

УДК 004.031.43

**Ю. А. Иванов** (аспірант)

Донецкий национальный технический университет  
yuriy.o.ivanov@gmail.com

## **АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены особенности выполнения циклических вычислений в задачах реального времени. Получены критерии существования и основные расчетные соотношения цикла реального времени. Выполнена оценка эффективности организации конкретных вычислительных процессов.

**Ключевые слова:** полунатурные системы, цикл реального времени, расписание выполнения.

### ***Способ организации обработки информации в реальном масштабе времени***

Использование в составе моделирующего комплекса реальной аппаратуры приводит к необходимости воспроизведения проблемных процессов и вычисления системных программ в установленные жесткие сроки. При этом определяющим фактором при этом является эффективная организация вычислительного процесса. Для решения этой задачи формулируется проблема оптимального планирования распределения машинного времени в системах моделирования реального времени, как задача построения расписаний выполнения программ обработки.

При проектировании исполняющей части моделирования динамической системы предлагается использовать особый класс расписаний организации вычислительного процесса, а именно циклические расписания. Особенность программно-аппаратных средств полунатурного моделирования заключается в разделении по частотам [1] моделируемых фазовых переменных задачи. Это приводит к тому, что для вычисления каждой переменной создаются отдельные программные потоки, каждый из которых выполняется циклически с заданным периодом. Отсюда следует, что в моделирующей системе должна использоваться организация вычислительного процесса, характерная для систем жесткого реального времени. Анализ научно-технической литературы показывает, что для построения циклических расписаний реального времени необходимо учесть опыт теоретических исследований, выполненных в работах [2], [3]. В цифровой части (ЦЧ) систем полунатурного моделирования, выполняются программы об

работки поступающей информации. Программы выполняются по соответствующим заявкам. Исполняющая часть программы системы моделирования характеризуется следующими начальными условиями: на ЦЧ поступают циклически  $n$  заявок на исполнение, каждой из которых необходимо процессорное время  $\tau_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) с периодом  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). При этом каждая заявка должна быть выполнена до поступления следующей такой же, а также все заявки должны быть выполнены до поступления следующей группы заявок спустя «полный период»  $T_{\psi} = \text{НОК}(T_i)$  ( $T_{\psi} \in \mathbb{N}$ ). Дополнительно введем понятие цикла реального времени (РВ-цикла) с периодом  $L$  ( $L \in \mathbb{N}$ ), на котором будет выполняться определенная доля  $\Delta$  ( $0 < \Delta \leq 1$ ) каждой заявки. Таким образом, выполнение каждой заявки будет синхронизировано значением  $L$ . При этом заявка будет обработана за  $k_i = \left\lceil \frac{\tau_i}{L} \right\rceil$  РВ-циклов, где  $\lceil x \rceil$  - определяется как наибольшее целое, меньшее или равное  $x$ . Соответственно изменятся фактические периоды обработки задач, они станут кратными выбранному для задачи значению РВ-цикла  $T'_i = k_i L \leq T_i$ . Вследствие этого изменится и значение полного периода  $T'_{\psi} = \sum_{i=1}^n T'_i$ . Тогда в полном цикле будет  $k = \left\lceil \frac{T'_{\psi}}{L} \right\rceil$  РВ-циклов.

Для решения этой задачи также характерен ряд особенностей. Основным является то, что поступающие на выполнение заявки и их характеристики известны до начала обработки и определяются условиями жесткого реального времени задачи моделирования. Следовательно, расписание для такой задачи строится заранее. Таким образом, для данной задачи рассматривать расписание поступления заявок (ПЗ-расписание) [2] не имеет смысла потому, что заявки подаются согласованно в моменты времени  $pT_{\psi}$  ( $p = 0, 1, 2, \dots$ ). Обработка же выполняется согласно построенного расписания и не зависит от поступающих заявок. На каждом РВ-периоде выполняется доля каждой задачи  $\Delta_i \tau_i$ .

Поскольку РВ-цикл имеет период  $L$ , то можно говорить, что  $\gamma_j = jL$  ( $j \in 1, \dots, k$ ). Также поскольку расписание является согласованным, можно ограничиться рассмотрением только одного периода  $T_{\psi}$  (рис.1).

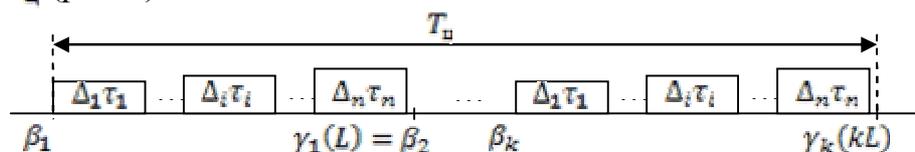


Рисунок 1 – Схема организации вычислительно процесса для одного полного периода  $T_{\psi}$

В соответствии с определениями [2] можем записать основные условия, выполнение которых предполагается для организации РВ-цикла:

$\alpha_j$  – момент поступления в систему  $j$ -ой заявки;

$\beta_j$  – момент начала выполнения  $j$ -ой заявки;

$\gamma_j$  – время окончания выполнения  $j$ -ой заявки.

1. Доли выполнения задач на каждом РВ-периоде одинаковы:

$$(\Delta_i \tau_i)_j = (\Delta_i \tau_i)_{j+r} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots; r = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

2. ПЗ и выполнения программ (ВП) расписания совпадают:

$$\beta_j = \alpha_j \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

3. Обработка группы заявок выполняется в каждом базовом цикле:

$$\beta_{j+r} = \beta_j + rL \quad (r = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

4. Одновременно может выполняться обработка не более одной заявки:

а) внутри РВ-цикла:

Определяется исходя из того, что в любой момент времени в РВ-цикле может происходить обработка только одной задачи, т.е. если среди набора задач выполняющихся в одном РВ-цикле выбрать две произвольные отличающиеся задачи с индексами  $h$  и  $d$ , то для их долей должно выполняться условие, что время начала выполнения доли задачи  $h$  больше чем время окончания выполнения доли задачи  $d$  или наоборот:

$$\begin{aligned} & (\beta_j + \sum_{i=1}^d \Delta_i \tau_i) - (\beta_j + \sum_{i=1}^{h+1} \Delta_i \tau_i) \geq 0 \cup \\ & \cup (\beta_j + \sum_{i=1}^h \Delta_i \tau_i) - (\beta_j + \sum_{i=1}^{d+1} \Delta_i \tau_i) \geq 0, \quad (4) \\ & (h, d = 1, 2, \dots, n; h \neq d) \end{aligned}$$

что может быть записано более компактно:

$$\{(\sum_{i=1}^d \Delta_i \tau_i - \sum_{i=1}^{h+1} \Delta_i \tau_i \geq 0) \cup (\sum_{i=1}^h \Delta_i \tau_i - \sum_{i=1}^{d+1} \Delta_i \tau_i \geq 0)\} \quad (5)$$

$$(h, d = 1, 2, \dots, n; h \neq d)$$

б) из разных РВ-циклов:

Определяется исходя из того, что в один момент времени может выполняться только один РВ-цикл, аналогично (а).

$$\{(\beta_d - \gamma_h \geq 0) \cup (\beta_h - \gamma_d \geq 0)\} \quad (6)$$

$$(h, d = 1, 2, \dots, k; d \neq h)$$

5. Выполнение программы обработки должно быть окончено не позднее момента поступления следующей группы заявок:

$$T_y - \gamma_k \geq 0 \quad (7)$$

Согласно [2] данное ВП расписание является согласованным, циклическим и допустимым, если для него выполняются условия (1-5).

**Оценка эффективности системы моделирования**

Для характеристики загрузки системы полунатурного моделирования вводится понятие коэффициента загрузки

$$\varphi = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\theta(t)}{t} \quad (8)$$

где  $\theta(t)$  – общие затраты машинного времени на обработку информации до момента времени  $t$ .

Поскольку выполнение программ обработки осуществляется по циклическому расписанию, то коэффициент загрузки можно представить в виде

$$\varphi = \frac{\theta(t_0 + \tau_u) - \theta(t_0)}{\tau_u}, \quad (9)$$

где  $t_0$  – произвольный момент времени.

Найдем выражение для коэффициента загрузки системы, работающей по расписанию общего вида. Величина  $\theta(t)$  может быть оценена сверху и снизу

$$\left(\left[\frac{t}{L}\right] - 1\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \leq \theta(t) \leq \left(\left[\frac{t}{L}\right]\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (10)$$

Данные неравенства являются следствием того, что в системе, работающей по допустимому ВП-расписанию [2], число выполненных к моменту  $t$  программ не может быть больше суммарного числа поступивших до этого момента заявок, что соответствует ограничению (2), и меньше, чем суммарное число заявок, срок исполнения которых уже истек, что соответствует ограничению (4).

Преобразуем данные неравенства, разделив все его части на  $t$

$$\frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right] - 1\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \leq \frac{\theta(t)}{t} \leq \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right]\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (11)$$

Выполним переход к пределам

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right] - 1\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\theta(t)}{t} \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right]\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (12)$$

Устремив  $t$  в бесконечность, получим равенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right] - 1\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right]\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (13)$$

Отсюда можем получить соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\theta(t)}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right]\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (14)$$

Справедливо также соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\left[\frac{t}{L}\right]\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \left(\frac{t}{L}\right) \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (15)$$

Таким образом, получаем

$$\varphi = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i \quad (16)$$

Оценка эффективности системы моделирования производится согласно определенному критерию качества построенного расписания. Для данной задачи целесообразным является минимизировать задержки при переключениях между задачами [3], которые вводятся из-за РВ-периода,

при этом при расчете критерия качества также учитывается изменение загрузки системы при использовании РВ-периода:

$$L = \arg \min_{L_v} F(L_v)$$
$$F = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \Delta_i \tau_i + \frac{T_p}{L} p \quad (17)$$

где  $p$  – время переключения между задачами (будем считать его постоянным),  $v$  – индекс всех рассматриваемых значений  $L$ .

### **Программно-аппаратная реализация РВ-цикла.**

Следующим этапом при рассмотрении вопросов диспетчеризации вычислительных процессов является разработка алгоритма ВП-расписания, возможный вариант построения которого был предложен в работе [4]. Однако для описанной выше задачи нет смысла рассматривать все возможные варианты ПЗ и ВП расписаний, поскольку сам вид организации вычислительного процесса определен заранее введением последовательного равномерного выполнения долей всех задач на РВ-цикле.

Следует отметить, что в работе [5] рассматривается подобная задача для реализации алгоритмов моделирования, решаемых одним из методов численного интегрирования. Однако при этом имеется ряд отличий с предлагаемым подходом. Значение базового периода при этом является кратным  $\min(T_i)$ . В данной работе оно может меняться в пределах  $[1..T_1]$ , что дает существенный прирост эффективности при выборе  $L$ , когда кратность присутствует для периодов  $T_i, i \neq 1$ . Одновременно, в [5] больше внимание уделено вопросам расчета временных характеристик функционирования системы при практической реализации. В данной же работе постановка и рассмотрение задачи организации РВ-циклов выполняется через понятие критерия оптимальности и ставится задача оптимизации  $L$ .

Полный цикл решения задачи управления системой сбора и обработки информации в цикле реального времени на примере реальной бортовой системы представлен в работе [3]. Эффективность работы системы повышается за счет оптимального распределения комплекса аппаратных и программных средств системы между источниками данных в соответствии с их информационной производительностью и пространственным положением. Такой подход оптимизирует временную диаграмму процесса сбора и обработки данных по критерию минимума загрузки вычислительных средств. Опустив рассмотренные в работе аппаратные решения, структуры и топологии, рассмотрим более подробно вопросы организации вычислительно процесса. Особенностью цикла выполнения является то, что во время обработки программ возникают паузы при

прерывании задачи диспетчером, либо в моменты, когда возвращается управление диспетчеру. Затраты процессорного времени  $\rho_d$  на диспетчеризацию рассчитываются исходя из особенностей структурной и аппаратной организации конкретной системы. В дальнейшем рассматривается оптимизация организации вычислительного процесса, базируясь на выражении:

$$\rho_{\pi} = 1 - \rho_d, \quad (18)$$

где  $\rho_{\pi}$  – потенциальный коэффициент полезной нагрузки процессора.

Существуют реализации подобных алгоритмов планирования и для многопроцессорных систем. Например, в работе [6] разработан эффективный субоптимальный алгоритм построения расписаний для иерархических систем. При этом учитываются особенности их структуры, что вносит существенные изменения в разрабатываемую модель вычислительного процесса. В различных системах могут существенно отличаться архитектурная организация, характеристики вычислительных блоков и шин, что вводит дополнительные ограничения и усложняет задачу построения расписания. В то же время эффект от применения расписаний, позволяет добиться повышения показателей производительности в таких системах.

Относительно новым является направление развития реконфигурируемых вычислительных систем [7]. В силу своих особенностей, они достаточно хорошо подходят для реализации описанных задач в масштабе реального времени. При этом организация вычислительного процесса заключается не только в разработке модели и ее программной реализации, а и в отображении необходимой архитектуры на аппаратные ресурсы реконфигурируемой вычислительной системы.

## **Выводы**

В результате проведенного анализа литературы установлены особенности задачи управления вычислительными процессами в системе реального времени: для всех задач обработки реального времени характерна цикличность; для повышения точности расчетной эффективности вычислительного процесса в реальных задачах дополнительно учитывается время работы программного монитора и накладные расходы на переключения. Разработан критерий оценки эффективности цикла реального времени полунатурной системы моделирования, отличающийся от известных работ по рассматриваемому направлению.

## **Список литературы**

1. Святный В.А. Устройство для обмена информацией между аналоговой и цифровой вычислительными машинами / В.А. Святный, И. М. Витенберг, Ю.А. Иванов. – Авторское свидетельство СССР ©1140135 кл. G06 j3\00, 1983 г.; Бюл. № 12.
2. Гильман А.Л. Расписания в задачах организации периодической обработки информации / А.Л. Гильман, Я.Г. Хаит // Техническая кибернетика. Известия академии наук СССР – X., 1970.
3. Виттих В.А. Оптимизация бортовых систем сбора и обработки данных / В.А. Виттих, В.А. Цыбатов. – М.: Наука, 1985.
4. Бейлин А.М. Планирование периодической обработки информации в системе, работающей без прерываний / А.М. Бейлин, А.Л. Гильман // Техническая кибернетика. Известия академии наук СССР. – X., 1973.
5. Шаповал В.Г. Определение и анализ условий обработки задач моделирования на ЦВС в гибридном вычислительном комплексе / В.Г. Шаповал. – 1984.
6. Колесов Н.В. Субоптимальный алгоритм построения расписаний для иерархических вычислительных систем / Н.В. Колесов, М.В. Толмачева // Информационно-управляющие системы. – 2006. – №2.
7. Гуленок А.А. Синтезатор структурных параллельных прикладных программ для многокристальных реконфигурируемых вычислителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гуленок А.А. – Таганрог, 2011.

*Надійшла до редакції 05.11.2011.*

*Рецензент: канд. техн. наук, доц. Красник М.Ю.*

### **Ю.О. Иванов**

Донецький національний технічний університет

**Аналіз виконання програм при моделюванні динамічних систем.** Розглянуто особливості виконання циклічних обчислень задач реального часу. Отримано критерії існування та основні розрахункові співвідношення циклу реального часу. Виконано оцінку ефективності організації конкретних обчислювальних процесів.

*Ключові слова: полунатурні системи, цикл реального часу, розклад виконання.*

### **Y. O. Ivanov**

Donetsk National Technical University

**Scheduling Analysis for Dynamic Systems Simulation.** In the paper features of the computing performance tasks in real time are analyzed. Criteria for the existence and the calculation parameters in real time are estimated. The aim is to evaluate effectiveness of organization-specific computational processes.

**Keywords: scaled-down system, real-time loop, execution schedule.**