

УДК 681.3

И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.Ф. Маслович, Е.О. Попова,
А.М. Поташенко, В.С. Смородин, В.В. Старченко, Г.А. Терещенко

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА

Излагаются принципы модификации программно-технологического комплекса имитации вероятности дискретных технологических процессов для проблемных областей: исследование вычислительных процессов; моделирование сборочно-разборочных работ; моделирование вероятностного сетевого планирования, почтовых отделений связи, дискретных технологических процессов производства с ненадежным оборудованием.

Введение

Для исследования дискретных технологических процессов производства (ДТПП) разработан мощный аналитический аппарат, основанный на использовании моделей сетевого планирования [1]. Однако в случае вероятностного характера технологических операций (TXO_i) возникают проблемы с применением процедур анализа параметров сетевого графика (СГР). Поэтому исследователи вынуждены применять имитационные модели (ИМ), использующие процедуры метода Монте-Карло [2]. Существует большое количество типов ДТПП, у которых TXO_i имеют сходную методику решения с помощью ИМ. Это обстоятельство побудило авторов разработать программно-технологический комплекс исследования (ПТКИ) ДТПП [3], автоматизирующий большинство этапов разработки и использования ИМ вероятностных ДТПП. В данной статье излагаются принципы модификации и использования ПТКИ ДТПП для следующих проблемных областей:

— исследование параметров вычислительного процесса (ВП) и рабочей нагрузки (РН) в вычислительных системах (ВС) и локальных вычислительных сетях (ЛВС) с помощью имитационных моделей;

— проектное моделирование технологии проведения сборочно-разборочных работ;

— расчеты параметров СГР с вероятностным характером микротехнологических операций ($MTXO_{ij}$), реализующих процедуры метода Монте-Карло;

— анализ динамики развития технологических процессов в почтовых отделениях связи (ПОС);

— отработка вариантов управления реализацией ДТПП в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций.

Использованию ПТКИ ДТПП в перечисленных предметных областях способствует то, что во всех этих случаях применения ИМ реализуются одни и те же процедуры на этапах создания, испытания и исследования свойств ИМ согласно универсальной технологии имитационного моделирования, предложенной в монографии [4]. Различие между ИМ по этим предметным областям заключается в алгоритмах активностей и процессов этих ИМ. Поэтому одним из путей модификации ПТКИ ДТПП явилась разработка библиотек компонентов ИМ.

2. Программно-технологический комплекс имитации дискретных технологических процессов

Предметом исследования является поиск "узких мест" в ДТПП в ходе имитационных экспериментов, определение пропускной способности производственных предприятий, функ-

ционирующих на основе вероятностных характеристик ДТПП предприятий, для получения оценок характеристик надежности и безопасности реализации ДТПП, а также выбора рациональных вариантов его организации с целью обеспечения возможности принятия решения в условиях неопределенности и риска, в том числе и для предотвращения случаев аварий и катастроф техногенного и экогенного характера.

ПТКИ ДТПП реализован как средство предметного расширения системы моделирования (СМ) МІСІС [4] при исследовании функционирования ДТПП методами имитационного моделирования. Основное назначение ПТКИ ДТПП [3] состоит в реализации методов анализа вероятностных ДТПП и автоматизации этапов разработки имитационных моделей ДТПП и их ис-

пользования на основе процедур метода статистических испытаний. ПТКИ ДТПП состоит из следующих подсистем: базовой СМ МІСІС, подсистемы взаимодействия с пользователем (ПС ВЗАИМОДЕЙСТВ), подсистемы расчета и анализа параметров вероятностного сетевого графика (ВСГ) по методу Монте-Карло (ПС. РАСЧЕТОВ), подсистемы оптимизации сетевого графика и принятия решений (ПС. ОПТИМИЗ). Связи подсистем осуществляются через информационную базу данных (ИБД). Блок-схема ПТКИ ДТПП представлена на рисунке.

ПС. ВЗАИМОДЕЙСТВ организует первоначальный ввод описания ВСГ и перевод его на внутренний язык, контролирует корректность описания, выдает исследователю результаты этого контроля для устранения ошибок в описании ВСГ. Это взаимодействие

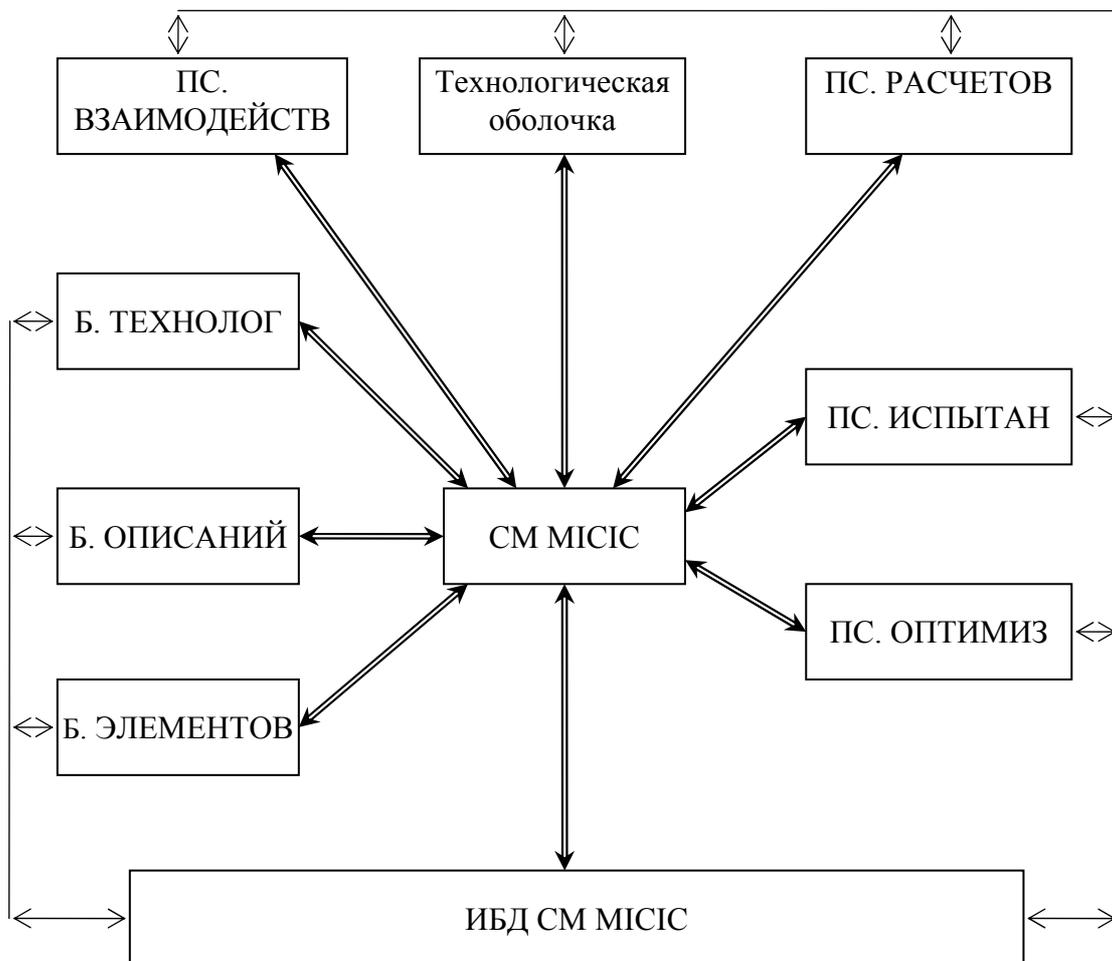


Рисунок. Блок-схема управляющих и информационных связей библиотек и подсистем ПТКИ ДТПП

осуществляется с помощью набора директив "меню" в режиме "вопрос — ответ".

ПС. РАСЧЕТОВ реализует ВСГ в серии i -х реализаций ($i = 1, N$) по методу Монте-Карло [2] в виде последовательности детерминированных сетевых графиков (ДСГР). При этом осуществляется поиск динамических ошибок в ВСГ и при их обнаружении дальнейший расчет параметров ДСГР не производится, а сама подсистема переходит в диалоговый режим взаимодействия с пользователем для корректировки ВСГ. Расчет параметров ДСГР выполняется до тех пор, пока не будет верифицирована i -я реализация ВСГ, в которой все $MTXO_{ij}$ имеют детерминированный характер. Далее имитируется выполнение ДСГР с расчетом ранних и поздних сроков выполнения событий j (t_{pj} и t_{nj}), определения резервов свершения событий $\{R_j\}$ и поиском критического пути (KRP_i), представляющего собой последовательность $\{MTXO_{ij}\}$ с нулевым резервом свершения событий.

ПС. ОПТИМИЗ сортирует информацию, накопленную в файле статистики, и формирует выборки объема N каждой статистики имитации (t_{pj} , t_{nj} , R_j , KRP_i). По этим выборкам формируются функции распределения, математические ожидания и дисперсии этих параметров. Анализ множества $\{KRP_i\}$ позволяет выбрать наиболее вероятный критический путь и оценить наиболее вероятные значения коэффициентов напряженности работ. Определяется список событий, имеющих наибольшие резервы их выполнения, и выбираются все $MTXO_{ij}$, входящие в эти события. Из этих $MTXO_{ij}$ намечаются кандидаты на изъятие ресурсов на величину, соответствующую резерву времени выполнения $MTXO_{ij}$.

В основу использования СМ МІСІС [4] положена концепция многоуровневого представления объектов моделирования (ОМ). Это позволяет работать с этими ИМ пользователям разной квалификации. Уровни пользо-

вателей определяются следующими целями использования ИМ: создание концептуальной модели и формального описания ОМ; программирование алгоритмов ИМ; конструирование очередного варианта имитации ОМ; эксплуатация ИМ. Согласно этому пользователи СМ МІСІС логически подразделяются на аналитиков, разработчиков, конструкторов и исследователей ОМ. Исследователи рассматривают ОМ как "черный ящик", имеющий входы (параметры) и выходы (отклики) имитации. Для постановки имитационного эксперимента (ИЭ) служит интегрированная среда СМ МІСІС. В ней имеются оперативные средства для формирования рабочей нагрузки (РН), просмотра результатов имитации, сбора статистики и реализации ИЭ. Структуру ИМ ОМ задает конструктор модели. Он рассматривает ОМ как многофазовую многоканальную систему массового обслуживания (СМО). Ее отображением является граф, в котором вершины представляют собой процессы (приборы СМО), а дуги — возможные пути следования транзактов (TR_i). ИМ ОМ функционирует в модельном времени (t_0) путем отображения взаимодействий TR_1 с процессами i . На дугах i между процессами i и j функциональные действия отсутствуют. Интегрированная среда СМ МІСІС позволяет создавать, модифицировать и уничтожать элементы структуры ИМ, изменять связи между ними, переводить их в различные состояния, получать справочную информацию.

Разработчик модели программирует на языке моделирования СМ МІСІС компоненты ИМ. Он проводит декомпозицию структуры ОМ, выделяет каждому механизму обслуживания пары процесс — транзакт. Для каждой такой пары составляется граф активностей, отображающий последовательную смену функциональных взаимодействий компонентов ИМ в модельном времени (t_0). Таким образом, разработчик ИМ на языке моделирования СМ МІСІС определяет параметры и

отклики модели, реализует алгоритмы активностей и операторы организации квазипараллельного взаимодействия компонентов ИМ.

Интегрированная среда исследователя ИМ позволяет выполнить следующие функции: корректировка параметров ИМ; просмотр значений откликов ИМ; организация мониторинга процесса имитации; постановка и реализация планов эксперимента; экспорт результатов многопрогонного эксперимента на ИМ. Интегрированная среда конструктора ИМ предоставляет такие возможности ИЭ: создание и удаление элементов структуры ИМ; изменение состояний элементов и связей между ними; генерация сигналов к элементам ИМ; просмотр и корректировка параметров элементов ИМ; управление очередями в ИМ; получение справочной информации. Аналитик ИМ разрабатывает концептуальную модель и формализует ОМ, опираясь на базовую схему формализации языка моделирования (ЯМ) СМ МІСІС, а также интерпретирует результаты ИЭ.

Процессы (устройства) могут быть многоканальными и обслуживать параллельно несколько TR_i . Взаимодействующая пара версии устройства и копия TR_i называется каналом. Они могут функционировать в одном из двух режимов: "сервер" и "процесс". В режиме "процесс" генерируются потоки транзактов. В режиме "сервер" устройство может принимать сигналы типа "открыть" и "закрыть" работу. Устройство "процесс" управляется сигналами "пассивизировать" и "активизировать". Транзакты могут принимать сигналы "задержать", "отпустить", "покинуть", "повторить" и "уничтожить". Каждый TR_i обладает встроенными приоритетом и указателем направления движения по устройствам ИМ. Конечная активность процесса определяет очередное устройство согласно программе их выбора, задаваемой разработчиком в "теле" TR_i . В "теле" транзакта также имеется буфер для сбора статистики имитации поведения транзакта ИМ. При-

ходя на обслуживание в занятое устройство, TR_i автоматически становится в очередь к нему. Очередь TR_i упорядочена по неубыванию приоритета и времени прибытия его в очередь.

Таким образом, СМ МІСІС позволяет исследователю:

- объединять в одном тексте ИМ ОМ декларативный и алгоритмический способы описания компонентов модели;
- объединять в тексте ИМ три способа формализации (процессный, транзактный, агрегатный);
- реализовать алгоритмы функционирования устройств с помощью графа активностей;
- организовать связи между компонентами ИМ по управлению как путем передачи транзактов на очереди к устройствам, так и с помощью неявных управляющих сигналов, изменяющих состояния устройств и транзактов;
- параметризовать и размножать компоненты ИМ;
- реализовать многоканальную обработку транзактов на устройствах.

С помощью СМ МІСІС исследователь может оперативным образом описать программы: процессов, отображающих $MTXO_{ij}$; классов TR_i , отображающих запросы на выполнение $MTXO_{ij}$, и очереди ($ОЧ_{ij}$), связывающие $MTXO_{ij}$ друг с другом, согласно графу технологии реализации ДТПП.

2. Проблемно-ориентированная модификация ПТКИ ДТПП

В ходе применения ПТКИ ДТПП определена возможность его расширения благодаря добавлению новых подсистем и модификации состава библиотек процедур комплекса. Прежде всего добавлена подсистема испытания и исследования свойств ИМ (ПС. ИСПЫТАН), а библиотека процедур комплекса расширена библиотеками описаний элементов ИМ и параметризованных ИМ каждой из рассматриваемых предметных областей.

Технология проблемной модификации ПТКИ ДТПП реализуется следующей последовательностью этапов:

1. Разработка библиотек описаний элементов для каждой проблемной области исследований (Б. ЭЛЕМЕНТОВ).

2. Разработка библиотеки параметризованных "заготовок" ИМ, скомпонованных из библиотеки описаний элементов (Б.ОПИСАНИЙ).

3. Расширение состава библиотеки процедур технологического обеспечения имитационного эксперимента (Б. ТЕХНОЛОГ), характерных для каждой предметной области исследований ДТПП.

4. Разработка процедур автоматизации натуральных экспериментов (НЭ) для получения исходной информации, необходимой для проведения верификации и испытания ИМ ДТПП соответствующей предметной области.

5. Расширение в СМ МІСІС состава библиотеки процедур, используемых при решении задач соответствующей предметной области. В результате реализуется известный принцип модификации программного обеспечения (ПО) "ромашки", лепестками которой являются библиотеки процедур, используемых для решения задач исследования каждой предметной области, а сердцевина состоит из универсальной части ПТКИ ДТПП.

Во время начального ввода описания вероятностного сетевого графика ДТПП с помощью подсистемы ВЗАИМОДЕЙСТВ происходит перевод директив описания на внутренний язык. В ходе имитации ВСГ по методу Монте-Карло ПС. РАСЧЕТОВ выдает серии i -х реализаций ИМ в виде последовательности детерминированных сетевых графиков. В итоге к этапу анализа уже сформированы выборки объема N . По этим выборкам определяются математические ожидания (M_j) и дисперсии $\{D_j\}$ j -х параметров ВСГ и множество критических путей $\{KRP_i\}$, $i = 1, N$. По множеству $\{KRP_i\}$ формируется новый сетевой график $ВСГ^*$, в ко-

тором длительности выполнения микротехнологических операций ($MTXO_{ij}^*$) представляют собой математические ожидания длительностей их выполнения ($M\tau_{ij}^*$), являясь уже детерминированными величинами. Сами же вероятности переходов между узлами $ВСГ^*$ определяются по частотам их встречаемости в $\{KRP_i\}$. Далее проводится вторая итерация исследований, но уже с $ВСГ^*$ с помощью ПС. РАСЧЕТОВ по изложенной выше методике. В итоге на n -й итерации $ВСГ^*$ вырождается в последовательность $\{MTXO_{ij}^*\}$ с высокой вероятностью нахождения их на всех критических путях $ДСГ_i$. Базовая СМ МІСІС [2] моделирует выполнение $ДСГ_i$ и фиксирует ранние и поздние сроки выполнения событий (t_{pi} и t_{ni}). Технологическая оболочка ПТКИ ДТПП "высвечивает" на экран дисплея список событий критического пути и событий, имеющих большие резервы их свершения. Кроме того, с помощью ИБД обеспечивается интерфейс между технологическими этапами исследования ВСГ и их верификация реальными ДТПП.

Б. ЭЛЕМЕНТОВ содержит описание множеств $\{TXO_i\}$ и $\{MTXO_{ij}\}$ для k -й предметной области. Например, в случае исследования ВП в ВС или ЛВС $MTXO_{ij}$ представляют собой описания компонентов подмоделей аппаратно-программных компонентов ВС или узлов ЛВС. При проектном моделировании ДТПП с меняющейся структурой все описания $\{TXO_i\}$ формируются в виде списковой структуры, элементами которой являются описания $MTXO_{ij}$. Все эти списки задаются исследователем при построении технологических карт (ТК). Между TXO_i задаются операции "расщепления" и "сборки" последовательностей $\{TXO_i\}$. Внутри любой TXO_i сохраняется последовательный характер выполнения $MTXO_{ij}$. Для случая анализа ДТПП, в которых переходы между $MTXO_{ij}$ являются вероятностными, в качестве средства описания используются ВСГ, где длительности вы-

полнения $MTXO_{ij}$ (τ_{ij}) задаются соответствующими функциями распределения вероятностей их значений. Технологические операции почтовых отделений связи (ПОС) описываются с помощью таких средств базовой СМ МІСІС, как транзакты (TR) и обслуживающие устройства (YOC_{ij}). Поэтому нет необходимости в создании дополнительных заготовок описаний компонентов ИМ ТППОС, для этой цели достаточно СМ МІСІС.

Б. ОПИСАНИЙ содержит варианты разработанных ранее ИМ для решения задач проектного моделирования по каждой из предметных областей. Состав ИМ в этой библиотеке может пополняться с помощью средств каталогизации ИМ базовой СМ МІСІС. Например, в случае исследований ВП в ЛВС в библиотеке содержится ИМ ВП и РН на узлах ЛВС. Эти ИМ имитируют распределенную обработку информации в ЛВС, рабочими узлами которой являются однопроцессорные ПЭВМ, а распределение потока запросов на обработку имитируется программой-диспетчером, расположенной на серверах ЛВС.

При проектном моделировании ДТПП с меняющейся структурой в состав Б. ОПИСАНИЙ входят варианты имитации сборочно-разборочных технологических операций, отличающихся друг от друга составом операций "расщепления" и "сборки" множества $\{TXO_i\}$. Для решения проектных задач с помощью ВСГ в состав библиотеки Б.ОПИСАНИЙ входят варианты $\{TXO_i\}$, заданных графами, узлами которых являются $\{MTXO_{ij}\}$ с вероятностными значениями параметров и прошедшие все этапы разработки и верификации ИМ. Поэтому для их использования необходимо лишь задание исходной информации при "запитке" ВСГ. Для проектного моделирования ТП ПОС в качестве параметризованных заготовок ИМ в состав Б. ОПИСАНИЙ входят подмодели реализации почтовых услуг i -го типа ($ПУ_i$). Для этих подмоделей при выборе вариан-

тов организации $ПУ_i$ достаточно задать стандартизованный состав информации о структуре, составе и особенностях технологии реализации $ПУ_i$, поведении и характеристиках запросов пользователей на обслуживание в $ПОС_j$.

Состав библиотеки Б. ТЕХНОЛОГ расширен за счет специализированных процедур обработки результатов моделирования, используемых в каждой из рассматриваемых предметных областей исследования. Например, для обеспечения исследований ВП и РН на ЛВС в составе Б. ТЕХНОЛОГ каталогизированы процедуры: анализа трассы реализации ВП (ПР. ТРАСС), измеренной с помощью соответствующей подсистемы мониторинга [3]; нахождения средних значений статистик имитации при использовании метода статистических испытаний (ПР. СТАТИС); обработки "трассы" расхода ресурсов ЛВС при имитации вариантов организации распределенной обработки информации на рабочих узлах ЛВС (ПР. РАСОБ). Для исследования ДТПП с вероятностным составом $MTXO_{ij}$ в Б.ТЕХНОЛОГ добавлены процедуры: формирования ВСГ (ПР. ФОРГР) из множества $\{KPP_i\}$; обработки выборок длительностей выполнения $MTXO_{ij}$, формируемых при реализации i -х итераций метода Монте-Карло (ПР. ДЛИТЕ). Проектное моделирование ТП ПОС обеспечивается в Б. ТЕХНОЛОГ набором процедур: формирования ежесуточных значений статистик имитации (ПР. СУТСТ); оценки загрузки технологических операций (ПР. ЗАГРУ); оценки потерь запросов в очередях к $MTXO_{ij}$ (ПР. ПОТЕР); формирования статистик получения дохода от реализации $ПУ_i$ (ПР. ДОХОД).

Для имитации сборочно-разборочных операций в ДТПП с меняющимся составом технологии реализации TXO_i в Б. ТЕХНОЛОГ добавлены процедуры: анализа трассы реализации сборочно-разборочных работ (ПР. АТРАС); нахождения средних значений времен реализации TXO_i по методу

Монте-Карло (ПР. СРЕДН). Для обработки методик управления и анализа характеристик ДТПП в чрезвычайных ситуациях в состав Б. ТЕХНОЛОГ добавлены процедуры: формирования статистик управления вероятностными ДТПП (ПР. УПРАВ); нахождения средних значений статистик управления по методу Монте-Карло (ПР. УСРЕД); нахождения вероятностных характеристик безотказности (ПР. БЕЗОТ.) и надежности (ПР. НАДЕЖ) в чрезвычайных ситуациях.

Поскольку технология испытания и исследования свойств ИМ в рассматриваемых предметных областях практически одинакова и реализует универсальные методики, изложенные в монографии [5], то для решения поставленных задач достаточно возможностей подсистемы испытания (ПС. ИСПЫТАН), реализованной в составе технологической оболочки СМ МІСІС. В распоряжение исследователей предоставляются следующие процедуры ПС. ИСПЫТАН: оценки точности имитации (ПР. ТОЧНО); нахождения длины переходного периода имитации (ПР. ПЕРЕХ); оценка устойчивости ИМ (ПР. УСТОЙ); анализа чувствительности ИМ и ранжировки параметров и откликов ИМ (ПР. ЧУВСТВ); проверки адекватности ИМ (ПР. АДЕКВ); нахождения рабочей области изменения параметров ИМ (ПР. ОБЛАС); поиска "узких мест" (ПР. УЗМЕСТ); нахождения в ИМ мест несбалансированности ДТПП (ПР. НЕСБАЛ).

Особенности постановки имитационных экспериментов (ИЭ) для каждой предметной области исследования ДТПП определяют специфику реализации ПС. ОПТИМИЗ множеством процедур обработки результатов ИЭ в составе ПС. ОПТИМИЗ для получения исходной информации, необходимой для реализации ИЭ и использования метода верификации ИМ ДТПП. Поскольку отклики этой модели для рассматриваемых предметных областей исследований, как правило, представляют собой векторные величины, то

для анализа результатов ИЭ разработаны процедуры: приведения откликов к безразмерным величинам (ПР. БЕЗРА); "свертки" векторов откликов к скалярным величинам по методу весовых коэффициентов (ПР. СВЕРТ); приведения откликов к одному типу (ПР. ОДНОТ); выбора определяющего фактора (ПР. ОПРФА); выбора главного критерия (ПР. ГЛКРИ); последовательных уступок (ПР. УСТУП); формирования логического составного критерия (ПР. СОСТК).

Поскольку ДТПП могут функционировать в условиях неопределенности поведения их внешней среды, то для этой цели в составе ПС. ОПТИМИЗ разработана процедура (ПР. НЕОПР), реализующая классические критерии принятия решений в условиях неопределенности и риска (ММ-критерия, Севиджи, Байеса – Лапласа, Ходжа – Лемана, Гурвица, Гермеера [4]). Таким образом, перечисленные дополнения возможностей технологической оболочки СМ МІСІС превращают ПТКИ ДТПП в универсальный инструментарий проектного моделирования ДТПП весьма обширной предметной области исследований.

1. Жогаль С.И., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Уч. пособ. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 109 с.
2. Максимей И.В., Серегина В.С. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: Уч. пособ. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 103 с.
3. Применение программно-технологического комплекса имитации при оценке возможности возникновения чрезвычайных ситуаций в технологических процессах производства / И.В. Максимей, Е.О. Попова, А.М. Потапенко и др. // Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. — 2002. — N 6(15). — С. 67–69.
4. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: учебное пособие / И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.П. Жогаль и др. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 150 с.
5. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1989. — 230 с.

Получено 12.06.03

Об авторах

Максимей Иван Васильевич,
д-р. техн. наук, проф., зав. каф. математических проблем управления

Левчук Виктор Дмитриевич,
канд. техн. наук, доцент

Сморозин Виктор Сергеевич,
канд. техн. наук, доцент

Маслович Сергей Федорович,
аспирант

Попова Елена Олеговна,
аспирант

Поташенко Александр Михайлович,
аспирант

Старченко Владимир Владимирович,
аспирант

Терещенко Галина Анатольевна,
аспирант

Место работы авторов:
Гомельский государственный университет им.
Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь