

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ В ОПТИМИЗИРУЕМОЙ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЕ АВИОНИКИ

М. Г. Матвеев*, Н. И. Сельвесюк**, Г. А. Платошин**, М. Е. Семенов***

**Воронежский государственный университет*

***Государственный научный центр ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС)*

****ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Поступила в редакцию 28.12.2016 г.

Аннотация. В работе предложен подход и алгоритм распределения функций по модульным вычислительным устройствам авионики в неоднородном многопроцессорном комплексе с общей операционной системой реального времени и общей памятью, с процессорами, в общем случае, различной производительности. Задача исследования состоит в определении такого соответствия между функциями и процессорами, которое обеспечит решение многоцелевой задачи, при заданных ограничениях. Поставленная задача решается, основываясь на методах планирования ресурсно-ограниченного проекта. С помощью диаграммы Ганта устанавливается минимально необходимое количество параллельно работающих процессоров, строится временная диаграмма, отображающая структуру изменения состояний процессоров во времени и временная диаграмма назначений для ограничений по производительности. Отличие предложенного подхода от известных заключается в том, что необходимая исходная информация для решения задачи распределения – структура функций и базовое время их выполнения, не зависит от проектировщика. Проектировщик выбирает только ограничения на количество процессоров и их производительность, но не задает эти параметры как константы.

Ключевые слова: авионика, многопроцессорный комплекс, многоцелевые задачи, задачи распределения.

Annotation. An approach and algorithm of the distribution functions of the modular avionics computing devices in a heterogeneous multiprocessor complex with a common real-time operating system and the shared memory to the processors, in general, of different capacity. The research task is to determine such a correspondence between functions and processors, which will provide a solution to the multi-task problem, given the constraints. The task is solved based on the methods of planning a resource-limited project. Using Gantt chart set minimum number of processors operating in parallel, we construct a time chart showing changes in time structure processor states and a timing diagram for appointments performance constraints. Unlike the proposed approach it is to see that the necessary background information to address the problem of distribution - the structure and basic functions of execution time, regardless of the designer. The designer chooses only limits on the number of processors and their performance, but does not specify these parameters as constants.

Keywords: Avionics, multiprocessor complex, multi-purpose tasks, distribution problems.

ВВЕДЕНИЕ

Интегрированная модульная авионика представляет собой совокупность бортовых

компьютерных систем летательного аппарата, предназначенных для реализации в реальном времени функций контроля и управления различными режимами полета. Множество функций Φ может быть представлено сетевой структурой, частичный порядок которой определяется логической последовательно-

© Матвеев М. Г., Сельвесюк Н. И., Платошин Г. А., Семенов М. Е., 2017

стью выполнения функций и (или) их информационными связями. Актуальной задачей проектирования модульной авионики является распределение вычислительных функций контроля, управления и обмена информацией по модульным вычислительным устройствам, обеспечивающим программную реализацию этих функций [1].

Бортовая вычислительная система авионики может быть многомашинным или многопроцессорным вычислительным комплексом [2]. Мы будем рассматривать многопроцессорный комплекс с общей операционной системой реального времени и общей памятью, с m процессорами, в общем случае, различной производительности. Введем следующие ограничения и допущения:

- считается, что рациональная декомпозиция функций контроля и управления на элементы множества Φ произведена и на множестве установлен частичный порядок;

- не допускается реализация одной функции на двух процессорах;

- процессор не может одновременно выполнять две функции, последующая функция может выполняться только после завершения выполнения предыдущей;

- производительность процессоров может быть различной, но это различие ограничивается конечным числом значений производительности;

- практически все функции авионики выполняются в реальном времени, т. е. должны быть выполнены за заданный промежуток времени T_0 между моментами поступления информации о текущем состоянии летательного аппарата и его устройств.

Показателями эффективности проектируемой системы интегрированной модульной авионики являются: стоимость, вес, быстродействие и надежность [3]. При заданном типе технических средств показатели стоимости и веса кооперируются в критерий количества процессоров, $q_1 = m$ – чем меньше q_1 (меньше процессоров), тем лучше, при условии выполнения всех функций за время меньше T_0 . Показатель быстродействия можно рассматривать в форме критерия минимизации времени выполнения функций авиони-

ки – q_2 , аргументами которого являются структура множества Φ и количество процессоров – m . Очевидно, что указанные критерии конфликтуют, так как улучшение q_1 влечет ухудшение q_2 и наоборот.

Таким образом, задача исследования состоит в определении такого соответствия G между функциями и процессорами, которое обеспечит решение многоцелевой задачи $(q_1, q_2) \rightarrow \min$, при заданных ограничениях. Если критерий $q_1 \rightarrow \min$ заменить на ограничение $m \leq m_{\max}$, где m_{\max} – максимально допустимое число процессоров в бортовой компьютерной системе, то задача оптимизации становится скалярной и может иметь единственное решение. При этом решение должно включать не только построение собственно соответствия G , но и определять минимально необходимое количество процессоров и их производительность для случая неоднородной вычислительной сети.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Введем множество S состояний процессоров в бортовой вычислительной системе. Состояния меняются в промежутке времени T_0 и представляются в рассматриваемый момент времени следующими двумя конструкциями: «процессор i выполняет функцию j » и «процессор i простаивает». Временное упорядочивание смены состояний процессоров определяет структуру множества S по аналогии со структурой множества Φ .

Систему интегрированной модульной авионики можно рассматривать как соответствие $G: \Phi \rightarrow S$, пример которого показан на рис. 1.

Перепишем представление Φ в форме стрелочного графа, дуги которого отображают функции, а вершины – моменты времени начала и окончания выполнения функций. Введем следующие обозначения: (i, j) – функция, начинающаяся в вершине i и заканчивающаяся в вершине j ; t_i, t_j – моменты времени соответствующие вершинам i и j ; $t_{ij}(x_{ij})$ – продолжительность вычислитель-

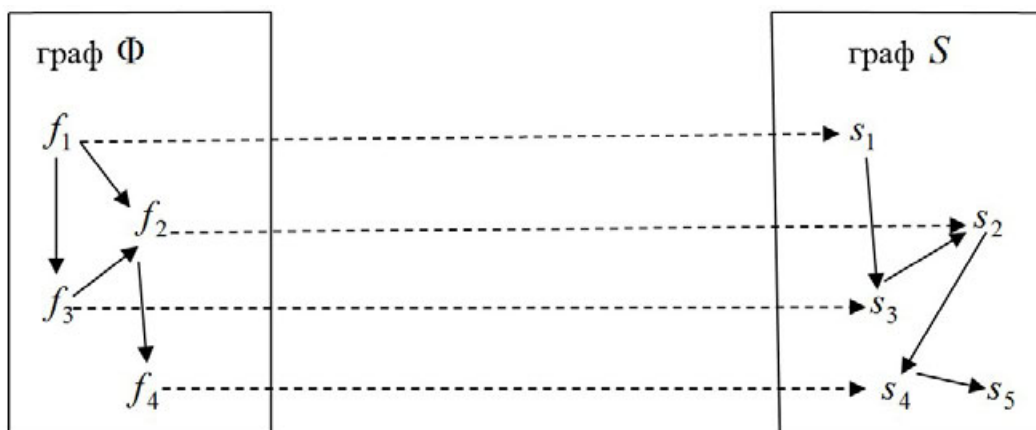


Рис. 1. Пример соответствия состояний процессоров s_i функциям f_i при соответствии G , показанном штриховыми линиями

ных операций реализующих функцию $(i; j)$, зависящая от ресурса x_{ij} , выделенного на ее выполнение, т.е. от производительности процессора на который эта функция назначена. Графы Φ и M параметрические графы, их параметрами могут быть время t_{ij} выполнения функций $(i; j)$ или критичность (приоритетность) этих функций у графа Φ ; производительность x процессора или коэффициент использования процессора у графа M .

На структуру и параметры графов могут накладываться ограничения. Например, временной интервал между вершинами $i; j$ не может быть меньше продолжительности функции $(i; j)$, т. е. $t_j - t_i \geq t_{ij}$, что рассматривается как структурное ограничение; ограниченность временных и материальных ресурсов определяет параметрические ограничения, например, ограничение $m \leq m_{\max}$ рассмотренное в предыдущем разделе.

Особенностью задачи является наличие в соответствии G обратной связи: структура и параметры графа M влияют на параметры графа Φ . Действительно, время выполнения функций зависит от выбранного соответствия G , количества процессоров и их производительности.

Структура и параметры системы $G^*: \Phi \rightarrow M^*$ могут быть синтезированы во множестве вариантов, удовлетворяющих заданным ограничениям. Поэтому актуальна постановка задачи ее оптимизации. В практических приложениях целесообразно рассмотреть три варианта этой задачи:

А) Структура графа Φ задана, т. е. задано множество функций и отношения частичного порядка на этом множестве. Необходимо выбрать такое соответствие G , задающее структура графа M , и такие параметры этого графа, которые обеспечат оптимум некоторого критерия (возможно векторного) при заданных ограничениях на ресурсы. Например, таким критерием (скалярным) может быть минимизация времени выполнения функций авионики, необходимая с точки зрения управления в реальном времени.

Б) Структура графа Φ задана и заданы параметры графа M . Необходимо выбрать такое соответствие G , которое обеспечит оптимум некоторого критерия (возможно векторного) при заданных ограничениях на временные ресурсы. Например, таким векторным критерием может быть минимизация общего времени выполнения функций и максимизация коэффициентов использования процессоров.

В) Необходимо выбрать такую декомпозицию функций графа Φ , которая обеспечивает максимальную независимость $f \in \Phi$. В этом случае решение задачи минимизации общего времени выполнения функций упрощается и обеспечивается максимальная эффективность использования вычислительных средств.

Задачи Б) и В) характерны для диспетчеризации параллельных вычислений на многопроцессорном комплексе с заданными параметрами [4]. В таких приложениях часто используются эвристические алгоритмы, на-

пример, основанные на итерационном применении решающего правила распределения функций по процессорам [4, 5]: на i -й свободный процессор последовательно назначаются функции, начиная с наиболее продолжительной по времени, после исчерпания ресурса i -го процессора осуществляется переход к $i + 1$ -процессору и т. д. до завершения распределения всех функций.

Применительно к управлению конфигураций устройств авионики задачу Б) решали в работе [3], где рассматривается задача о назначении множества функций на множество вычислительных модулей многопроцессорного комплекса с минимизацией функции загрузки сети и ограничений на производительность вычислительных модулей, а также требования реализации каждой функции на одном модуле. Алгоритм реализации основан на модификации приведенного решающего правила. Однако при этом количество процессоров (вычислительных модулей) в системе и их производительность должны быть заранее заданы, что соответствует целям реконфигурирования, но не обеспечивает задачи проектирования.

Задачу В) решали, например, в работе [2], где была предложена такая декомпозиция функций и их конфигурация, которые обеспечили взаимную независимость функций авионики, высокую производительность решения, высокую надежность функционирования и простое назначение – каждой функции назначается свой вычислительный модуль. Однако, такой подход не обеспечивает оптимальность проектных решений в смысле приведенных критериев эффективности интегральной модульной авионики.

Примем, что задачи проектирования интегральной модульной авионики состоят в определении структуры и параметров графа M : соответствия G , минимально необходимого количества процессоров и их производительность при заданных структуре графа Φ и ограничениях на ресурсы.

Задачам проектирования наиболее релевантен вариант А), реализация которого составляет цель нашего исследования. В этой связи предлагается подход к решению по-

ставленной задачи, основанный на методах планирования ресурсно-ограниченного проекта (resource constrained project scheduling problem, RCPSP) [6].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ RCPSP

Пусть структура множества Φ представлена стрелочным графом, дуги которого отображают функции, а вершины – моменты времени начала и окончания выполнения функций. Для стрелочных графов характерно наличие фиктивных функций с нулевой продолжительностью выполнения, которые на графе будем обозначать штриховыми дугами. Примерный вид такого графа показан на рис. 2.

Тогда задача минимизации времени выполнения всех функций в условиях ограничений может быть представлена в следующем виде:

$$t_n - t_0 \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} t_j - t_i &\geq t_{ij}(x_{ij}), \quad \forall(i, j); \\ T = t_n - t_0 &= \sum_i t_{ij}^k < T_0; \\ t_i &\geq 0, \quad i = t_0; t_1; \dots; t_n, x_{ij} \in X \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь T определяется как сумма продолжительностей t_{ij}^k функций, лежащих на критическом (самом продолжительном) пути графа; X – подразумевает совокупность имеющихся ограничений на производительность процессоров.

Выбор X играет важную роль как в подходах к решению задачи (1)–(2), так и в получаемых результатах. Будем считать, что имеется возможность выбирать из располагаемого количества процессоров с заданными производительностями – $m_{\max} = m_1 + m_2 + \dots + m_k$, где m_i – количество процессоров i -ой производительности. Допустимые производительности представлены вектором (x_1, x_2, \dots, x_k) и измеряются как кратности минимального x_i (в два раза выше, в три раза выше и т. д.). Обозначение x_{ij} суть производительность при реализации функции (i, j) , оптимальная с точки зрения критерия (1). Очевидно, что расчетное значение x_{ij} может не совпасть с

целочисленным x_i , тогда допускается округление до ближайшего целого значения. В таком случае ограничение по производительности можно задавать в виде:

$$x_i^{\min} \leq x_{ij} \leq x_i^{\max} \quad (3)$$

Решение (1)–(2) обычно отображается специальной временной диаграммой, которая называется диаграммой Ганта [7] и позволяет определить минимально необходимое количество процессоров как $\max\{m_t\}$, где m_t – количество параллельно выполняющихся функций на диаграмме в момент времени t .

Целесообразно выделить следующие этапы решения.

Первый этап – решение задачи (1)–(2), определение моментов времени $t_1; \dots; t_n$ и необходимой производительности x_{ij} при реализации функции (i, j) .

Второй этап – округление не целых значений x_{ij} до ближайших значений x_i и пересчет времени выполнения функций.

Третий этап – построение диаграммы Ганта с учетом выбранной производительности и определение минимально необходимого количества процессоров.

Четвертый этап – формирование соответствия G на основании простых эмпирических правил, которые будут рассмотрены в примерах.

Следует заметить, что в предлагаемом подходе, в отличие от известных подходов, необходимая исходная информация для решения задачи распределения – структура функций и базовое время их выполнения, не зависит от проектировщика. Проектировщик выбирает только ограничения на количество процессоров и их производительность, но не задает эти параметры как константы. В качестве оценки эффективности выбора ограничений предлагается использовать коэффициент загрузки процессоров в варианте распределения, который считается по формуле:

$$k = \sum_{k=1}^n t^k / T_0 m, \quad (4)$$

где t^k – время выполнения k -ой функции, m – вычисленное количество процессоров.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПО УСТРОЙСТВАМ АВИАНИКИ

Рассмотрим решение (1)–(2) на примере распределения функций в неоднородном многопроцессорном комплексе, т. е. в комплексе, включающем процессоры с различной производительностью. Пусть граф Φ имеет вид, показанный на рис. 1. Ограничения на производительность представлены рядом значений $x_1 = 1; x_2 = 2$. Такт цикла реального времени $T_0 = 7,5$. Функция $t_{ij}(x_{ij}) = t_{ij}^0 / x_{ij}$, где t_{ij}^0 – продолжительность функции (i, j) на процессоре с единичной производительностью; $t_{01}^0 = 1; t_{12}^0 = 4; t_{13}^0 = 2; t_{14}^0 = 1; t_{43}^0 = 6; t_{23}^0 = 0; t_{45}^0 = 2; t_{53}^0 = 0; t_{36}^0 = 7$. Решение (1)–(2) будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} t_0 = 0; t_1 = 0,5; t_2 = 4; t_3 = 4; \\ t_4 = 1; t_5 = 4; t_6 = 7,5; \\ x_{01} = 2; x_{12} = 2; x_{13} = 1; x_{14} = 1; \\ x_{43} = 2; x_{45} = 1; x_{36} = 2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

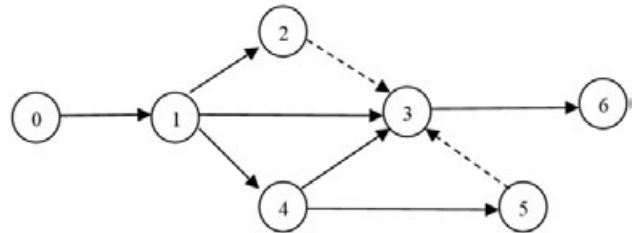


Рис. 2. Пример графа Φ

На рис. 3 показана диаграмма Ганта, отображающая решение (4), по оси абсцисс откладывается время, по оси ординат – функции графа Φ . Черным фоном показана продолжительность выполнения функций, серым фоном – вынужденный простой, определяемый порядком выполнения функций, который трактуется как временной резерв соответствующей функции. Функции без резерва времени образуют так называемый критический путь, связывающий начальную и конечную вершины графа Φ , в нашем случае это последовательность функций $(0;1), (1;4), (4;3), (3;6)$.

С помощью диаграммы Ганта легко установить минимально необходимое количество параллельно работающих процессоров. Видно, что в промежутке времени от 1 до 2,5 од-

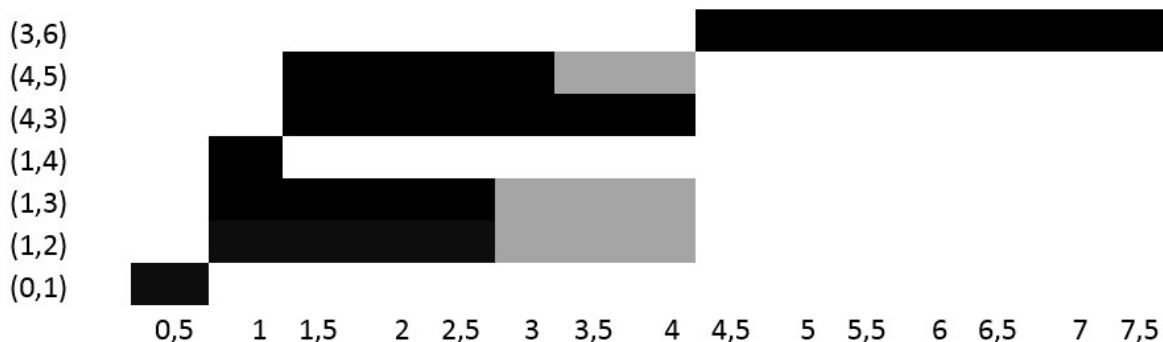


Рис. 3. Временная диаграмма выполнения функций (диаграмма Ганта) процессорами с производительностью 1 и 2

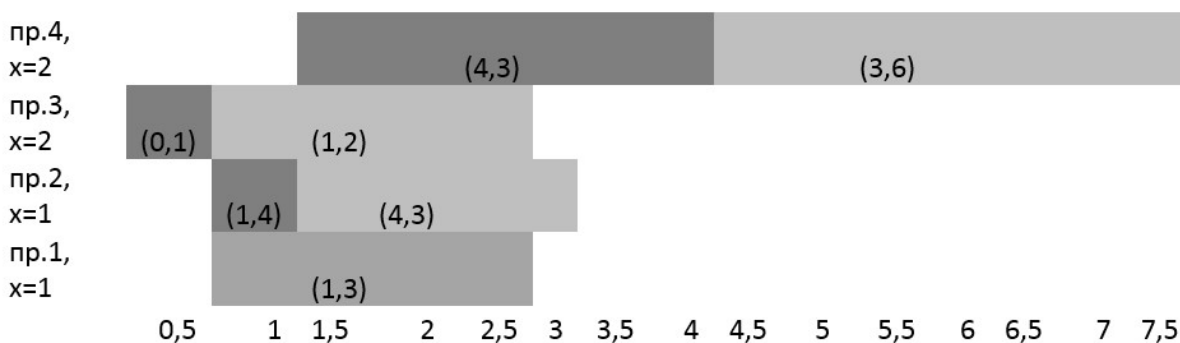


Рис. 4. Временная диаграмма изменения состояний процессоров, $x_1 = 1; x_2 = 2$

новременно выполняются четыре функции, т. е. минимально необходимое количество процессоров $m = 4$.

Теперь можно построить временную диаграмму множества M , отображающую структуру изменения состояний процессоров во времени, при соответствии G . Правила формирования соответствия достаточно простые:

- сначала все функции группируются по назначенной им производительности;
- в каждой группе строится последовательность функций таким образом, чтобы в этой последовательности не было параллельно выполняемых функций; эта последовательность назначается процессору с соответствующей производительностью; для параллельно выполняемых функций строится своя последовательность и назначается аналогичному по производительности процессору.

Временная диаграмма назначений для ограничений по производительности $x_1 = 1; x_2 = 2$ показана на рис. 4, где по оси абсцисс время, а по оси ординат номера процессоров

Итоговые характеристики распределения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Итоговые характеристики эффективности распределения функций по процессорам

x	m	T	k
{1; 2}	4	7,5	0,45

Пусть теперь количество процессоров ограничено $m_{\max} = 4$ и изменять можно только производительность. Рассмотрим как влияет расширение ограничений производительности на характеристики эффективности распределения функций по процессорам. Изменим в выше рассмотренном примере ограничения на производительность – $x_1 = 1; x_2 = 2; x_3 = 3$. Решение (1)–(2) будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} t_0 = 0; t_1 = 0,33; t_2 = 2,67; t_3 = 2,67; \\ t_4 = 0,67; t_5 = 2,67; t_6 = 5; \\ x_{01} = 3; x_{12} = 2; x_{13} = 1; x_{14} = 1; \\ x_{43} = 3; x_{45} = 1; x_{36} = 3. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

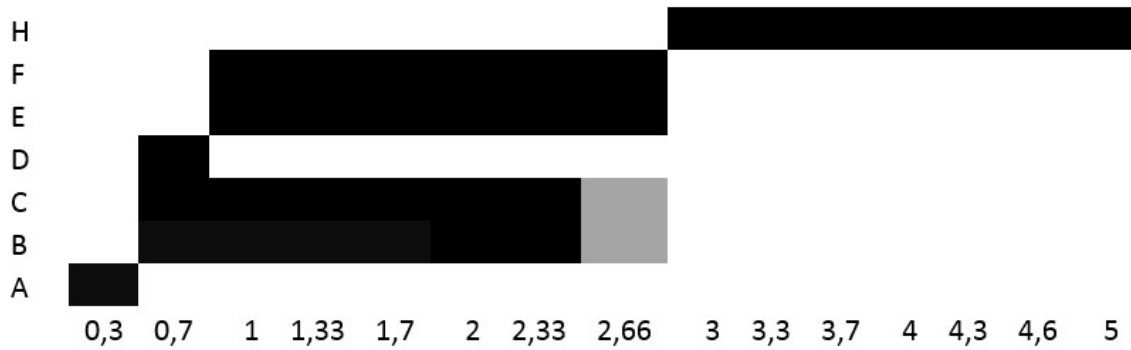


Рис. 5. Временная диаграмма выполнения функций (диаграмма Ганта) процессорами с производительностями 1, 2 и 3

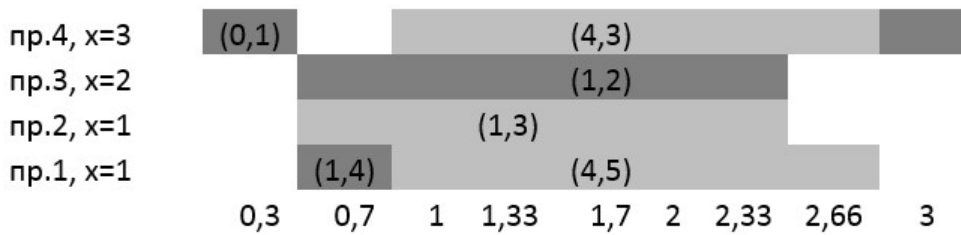


Рис. 6. Временная диаграмма изменения состояний процессоров, $x_1 = 1; x_2 = 2; x_3 = 3$



Рис. 7. Временная диаграмма выполнения функций (диаграмма Ганта) процессорами с производительностями 1, 2, 3 и 4

Соответствующая диаграмма Ганта имеет вид, показанный на рис. 5, из которого следует, что $m = 4$.

Временная диаграмма назначений для указанных производительностей показана на рис. 6.

Итоговые характеристики распределения приведены в табл. 2.

Таблица 2
Итоговые характеристики эффективности распределения функций по процессорам

x	m	T	k
{1; 2; 3}	4	5	0,55

Повторим все расчеты для ограничений производительности – $x_1 = 1; x_2 = 2; x_3 = 3; x_4 = 4$. Решение (1)–(2) будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} t_0 = 0; t_1 = 0,25; t_2 = 2; t_3 = 2; \\ t_4 = 0,5; t_5 = 2; t_6 = 3,75; \\ x_{01} = 4; x_{12} = 2; x_{13} = 1; x_{14} = 1; \\ x_{43} = 4; x_{45} = 1; x_{36} = 4. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Соответствующая диаграмма Ганта имеет вид, показанный на рис. 7, из которого следует, что количество процессоров не изменилось, $m = 4$.

Временная диаграмма назначений для указанных производительностей показана на рис. 8.

Итоговые характеристики распределения приведены в табл. 3.

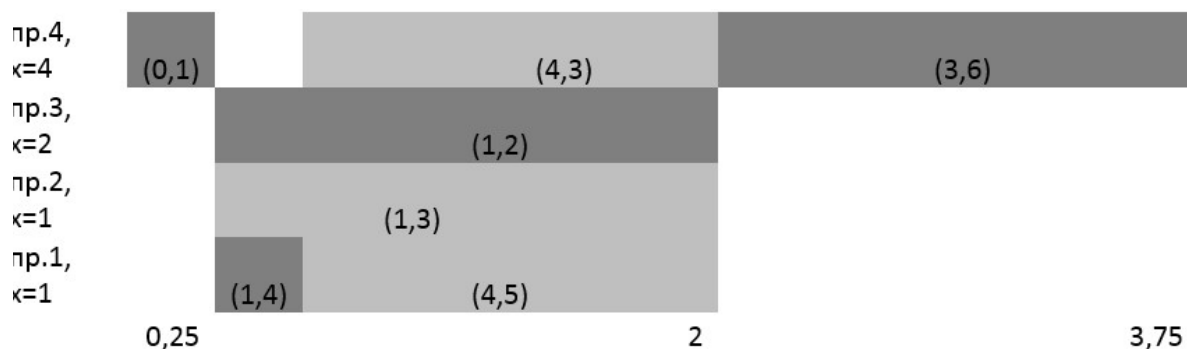


Рис. 8. Временная диаграмма изменения состояний процессоров, $x_1 = 1; x_2 = 2; x_3 = 3; x_4 = 4$

Итоговые характеристики эффективности распределения функций по процессорам

x	m	T	k
{1; 2; 3; 4}	4	3,75	0,58

Анализ рассмотренных решений показывает, что увеличение производительности до целочисленного максимума применяется к функциям, лежащим на критическом пути, что снижает возможные погрешности, связанные с округлением расчетных значений по правилам формирования соответствия G .

Рассмотренные примеры показывают, что сокращение времени выполнения всех функций в цикле управления достигается многопроцессорным комплексом с фиксированным количеством процессоров различной производительности. Одновременно с сокращением времени выполнения функций возрастает коэффициент загрузки процессоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход и алгоритмы распределения функций по модульным вычислительным устройствам авионики при проектировании системы реального времени управления летательным аппаратом обеспечивает оптимальность распределения в смысле минимизации продолжительности выполнения всех функций в цикле управления. Другими словами, применение этого подхода обеспечивает расчет нижнего порога величины такта квантования времени в системе управления, при оптимальном выборе количества и производительности вычислительных устройств многопроцессорного комплекса.

Реализация такого подхода потребует функций супервайзера для управления переключениями функций на назначенные процессоры в заданные моменты времени. Для функций супервайзера может понадобиться дополнительный процессор, но можно использовать имеющиеся вычислительные устройства, с распределением функций супервайзера по свободным временным отрезкам наименее загруженных процессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики / Г. А. Чуянов, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвисюк. – Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 55–62.
2. Декомпозиционные методы в задачах распределения вычислительных ресурсов многомашинных комплексов бортовой авионики / Б. В. Видин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов – Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 1. – С. 1–5.
3. Дегтярев А. Р., Медведев Г. В. Алгоритм распределения задач в многопроцессорных комплексах интегрированной модульной авионики // Автоматизация процессов управления. – 2014. – Т. 35, №1. – С. 79–84.
4. Buyya R., Abramson D., Giddy J. Nimrod/G: An architecture for a resource management and scheduling system in a global computational Grid // Proceedings of the 265 4th International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region. – 2000. – P. 283–289.
5. Nimrod/G: An architecture for a resource management and scheduling system in a global

computational Grid Gairing M., Luching T., Mavronicolas M., Monien B. Computing Nash Equilibria for Scheduling on Restricted Parallel Links // Proc. 36th Annual ACM Sympos. Theory Comput. – 2004. – P. 613–622.

6. *Mingozzi A.* An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling prob-

lem based on a new mathematical formulation / A. Mingozzi, V. Maniezzo, S. Ricciardelli // Management Science. – 1998. – 44(5). – С. 714–729.

7. Руководство к своду знаний по управлению проектами, 4 издание (руководство PMBOK). – Project Management Institute, Inc. – 2008. – 241 с.

Матвеев Михаил Григорьевич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой информационных технологий управления Воронежского государственного университета.

Сельвесюк Николай Иванович – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник Государственный научный центр ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС), Москва.

Платошин Георгий Александрович – и.о. начальника сектора Государственный научный центр ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС), Москва.

Семенов Михаил Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры 11 теоретической гидрометеорологии ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж; профессор кафедры цифровых технологий Воронежского государственного университета.

E-mail: mkl150@mail.ru

Matveev Mikhail G. – Head of the department Information technologies of the Voronezh State University.

Selveysuk Nikolai I. – Chief Researcher State Research Institute of Aviation Systems, Moscow.

Platoshin Georgiy A. – State Research Institute of Aviation Systems, Moscow.

Semenov Mikhail E. – Theoretical Hydrometeorology Department, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh; Digital Technologies Department, Voronezh State University.

E-mail: mkl150@mail.ru