

$Re_{g,s}$ — число Рейнольдса относительного движения фаз;
 t — время;
 T_i — температура i -ой фазы ($i = g, s$);
 v_i — скорость i -ой фазы ($i = g, s$);
 x — пространственная переменная.

α_i — объемное содержание i -ой фазы ($i = g, s$);
 Δt — шаг счета по времени;
 Δt^{KFL} — шаг счета по времени, определяемый условием Куранта-Фридрихса-Леви;
 Δx — шаг счета по пространственной переменной;
 λ_g — коэффициент теплопроводности;
 μ_g — динамическая вязкость;
 ρ_i — приведенная плотность i -ой фазы ($i = g, s$);
 ρ_i^0 — истинная плотность i -ой фазы ($i = g, s$);
 τ — масштаб времени задачи;
 $\tau_{T,i}$ — характерное время изменения температуры i -ой фазы ($i = g, s$);
 $\tau_{T,s}^{(fil)}, \tau_{T,s}^{(in)}$ — характерные времена изменения температуры частиц в фильтрационном и инерционном режимах движения;
 $\tau_T^{(St)}$ — характерное Стоксово время изменения температуры частицы;
 $\tau_{v,i}$ — характерное время изменения скорости i -ой фазы ($i = g, s$);
 $\tau_{v,g}^{(fil)}, \tau_{v,g}^{(in)}$ — характерные времена изменения скорости в фильтрационном и инерционном режимах движения;
 $\tau_v^{(St)}$ — характерное Стоксово время изменения скорости частицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. Ивандаев А. И. Об оценке характерных времен динамического и теплового взаимодействия фаз в задачах волновой динамики газовзвесей // ПМТФ. 1985. № 2. С. 102-106.
3. Kutushev A. G. Non-stationary shock waves in two-phase gas-particle or gas-droplet mixtures. Saint-Petersburg: Nedra, 2003. 118 p.
4. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра, 2003. 284 с.
5. Ergun, S. Fluid flow through packed columns // Chemical Engineering. 1952. V. 48. № 2. P. 89-94.

*Евгений Сергеевич ОХОТНИКОВ —
 ассистент кафедры программного обеспечения*

УДК 519.711.3, 519.872

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА В НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ СФЕРЕ

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается подход к моделированию распределенных систем мониторинга с помощью методов теории массового обслуживания и имитационного моделирования.

The subject of the article is modeling of distributed monitoring systems with methods of queueing theory and simulation

Под мониторингом (от англ. monitor — контролировать, проверять) понимают специально организованное, систематическое наблюдение за состоянием объектов, явлений, процессов с целью их оценки, контроля, прогноза.

Системы мониторинга достаточно широко применяются в промышленном производстве. Они особенно актуальны, если предприятие представляет потенциальную угрозу людям или экологии, или если высок риск больших финансовых потерь из-за нарушений в ходе технологических процессов, что имеет место в нефтегазодобывающей отрасли. Из-за специфики данной отрасли системы мониторинга обычно являются территориально распределенными и имеют сложную иерархическую структуру.

Жизненный цикл систем мониторинга состоит из этапов, существенно отличающихся по решаемым задачам, степени детализации и полноте описания системы. Представляется целесообразным применять структурное и аналитическое моделирование при укрупненном проектировании системы. Имитационное моделирование хорошо подходит для решения задач проектирования подсистем, внедрения, эксплуатации, обучения персонала.

При аналитическом моделировании данная система мониторинга может быть классифицирована как сеть массового обслуживания (СМО), то есть сведена к модели марковских или полумарковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем. Действительно, в рамках теории массового обслуживания события, возникающие в системе, могут быть интерпретированы как заявки, устройства мониторинга — как накопители, процесс передачи информации по каналам связи и ее обработка — как обслуживание заявок в отдельной системе массового обслуживания (СМО).

Обозначим через Γ сеть обслуживания, которая в достаточно общем виде определяется следующим набором параметров [1]:

$\Gamma = \langle L, K, A, W, T, \bar{r}, \bar{D}, \mu, \bar{\pi} \rangle$, где L — число СМО, входящих в состав сети (C_i — система с номером i); K — число классов требований в сети. (c_i — класс требований с номером i); A — матрица λ_{ij} интенсивностей потоков внешних требований класса c_i , поступающих в систему C_j ; \bar{W} — вектор типов функций распределения длительности обслуживания в C_j ; T — маршрутная матрица вероятностей перехода требований из C_i в C_j ; \bar{r} — вектор числа однотипных обслуживающих приборов в C_j ; \bar{D} — вектор дисциплин обслуживания в C_j ; μ — матрица μ_{ij} функций интенсивности обслуживания требования c_i в C_j ; $\bar{\pi}$ — вектор π_i приоритетов обслуживания для c_i .

Необходимо отметить, что для систем мониторинга нефтегазовой отрасли характерна проблема «последней мили», то есть основные проблемы возникают при сборе информации с первичных устройств мониторинга. Дальнейшая передача и обработка информации обычно осуществляется с помощью высокопроизводительных каналов связи и серверного оборудования. Поэтому часто возможно рассматривать только первый, проблемный участок сети массового обслуживания, то есть упростить модель до системы массового обслуживания $S = \langle A, B, m, K, M \rangle$, параметрами которой являются соответственно: распределение промежутков времени между соседними требованиями и времени их обслуживания, число обслуживающих приборов, емкость накопителя и количество источников нагрузки. В случае отсутствия последних двух параметров предполагается, что число их сколь угодно велико.

Применение подходов теории массового обслуживания дает возможность получить аналитические решения для искомых характеристик системы. Однако для этого процессы в системе должны соответствовать ряду требований и ограничений.

Наиболее простые результаты в теории массового обслуживания получены для систем $M/M/1$ (1-канальных с пуассоновским потоком и экспоненциальным распределением времени обслуживания). Однако в системах мониторинга

для процесса поступления заявок от элементарного источника данных не выполняются требования стационарности и ординарности. В работах [2, 3] показано, что совокупность большого числа часто пуассоновских процессов ведет себя как простейший пуассоновский процесс. Для систем мониторинга наличие значительного количества источников, в совокупности образующих общий поток заявок, является типичной ситуацией. Гипотеза о совпадении наблюдаемого потока с простейшим может быть проверена с помощью критерия χ^2 [4, 5]. Подсчитаем количество периодов времени N_k одинаковой длиной t , за каждый из которых было получено соответственно k событий. Рассчитаем выборочное среднее количество событий и интенсивность входящего потока

$$a = \frac{1}{N} \sum_k k N_k; \quad N = \sum_k N_k. \quad \lambda \approx \frac{a}{t}$$

Затем вычислим величину χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_k \frac{(N_k - N p_k)^2}{N p_k}; \quad p_k = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$$

Используя полученное значение, по таблице распределения χ^2 определяем вероятность того, что наблюдаемое распределение является пуассоновским.

Значительно сложнее обстоит дело с распределением времени обслуживания заявки, то есть передачи информации по каналам связи. Данный процесс является стационарным, но обладает последствием. Действительно, часто время передачи информации через канал связи практически детерминировано зависит от скорости канала и объема информации, хотя и может возрасти из-за случайных помех. Приняв для упрощения гипотезу о детерминированном времени обслуживания, получаем возможность исследовать нашу систему на модели $M/D/1$. При необходимости случайность передачи информации может быть учтена в модели $M/G/1$, где G — случайный процесс общего вида.

С помощью модели $M/G/1$ или ее частного случая $M/D/1$ можем получить основные характеристики системы мониторинга в установившемся режиме работы. Наиболее важными из них являются средние длительности ожидания в очереди W , среднее полное время нахождения заявки в системе T , среднее количество заявок в очереди \bar{N}_q .

Обозначим τ_n момент поступления в систему требования C_n , $t_n = \tau_n - \tau_{n-1}$ — интервал между требованиями C_n и C_{n-1} , x_n — время обслуживания требования C_n , w_n — время ожидания в очереди, $s_n = w_n + x_n$ — полное время пребывания в системе. Также определим обозначения для их средних значений:

$\bar{t} = E[t]$ — среднее время между требованиями, $\lambda = 1/\bar{t}$ — интенсивность поступления требований в систему;

$\bar{x} = E[x]$ — среднее время обслуживания, $\mu = 1/\bar{x}$ — интенсивность обслуживания;

$W = E[w]$ — среднее время ожидания в очереди;

$T = E[s]$ — среднее время нахождения в системе.

Тогда для случая произвольной одноканальной системы обслуживания имеем:

$\rho = \lambda \bar{x}$ — коэффициент использования системы;

$\bar{N} = \lambda T$ — среднее число требований в системе (формула Литтла)

$\bar{N}_q = \lambda W$, $\bar{N}_q = \bar{N} - \rho$ — среднее число требований в очереди

Для системы M/D/1, то есть с пуассоновским входящим потоком и детерминированным временем обслуживания имеем :

$$\bar{q} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \quad W = \frac{\rho \bar{x}}{2(1-\rho)}$$

Для более общей системы M/G/1 с произвольным распределением времени обслуживания имеем:

$C_B = \frac{\delta_B}{\bar{x}}$ — коэффициент вариации времени обслуживания, где δ_B^2 — дисперсия времени обслуживания

$$\bar{N} = \rho + \rho^2 \frac{1 + C_B^2}{2(1-\rho)} \quad T = \bar{x} \left(1 + \rho \frac{1 + C_B^2}{2(1-\rho)} \right) \quad W = \bar{x} \rho \frac{1 + C_B^2}{2(1-\rho)}$$

(формула Полячека-Хинчина)

Однако есть ряд особенностей систем мониторинга, усложняющих получаемые аналитические модели и затрудняющих процесс исследования:

- множественность накопителей. Однако в модели рассматривается совокупная очередь, что делает невозможным исследование весьма важных характеристик отдельных очередей;

- недетерминированное в общем случае время обслуживания одной заявки. При этом время обслуживания единичной заявки зависит от общего объема пакета. Следствием этого является взаимная зависимость среднего времени обслуживания заявки и количества заявок, ожидающих обслуживания;

- наличие корреляционных связей между временами поступления заявок, поступающих от различных элементарных источников, что может приводить к нестационарности потока.

Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность достичь очень высокой степени подобия модели и объекта. При решении задачи имитационного моделирования системы мониторинга автором было предложено два подхода, различающихся в первую очередь достигаемой степенью подобия модели объекту. Это позволяет использовать их на различных этапах жизненного цикла моделируемой системы мониторинга.

Первый подход достаточно близок к аналитической модели и фактически является способом нахождения ее характеристик методом имитационного моделирования. Это позволяет учесть следующие аспекты:

- различные распределения входящих потоков от каждого элементарного источника, в том числе детерминированные и нестационарные процессы;

- наличие отдельной очереди заявок для каждого устройства мониторинга в отличие от единой очереди в более простой аналитической модели;

- неординарность процесса обслуживания, то есть пакетную, практически одновременную передачу по каналам связи блока событий;

- недетерминированное в общем случае время обслуживания одной заявки, зависящее от количества обрабатываемых в рамках одного пакета заявок;

- необходимость учитывать в ходе моделирования возможности возникновения кратко- и среднесрочных сбоев в процессе обслуживания, например, возникающих из-за помех в канале связи.

Достигнутая степень адекватности модели и объекта достаточна для получения представлений о работе системы мониторинга в целом, но не позволяет учесть нюансы работы отдельных подсистем и алгоритмов вследствие значительных отличий между программным и алгоритмическим обеспечением систем мониторинга и имитации.

Сущность второго предлагаемого автором подхода к имитационному моделированию систем мониторинга состоит в комбинировании имитационного и натурального экспериментов. При этом для имитации используется фактически сама система мониторинга, в состав которой вводятся отдельные имитационные элементы. Такими элементами могут быть:

- каналы связи, для которых имитируется уровень надежности и пропускная способность;
- первичные устройства мониторинга, для которых имитируются различные алгоритмы мониторинга, в том числе с обратной связью;
- контролируемые технологические процессы, для имитации которых могут применяться как специализированные пакеты имитационного моделирования технологических процессов, так и детальная история их изменения с реального объекта.

Данный метод наиболее удобен при анализе возможностей развития существующей системы. Другой важной областью его применения является тестирование как отдельных компонент и алгоритмов, так и всей системы в целом до запуска ее на реальном объекте.

При имитационном моделировании важна оценка достоверности полученных результатов, то есть получение не только средних значений характеристик, но и их дисперсий, доверительных интервалов. В [5] утверждается, что при повторных реализациях характеристики систем в установившемся состоянии распределены приближенно по нормальному закону. Следовательно, можно использовать статистику Стьюдента для построения доверительного интервала в виде $(\bar{x} \pm t_{\alpha} s_x / \sqrt{n})$, где s_x — стандартное отклонение, вычисленное по единичным реализациям x_i ($i = 1, \dots, n$).

Можно выделить отдельный класс систем мониторинга с обратной связью, то есть способных оказывать управляющие воздействия на контролируемые технологические процессы. Исследование характеристик таких систем мониторинга является не единственной задачей, для решения которой можно использовать описываемый комбинированный метод имитационного моделирования. Автором был предложен еще один способ применения имитационных моделей, основанный на достигаемой высокой степени подобия моделируемой системе. Речь идет о применении таких моделей в качестве обучающего тренажера.

Другим способом использования комбинированной имитационной модели, во многом близким тренажу, является отладка алгоритмов мониторинга, особенно с обратной связью, например, регулирующих или противоаварийных.

Модель послужила основой для проектирования системы, программная реализация которой была внедрена на нескольких подразделениях двух крупных нефтяных компаний Тюменской и Пермской областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Днебат С. А. Применение сетей массового обслуживания для исследования процессов передачи видеопотоков в пакетных сетях : Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 147 с. РГБ ОД, 61:05-5/729.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

3. Хинчин А. Я. Математические методы теории массового обслуживания. В кн.: Труды математического института им. В. А. Стеклова. М.: Изд. АН СССР, т. 49, 1966. 122 с.
4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 418 с.
5. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. Вып. 1. М.: Статистика, 1978. 223 с.

Умаржон Маллабоевич МАЛЛАБОЕВ —
зав. кафедрой физики и методики преподавания
физики ТГПИ им. Д. И. Менделеева,
доктор физико-математических наук, профессор

Виктор Иванович НОВОСЕЛОВ —
декан факультета физики и информатики
ТГПИ им. Д. И. Менделеева, кандидат
физико-математических наук, доцент

Наталья Николаевна ПЕТУХОВА —
аспирант кафедры физики и методики
преподавания физики ТГПИ
им. Д. И. Менделеева

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНО АНИЗОТРОПНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЦИКЛИЧЕСКИМИ ФРАГМЕНТАМИ В МОЛЕКУЛЕ

АННОТАЦИЯ. Исследовано влияние полярности циклических фрагментов молекул на диэлектрические свойства нематических жидких кристаллов, молекулы которых имеют одинаковые концевые группы.

The authors research the influence of cyclic molecule fragments polarity upon dielectric properties of nematics whose molecules have similar end groups.

Молекулы большинства известных термотропных жидких кристаллов (ЖК) содержат циклические фрагменты (бензольные, циклогексановые, пиридиновые и др.). Вариация их числа и полярности в молекулах ЖК приводит к изменению температур фазовых переходов, интервалов существования мезофаз, диэлектрических свойств (анизотропии, дисперсии) [1]. Установление закономерностей, связанных с влиянием циклических фрагментов и их полярности на диэлектрические свойства вещества, находящегося в жидкокристаллическом и изотропно-жидком состояниях, является актуальным.

Для проведения исследований были выбраны объекты, молекулы которых содержат разные циклические фрагменты, но имеют одинаковые концевые группы: 4-н-пентил-4'-цианобифенил (ПЦБ), пентил-4-(4'-цианофенил) циклогексан (ЦФЦГ) и 5-(4-пентилфенил)-2-(4-цианофенил) пиридин (ПФЦФП). Структурные формулы молекул веществ, температурные интервалы существования мезофаз и некоторые молекулярные характеристики приведены в табл. 1.

Были проведены измерения главных значений диэлектрической проницаемости ϵ^I и диэлектрических потерь ϵ^{II} в диапазоне частот 100 Гц-100 МГц и температурном интервале, охватывающем нематическую и изотропно-жидкую фазы. Для перекрытия частотного диапазона использовались следующие приборы: измеритель полных сопротивлений ВМ-507 «Тесла» (5 Гц-0,5 МГц), измери-