bar{P}_2(0, s)$

Согласно рис. 7

$$P[0, n] = \sum_{m=0, 5\lambda\delta}^n K'_s[m] \cdot P_2[0, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P[0, n] \cdot 1[n-m] \quad (11)$$

Решение прямой задачи, связанное с определением $P(0, t)$, согласно структурной схеме (рис. 1) имеет вид (7). Откуда после некоторых промежуточных математических выкладок $P[0, n]$ определяется рекуррентным соотношением (8). Для псевдообратной задачи, связанной с определением $\bar{P}(\ell, t)$ имеем:

$$\bar{P}(\ell, s) = ch\gamma\ell \bar{P}(0, s). \quad (12)$$

Уравнение (12) после некоторых промежуточных преобразований в области оригиналов имеет вид:

$$P[\delta, n] = \sum_{m=0}^n P[0, m] \cdot 1[n-m] + \sum_{m=0, 5\delta\lambda}^n K_{20}[m] P[0, n-m] - 2 \sum_{m=\delta\lambda}^{n-1} P[\delta, m] K_{19}[n-m] \quad (13)$$

Решение прямой задачи связанное с определением $P(x, t)$ согласно структурной схеме (рис.1.) имеет вид:

$$\bar{P}(x, s) = ch\gamma x \bar{P}(0, s), \quad (14)$$

откуда согласно дискретного метода и теоремы свертки

$$P[\delta, n] = \sum_{m=0}^n P[0, m] \cdot 1[n-m] + \sum_{m=0, 5\delta\lambda}^n K_{20}[m] P[0, n-m] - 2 \sum_{m=\delta\lambda}^{n-1} P[\delta, m] K_{19}[n-m] \quad (15)$$

Для псевдообратной задачи имеем

$$\bar{P}(0, s) = \frac{1}{ch\gamma x} \bar{P}(x, s), \quad (16)$$

или в области оригиналов

$$P[0, n] = 2 \sum_{v=0, 5\delta\lambda}^n K_{22}[m] P[\delta, n-m] - \sum_{m=\delta\lambda}^n K_{21}\{m\} P[0, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P[0, m][n-m], \quad (17)$$

Где $K_{19}[n], K_{20}[n], K_{21}[n], K_{22}[n]$ – соответственно оригиналы изображений $\bar{K}_{19}(s) = \bar{K}_{22}(s) = \frac{1}{s} e^{-\gamma x}$, $\bar{K}_{20}(s) = \bar{K}_{21}(s) = \frac{1}{s} e^{-2\gamma x}$ определяемые по таблице изображений [8].

Структурные архитектурные модели как модель физического процесса могут быть одним из удобных способов описания и анализа взаимосвязанных процессов. На основании структурных архитектурных моделей можно написать уравнения звена или группы звеньев, что позволяет устанавливать связь между коэффициентами и переменными уравнений. Составленные таким образом структурные архитектурные модели позволяют визуализировать взаимодействия и преобразования давления и расхода, являются информативной математической моделью динамических процессов в магистральных нефтепроводных системах. В целом структурные архитектурные модели отображают непрерывную информации о состоянии объекта. При необходимости, перейдя в область оригиналов можно получить приближенную или точную информации в текущий момент времени.

Исходя из вышеизложенного, изучив методы построения структурных архитектурных моделей, их преобразование, можно повысить информативность структурных архитектурных моделей, формулировок и решений прямых, обратных и псевдообратных задач. Исследуя физический смысл операторных передаточных функций и их оригиналов, отдельных звеньев структурных архитектурных моделей, можно решать задачи идентификации, анализа и синтеза сложных систем с распределенными параметрами.

Литература

1. Мусаев В.Г. Сложные системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Баку, Элм, 2004, 301с.
2. Шашков А.Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение. М.: Энергоатомиздат, 1983, 280с.
3. Роппорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003, 298с
4. Гусейн-заде М.А., Юфин В.А. Методы расчета неустановившегося движения нефтепродуктов и нефтей в магистральных трубопроводах с промежуточными насосными станциями. М.: Недра, 1973, 72 с.
5. Рустамов К.Э., Мусаев В.Г. Системно-структурный анализ гидродинамических процессов в магистральных нефтепроводных системах // Изв. АН Азерб. Серия “Наука о Земле”, 1991, №1,2, с.123-127
6. Кадымов Я.Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами. М.: Наука, 1968, 192 с.
7. Микусинский Я.Н. Операционное исчисление. М.: Ил. 1956, 380 с.
8. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965, 465 с.