

А. В. Жевак, В. Ю. Арьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБОРА ДАННЫХ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ СКВАЖИН И ГАЗОСБОРНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

От эффективности сбора данных в системе мониторинга, основанной на автономных сенсорных узлах, собирающих измеряемые на контрольных точках газосборных коллекторов геофизические параметры в контрольный пункт, зависит среднее энергопотребление узлов, а следовательно, и затраты на замену источников питания в сложных климатических условиях Крайнего Севера. В статье предложена новая модель процесса сбора данных в системе мониторинга, в отличие от известных, учитывающая возможности современных радиомодулей изменять мощность передатчика (что существенно влияет на энергопотребление). Рассматривается цифровой алгоритм оптимизации, учитывающий специфику предложенной модели. *Мониторинг; оптимизация; моделирование; транспортная задача; расписание*

Отсутствие оперативной информации об устьевых параметрах скважин и состоянии газосборных коллекторов делает процесс поддержания объемов добычи газа весьма проблематичным. Это связано, прежде всего, с несвоевременным обнаружением процесса развития жидкостных пробок, снижающих пропускную способность шлейфов и провоцирующих остановку скважин, что может длительное время оставаться незамеченным [6].

Наиболее очевидным решением являлась бы электрификация и оборудование фонда скважин кабельными системами телеметрии. Однако, в связи с удаленностью объектов добычи газа, затраты на такую автоматизацию будут очень большими и вряд ли скоро окупятся, особенно на завершающем этапе эксплуатации месторождений.

В связи с этим, для решения задач телеметрии устьевых параметров скважин и контроля за состоянием газосборных коллекторов предлагается использовать автономную информационно-измерительную систему (по перепаду давления в разных точках коллектора возможно выявить жидкостную пробку, как показано на рис. 1) [1].

На рис. 2 схематически представлена система мониторинга скважин и газосборных коллекторов, развернутая на УКПГ-5 ООО «Газпром добыча Уренгой».

Ограниченная емкость источников питания сенсорных узлов системы ведет к необходимости оптимизации процесса сбора данных по критерию энергопотребления. Сложность натурального эксперимента делает оправданным разработку комплекса предметно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Для решения задачи оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов целесообразным является применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Математическая модель системы мониторинга (технического объекта) построена с применением методов теории графов. Алгоритм оптимизации сбора данных реализован в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. Таким образом, проведено комплексное исследование научно-технической проблемы мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Известные модели процесса сбора данных в автономных системах мониторинга можно разбить на 2 основных класса: модели сбора данных по расписанию и адаптивные модели. Важно отметить, что нельзя рассматривать алгоритм оптимизации процесса сбора данных отдельно от модели процесса сбора данных и наоборот. Основной идеей алгоритмов сбора данных по расписанию является создание некоторого расписания передачи данных для узлов системы. Расписание жестко прописывает для каждого узла, что он должен делать в каждый момент времени. При этом время может быть разбито на интервалы. Как правило, расписание строится таким образом, чтобы исключить дублирование данных [2]. Адаптивные модели реализуют идею так называемых самоорганизующихся узлов.

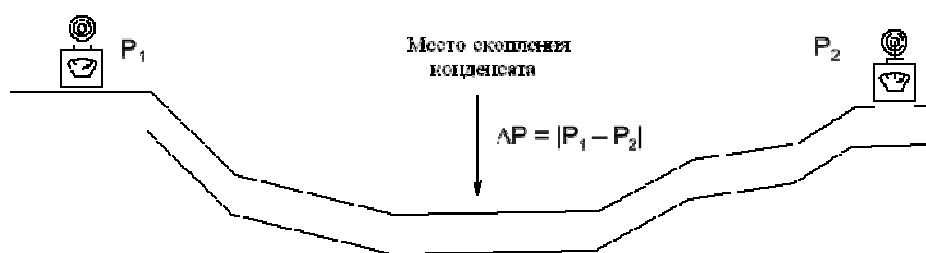


Рис. 1. Определения жидкостной пробки по перепаду давления на контрольных точках

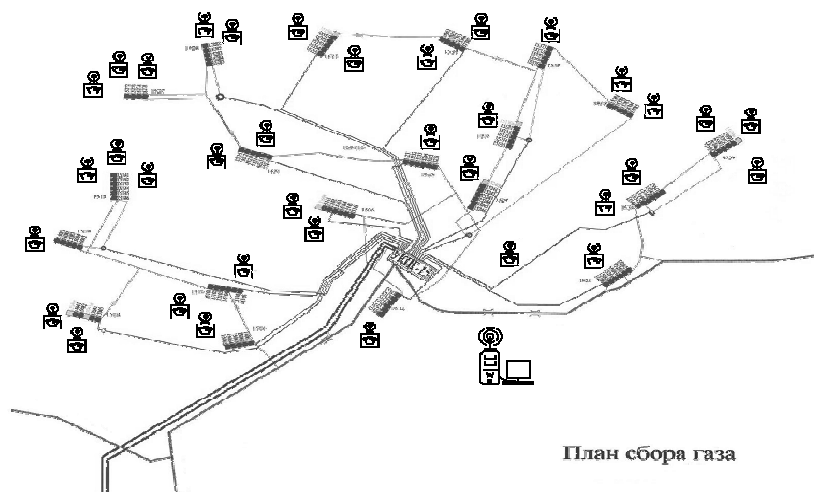


Рис. 2. Система мониторинга скважин и газосборных коллекторов, развернутая на УКПГ-5 ООО «Газпром добыча Уренгой»

Основной смысл заключается в том, что в системе не существует никакого заданного извне расписания. Узлы системы самостоятельно определяют кому передавать данные в тот или иной момент времени. В таблице приведена сводка основных характеристик существующих моделей информационных потоков.

Характеристики моделей процесса сбора данных в автономных системах мониторинга

Класс моделей	Время сбора данных	Энергопотребление	Поддержка мобильности	Отказоустойчивость
Основные на расписании	малое, фиксированное	низкое, постоянное	нет	Низкая
Адаптивные	большое, без верхней границы	высокое, непредсказуемое	да	Высокая

Ни одна из известных моделей процесса сбора данных в автономных информационно-измерительных системах не отвечает в полной

мере требованиям, предъявляемым к системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов, а именно: отсутствует формула расчета энергопотребления для каждого узла системы, не учитывается возможность переключения передатчиков узлов между несколькими уровнями мощности, что могло бы снизить энергопотребление.

Таким образом, актуальной и практически востребованной является задача моделирования и оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является повышение эффективности сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов путем создания эффективных моделей и алгоритмов оптимизации, а также оценка эффективности предложенных решений. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1) разработать математическую модель процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов;

2) разработать алгоритм оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов;

3) разработать алгоритм генерации тестовых графов, описывающих процесс сбора данных, для проведения вычислительного эксперимента;

4) реализовать разработанные алгоритмы в виде комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При решении поставленных задач использовались методы теории графов, теории вероятностей и математической статистики, объектно-ориентированного программирования, проведения вычислительного эксперимента.

Система мониторинга, состоящая из n узлов ($n-1$ сенсорного и 1 центрального), есть связный неориентированный граф $G(V, E)$, где

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество вершин графа G , причем: v_1, v_2, \dots, v_{n-1} – сенсорные узлы; v_n – центральный узел; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – множество ребер графа G , причем: $\{u, v\} \in E$, если между u и v возможна прямая передача данных; $w(u, v)$ – минимальный уровень мощности передатчика, при котором возможна прямая передача данных между u и v .

Представление системы мониторинга в виде графа встречалось в работах других авторов, однако в модель был также введен новый элемент – функция $w(u, v)$, указывающая минимальный уровень мощности передатчика, необходимый для установления прямой связи между узлами u и v . Такое нововведение обусловлено наличием у большинства современных радиомодулей возможности переключения между несколькими уровнями мощности при работе в режиме передачи. При этом чем выше мощность, тем выше потребляемый ток и радиус действия. Так как не всегда для связи между 2 узлами требуется использовать самый высокий уровень мощности, то за счет снижения мощности может быть достигнута экономия энергии, а как следствие – увеличения срока службы узлов без замены источника питания. Так, используемые в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов радиомодули XE1203 фирмы Xemics имеют 4 дискретных уровня мощности передатчика [3].

Каждый сенсорный узел генерирует пакет данных, включающий в себя значения измеряемых им параметров. Все такие пакеты с каждого из сенсорных узлов должны быть переданы в центральный узел. Сбор данных в системе мониторинга осуществляется по расписанию. Время разбивается на единичные временные

интервалы. Период, за который данные со всех сенсорных узлов поступают в центральный узел, называется циклом сбора данных. Цикл сбора данных состоит из L единичных временных интервалов. Каждый узел в течение 1 единичного временного интервала выполняет 1 из 3 возможных действий: 1) принимает данные от другого узла, 2) передает данные другому узлу, 3) не осуществляет прием/передачу данных.

В последнем случае узел расходует гораздо меньше энергии за счет временного отключения приемопередатчика, пребывания микропроцессора в спящем режиме и тому подобных мер.

Расписание сбора данных описывается математически как упорядоченное множество $\{S_1, S_2, \dots, S_L\}$, где S_i описывает передачу данных в i -й единичный временной интервал и представляет собой множество упорядоченных пар вершин: $S_i = \{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_m, b_m)\}$, где a_i – узел, передающий информацию в течение i -го единичного временного интервала узлу b_i , а b_i , соответственно, узел, принимающий информацию от узла a_i , в течение i -го временного интервала.

Расход энергии вычисляется исходя из расписания сбора данных и технических характеристик используемого оборудования (токов, потребляемых аппаратными компонентами сенсорного узла в различных режимах). Формула расчета расхода энергии сенсорным узлом системы, приведенная ниже, используется для прогнозирования срока службы каждого сенсорного узла системы без замены источника питания. Предложенная в работе модель является первой в своем роде моделью процесса сбора данных, позволяющей строить такой прогноз. Формула расчета расхода энергии сенсорным узлом i за 1 цикл передачи данных приведена ниже:

$$\begin{aligned}
 e_i = & L_r e_s + t_m (e_m + e_w - e_s) + t_c (e_w - e_s) + \\
 & + (r_i + 1) t_w (e_w - e_s) + r_i t_p (e_w + e_r - e_s) + \\
 & + \left(\frac{r_i (V_p + V_c) + k_i V_m + V_c + V_t + V_p}{B} + \right. \\
 & \left. \frac{(2r-1)(r_i+1)t_r}{(2r-1)(r_i+1)t_r} \right) \times \\
 & \times (e_r + e_w - e_s) + \\
 & + \left(\frac{r(V_c + V_t + V_p)}{B} + (2r-1)r_i t_t \right) \times \\
 & \times (h_i + r_i (e_w - e_s)) + \\
 & + \left(\frac{r(V_p + (k_i + 1)V_m + V_c)}{B} + (2r-1)t_t \right) \times \\
 & \times (z_i + e_w - e_s).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь

t_m – время, необходимое АЦП для измерения всех необходимых параметров;

t_c – время, необходимое микропроцессору для обработки значений, полученных от АЦП;

t_w – время перехода микропроцессора в рабочий режим (из спящего режима);

t_p – максимальное время ожидания сигнала приемником (интервал времени между включением узла-приемника на прием и началом передачи данных узлом-передатчиком);

t_r – время перехода радио-модуля в режим приемника;

t_t – время перехода радио-модуля в режим передатчика;

e_s – ток, потребляемый микропроцессором в спящем режиме;

e_m – ток, потребляемый АЦП во время измерения;

e_w – ток, потребляемый микропроцессором в рабочем режиме;

e_r – ток, потребляемый приемопередатчиком в режиме приемника;

e_t – ток, потребляемый приемопередатчиком в режиме передатчика;

B – скорость обмена данными между двумя узлами;

V_p – объем служебной информации, передаваемой при каждой передаче данных (кроме передачи отклика);

V_c – размер пакета отклика;

V_t – размер 1 пакета синхронизации времени;

V_m – размер 1 пакета измерений 1;

L_r – реальная длительность цикла сбора данных;

\hat{r} – ожидаемое среднее количество попыток связи;

r_i – количество узлов, у которых узел i принимает данные в течение 1 цикла передачи данных;

k_i – количество пакетов измерений, принимаемых узлом i в течение 1 цикла передачи данных;

h_i – сумма значений энергопотребления радиопередатчика i -го узла при передаче откликов во все узлы, передающие данные напрямую узлу i (с учетом необходимых уровней мощности);

z_i – энергопотребление радиопередатчика i -го узла при передаче пакетов измерений (с учетом требуемого уровня мощности).

На основании формулы (1) определена формула расчета общего расхода энергии (т. е. суммарного расхода энергии всеми сенсорными узлами системы за 1 цикл сбора данных).

$$\begin{aligned}
 E = & (n-1)L_r e_s + (n-1)t_m(e_m + e_w - e_s) + \\
 & + (n-1)t_c(e_w - e_s) + (2n-q-1)t_w(e_w - e_s) + \\
 & + (n-q)t_p(e_r + e_w - e_s) + \\
 & + (n-1)\left(2r-1\right)t_r(e_r + e_w - e_s) + \\
 & + (n-1)2rt_r(e_r + e_w - e_s) + \\
 & + 2rt_t \sum_{i=1}^{n-1} (z_i + e_w - e_s) + \\
 & + \left(2r-1\right)t_t \left(\sum_{i \in V/Q} z_i + (n-q)(e_w - e_s) \right) + \\
 & + (n-1)r \frac{V_t + V_p + V_c}{B} (e_r + e_w - e_s) + \\
 & + \frac{r}{B} \left((n-q)(V_p + V_m + V_c) + V_m \sum_{i=1}^{n-1} k_i \right) \times \\
 & \times (e_r + e_w - e_s) + r \sum_{i=1}^{n-1} \frac{V_p + V_c + (k_i + 1)V_m}{B} \times \\
 & \times (z_i + e_w - e_s) + r \frac{V_t + V_p + V_c}{B} \left(\sum_{i \in V/Q} z_i + (n-q)(e_w - e_s) \right). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Общий расход энергии E является критерием оптимизации в задаче оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов, постановка которой приведена ниже.

Дано:

$G(V, E)$ – граф, описывающий систему мониторинга;

$B, V_m, V_c, V_p, V_t, t_w, t_m, t_c, t_p, t_r, t_t, e_s, e_w, e_m, e_r, C$ – характеристики системы мониторинга.

Найти:

S – расписание сбора данных для заданной системы мониторинга, такое, что $E \rightarrow \min$ (общий расход энергии минимален).

Здесь $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множество, описывающее уровни мощности передатчика; c_i – ток, потребляемый РМ в режиме передачи при i -м уровне мощности; m – количество уровней мощности.

Задача оптимизации процесса сбора данных, посредством определенных манипуляций, сводится к задаче поиска максимального потока минимальной стоимости в транспортной сети. Таким образом, разработанный алгоритм состоит из 3 основных шагов:

1) построение транспортной сети по заданному графу системы мониторинга;

2) нахождение максимального потока минимальной стоимости в транспортной сети, построенной на предыдущем шаге;

3) построение расписания передачи данных для исходной системы мониторинга по потоку в транспортной сети, найденному на предыдущем шаге.

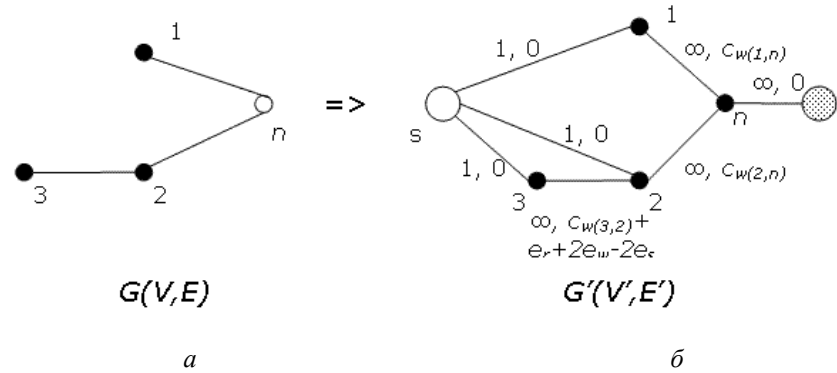


Рис. 3. Граф системы мониторинга (а) и соответствующая ему транспортная сеть (б)

Второй шаг решается с помощью модифицированного алгоритма Форда – Фалкерсона [5]. Шаги 1 и 3, в свою очередь, представляют собой новые задачи, для которых не существует известных решений.

На первом шаге алгоритма по исходному графу системы мониторинга $G(V, E)$ строится транспортная сеть $G'(V', E')$ таким образом, что $V' = V \cup s \cup t$, где s – исток, t – сток; $E' = E \cup (s, 1) \cup (s, 2) \cup \dots \cup (s, n-1) \cup (n, t)$ – множество дуг; $p(s, v) = 1$, для всех v , таких что $(s, v) \in E'$; $p(u, v) = \infty$, для всех u, v , таких что $(u, v) \in E'$ и $u \neq s$; $a(u, v) = 0$, для всех u, v , таких что $(u, v) \in E' / E$; $a(u, v) = c_{w(u,v)} + e_r + 2e_w - 2e_s$, для всех u, v , таких что $(u, v) \in E$, $u \neq n, v \neq n$; $a(u, n) = c_{w(u,v)} + e_w - e_s$, для всех u , таких что $(u, n) \in E$. Здесь $p(u, v)$ – пропускная способность дуги (u, v) ; $a(u, v)$ – цена прохождения потока по дуге (u, v) .

На рис. 3 показан пример построения транспортной сети по графу системы мониторинга согласно приведенному выше алгоритму.

Третий шаг алгоритма включает в себя операцию «объединения потоков», корректность которой доказывается в теореме, формулировка которой приведена ниже.

Теорема об объединении потоков: если в транспортной сети, построенной по графу системы мониторинга, для некоторого узла u существует несколько узлов v_1, v_2, \dots, v_k , таких что из u в каждый из них протекают потоки ненулевой величины, то объединение этих потоков в единый поток из u в v_i (для любого $i \in [1, k]$) не изменит ни суммарной величины потока в графе, ни его стоимости.

Сложность проведения натурального эксперимента приводит к необходимости создания комплекса компьютерных программ для имитационного моделирования [4]. Для проведения последнего спроектирован (с помощью унифицированного языка моделирования UML (Unified

Modeling Language)) и реализован (на языке программирования C++) комплекс программ для ЭВМ. Данный комплекс позволяет тестировать алгоритм оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов всевозможных конфигураций не прибегая к дорогостоящему и длительному натурному эксперименту.

Для проведения вычислительного эксперимента было необходимо предложить алгоритм генерации тестовых графов систем мониторинга (входных данных алгоритма оптимизации). Постановка задачи генерации тестовых графов систем мониторинга приведена ниже.

Дано: n – количество узлов системы; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, где d_i – количество связей между узлами с минимальным уровнем мощности передатчика равным i . Требуется сгенерировать граф $G(V, E)$, такой что:

$G(V, E)$ – связный неориентированный граф;

$|V| = n; w(u, v) \in \{1, 2, \dots, m\} \forall \{u, v\} \in E$;

количество $\{u, v\} \in E$ и $w(u, v) = i$, равно d_i для всех $i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Алгоритм генерации тестовых графов систем мониторинга, решающий поставленную задачу:

Задать $V = \emptyset, E = \emptyset$.

Задать $V' = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество всех допустимых вершин.

Задать $E' = \bigcup_{u \in E', v \in E'} (u, v)$ – множество всех допустимых ребер.

Построить случайное остовое дерево:

Задать u = случайная вершина из V' .

Задать $V = V' \cup u$.

Задать u = случайная вершина из V' .

Задать v = случайная вершина из V .

Задать $V = V' \cup u, V' = V' / u$.

Задать $E = E' \cup (u, v), E' = E' / (u, v)$.

Задать $w(u, v)$ = случайный элемент из $\{1, 2, \dots, m\}$.

$d_{w(u,v)} = d_{w(u,v)} - 1$.

Если $|V| < n$, перейти на шаг 4с.

Дополнить граф случайным образом до достижения заданного числа ребер:

Пока $\sum d_i > 0$, выполнять:

Задать (u, v) = случайное ребро из E' .

Задать $E = E \cup (u, v)$, $E' = E' / (u, v)$.

Задать $w(u, v)$ = случайный элемент из $\{1, 2, \dots, m\}$.

$d_{w(u,v)} = d_{w(u,v)} - 1$.

Примечание к шагам 4g и 5с: вероятность генерации элемента i равна

$$\frac{d_i}{\sum_{j=1}^m d_j}$$

Новизна данного алгоритма заключается в его способности случайным образом генерировать графы систем мониторинга $G(V, E)$ с заданным числом вершин учетом и количеством ребер по каждому уровню мощности радиопередатчиков (т. е. с учетом новой функции $w(u, v)$).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4 и 5 показаны результаты экспериментов для графов различной плотности, состоящих из 100 узлов.

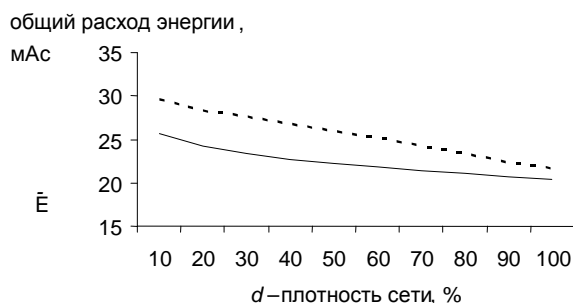


Рис. 4. Общий расход энергии (E) по результатам вычислительного эксперимента для графов систем мониторинга, состоящих из 100 узлов

На рис. 5 по оси ординат отложен средний срок службы сенсорного узла системы до замены источника питания (R), вычисляемый по следующей формуле: $R = \frac{1}{24 \cdot 365,25} H \frac{E}{L_r}$ –

средний срок службы сенсорного узла системы в годах. На рис. 4 и 5 сплошной линией показан график результатов для алгоритма оптимизации с использованием возможности варьирования уровня мощности радиопередатчика, а пунктирной – без использования такой возможности. Из результатов вычислительного эксперимента видно, что варьирование уровней мощности

радиопередатчиков позволяет снизить общий расход энергии (значение целевой функции E) в среднем на 14–16%.

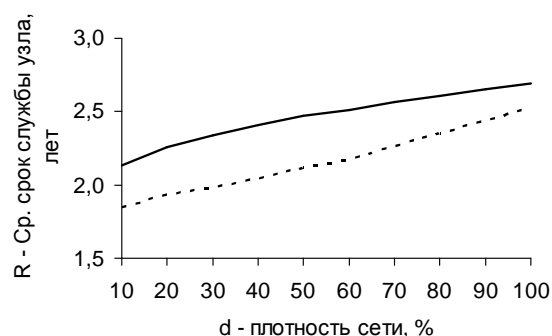


Рис. 5. Средний срок службы сенсорного узла системы мониторинга (R) по результатам вычислительного эксперимента для графов систем мониторинга, состоящих из 100 узлов

Таким образом, результаты эксперимента доказывают целесообразность добавления нового параметра в модель процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов.

5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанный и реализованный комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента позволяет протестировать алгоритм оптимизации сбора данных менее чем за 1 минуту, не прибегая к натурному эксперименту длительностью в 2–3 года.

Разработанный алгоритм оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов позволяет составлять расписание сбора данных для системы, обеспечивающее функционирование сенсорных узлов системы без замены источника питания в среднем в течение 2–3 лет, что превышает период изменения конфигурации системы мониторинга. Использование в процессе оптимизации такого нового фактора, как дискретные уровни мощности передатчиков, дает эффект в виде повышения среднего срока службы сенсорного узла системы без замены источника питания на 14–16%. Данная модель также позволяет осуществить прогноз срока службы каждого сенсорного узла без замены источника питания с точностью 4–6%. Такая погрешность является незначительной на фоне вариации емкости источника питания в зависимости от температурного режима (более 50%).

ВЫВОДЫ

1) Разработана математическая модель процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов, основанная на идее сбора данных по расписанию и, в отличие от существующих, учитывающая такой фактор, как наличие у передатчиков узлов системы нескольких дискретных уровней мощности. Данная модель может быть использована для расчета расхода энергии для каждого узла системы. Данная модель позволяет избежать конфликтов и дублирования при передаче данных, обеспечивает сбор данных со всех сенсорных узлов за фиксированное время (менее 2 минут для системы из 100 узлов) и не требует изменения расписания сбора данных до тех пор, пока не изменится конфигурация системы мониторинга. Прогноз срока службы каждого сенсорного узла без замены источника питания по математической модели отличается от экспериментального показателя в среднем на 4–6%, что является незначительным на фоне вариации емкости источника питания в зависимости от температурного режима (более 50%).

2) Предложен алгоритм оптимизации процесса сбора данных в системе мониторинга газовых скважин и газосборных коллекторов, основанный на разработанной модели, использующий модифицированный алгоритм Форда-Фалкерсона для поиска максимального потока минимальной стоимости в графе. Предложенный алгоритм содержит в себе такие новые шаги, как преобразование графа системы мониторинга в транспортную сеть и построение расписания сбора данных для системы мониторинга по потоку в упомянутой транспортной сети. Алгоритм позволяет составлять расписание сбора данных для системы, обеспечивающее функционирование сенсорных узлов системы без замены источника питания в среднем в течение 2–3 лет. Использование в процессе оптимизации такого нового фактора, как дискретные уровни мощности передатчиков, дает эффект в виде повышения среднего срока службы сенсорного узла системы без замены источника питания в среднем на 14–16%.

3) Предложен алгоритм генерации тестовых графов, описывающих процесс сбора данных, для проведения вычислительного эксперимента. Алгоритм включает в себя такие шаги, как построение случайного остового дерева и дополнение графа до достижения требуемого количества ребер по каждому уровню мощности передатчика. В отличие от ранее известных, данный алгоритм позволяет генерировать графы с заданным числом узлов (до 100) и количеством

связей по каждому уровню мощности передатчика.

4) Разработан комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента, реализованный на языке программирования C++, реализующий новую модель процесса сбора данных и новые алгоритмы оптимизации и генерации тестовых графов систем мониторинга. Данный комплекс программ позволяет протестировать алгоритм оптимизации на 2000 различных графах систем мониторинга менее чем за 1 мин., не прибегая к натурному эксперименту длительностью в 2–3 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жевак А. В., Арьков В. Ю., Фридлянд А. М.** Оптимизация сбора данных в беспроводных сенсорных сетях с использованием нейронной сети с градиентным алгоритмом обучения // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. М., 2007. Вып. 10. С. 47–49.
2. **Коловертнов Г. Ю., Ланчаков Г. А.** Беспроводная информационно-измерительная система контроля технологических параметров скважин и газосборных коллекторов // *Газовая промышленность*. М., 2008. Вып. 8. С. 26–28.
3. **Жевак А. В.** Распределенная автономная информационно-измерительная система мониторинга состояния трубопровода // *Сб. тезисов второй науч.-техн. конф. молодых спец.* Уфа, 2006. С. 70–71.
4. **Трусов П. В.** Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие. М.: Логос, 2004. 307 с.
5. **Акимов О. Е.** Дискретная математика: логика, группы, графы. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 352 с.
6. **Hauge E., Aamo O. M.** Model-Based Monitoring and Leak Detection in Oil and Gas Pipelines // *SPE Projects, Facilities & Construction*. 2009. Vol. 4. P. 53–60.

ОБ АВТОРАХ



Жевак Алексей Владимирович, инженер. Дипл. инж. по прикладной информатике в экономике (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. моделирования и оптимизации сбора данных в системах мониторинга.



Арьков Валентин Юльевич, проф. каф. автоматизир. систем упр-я. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1986). Д-р техн. наук по системному анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. идентификации и моделирования сложных систем.