

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.415.25

Святный В. А.¹, Иванов А. Ю.², Иванов Ю. А.³

¹Д-р техн. наук, заведующий кафедрой компьютерной инженерии Донецкого национального технического университета, Покровск, Украина

²Ст. преподаватель кафедры компьютерной инженерии Донецкого национального технического университета, Покровск, Украина

³Канд. техн. наук, инженер-программист, Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСПИСАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИ СЕТЕВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Актуальность. Рассмотрено создание моделей автоматизированных систем управления проветриванием, предназначенных для предотвращения возникновения аварийных ситуаций в шахтной вентиляционной сети. Решается задача исследования и реализации программных средств моделирования, которые дают возможность выполнения экспериментов с реальными наукоемкими объектами.

Цель работы – повышение эффективности цифровой полунатурной модели шахтной вентиляционной сети за счет разработки способа организации вычислительного процесса, учитывающего разночастотные параметры моделей, и его оптимизации.

Метод. Исследован, разработанный авторами, алгоритм планирования и реализации циклического расписания для модели динамического объекта реального времени, представленного шахтной вентиляционной сетью. Анализ математической модели аэродинамических процессов позволил отнести ее к классу жестких систем реального времени. Вычисления фазовых переменных, изменяющихся с различной скоростью, выполняется путем расщепления исходного алгоритма на параллельные потоки в программной модели. Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений математической модели объекта выполнено в соответствии с алгоритмом статических приоритетов и управлением при помощи временной шкалы теории расписаний. Определена допустимость расписаний для директивных сроков переменных объекта. Алгоритм планирования учитывает временные параметры программных средств как однопроцессорных, так и симметричных мультипроцессорных систем.

Результаты. Анализ результатов моделирования предложенной модели с использованием циклических расписаний показывает соответствие получаемых результатов моделирования эталонным.

Выводы. Основным достоинством модели является повышение производительности при выполнении обработки данных за счет уменьшения использования процессорного времени. Реализованный алгоритм циклического расписания полунатурной моделирующей платформы используется для последующей разработки системы управления технологическими и аварийными режимами проветривания в шахтах.

Ключевые слова: моделирование, циклическое расписание, многоядерная система, расширение реального времени.

НОМЕНКЛАТУРА

РВ-цикл – повторяющееся выполнение части всех потоков интегрирования переменных в реальном времени;

РРВ – расширение реального времени для операционной системы;

РИ – различная инерционность;

ШВС – шахтная вентиляционная сеть;

ОДУ – обыкновенное дифференциальное уравнение;

ЗМ – задача моделирования;

SMP – symmetric multiprocessing;

Q_j – значения расхода воздуха в ветвях сети;

P_B – давление вентилятора;

C – значение расхода метана;

τ_i – время вычисления i -ой переменной процессором;

T_i – директивный срок вычисления i -ой переменной в реальном времени;

p – накладные временные расходы операционной системы;

$\Delta_i \tau_i$ – время выполнения части потока на РВ-цикле;

L_j – период РВ-цикла;

h_i – шаг интегрирования численного метода.

ВВЕДЕНИЕ

Для полунатурных моделирующих устройств динамических объектов реального времени с реальной аппа-

ратурой наиболее характерными типами приложений являются hardware in the loop (HIL) и software in the loop (SIL) [2, 3]. Особенность моделируемых процессов в этих приложениях состоит в том, что их математическое описание содержит системы дифференциальных уравнений. Для моделей жестких систем уравнений [4] является существенной разница в скорости изменения фазовых переменных, описывающих объект моделирования. Частоты переменных моделей реального времени изменяются в диапазоне: сотни герц для процессов медленной динамики и сотни килогерц в сверхбыстрых переходных процессах [5]. Обеспечение таких характеристик требует специальной организации вычислений при создании моделей реального времени [6, 7].

В качестве динамического объекта для исследования циклического расписания выбрана ШВС. Фрагмент традиционного для ШВС тестового объекта представляется в виде ориентированного графа (рис. 1), состоящего из ветвей (выработок) и узлов (мест соединения выработок друг с другом). Его ветви обозначены переменными $Q_j [m^3 / c]$. Аэродинамические процессы в тестовой для ШВС модели вызываются вентилятором, который установлен в Q_B , развивает давление $P_B = 4100 [H / m^2]$. Проектирование систем управления проветриванием ШВС базируется на анализе изменения значений расхода воздуха Q , метана C и давления P во всех ветвях. В любом сечении выработки уравнения аэродинамического состояния описываются дифференциальными уравнениями в частных производных [8, 9] для воздуха и метана. Для упрощения математической модели с достаточной для практики точностью допустимо использовать и широко применяются ОДУ. В j -ой ветви процессы изменения расхода воздуха являются первой частотной составляющей системы.

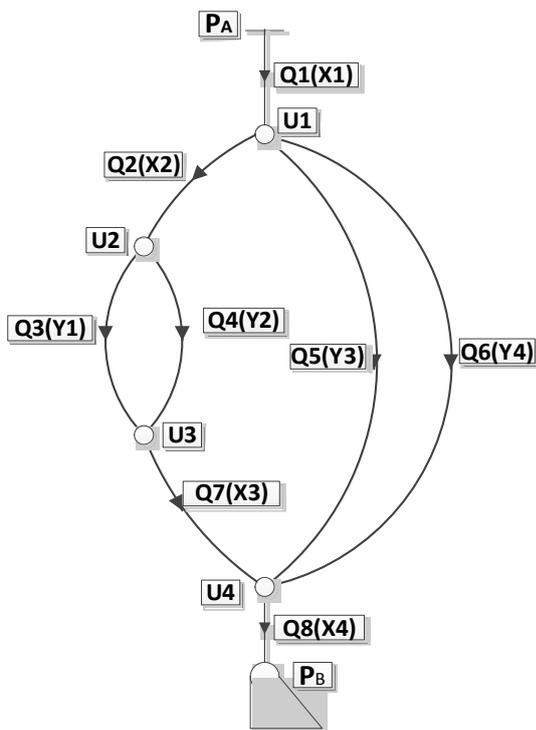


Рисунок 1 – Схема ШВС

Период времени T_1 для шага интегрирования по расходу воздуха (h_1) в модели соответствует собственной частоте изменения Q_j реальной сети и составляет 2000 [мкс]. Второй частотной составляющей системы ОДУ является изменения показателей метана в выработках. Период времени T_2 , соответствующий собственной частоте изменения метана C (шага интегрирования h_2) составляет 9000 [мкс]. Технологические постоянные, которые задействованы в уравнениях аэродинамики ШВС, подробно описаны в [8, 9].

Представление динамики аэрогазодинамического объекта математической моделью с различными скоростями (РИ) изменения параметров используется при решении задач с критичными требованиями реактивности реагирования при установленных директивных сроках. Примерами таких задач являются: распространение пожаров в шахтах, режим помпажа. Эти явления сопровождаются резкими срывами воздушных потоков, сильным гидравлическим ударом.

Задачи исследования технологических и аварийных режимов управления проветриванием путем регулирования расхода воздуха для поддержания концентрации метана в нормативных пределах в вентиляционной сети как сложном РИ объекте реального времени имеют практическую значимость для угледобывающей отрасли.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачи оптимизации работы средств моделирования сложных динамических систем в реальном масштабе времени требуют учета особенностей моделей при реализации. В статье предлагается разработать на основании измеренных временных характеристик и физических РИ параметров ШВС равномерное циклическое расписание [13] и оптимизировать [14] программные средства организации вычислений модели динамической системы реального времени. Исследование циклического расписания провести для реализации, как для однопроцессорной, так и для многоядерной системы.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Цифровая часть модели жесткой динамической системы рассмотрена как один из видов SIL, HIL-задач реального времени [1]. Вычисления фазовых переменных в модели выполняется путем расщепление исходного алгоритма способом параллелизма задач [10]. Каждая из задач должна быть запущена и полностью выполнить свою работу за время τ_i , ($i=1-n$) на каждом соответствующем этой задаче периоде времени T_i точно в срок. Временные модели вычисления фазовых переменных при интегрировании, рассматриваются как периодические задачи, задаваемые набором (τ_i, T_i) . При этом величина

$$\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i} \text{ определяет загрузку процессора.}$$

Для формального описания модели как системы реального времени используется модель synchronous data flow [10]. Описание процесса выполнения модели целесообразно формализовать методами теории расписаний [11]. Доказано [12], что допустимость и качество построения расписания зависит исключительно от директив-

ных частот вызова программ обработки или скоростей процессов, протекающих в модели.

Для разработки модели ШВС представляется перспективным применение оптимизированных циклических расписаний. Задача оптимизации рассматриваемого типа циклического расписания решена в [13] для однопроцессорной и в [14] для многоядерной SMP системы.

Анализ литературы [15] показывает, что для выполнения программ в режиме реального времени имеется широкий выбор различных сред. Расширения для операционных систем Linux и Windows, функциональность и временные характеристики, сопоставимые со специализированными операционными системами, обеспечивают экономию на программном и аппаратном обеспечении. Основу РРВ составляет специально реализованный слой аппаратной абстракции, которые позволяют работать с аппаратными ресурсами на уровне ядра операционной системы в режиме реального времени. В качестве платформы для разработки системы моделирования ШВС использована РРВ RTX 2012 для Windows фирмы Interval Zero [16] с монополярной архитектурой и разрешением таймера системы 0,01 [мс].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первым шагом создания модели является анализ и преобразование ее математического описания. Для системы уравнений, описывающих расход воздуха Q_j , применяется метод прямых, что позволяет получить систему ОДУ, описывающую неустановившееся движение воздуха в ШВС [8]. Разностные уравнения всех ветвей получены разбиением на участки длиной 40 метров. Каждая j ветвь, будет разбита на $U_j = \{20, 4, 49, 36, 43, 24, 4, 17\}$ участков, соответственно. Общее количество уравнений, описывающих аэродинамические процессы объекта, равно удвоенной сумме

$$\text{количества всех участков } 2 \times \sum_{j=1}^8 U_j - 4 = 390 \text{ за исклю-}$$

чением четырех вершин, в которых ветви соединяются, и давления в них будут одинаковы. Для каждой из ветвей ($Y_1 - Y_4$) в модель включены 4 уравнения, описывающие газовые процессы. Тогда общее количество уравнений, которые описывают аэрогазодинамическую модель объекта, составит 406.

В цифровой модели выполняется обработка задач с учетом особенностей РИ объектов в виде модели параллельных заданий. Интегрирование системы по воздуху и метану выполняется в отдельных потоках программно-

го проекта в соответствии с алгоритмом статических приоритетов. Каждый параллельный поток модели содержит программу расчета соответствующих переменных системы ОДУ. Выбрана беспriorитетная циклическая дисциплина, причем первым выполняется поток с наибольшей частотой повторения.

Для разработки эффективного расписания проведены измерения временных характеристик данной платформы, после чего генерируется расписание и датаграмма выполнения для запуска НП моделирования. На вход модуля планирования подаются полученные на этапе профилирования τ_i и p (накладные временные расходы), а также n , T_i от разработчиков модели, что позволяет проверить условие существования расписания

$$\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i} \leq 1 [7]. \text{ В зависимости от целевой платформы вы-}$$

полняется расчет численных значений модели по алгоритму оптимизации для системы с однопроцессорной цифровой частью или для SMP системы. Расчет долей

$$\text{выполнения каждого потока } \Delta_i \tau_i = \frac{\tau_i}{T_i} L_j, \text{ (} j \text{ – номер}$$

ядра), выполняется на основании периода L_j РВ-цикла.

После чего полученные параметры модели преобразуются в датаграмму расписания для управления процессами реального времени на основе принципа временной шкалы. Вызовы потоков интегрирования системы по воздуху и метану выполняется согласно разработанной структуре – датаграмме управления циклическим расписанием обработки (рис. 2).

В основе реализации управления вычислением каждой фазовой переменной лежит установка таймера с заданным L_j для каждого из ядер. При создании, таймеру устанавливается максимальный приоритет в системе, чтобы обеспечить порядок следования согласно разработанному расписанию. Обработчик таймера выполняет последовательный запуск всех назначенных на ядро M_j потоков ЗМ в указанном порядке. Каждому потоку

предоставляется время для выполнения его части ($\Delta_i \tau_i$), после чего его работа приостанавливается. Только один из потоков ядра может завершаться полностью на одном РВ-цикле в том случае, если его период вызова соответствует периоду цикла. Работа всех остальных потоков будет приостановлена и продолжена уже в следующем цикле. После вызова всех необходимых потоков



Рисунок 2 – Формат датаграммы расписания

работа функции обработчика таймера прекращается. Ее повторный вызов инициируется сигналом от таймера, который соответствует наступлению нового РВ-цикла.

Реализация управления циклическим расписанием реального времени на системе RTX 2012 выполнена в среде Microsoft Visual Studio (VS) на языке C++ с использованием специальных системных функций WINAPI библиотек RTX. Все выполняемые потоки созданы с установкой параметра *Affinitymask*, который задает их привязку к необходимому ядру системы [17,18]. Для организации функционирования обработчика таймера РВ-цикла используется функция *RtCreateTimerEx()*, которая позволяет запустить таймер с необходимой частотой и выполнить его привязку к заданному ядру.

Основными исполнительными частями модуля управления потоками являются: главная функция, функции обработки событий таймера и функции расчета значений уравнений модели. Главная функция выполняет инициализацию начальных значений модели, создание объектов таймеров, событий управления, потоков интегрирования, запуск таймеров и потоков [19]. Количество функций обработки событий от таймера, которые вызываются каждый раз равномерно с установленным периодом L_j , соответствует числу задействованных в расписании ядер. Функции расчета значений фазовых переменных выполняют интегрирование согласно численному методу Рунге-Кутты и их количество соответствует числу потоков ЗМ.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Разработка параллельной модели для исследования циклического расписания выполнена на четырех ядерной системе с Windows 7 и установленным РРВ. Измерение временных характеристик исследуемых функций потоков выполнено с использованием стандартных инструментов профилирования среды разработки VS с учетом механизмов синхронизации и защиты данных [19]. Это позволяет выполнять разработку и исследование всех программных компонентов ЗМ в единой оболочке. С помощью утилит VS получены величины $\tau_1 = 1260$ [мкс] для функций воздуха и $\tau_2 = 100$ [мкс] для расчета значений системы по метану. Директивные величины $T_1 = 2000$ [мкс], $T_2 = 9000$ [мкс] выбраны так, чтобы они соответствовали частотам изменения физических величин в объекте. Эти периоды соответствуют выбору, соответственно $h_1 \approx 0,002$ и $h_2 \approx 0,009$. Измерение временных задержек среды реального времени, в которой выполняется ЗМ, основано на использовании программируемых таймеров. В циклическом расписании реального времени измерены и учтены временные задержки тестовой платформы: управления функцией обработки (максимальное значение отклонения от таймера системы d не превышает $0,00002$ [мс]), передачи управления из функции обработки событий таймера, конкретной функции обработки одного из потоков (значение задержки не более $0,02$ [мкс]), самой функции обработки (составило в худшем случае не более $0,06$ [мкс]). Разработанная на подготовительном этапе сервисная программа определения задержек, основывается на измерении

времени с использованием функции *RtGetClockTimerPeriod (CLOCK_FASTEST)*. Величина p может быть рассчитана как сумма всех трех задержек. В данном случае она составляет $p=0,1$ [мкс].

С использованием модуля расчета значения РВ-цикла определено оптимальное [15, 16] значение $L=1000$ [мкс]. На основании полученных исходных параметров циклического расписания ШВС ($M=2$ $p=0,1$): характеристик потока расчета по воздуху ($\tau_i = 1260$, $T_i = 2000$) и характеристик потока расчета по метану ($\tau_i = 2000$, $T_i = 9000$) выполняется проверка условия существования расписания:

$$\sum_{i=1}^M \frac{\tau_i}{T_i} = 0,6411 < 1 - \text{условие выполняется.}$$

Вычисляются доли выполнения каждого потока

$$\Delta_i \tau_i = \frac{\tau_i}{T_i} L \text{ на периоде РВ-цикла, на основании полученных значений } L \text{ с использованием модуля разработ-}$$

ки расписаний:

$$\Delta_1 \tau_1 = \frac{1260}{2000} \cdot 1000 = 630 \text{ [мкс],}$$

$$\Delta_2 \tau_2 = \frac{100}{9000} \cdot 1000 = 11,1 \text{ [мкс].}$$

Полученные временные интервалы должны быть обеспечены при обработке в функциях программных потоков. Такой вариант организации вычислительного процесса соответствует построенной датаграмме № 1:

1
1000 2 1 630 2 12

Для реализации на двоядерной системе, модулем генерации расписаний каждый из потоков был назначен на отдельное ядро с расчетными периодами циклов:

$L_1 = 2000$ [мкс] и $L_2 = 9000$ [мкс] (рис. 2).

По полученным датаграммам выполняется настройка параметров таймеров и функций задержки в системы управления вычислительным процессом. Для первого расписания выполняется создание и привязка таймера (*hTimer*) к одному из ядер системы реального времени функцией *RtCreateTimerEx()*. Для запуска таймера (*hTimer*) устанавливается интервал вызова функцией *RtSetTimerRelative()*. В функции обработки таймера выполняется возобновление работы программного потока расчета системы ОДУ по воздуху *ResumeThread()* и ожидание его выполнения в течение 630 [мкс] (функция *RtSleepFt(6300)*, после чего он останавливается функцией *SuspendThread()*. Далее происходит аналогичный вызов программных потоков по метану с ожиданием 12 [мкс] функцией *RtSleepFt()*. Для второй датаграммы создается два таймера *hTimer1* (2 [мс]) и *hTimer2* (9 [мс]), каждый из них привязывается к собственному ядру. В функциях обработки каждого из потоков выполняется ожидание необходимого временного интервала программного потока: по воздуху функцией *RtSleepFt(12600)* и по метану функцией *RtSleepFt(1000)*.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование эффективности при многопоточном [18] моделировании аэродинамического объекта выполнена для трех различных режимов работы (рис.3): интегрирование модели по метану и воздуху выполняются традиционно с одинаковой частотой (рис. 3а); вычисления согласно усовершенствованному методу планирования на одном ядре с использованием РИ по сгенерированному расписанию (рис. 3б); вычисления модели с РИ по составленному расписанию на двух ядрах (рис. 3в).

Цель первого эксперимента заключается в определении эталонных расчетных значений для оценки эффективности разработанного подхода. С использованием функций замера времени RTXAPI, были получены затраты процессорного времени при моделировании: время работы потока обработки по воздуху (24,591 [с]), время работы потока обработки по метану (1,997 [с]) и суммарное процессорное время модели (27,221 [с]). Реальное время выполнения определялось от точки входа в функцию обработки, то есть после срабатывания сигнала от таймера до передачи управления во время возврата из функции.

Второй эксперимент выполнялся на том же временном интервале, но каждое из уравнений системы по Q , C просчитывается с собственной частотой, которые соответствуют периодам (T_1, T_2). Порядок и временные параметры работы модели системы управления устанавливались согласно рассчитанной датаграммы №1. В результате профилирования модели получены следующие результаты: время работы потока обработки по воздуху

(24,585 [с]), время работы потока обработки по метану (0,444 [с]) и суммарное процессорное время 3М (25,643 [с]). Полученные результаты свидетельствуют о существенном уменьшении временных затрат на интегрирование системы по метану, которое равно $\frac{2}{0,445} = 4,494$

раза. Общее сокращение используемого процессорного времени составило 5,7%.

Для третьего эксперимента выполнение потоков происходит на разных ядрах системы. Потоки, моделирующие систему по воздуху, запускаются с периодом T_1 на первом ядре, а поток, в котором интегрируются значения системы по метану с периодом T_2 выполняются на втором ядре. Анализ такой организации вычислительного процесса показал результаты: время работы потока обработки по воздуху (24,590 [с]), время работы потока обработки по метану (0,445 [с]) и суммарное процессорное время (25,590 [с]). Суммарное процессорное время в данном случае рассчитывается по длительности максимального из выполняемых потоков, в связи с тем, что они функционируют параллельно [19]. При такой организации вычислений фазовых переменных, сокращение процессорного времени составило 1,8% по отношению к одноядерной РИ датаграмме. Повышение эффективности при этом достигается путем построения оптимального расписания [13, 14] и директивного его исполнения разработанной системой управления программными средствами. Для более сложных задач, в которых имеется значительное количество разделяемых физических переменных полезность предложенного подхода будет возрастать.

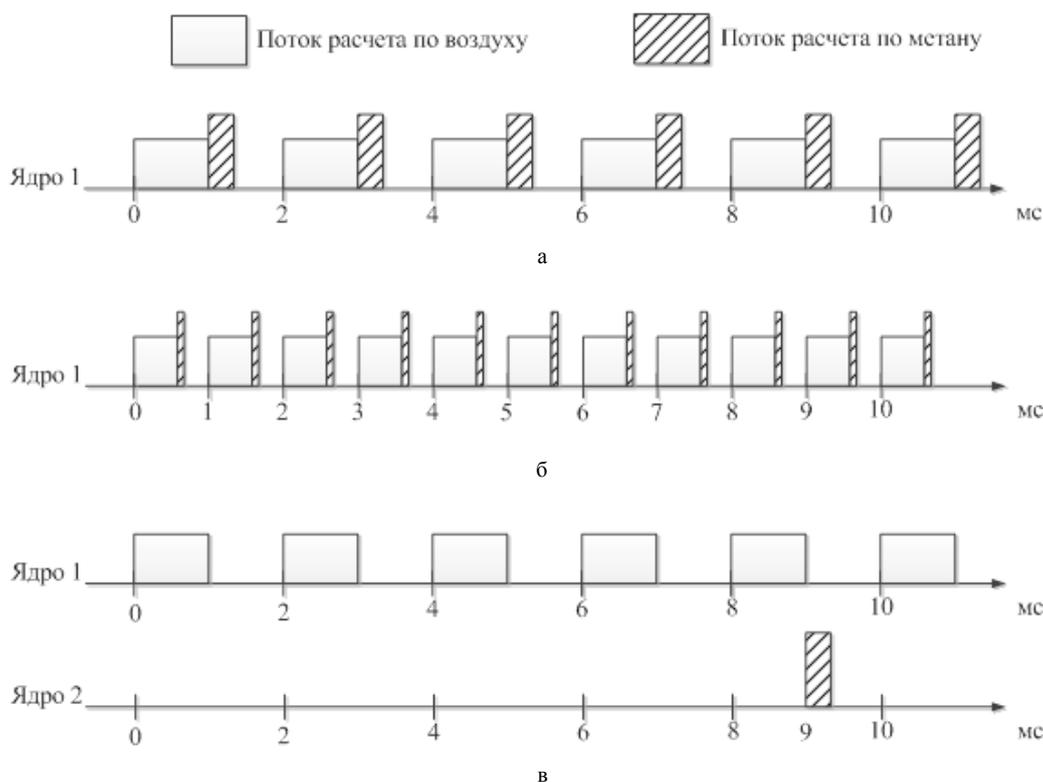


Рисунок 3 – Диаграммы выполнения экспериментов:

а – расчет с единой частотой на одном ядре; б – расчет с разными собственными частотами на одном ядре; в – расчет с разными собственными частотами на двух ядрах

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Для верификации поведения воздушных и газовых процессов в разработанной модели, было выполнено сравнение с известными показателями в установившемся режиме. Также было выполнено сравнение графиков с результатами моделирования разработанной в среде MATLAB программой. В ней был выбран аналогичный метод решения с применением функции ode45 (метод Рунге-Кутты 4–5-го порядков). Графики изменения значений расхода воздуха (рис. 4) как в системе MATLAB, так и полученные разработанной моделью для трех экспериментов совпадают.

ВЫВОДЫ

Разработана программная аэрогазодинамическая РИ модель ШВС, которая представляется в виде графа. В объекте исследованы процессы по воздуху, протекающие во всех ветвях, а также изменение концентрации метана для выработок. Научные результаты, полученные в статье: основываясь на РИ фазовых переменных ШВС впервые предложена и исследована НИЛ модель на базе усовершенствованного авторами циклического расписания для решения уравнений модели. Отличительной чертой расписания является равномерное выполнение потоков вычисление фазовых переменных при постоянном базовом периоде РВ-цикла, получены условия его существования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод планирования циклических расписаний, на основе которого решена задача построения многопоточной модели ШВС для решения задач прогнозирования в угледобывающей отрасли. В разработанной модели время расчета системы ОДУ по метану уменьшилось в 4,5 раза.

Дальнейшее повышение эффективности разработанных методов планирования и расширение класса создаваемых на их основе моделей может быть выполнено за счет учета информационной связности переменных в кэше процессоров SMP системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры «Компьютерная инженерия» Н-26-10 «Теоретический анализ и исследование процессов управления и обработки данных в компьютерных системах» Донецкого национального технического университета г. Покровск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bélanger J. The What, Where and Why of Real-Time Simulation / J. Bélanger, P. Venne, J. N. Paquin // PES-GM-Tutorial_04, IEEE PES general meeting. – 2010. – P. 37–49
2. Abel D. Rapid control prototyping / D. Abel, A. Bollig. – Berlin : Springer, 2006. – 400 p.
3. Demers S. A Generic Solution to Software-in-the-Loop / S. Demers, P. Gopalakrishnan, L. Kant // Military Communications Conference. – Orlando : MILCOM, 2007. – P. 1–6.
4. Hairer E. Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems 2nd rev. ed. / E. Hairer, S. P. Norsett, G. Wanner. – Heidelberg : Springer, 2009. – 474 p.
5. Pimentel J. C. G. Hardware Emulation for Real-Time Power System Simulation / J. C. G. Pimentel, L. Hoang // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Montreal : IEEE, 2006. – № 2. – P. 1560–1565.
6. Mohammadi A. G. Scheduling Algorithms for Real-Time Systems / A. G. Mohammadi, S. G. Akl // School of Computing, Queen's University, Technical Report N 2005. – 2005. – 499 p.
7. Liu C. L. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment / C. L. Liu, J. Layland // Journal of the ACM. – 1973. – № 20. – P. 46–61.
8. Forschungsgebiet: parallele Simulationstechnik / [Feldman L. P., Svatnyj V. A., Resch M., Zeitz M.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування». – 2008. – № 7(150). – С. 9–39.
9. Абрамов Ф. А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф. А. Абрамов, Л. П. Фельдман, В. А. Святный. – К. : Наукова думка, 1981. – 284 с.
10. Tanenbaum A. Structured Computer Organization (6th Edition) / A. Tanenbaum, T. Austin. – Pearson, 2012. – 800 p.
11. Conway R. W. Theory of Scheduling (2nd ed.) / R. W. Conway, W. L. Maxwell, L. W. Miller – New York : DOVER PUBLICATIONS, 1967. – 294 p.

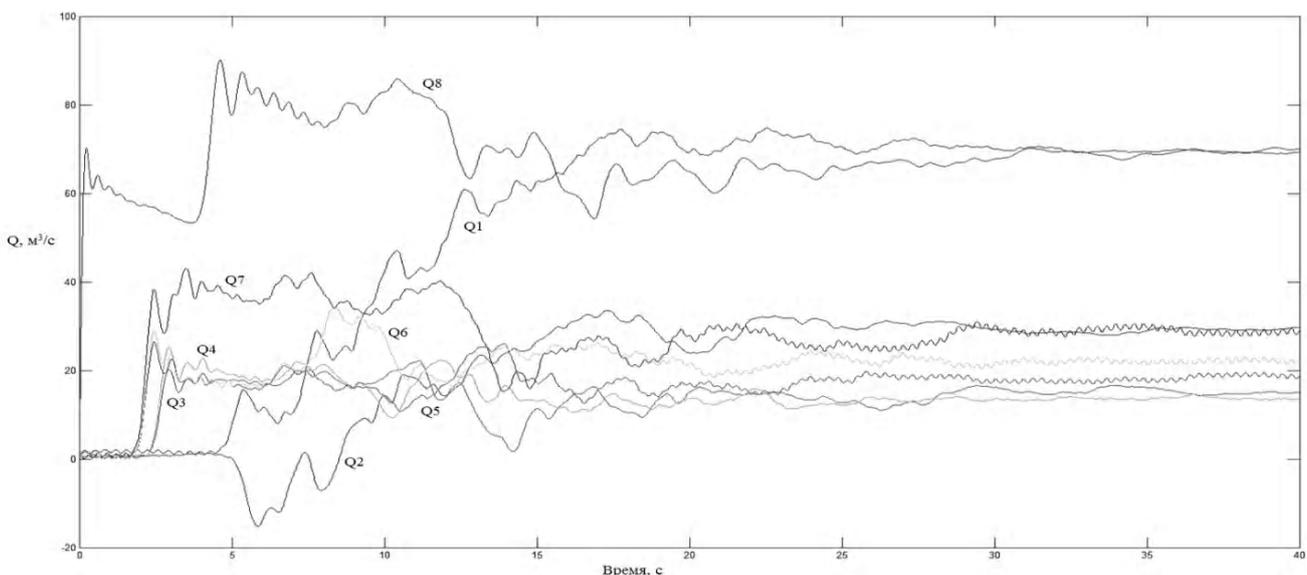


Рисунок 4 – Изменение расхода воздуха в ветвях ШВС при моделировании

12. Гильман А. Л. Расписания в задачах организации периодической обработки информации / А. Л. Гильман, Я. Г. Хаит // Техническая кибернетика. – Харьков : Известия академии наук СССР, 1970. – С. 125–130.
13. Иванов Ю. А. Алгоритм решения задачи оптимизации для циклических расписаний с прерываниями / Ю. А. Иванов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2012. – № 2 (27). – С. 97–102. ISSN 1607-3274.
14. Иванов Ю. А. Оптимизация вычислительного процесса на многоядерной системе с использованием алгоритма искусственной пчелиной колонии / Ю. А. Иванов // Наукові праці ДонНТУ, Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2013. – № 2 (18). – С. 19–25. ISSN 1996-1588.
15. RTX 2012 Release Notes : [каталог]. – [IntervalZero, Inc., 2012]. – 20 p.
16. Kithara Real-Time Suite Version 9.23 : [каталог]. – [Kithara Software GmbH, 2011]. – 105 p.
17. Williams A. C++ Concurrency in Action: Practical Multithreading / A. Williams. – New York : Manning Publications, 2012. – 528 p.
18. Akhter S. Multi-core programming: increasing performance through software multi-threading / S. Akhter, J. Roberts. – Santa-Clara : Intel Press, 2015. – 360 p.
19. Wilkinson B. Parallel Programming Techniques & Applications Using Networked Workstations & Parallel Computers / B. Wilkinson, M. Allen. – Toronto : Pearson, 2004. – 496 p.

Статья поступила в редакцию 26.09.2017.
После доработки 10.11.2017.

Святний В. А.¹, Иванов О. Ю.², Иванов Ю. О.³

¹Д-р техн. наук, профессор, завідувач кафедрою комп'ютерної інженерії Донецького національного технічного університету, Покровськ, Україна

²Старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії Донецького національного технічного університету, Покровськ, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, інженер-програміст, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОГО РОЗКЛАДУ ДЛЯ МОДЕЛІ МЕРЕЖЕВОГО ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄКТА РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Актуальність. Розглянуте створення моделей автоматизованих систем управління провітрюванням призначених для запобігання виникненню аварійних ситуацій в шахтній вентиляційній мережі. Вирішується задача дослідження та реалізації програмних засобів моделювання, які дають можливість виконання експериментів з реальними наукомісткими об'єктами.

Мета роботи – підвищення ефективності цифрової напівнатурної моделі шахтної вентиляційної мережі за рахунок розробки способу організації обчислювального процесу, що враховує різночастотні параметри моделей, та його оптимізація.

Метод. Виконано дослідження розроблення алгоритму планування та реалізація циклічного розкладу для моделі динамічного об'єкту реального часу представленого шахтною вентиляційною мережею. Аналіз математичної моделі аеродинамічних процесів дозволив віднести її до класу жорстких систем реального часу. Обчислення фазових змінних, що змінюються із різною частотою, виконуються шляхом розщеплення початкового алгоритму на паралельні потоки програмної моделі. Чисельне інтегрування системи диференціальних рівнянь математичної моделі об'єкта виконано відповідно з алгоритмом статичних пріоритетів та керуванням за допомогою часової шкали теорії розкладів. Визначена допустимість розкладів для директивних строків змінних об'єкту. Алгоритм планування враховує параметри програмних засобів як однопроцесорних, так і симетричних мультипроцесорних систем.

Результати. Аналіз результатів моделювання запропонованої моделі з використанням циклічних розкладів показав відповідність отриманих результатів моделювання до еталонних.

Висновки. Основною перевагою моделі є підвищення продуктивності при виконанні обробки даних за рахунок зменшення використання процесорного часу. Реалізований алгоритм циклічного розкладу напівнатурної моделюючої платформи використовується для наступної розробки систем управління технологічними та аварійними режимами провітрювання у шахтах.

Ключові слова: моделювання, циклічний розклад, багатоядерна система, розширення реального часу.

Svjatnij V. A.¹, Ivanov O. Y.², Ivanov Y. A.³

¹Dr. Sc., Professor, Chief of the Department of Computer Engineering of the Donetsk National Technical University, Ukraine

²Senior lecturer of the Donetsk National Technical University, Ukraine

³PhD, software engineer, Kiev, Ukraine

CYCLIC SCHEDULE RESEARCH FOR THE MODEL OF REAL-TIME DYNAMIC NETWORK OBJECT

Context. Development of models of automated control systems for ventilation, designed to prevent emergencies in the mine ventilation network, is considered in the paper. The task of research and implementation of software modeling tools that allows the execution of experiments with real science-intensive objects is being solved.

Objective is to improve effectiveness of the real-time model of a mine ventilation network by developing and optimizing a method for organizing a computational process that considers the different frequency parameters of the models.

Method. We proposed and investigated the algorithm of scheduling and implementation of the cyclic schedule for the model of the dynamic real-time object, presented by the mine ventilation network. We analyzed the mathematical model of aerodynamic processes and classified it as a stiff real-time system. Calculations of phase variables with varying velocities are performed by splitting the original algorithm into parallel flows in the program model. Numerical integration of the differential equations system of the mathematical model of the object is performed in accordance with the algorithm of static priorities and controlled using the time scale. The schedules feasibility is determined for the target object limited parameters. The scheduling algorithm considers the time parameters of software tools for both uniprocessor and symmetric multiprocessor systems.

Results. Analysis of simulation results of the proposed model with using cyclic schedules shows the correspondence of the obtained modeling results to the reference one.

Conclusions. The main advantage of the model is the performance increase when performing data processing due to the reduction of the CPU usage time. Implemented cyclic schedule algorithm for real-time simulation platform can be used for development of control system for technological and emergency modes of ventilation in mines.

Keywords: simulation, cyclic schedule, multi-core system, real-time extension.

REFERENCES

1. Bélanger J., Venne P., Paquin J. N. The What, Where and Why of Real-Time Simulation, *PES-GM-Tutorial_04, IEEE PES general meeting*, 2010, pp. 37–49
2. Abel D., Bollig A. Rapid control prototyping. Berlin, Springer, 2006, 400 p.
3. Demers S., Gopalakrishnan P., Kant L. A Generic Solution to Software-in-the-Loop, *Military Communications Conference*. Orlando, MILCOM, 2007, pp. 1–6.
4. Hairer E., Norsett S. P., Wanner G. Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems 2nd rev. ed. Heidelberg, Springer, 2009, 474 p.
5. Pimentel J. C. G., Hoang L. Hardware Emulation for Real-Time Power System Simulation, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Montreal, IEEE, 2006, No. 2, pp. 1560–1565.
6. Mohammadi A. G., Akl S. G. Scheduling Algorithms for Real-Time Systems, *School of Computing, Queen's University, Technical Report N 2005*, 2005, 499 p.
7. Liu C. L., Layland J. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment, *Journal of the ACM*, 1973, No. 20, pp. 46–61.
8. Feldman L. P., Svyatnyj V. A., Resch M., Zeitz M. Forschungsgebiet: parallele Simulationstechnik, *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo technicheskogo universitetu, seriya «Problemy modeluvannya ta avtomatizacii proektuvannya»*, 2008, No. 7(150), pp. 9–39.
9. Abramov F. A., Feldman L. P., Svyatnyy V. A. Modelirovanie dinamicheskikh procesov rudnichnoy aerologii. Kiev, Naukova dumka, 1981, 284 p.
10. Tanenbaum A., Austin T. Structured Computer Organization (6th Edition). Pearson, 2012, 800 p.
11. Conway R. W., Maxwell W. L., Miller L. W. Theory of Scheduling (2nd ed.). New York, DOVER PUBLICATIONS, 1967, 294 p.
12. Gilman A. L., Hayt Y. G. Raspisaniya v zadachah organizacii periodicheskoy obrabotki informacii, *Tehnicheskaya kibernetika*. Kharkov, Izvestiya akademii nauk SSSR, 1970, pp. 125–130.
13. Ivanov Y. A. Algoritm resheniya zadachi optimizacii dlya ciklicheskih raspisaniy s preryvaniyami, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2012, No. 2(27), pp. 97–102.
14. Ivanov Y. A. Optimizaciya vichislitel'nogo processa na mnogoyadernoy sisteme s ispolzovaniem algoritma iskusstvenoy pchelinoj kolonii, *Invormatyka, kibenytyka ta obchysluvalna tehnika*, 2013, No. 2 (18), pp. 19–25. ISSN 1996-1588.
15. RTX 2012 Release Notes : [catalog]. [IntervalZero, Inc., 2012], 20 p.
16. Kithara Real-Time Suite Version 9.23 : [catalog]. [Kithara Software GmbH, 2011], 105 p.
17. Williams A. C++ Concurrency in Action: Practical Multithreading. New York, Manning Publications, 2012, 528 p.
18. Akhter S., Roberts J. Multi-core programming: increasing performance through software multi-threading. Santa-Clara, Intel Press, 2015, 360 p.
19. Wilkinson B., Allen M. Parallel Programming Techniques & Applications Using Networked Workstations & Parallel Computers. Toronto, Pearson, 2004, 496 p.