

УДК 681.324

**В.В. ЕЛИСЕЕВ**

*ЗАО «Северодонецкое НПО «Импульс», Украина*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕТОДОВ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ НАБОРОВ ЗАДАЧ В НЕОДНОРОДНЫХ ПТК**

Предложена математическая модель для оценки методов диспетчеризации наборов задач в неоднородных программно-технических комплексах систем контроля и управления. Рассмотрены вопросы формальной оценки, сравнения и выбора дисциплин динамической диспетчеризации работ.

**интеллектуальная система поддержки оперативного персонала, программная модель энергоблока АЭС, программно-технические комплексы, методы диспетчеризации наборов задач**

### **Введение**

В настоящее время одним из главных актуальных направлений научных исследований на Украине является повышение безопасности и эксплуатационной надежности объектов атомной энергетики [1]. Одним из способов обеспечения уровня радиационной и ядерной безопасности АЭС, соответствующего международным требованиям, является введение в состав информационных и управляющих систем [2, 3] интеллектуальных систем поддержки оперативного персонала (ИСПП). Реализация ИСПП предполагает создание сложных математических моделей технологических систем с анализом прогнозной и текущей информации об объекте. К настоящему времени накопилась достаточно обширная теоретическая база по вопросам моделирования энергоблоков АЭС и его компонентов, а также по концепции прогнозных систем. Результаты работ по созданию моделей ядерных реакторов и энергоблоков АЭС нашли, в частности, отражение в работах [4 – 8]. Например, для системы внутриреакторного контроля (СВРК) реактора ВВЭР-1000 функциями ИСПП являются: прогнозирование нейтронно-физических характеристик активной зоны при эксплуатации энергоблока, прогнозирование отклика активной зоны на воздействие оператора; поддержка оператора в режиме советчика во всех режимах

нормальной эксплуатации. ИСПП СВРК представляет собой программный комплекс (приложение), состоящий из набора задач, моделирующих функционирование отдельных узлов энергоблока с учетом воздействия на них регуляторов и взаимодействия узлов между собой по параметрам рабочих сред с учетом обратных связей. Модели имеют многоуровневую иерархическую структуру с вертикальными и горизонтальными связями, отражающими реальные связи. Например, программная модель энергоблока с ВВЭР-1000 включает модели реакторной установки, второго контура, турбогенератора, которые, в свою очередь, состоят из подмоделей. Таким образом, модель энергоблока представляет собой набор взаимосвязанных последовательно-параллельных программных модулей (задач).

Расчеты моделей должны проводиться в ускоренном масштабе времени (относительно реального масштаба времени), так как недопустимо ухудшать реакцию оператора-технолога более чем на 10%. В основе большинства способов достижения требуемой производительности лежит представление приложений в виде набора задач (или комплекса взаимосвязанных работ) [9], с точками их разветвления и объединения. Подобное представление создает возможность такой организации вычислительного процесса, при котором параллельно во времени могут выполняться задачи на различных ресурсах про-

граммно-технического комплекса (ПТК) [10].

**Целью данной статьи** является решение задачи формальной оценки и выбора дисциплин диспетчеризации задач по вычислителям ПТК по критерию минимизации времени выполнения каждого конкретного приложения, состоящего из набора взаимосвязанных последовательно-параллельных программных модулей.

**Содержательная постановка задачи.** Для реализации приложений требуются значительные вычислительные ресурсы, которые однопроцессорная ЭВМ не в состоянии предоставить. Для преодоления этого барьера целесообразно использовать ПТК, состоящий из нескольких компьютеров, объединенных быстродействующей локальной сетью (рис. 1).

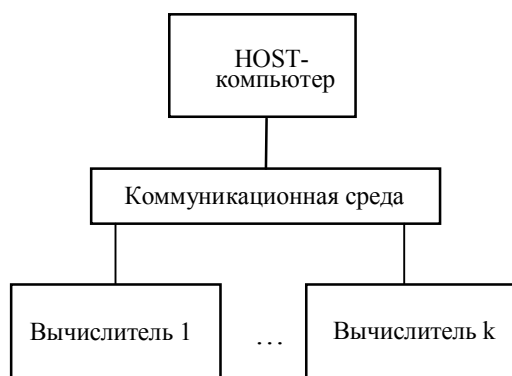


Рис. 1. Структурная схема ПТК

Подобные структуры обладают высокой совокупной вычислительной мощностью и позволяют в ряде случаев обойтись без применения дорогостоящих сверхбыстродействующих процессоров с уникальной архитектурой. Отметим, что ПТК на базе ЛВС можно рассматривать как одну из разновидностей вычислительного кластера. В кластерах отдельные компьютеры соединены высокоскоростной сетью. На каждом компьютере установлено промежуточное программное обеспечение для работы компьютера в составе кластера.

ПТК может строиться как совокупность полнофункционального компьютера (HOST-компьютер) и подчиненных ему компьютеров для вычислений

(вычислителей). HOST-компьютер и вычислители могут быть построены на базе промышленных компьютеров в исполнении «для АЭС» [10], причем в составе вычислителей не обязательны графические карты, дисплеи и другое периферийное оборудование. В качестве операционной системы (ОС) ПТК может использоваться широко распространенная ОС Linux. Встроенная аппаратная поддержка функций ОС, в частности, по переключению задач, практически «свела к нулю» накладные расходы по управлению параллельным вычислительным процессом как на уровне выполнения фрагментов каждой программы, так и на уровне нескольких программ. ПТК может быть оснащен одной из систем параллельного программирования, предоставляющей возможность распределенной обработки данных.

Рассматриваемое далее исследование является составной частью технологии обеспечения надежного выполнения взаимосвязанных задач в параллельных вычислительных системах реального времени, включая параллельные ПТК [11]. Требование минимизации времени выполнения приложения приводит к актуальной проблеме выбора рационального алгоритма диспетчеризации (планирования, расписания) наборов задач. За счет применения рационального алгоритма диспетчеризации (при незначительных издержках на его разработку и функционирование) можно заметно уменьшить общее время выполнения заданного набора задач.

### Описание математической модели

Особенности данного исследования, отличающие его от известных работ по аналогичной проблематике, заключаются в следующем:

– дисциплины диспетчеризации исследуются на основе методологии математического прогнозирования времени выполнения сложных наборов задач с произвольными информационными и логическими взаимозависимостями между задачами [9, 11]; такие

наборы названы комплексами взаимосвязанных работ (КВР);

- времена выполнения работ КВР могут быть различны и рассматриваются как случайные величины;

- рассматривается выполнение КВР в неоднородных (несимметричных) ПТК, где одни и те же работы могут выполняться на вычислителях разных типов, имеющих различную производительность, а, следовательно, с различными временами выполнения одной и той же работы;

- в отличие от ближайшего прототипа – работы [12] – рассматриваемые здесь неоднородные ПТК включают в себя произвольное число  $k \geq 2$  вычислителей с различной производительностью.

В данном исследовании решается задача формальной оценки и выбора дисциплин динамической диспетчеризации работ КВР (из априорно заданного набора дисциплин) по  $k \geq 2$  вычислителям ПТК, отличающимся по производительности, для каждого конкретного КВР, задаваемого пользователем, при случайных временах выполнения работ КВР, с целью минимизации времени выполнения каждого конкретного КВР в неоднородном ПТК.

Как уже упоминалось, каждая работа КВР может быть реализована на любом из  $k$  вычислителей ПТК, но с различными временами выполнения. Введем величину  $h_i$  – коэффициент увеличения среднего времени  $\bar{t}_i$  выполнения работы КВР на  $i$ -м вычислителе по сравнению со средним временем  $\bar{t}_1$  выполнения этой же работы на самом “быстром” из вычислителей ПТК (для определенности припишем самому быстрому вычислителю номер 1). Тогда вектор  $h = (h_1, \dots, h_i, \dots, h_k)$  трактуется как вектор коэффициентов  $h_i$  асимметрии системы. Принимается, что  $h_1 = 1$ , а среднее время выполнения любой  $j$ -й работы КВР на любом из  $k$  вычислителей ПТК выражается следующим образом:

$$\bar{t}_{i,j} = \bar{t}_j \times h_i, \tag{1}$$

где  $i$  – номер вычислителя, на котором выполняется  $j$ -я работа;  $\bar{t}_j$  – среднее время выполнения  $j$ -й работы на самом “быстром” из вычислителей,  $i = 1, \dots, k$ .

При единичном векторе  $h = (1, \dots, 1, \dots, 1)$  ПТК рассматривается как однородная (симметричная) вычислительная система.

По аналогии с [9, 11, 12], КВР задается в виде простого ориентированного графа  $G(A, H)$  с конечным числом  $N$  вершин, где вершина  $\alpha_j \in A$  соответствует  $j$ -й работе ( $j = 1, \dots, N$ ), а множество дуг  $H$  отображает информационно-логические связи между работами (рис. 2). Граф  $G$  заданного КВР описывается таблицей связности его вершин (табл. 1).

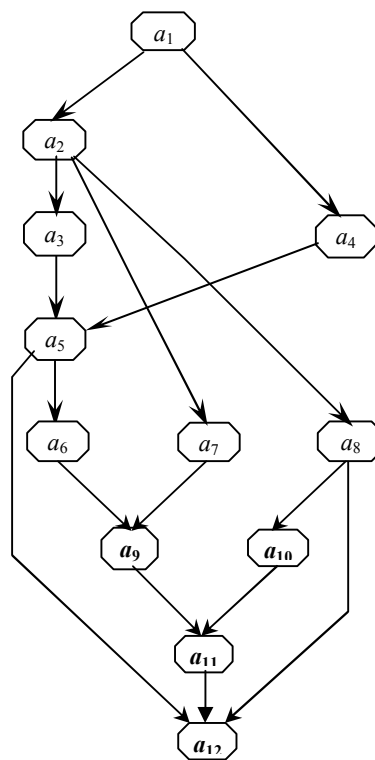


Рис. 2. Граф КВР

Предлагается общая (унифицированная) математическая модель процесса выполнения КВР в неоднородных ПТК, с произвольным числом  $k \geq 2$  неод-

нотипных вычислителей, в виде однофазной системы массового обслуживания (СМО). Структура этой модели аналогична структуре базовой математической модели по [9, 11], рис. 3: каждая из моделей включает  $k \geq 2$  обслуживающих приборов ОП; общий буфер Б для готовых к выполнению работ, которые поступают из пула П, содержащего в исходном состоянии все работы заданного пользователем КВР. Однако предложенная модель отличается иным набором ее параметров, иным определением состояния СМО, причем содержит произвольное количество  $k > 1$  обслуживающих приборов с различной интенсивностью обслуживания одной и той же работы.

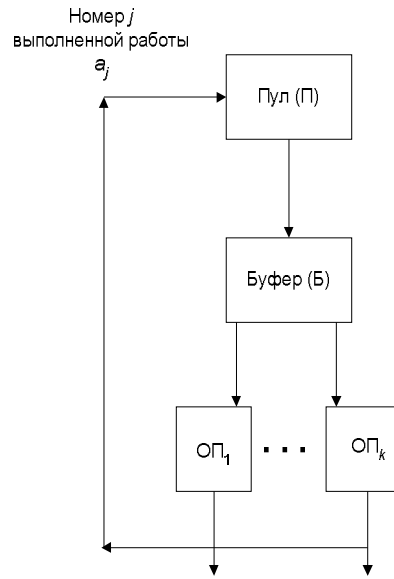


Рис. 3. Структура СМО

Таблица 1

Пример таблицы связности вершин графа

Номер работы $\alpha_j$	Преемники работы $\alpha_j$	$\bar{t}_j$	Ранг $r_j$	Связность $b_j$
1	2	3	4	5
1	2,4	1	8	2
2	3,7,8	30	7	3
3	5	20	6	1
4	5	40	6	1
5	6,12	30	5	2
6	9	20	4	1
7	9	70	4	1
8	10,12	60	4	2
9	11	20	3	1
10	11	30	3	1
11	12	160	2	1
12	–	1	1	0

Модель функционирует следующим образом. В начальный момент времени в систему (Б, ОП) поступает из пула П одна заявка — начальная работа  $\alpha_1$ , которая немедленно начинает обслуживаться на первом (самом быстром) ОП<sub>1</sub> с интенсивностью  $\mu_1 = 1/\bar{t}_1$ . По завершению обслуживания работы  $\alpha_1$  в ОП<sub>1</sub> она покидает систему, “передавая” свой номер в пул П, из которого выбираются в буфер Б те преемники работы  $\alpha_1$ , которые оказались готовы к выполнению (т.е. выполнены все их предшественники); номера этих работ однозначно устанавливаются по табл. 1.

Из буфера Б заявки выбираются – по некоторой заданной пользователем дисциплине диспетчеризации – на обслуживание в незанятые ОП.

Если заявка (работа)  $\alpha_j$  назначается на обслуживание в  $i$ -й вычислитель, то она выполняется с интенсивностью

$$\mu_j = 1/(\bar{t}_j \times h_i).$$

СМО функционирует до тех пор, пока в пуле П и в системе не иссякнут заявки. Пусть  $T$  – время жизни системы (время выполнения КВР из  $N$  работ).

Функционирование такой СМО можно описать обрывающимся марковским процессом (ОМП)  $X(t), t \in [0, T)$  над следующим множеством состояний:

$$X = \{(m; i; p; h) : m = \overline{0, N-1}\}, \quad (2)$$

где  $m$  – число работ, находящихся в пуле П в момент  $t$ ;

$i = (i_1, i_2, \dots, i_w)$  – вектор номеров работ, находящихся в буфере Б,  $w$  – число таких работ,  $w = \overline{0, N-2}$ ;

$p = (p_1, p_2, \dots, p_k)$  – вектор номеров работ, выполняемых на ОП,  $k$  – общее число вычислителей неоднородного ПТК;

$h = (h_1, \dots, h_i, \dots, h_k)$  – вектор коэффициентов асимметрии системы,  $h_1 = 1$ .

При  $k = 2$  предлагаемая общая математическая модель сводится к ее частному случаю, описанному в [12], где используется только один “быстрый” и только один “медленный” вычислитель.

Расчет предложенной модели (прогнозирование времени выполнения КВР) осуществляется методом прямого стохастического моделирования [9], на основе которого строится граф переходов ОМП в различные состояния (графическое изображение произвольного состояния  $X(l)$  ОМП приведено на рис. 4) и матрица интенсивностей переходов; на основе последней определяется функция распределения времени выполнения КВР при использовании различных дисциплин диспетчеризации, математическое ожидание и дисперсия этого времени. В качестве примеров проведен сравнительный анализ эффективности нескольких дисциплин, подробно описанных в [12], в частности: “ранг  $r_j$  /связность  $b_j$ ” работы  $\alpha_j$  КВР (их значения приведены в табл. 1), выбор работ с различными значениями рангов для “быстрого” и “медленных” вычислителей, некоторые статические распределения работ КВР по вычислителям неоднородного ПТК и др.

	$i_1, i_2, \dots, i_w$		$m$
	$h_1$	$\dots$	$h_k$
$X(l)$	$p_1$	$\dots$	$p_k$

Рис. 4. Графическое изображение состояния ОМП

В результате показано, что оптимальной дисциплины диспетчеризации для различных КВР (по критерию минимума времени выполнения КВР) не существует. Более того: для одного и того же КВР (например, по рис.2), но с иными временными параметрами выполнения работ (по отношению к указанным в табл. 1), наиболее эффективными могут оказаться самые различные дисциплины диспетче-

ризации (в частности, из упомянутых выше). Выбор той или иной дисциплины для каждого конкретного КВР осуществляется по результатам расчетов предложенной общей математической модели при использовании каждой из предусмотренных дисциплин.

Показано, что эффективность той или иной дисциплины диспетчеризации работ в неоднородном ПТК существенно зависит от конкретной структуры каждого заданного КВР (в частности, от значений рангов  $r_j$  и связности  $b_j$  вершин графа КВР), от конкретных временных параметров его работ, от соотношения длительностей времен выполнения каждой работы в различных вычислителях ПТК, от значений коэффициентов асимметрии  $h_i$  неоднородного ПТК.

### Заключение

Новый результат исследования заключается в том, что на основе методологии математического прогнозирования времени выполнения различных КВР, задаваемых пользователем, решена задача *формальной оценки, сравнения и выбора* дисциплин динамической диспетчеризации работ КВР – из априорно заданного набора дисциплин – по вычислителям неоднородных ПТК для каждого конкретного КВР с целью минимизации времени выполнения заданного КВР в ПТК, включающем произвольное количество разнотипных вычислителей различной производительности.

С помощью разработанной общей математической модели могут исследоваться и другие дисциплины диспетчеризации, задаваемые пользователем (помимо упомянутых выше), для ПТК с произвольными значениями коэффициентов  $h_i$  асимметрии системы. В используемой математической модели это отражается только на правилах выборки готовых к выполнению работ на освобождающиеся вычислители ПТК.

## Литература

1. Энергетичні ресурси та потоки / За заг. ред. А.К. Шидловського. – К: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
2. Безопасность атомных станций. Информационные и управляющие системы / Под общ. ред. М.А. Ястребенецкого. – К.: Техніка, 2004. – 472 с.
3. Горелик А.Х., Елисеев В.В., Орловский В.А. Опыт разработки новых и поэтапной реконструкции действующих информационно-вычислительных систем энергоблоков с реактором ВВЭР-1000 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – № 1. – С. 91-96.
4. Прангишвили И.В., Пащенко Ф.Ф. и др. Системы информационной поддержки оперативного персонала для предприятий повышенного риска // Приборы и системы управления. – 1996. – № 4. – С. 7-11.
5. Бурьян В.И. Оперативный контроль поля энерговыделения в ВВЭР. Математическая модель и алгоритм оценки // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2003. – № 2. – С. 3-7.
6. Бурьян В.И., Кужиль А.С., Падун С.П., Пешков А.Б. Синтез поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР на основе критерия направленного расхождения // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2002. – № 4. – С. 24-28.
7. Ильюков В.Д. Некоторые аспекты создания быстродействующих моделей ядерных реакторов // Труды II Междунар. конф. “Параллельные вычисления и задачи управления” (РАСО’2004). – М., 2004. – С. 664-673.
8. Погосов А.Ю. Шумометрия как средство диагностики активной зоны и инструмент анализа устойчивости контуров регулирования ядерных реакторов // Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – № 4. – С. 79-84.
9. Ignatushchenko V.V. A principle of dynamic control of parallel computing processes on the basis of static forecasting // Proc. 10th Int. Conf. on Parallel and Distributed Computer Syst. (PDCS-97). – New Orleans, USA, 1997. – P. 593-597.
10. Елисеев В.В., Ларгин В.А., Пивоваров Г.Ю. Программно-технические комплексы АСУ ТП. – К: Издательско-полиграфический центр “Киевский университет”, 2003. – 429 с.
11. Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю. Динамическое управление надежным выполнением параллельных вычислительных процессов для систем реального времени // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С.142-157.
12. Елисеев В.В., Барбан А.П., Подшивалова И.Ю. Об эффективности методов диспетчеризации сложных наборов задач в неоднородных многопроцессорных вычислительных системах // Труды II Междунар. конф. “Параллельные вычисления и задачи управления” (РАСО’2004). – М., 2004. – С. 796-813.

*Поступила в редакцию 24.01.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Хаханов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.