АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ
(Вычислительные системы)
1980 год Выпуск 82

УДК 681.32.324

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМАШИННОЙ СИСТЕМЫ МИНИМАКС ДЛЯ ОТЛАДКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Ю.И. Колосова

Структурные и функциональные особенности параллельных программ (р-программ) для однородных вычислительных систем (ОВС) требуют создания методов и средств, обеспечивающих проведение автономной и комплексной отладки, а также организацию контрольного исполнения р-программ. В данной работе рассматриваются назначение и основные особенности отладчика ДЕВ2, организующего отладку р-программ на двух машинах ОВС МИНИМАКС [1]. Основной структурной единицей этой системы является элементарная машина (ЭМ), состоящая из ЭВМ и модуля межмашинной связи. В качестве ЭВМ используется вычислительный комплекс, организованный на базе АСВТ-М и включающий процессор М-6000. Модуль межмашинной связи смонтирован, как автономное устройство АСВТ-М. Он обеспечивает передачу информации от собственной ЭВМ или от соседних модулей межмашинной связи к другим соседним модулям связи или к собственной ЭВМ. Эти передачи синхронизируются, что обеспечивает обмен информацией в условиях любых рассогласований скоростей работы элементарных машин.

Структура и общие свойства параллельных программ

Под параллельной программой понимается организованная совокупность последовательных программ (ветвей), выполняющихся одновременно на отдельных элементарных машинах ОВС и взаимодействующих между собой в соответствии с требованиями параллельного алгоритма. Для записи параллельных алгоритмов в системе МИНИМАКС используются специальные языковые средства, получившие название ОВС-языков. Они построены на базе языковых средств АСВТ-М (МНЕМОКОД, ФОРТРАН, АЛГОЛ) путем расширения последних операторами для зада-

ния взаимодействий ветвей. ОВС-языки позволяют формировать как идентичные, так и неидентичные ветви р-программ и устанавливать синхронный или асинхронный режим их выполнения.

Взаимодействия могут быть групповыми или индивидуальными в зависимости от способов синхронизации и методов доступа к общим данным [I]. Параметры операторов, задающих эти взаимодействия (например, номер передающей ветви, параметр, выделяющий подмножество семафоров, и т.п.), в общем случае являются функциями, которые изменяются по мере выполнения р-программы. Оператор, задающий определенное групповое взаимодействие, должен присутствовать в каждой ветви р-программы. Взаимодействие считается наступившим (событие, разрешающее это взаимодействие, произошло), если все ветви р-программы при выполнении выйдут на такой оператор. Если хотя бы одна ветвь не выйдет на него, то событие не наступит. Ветви, вышедшие на оператор, будут находиться в состоянии ожидания этого события. Индивидуальное взаимодействие может происходить только между двумя ветвями р-программы. Любой оператор индивидуального взаимодействия присутствует только в ветви, являющейся и н и ц и а т о р о м этого взаимодействия. Другая ветвь указывается значением определенного параметра такого оператора. При индивидуальном взаимодействии разрешающим событием является факт готовности инициируемой ветви участвовать в указанном взаимодействии. Для того чтобы запрашивающая ветвь узнала о готовности запрашиваемой, используется аппарат событий, управление которым осуществляется на основе операций над семафорными переменными, определяющими упорядоченную последовательность степеней операций P и V [2].

Пример схемы выполнения р-программы из L ветвей представлен на рис.I. Ветви могут быть как идентичными, так и неидентичными. Отрезками обозначены участки ветвей, выполняющиеся последовательно. Операторы индивидуальных взаимодействий в ветвях-инициаторах обозначены знаком ⊙. Соответствующие инициируемые ветви указаны стрелками. Операторы групповых взаимодействий обозначены прямоугольниками, одинаковая штриховка которых конкретизирует групповое взаимодействие. Групповое взаимодействие будет считаться наступившим, если все ветви выйдут на операторы, представленные прямоугольниками с одинаковой штриховкой. Индивидуальное взаимодействие будет считаться наступившим, если инициируемая ветвь готова участвовать во взаимодействии.

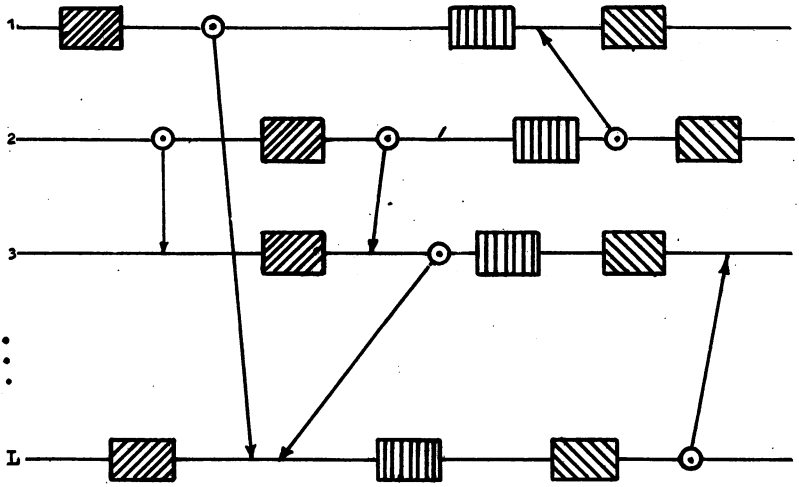

Рис. I. Схема выполнения параллельной программы.

Для реализации операторов взаимодействий необходимо присутствие в каждой ЭМ информации об относительном порядковом номере (S) соответствующей ветви и о числе (L) всех ветвей р-программы. Такая информация сообщается на уровне операционной системы при загрузке р-программы.

Особенности задания взаимодействий между ветвями иллюстрируются следующими двумя операторами.

Оператор группового взаимодействия ТРАНСЛЯЦИОННЫЙ ОБМЕН:

BEXC (N2 , N1 , N, A, B),

где BEXC - имя оператора, аббревиатура английского названия; в скобках - параметры, имеющие следующий смысл:

N2 - спецификатор, отличающий операторы с одинаковыми именами; т.е. операторы, задающие одно и то же взаимодействие, должны во всех ветвях иметь одинаковое значение параметра N2;

N1 - номер передающей ветви;

N - число передаваемых кодов;

A - идентификатор передаваемого массива;

B - идентификатор принимающего массива.

Данный оператор присутствует во всех ветвях р-программы и при выходе на него в процессе выполнения всех ветвей обеспечивает пе-

редачу N кодов массива A из ветви с относительным номером S = N1 во все остальные (L-1) ветви в массив B. Если хотя бы одна ветвь не выйдет на такой оператор, передачи не происходит, ветви будут находиться в состоянии ожидания соответствующего события.

Оператор индивидуального взаимодействия ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЧТЕНИЕ:

IR (I, AL1, AL2, N1, B, N, A) ,

где IR - имя оператора. Назначение первых трех параметров описано ниже, остальные параметры аналогичны соответствующим параметрам в ВЕХС.

Данный оператор присутствует в ветви-инициаторе и при выполнении условия синхронизации обеспечивает передачу N кодов массива A из инициируемой ветви (с относительным номером S = N1) в ветвь-инициатор в массив B.

Для синхронизации индивидуальных взаимодействий каждая ветвь задает с помощью специального оператора [I] один или несколько наборов семафорных переменных. Каждый набор идентифицируется именем и представляется в виде упорядоченной последовательности переменных $Q_1, Q_2, \ldots, Q_z$. В рассматриваемом операторе IR этот набор указан значением параметра I. Значение параметра AL1 указывает требуемое подмножество (E) переменных из заданного набора I. На переменных этого подмножества задается логическая функция - конъюнкция или дизъюнкция, определяемая знаком параметра I ("+" или "-" соответственно). Условие синхронизации считается выполненным, если $\bigwedge_{i \in E} Q_i > 0$ или $\bigvee_{i \in E} Q_i > 0$. При осуществлении заданного взаимодействия производится преобразование всего набора семафорных переменных в соответствии со значением параметра AL2, определяющего упорядоченную последовательность степеней P - и V -операций, количество которых равно числу семафоров в заданном наборе I. Если условие синхронизации не выполнено, то ветвь-инициатор будет находиться в состоянии ожидания требуемого события, а инициируемая ветвь продолжает свое выполнение.

Таким образом, существенными особенностями p-программ являются:

- наличие операторов групповых и индивидуальных взаимодействий;

- обязательный выход всех ветвей на конкретный оператор группового взаимодействия для наступления этого взаимодействия;

- задание и обработка семафорных переменных для синхронизации индивидуальных взаимодействий.

Средства отладки таких р-программ должны предоставлять возможность проверки правильности использования и контрольного испытания указанных функций.

К настоящему времени разработаны два типа отладочных средств, обеспечивающих проверку правильности выполнения р-программы соответственно на одной и двух машинах ОВС МИНИМАКС. Отладчики первого типа, описанные в [3], позволяют в основном свести процесс отладки р-программы к проверке правильности использования как обычных операторов последовательного программирования, так и операторов групповых взаимодействий. Отладчики второго типа расширяют возможности отладчиков первого типа, позволяя проверять правильность использования операторов индивидуального взаимодействия, а также проводить контрольные испытания р-программ.

Рассматриваемый в данной работе отладчик ДЕВ2 в процессе тестирования отлаживаемой р-программы осуществляет:

- выполнение р-программы на двух машинах в режиме интерпретации;
- обычное исполнение р-программы с выходом на отладчик в заданных контрольных точках;
- контроль использования ветвями общих ресурсов;
- контроль изменения программно задаваемых семафоров;
- организацию взаимодействия между ветвями;
- выдачу сообщений об ошибках.

Кроме того, отладчик ДЕВ2 может осуществлять все основные функции отладчиков р-программ на одной машине [3].

Функционирование отладчика

Разработка предложенного отладчика базируется на следующих основных принципах:

- преемственности основных методов и средств последовательного программирования;
- простоте и удобстве общения пользователя с отладчиком;
- наличии диалога;
- возможности расширения функциональных свойств отладчика и его системно-технического обеспечения;
- модульности структуры;
- использовании программно-аппаратных средств обеспечения взаимодействий.

В качестве базы,обеспечивающей работу отладчика ДЕВ2,используются две элементарные машины ОВС МИНИМАКС. Отладчик способен функционировать в различных операционных обстановках.Отладка ведется в режиме диалога с помощью дисплея на одной из ЭМ,ответы отладчика могут также выдаваться на дисплей или же на печатающие устройства одной или обеих элементарных машин.

Под управлением отладчика ДЕВ2 осуществляется выполнение р-программы, настроенной на число ветвей, равное двум. В процессе работы отладчик в каждой ЭМ строит п р о т о к о л ы для обмена информацией о текущем состоянии выполняемых ветвей.Обмен протоколами ведется в синхронном режиме. Информация протоколов может быть двух типов.Во-первых,это выход ветви на оператор взаимодействия. В этом случае протокол содержит необходимые значения параметров таких операторов для организации и проверки правильности задания взаимодействия. Во-вторых,это исчерпание интервала.В случае невыхода ветвей на операторы взаимодействий обмен протоколами производится через определенное число выполненных команд отлаживаемых ветвей - и н т е р в а л. Кроме того, пользователь может сам задавать величину интервала с помощью соответствующей директивы. После обмена протоколами отладчик производит анализ полученной информации и принимает решение о дальнейших действиях.

Обобщенная структурная схема отладчика ДЕВ2 представлена на рис.2. Дадим краткую характеристику функционирования его блоков.

ТРАНСЛЯТОР ДИРЕКТИВ осуществляет синтаксический контроль вводимых отладочных директив, в случае ошибки выдает соответствующее сообщение и переходит в состояние готовности принять новую директиву. При верной директиве управление получает реализатор директив.

РЕАЛИЗАТОР ДИРЕКТИВ обеспечивает выполнение отладочных директив, с помощью которых пользователь может осуществлять:

- запуск каждой ветви или одновременный запуск обеих ветвей параллельной программы;
- завершение выполнения отладки;
- задание одного из двух режимов работы: интерпретационного выполнения или простого выполнения с возвратом управления отладчику по контрольным точкам;
- задание интервала;
- изменение хода выполнения программы;
- корректировку значений семафоров;
- задание режимов вывода отладочной информации.

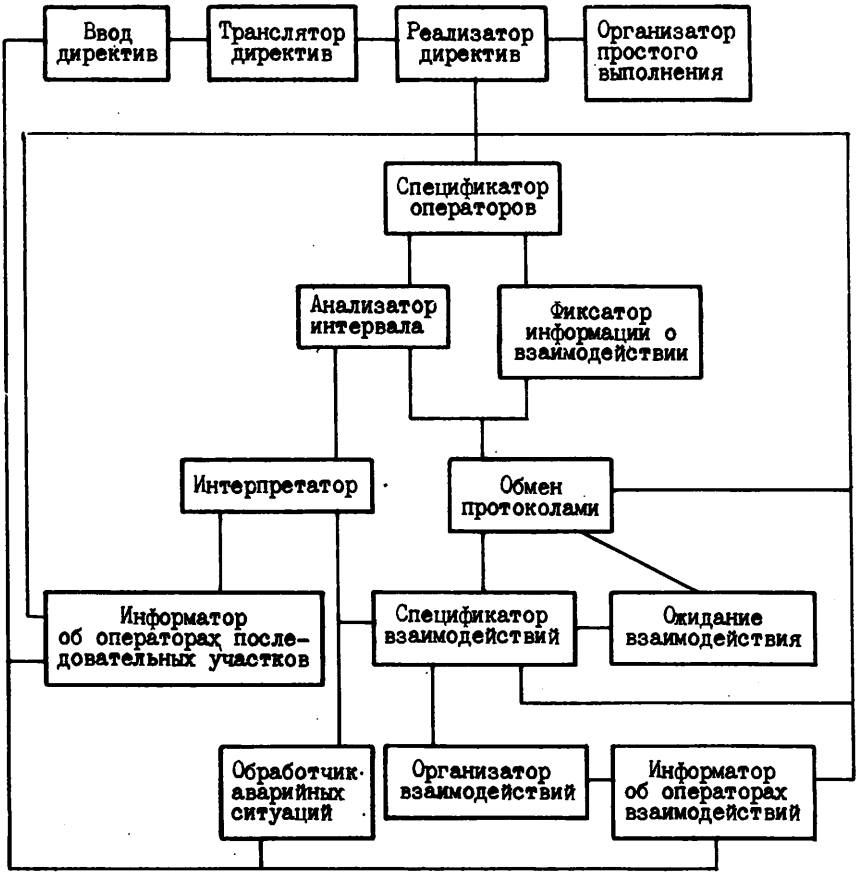

Рис.2. Обобщенная структурная схема отладчика ДЕВ2.

Кроме того, пользователь имеет возможность применять для обеих ветвей обычные директивы отладчика последовательных программ: выполнение группы команд с остановом по адресу, выполнение программы в режиме заданного останова по записи-чтению в память или регистры, выполнение участка программы в режиме слежения, вывод на печать значений регистров,параметров и областей памяти,запись информации в память или регистры и т.п.

СПЕЦИФИКАТОР ОПЕРАТОРОВ осуществляет выбор очередного, подлежащего выполнению оператора отлаживаемой программы и в случае появления оператора взаимодействия передает управление фиксатору информации о таком операторе. В противном случае управление получает анализатор интервала.

АНАЛИЗАТОР ИНТЕРВАЛА сравнивает число выполненных команд отлаживаемой р-программы со значением интервала и в случае превышения этого значения передает управление блоку обмена протоколами. Иначе управление получает интерпретатор.

Отметим, что большое значение интервала уменьшает число обменов протоколами между элементарными машинами. В предельном случае обмены будут производиться только при появлении операторов взаимодействий. Малое же значение интервала позволяет вплоть до отдельной команды определить момент появления в ветвях оператора взаимодействий. Это особенно важно для проверки правильности использования операторов индивидуальных взаимодействий, так как можно проследить в динамике порядок изменения семафоров и выявить ошибки их задания.В ходе отладки пользователь может уменьшать или увеличивать значение интервала по своему усмотрению.

ОРГАНИЗАТОР ПРОСТОГО ВЫПОЛНЕНИЯ обеспечивает выполнение заданного участка ветви р-программы без интерпретации, реализует возврат управления в отладчик, запоминание и восстановление содержимого необходимых регистров. В таком режиме могут выполняться участки р-программы, не содержащие операторов взаимодействий. Организатор простого выполнения информирует пользователя о возврате в режим интерпретации.

ИНТЕРПРЕТАТОР обеспечивает выполнение последовательных участков ветвей р-программы в обеих элементарных машинах, организует выходы на подпрограммы, реализующие отладочные распечатки соответственно заданным директивам. Ведет контроль косвенного зацикливания и других стандартных ошибок и при необходимости передает управление обработчику аварийных ситуаций.

ФИКСАТОР ИНФОРМАЦИИ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ обеспечивает заполнение протокола ветви значениями заданных параметров операторов взаимодействий.

ОБМЕН ПРОТОКОЛАМИ производит передачу-прием рабочей информации между ветвями р-программы. Отладчик ДЕВ2 организует выход каждой из ветвей на этот блок либо при появлении в ней оператора взаимодействия, либо при исчерпании интервала. Обмен осуществляется после того, как обе ветви выйдут на этот блок. В случае исчерпания интервалов в обеих ветвях управление получает спецификатор операторов, иначе - спецификатор взаимодействий.

СПЕЦИФИКАТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ анализирует протоколы и обеспечивает соответствующий порядок организации выполнения ветвей р-программы. В случае оператора индивидуального взаимодействия при наличии события, разрешающего его выполнение, управление получает организатор взаимодействий. При отсутствии такого события оператор помещается в очередь, ветвь-инициатор переводится в состояние ожидания события, а в инициируемой ветви управление получает спецификатор операторов. Содержимое очереди просматривается всякий раз при активизации спецификатора взаимодействий. Аналогичные действия производятся в случае появления оператора групповых взаимодействий в одной из ветвей. В случае появления их в обеих ветвях управление получает организатор взаимодействий. Одновременно спецификатор взаимодействий ведет проверку правильности заданий операторов взаимодействий. Проверяет совпадение параметров в операторах групповых взаимодействий, анализирует принципиальную возможность взаимодействия и при обнаружении ошибок передает управление блоку аварийных ситуаций.

Кроме того, спецификатор выдает на дисплей или на печатающее устройство номер ветви и заголовок появившегося в ней оператора взаимодействия, в котором указаны текущий и очередной адреса команд, название оператора и значение счетчика команд в пределах интервала. Благодаря этому пользователь получает информацию о порядковом соотношении возбуждения взаимодействий в динамике выполнения своей р-программы. Информация же об адресах этих операторов может быть задействована при задании контрольных точек для режима простого выполнения.

ОЖИДАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ обеспечивает задержку выполнения одной из ветвей р-программы до появления требуемого события. Спецификатор взаимодействий периодически проверяет и изменяет состоя-

ние данного блока в соответствии с динамикой выполнения другой ветви р-программы. Активизация анализа задержанной ветви происходит через блок обмена протоколами.

ОРГАНИЗАТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ производит непосредственную реализацию заданного взаимодействия с помощью программно-аппаратных средств, заложенных в однородной вычислительной системе, адекватно отражая процесс взаимодействия ветвей р-программы в процессе счета, а также обеспечивает преобразование набора семафорных переменных после выполнения оператора индивидуальных взаимодействий.

ИНФОРМАТОР ОБ ОПЕРАТОРАХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ активизируется в случае задания режима отладочной выдачи соответствующими директивами. Ответы информируют пользователя: о содержимом заданных областей памяти, об остановах в контрольных точках, о состоянии каждой команды заданного участка программы при режиме слежения. Отметим, что этот блок не является обязательным в данном отладчике, так как предполагается, что все последовательные участки р-программы отлажены заранее, например, с помощью отладчиков программ на одной машине [3].

ИНФОРМАТОР ОБ ОПЕРАТОРАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ выполняется при завершении каждого взаимодействия. Ответы информируют пользователя: о характере взаимодействия (прием, передача, обобщенный условный или безусловный переходы), о числе обмениваемых кодов, об адресе принимающего и передающего массивов в каждой ветви, о значении переменных управления, об адресе безусловного перехода. Кроме того, в случае операторов индивидуальных взаимодействий сообщаются состояния соответствующих семафоров до и после взаимодействия. Существенным моментом работы данного блока является предоставление пользователю информации о взаимодействии на уровне используемого языка, чем обеспечивается удобство применения предлагаемого средства отладки. Пользователю нет необходимости добавлять или изменять свою программу, отладчик автоматически фиксирует появление оператора взаимодействия и информирует об этом пользователя.

Данный блок выполняется безусловно, но,кроме того, имеются директивы отмены и восстановления его работы.

ОБРАБОТЧИК АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИИ предоставляет возможность для определения и сбора данных об ошибках в отлаживаемой р-программе. Ответы информируют пользователя: об ошибках в параметрах операторов взаимодействий (несовпадение числа передаваемых и принимаемых кодов, неверное задание номера ветви и т.п.); об ошибках в исполь-

зовании операторов взаимодействий (выход на разноименные операторы групповых взаимодействий, значения семафоров не обеспечивают нужного события для организации индивидуального взаимодействия и т.п.); об ошибках, связанных с косвенным зацикливанием и т.п. Обработчик аварийных ситуаций имеет возможность в случае сбоев машин проанализировать их и выдать соответствующую информацию.

Отладчик ДЕВ2 представляется в виде пакета программных модулей, обеспечивающего компоновку конкретных его версий: отладчика р-программ только с операторами групповых или только с операторами, индивидуальных взаимодействий, или только с некоторыми операторами взаимодействий и т.д. Это относится и к блокам, организующим выдачу отладочной информации.

Основные возможности отладчика

Предложенный отладчик ДЕВ2 является средством, помогающим легче пройти фазу отладки параллельных программ. ДЕВ2 ориентирован на упорядочение процесса отладки р-программ и может обеспечивать поэтапный процесс конструирования таких программ по принципу "сверху-вниз". На самом верхнем уровне (первом этапе) задается каркас (остов) создаваемой параллельной программы, представленный на любом используемом в ОВС языке операторами задания взаимодействий ветвей, операторами преобразования параметров операторов взаимодействий и операторами, специфицирующими еще не описанные подпрограммы этих ветвей. Роль операторов-спецификаций могут играть любые операторы, заданные пользователем, или же стандартные отладочные операторы, задающие вспомогательные массивы данных, размеры или время выполнения заменяемых подпрограмм и т.п. Отладчик ДЕВ2 производит отладку каркаса параллельной программы, контролируя выходы ветвей р-программы на операторы групповых взаимодействий и правильность задания семафоров для организации выполнения индивидуальных взаимодействий, а также осуществляя выполнение взаимодействий между ветвями или же выдавая сообщения об ошибках. Каркас параллельной программы может служить основой для автоматизированного создания тестов. На каждом очередном этапе операторы-спецификации заменяются конкретными подпрограммами, которые могут быть до этого автономно отлажены. Такой процесс продолжается до замены в каркасе всех операторов-спецификаций соответствующими подпрограммами.

Предусмотрены два отладочных режима: интерпретирование и обычное исполнение. В первом режиме управление всегда остается за

отладчиком, который, анализируя значения параметров операторов взаимодействия, сам принимает решение о порядке выполнения таких операторов. Во втором режиме отладчик ДЕВ2 получает управление только в заданных контрольных точках. Решение вопроса о порядке выполнения операторов взаимодействий предоставляется пользователю, позволяя ему тем самым набрать статистику о поведении программы в различных временных соотношениях функционирования ветвей. Второй режим работы при отмене всех отладочных выдач фактически сводит функционирование р-программы под управлением отладчика к контрольному испытанию ее выполнения на двух машинах.

Следует отметить, что отладчик ДЕВ2 может служить основой для изучения зависимости числа ошибок и скорости их обнаружения от сложности параллельной программы.

Выводы

Предложенный отладчик р-программ для ОВС МИНИМАКС обеспечивает преемственность основных методов последовательного программирования, содержит в себе средства проверки правильности задания асинхронных параллельных вычислений, вносит определенный вклад в развитие методов отладки р-программ на многомашинных комплексах. Использование данного отладчика может позволить не только повысить достоверность параллельной программы, но и сократить сроки ее разработки на основе совмещения этапов отладки программы на верхнем уровне с этапами создания подпрограмм, заменяемых операторами-спецификациями. Кроме того, применяя программно-аппаратные средства для реализации групповых и индивидуальных взаимодействий между ветвями, отладчик приближает испытание всей р-программы к условиям, близким к реальным.

Литература

1. Программное обеспечение системы МИНИМАКС /Кербель В.Г., Колосова Ю.И., Корнеев В.Д., Крылов Э.Г., Миренков Н.Н. - Новосибирск, Б.и., 1979 -48 с. -(Препринт/ИМ СО АН СССР; ОВС-09).

2. КОРНЕЕВ В.Д. Операционная система МИНИМАКС. -В кн.: Математическое обеспечение вычислительных систем. (Вычислительные системы, вып. 78). Новосибирск, 1979, с. 3-30.

3. КОЛОСОВА Ю.И. Отладчики параллельных программ для однородной вычислительной системы МИНИМАКС. -В кн.: Вопросы теории и построения вычислительных систем (Вычислительные системы, вып.73). Новосибирск, 1978, с. 132-137.

Поступила в ред.-изд.отд.
2 октября 1980 года