

## ПРОГРАММНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На основе анализа особенностей технологических процессов производства с переменной структурой определены требования к средствам автоматизации их проектного моделирования. Излагается состав и структура программно-технологического комплекса исследования технологических процессов производства. Сформулированы базовые принципы формализации и имитационного моделирования. Определены особенности технологии использования комплекса при решении проектных задач.

### *Введение*

Компьютерному моделированию технологических процессов производства (ТПП) уделяется много внимания исследователей и технологов [1, 2]. Созданы специальные расчетные программы и методики их использования [1]. Однако в случаях, когда ТПП имеют вероятностную природу и переменную структуру существующие средства автоматизации компьютерного моделирования не обладают необходимым уровнем технологии исследований и проектного моделирования. Ограничения, накладываемые на применение математических моделей, зачастую не выполняются, необходим высокий уровень детализации ТПП, что неизбежно приводит к их имитации. Наличие же в составе ТПП технологических операций ( $TXO_i$ ) вероятностных переменных требует использования метода Монте-Карло [3], который весьма ресурсоемок, и поэтому возникает проблема экономии ресурсов ЭВМ при имитационных экспериментах (ИЭ). Таким образом, несмотря на обилие систем моделирования (СМ) на ЭВМ, актуальна разработка экономичных специализированных программно-технологических комплексов имитации (ПТКИ) производства. В данной статье рассматриваются состав, структура и технология использования ПТКИ, ориентированного на класс ТПП, обладающих следующими особенностями реализации  $TXO_i$ : во-первых, это ТПП, описываемые сетевыми графиками выполнения

$TXO_i$ , когда параметры выполнения микротехнологических операций ( $MTXO_{ij}$ ), входящих в состав  $TXO_i$ , имеют вероятностный характер, поэтому сам сетевой график реализации  $TXO_i$  является вероятностным; во-вторых, ТПП состоит из множества  $\{TXO_i\}$  и имеет переменную структуру технологии выполнения, также задаваемую графом, узлами которого являются  $TXO_i$  и операции изменения их состава и структуры.

### *1. Особенности технологических процессов производства с переменной структурой*

В первую группу особенностей рассматриваемых типов ТПП входят: использование для описания  $TXO_i$  одноуровневого вероятностного графа ( $GTXO_i$ ); вероятностный характер применения ресурсов ТПП при выполнении ( $MTXO_{ij}$ ); использование в составе ресурсов, требуемых для реализации  $MTXO_{ij}$ , кроме времени ее выполнения, еще таких характеристик, как количество материалов и комплектующих изделий; состав рабочей силы и оборудования; стоимость выполнения операций.

Вторую группу особенностей ТПП составляют следующие. Во-первых, наличие в графе ГТПП, описывающего состав и структуру  $TXO_i$ , специфичных  $MTXO_{ij}$ , называемых операциями «расщепления» ( $RACH_{ij}$ ) и

«объединения» ( $OBJE_{ij}$ ) ветвей алгоритма ГТПП. При этом структура и состав  $MTXO_{ij}$  в  $GTXO_i$  фиксированы и задаются в виде специальной технологической карты (ТК). Во-вторых, состав коллективно используемых ресурсов ТПП фиксирован максимальными величинами. При этом ТПП реализуется на множестве узлов обработки  $\{UZO_l\}$ , представляющих собой рабочие места с закрепленными за ними частями оборудования ТПП и определенного состава рабочей силы. В-третьих, определено такое понятие ТПП<sub>h</sub>, как его пропускная способность ( $\omega_h$ ), означающая количество обслуженных запросов при реализации ТПП<sub>h</sub>. Параллельные ветви ГТПП<sub>h</sub> реализуются на одном и том же составе  $UZO_l$ , поэтому возникает конкуренция  $UZO_l$  за захват оборудования, материалов, рабочей силы на время выполнения на нем соответствующих  $MTXO_{ij}$ . В-четвертых, каждая  $MTXO_{ijh}$  характеризуется вектором запроса ресурсов ТПП<sub>h</sub>, которые могут быть как детерминированными, так и вероятными.

## **2. Требования, предъявляемые к средствам автоматизации проектного моделирования технологических процессов производства**

Перечисленные особенности ТПП при моделировании вариантов их организации требуют использования таких средств имитационного моделирования, которые обладали бы следующими возможностями.

Во-первых, позволяли бы в одном тексте имитационной модели (ИМ) ТПП сочетать процессный и транзактный способы имитации технологии реализации  $MTXO_{ij}$ . При этом одна часть описания ИМ может быть декларативной, а другая — предполагает алгоритмический способ описания компонентов ТПП. Это требование означает, что в ИМ роль технологической карты изделия ( $TK_k$ ) играет соответст-

вующий транзакт  $k$ -го типа ( $TR_k$ ), а узлами обработки изделий являются процессы со сложными алгоритмами обслуживания  $TR_k$ .

Во-вторых, у средств программирования ИМ ТПП должны быть возможности описания параллельных ветвей ТПП с операторами «расщепления» и «объединения»  $TXO_i$ . Для этого необходимо создание новых транзактов (расщеплений ветвей  $TXO_i$ ) и уничтожение лишних (при объединении ветвей в одну базовую  $TXO_i$ ). Таким образом, управляющая программа моделирования (УПМ) системы моделирования (СМ) должна обеспечивать многокальную обработку информации, относящейся к составу и структуре  $MTXO_{ij}$ . Для этого в специализированной СМ необходимо предусмотреть следующее: наличие широкого спектра механизмов обслуживания очередей транзактов; многоканальный характер обработки  $TR_k$ , находящихся на разных стадиях их обслуживания; наличие механизмов прерывания выполнения алгоритмов процесса и определения условий воздействия на процессы для организации прерываний обслуживания этих транзактов.

В-третьих, параметрическое описание характеристик ресурсов, используемых  $TXO_i$  и  $MTXO_{ij}$ . СМ должна позволять оперативным образом создавать копии компонентов с однотипными алгоритмами, корректировать модельную информацию, устанавливать наблюдателей для сбора статистики, организовывать управляющие связи компонентов ИМ, обеспечивать синхронизацию параллельных ветвей  $\{TXO_i\}$  с помощью семафорной техники. Для отображения конкуренции  $TR_k$  ресурса ТПП<sub>h</sub> необходимо СМ обеспечить возможностью создания и уничтожения  $TR_k$  в любом месте «расщепления» и «объединения» ветвей и границ  $TXO_i$ , а также установки соответствующих управляющих сигналов.

Анализ технологических возможностей существующих средств автоматизации имитационного эксперимента (ИЭ), доступных широкому пользователю [4], позволил установить, что наиболее подходящим инструментальным средством имитации ТПП<sub>h</sub> является СМ МІСІС [5]. Это определило выбор СМ МІСІС [5] в качестве базовой компоненты программно-технологического комплекса исследования технологических процессов производства (ПТКИ ТПП).

### 3. Состав и структура программно-технологического комплекса исследования ТПП

Структурно ПТКИ ТПП состоит из следующих компонентов:

- система моделирования МІСІС со своей технологической оболочкой организации ИЭ, адаптированной к среде ОС Windows любых модификаций;
- библиотека подпрограмм технологического обеспечения ИЭ с моделями ТПП<sub>h</sub> (*LIB.TECNOL*);
- библиотека процедур испытания и исследования свойств ИМ ТПП (*LIB.ISPMOD*);
- библиотека процедур информационного обеспечения и реализации интерфейсов с подпрограммами обработки данных ИЭ (*LIB.INFORM*);
- библиотека процедур анализа данных и принятия решений на основе классических критериев в условиях неопределенности и риска (*LIB.RESHEN*);
- библиотека имитационных и аналитических подмоделей технологических операций и процессов (*LIB.IMITAT*);
- библиотека генераторов псевдослучайных чисел имитации воздействия внешней среды на ТПП<sub>h</sub> (*LIB.GENERT*);
- единая информационная база данных (ИБД) комплекса;
- пакет программ статистической обработки и анализа данных ИЭ (*STATISTIKA* [6]).

СМ МІСІС обладает адаптированным к данной предметной области языком описания состава (ЯОСС) и

структуры ИМ ТПП, задания исходной информации и планирования серии ИЭ при исследовании вариантов организации ТПП. Из перечисленного состава компонентов ПТКИ ТПП в диалоговом режиме СМ МІСІС формирует рабочую версию варианта ИМ ТПП и каталогизирует ее для дальнейшего использования в *LIB.IMITAT*. Для удобства работы с моделью ТПП специалистов по исследованию и проектированию ТПП диалог с моделью и результаты имитации выдаются в понятных им терминах и определениях. Диалог достигается с помощью одной из подпрограмм из *LIB.TECNOL*.

В состав *LIB.TECNOL* входят еще подпрограммы:

- задания начальных условий имитации ТПП (*ПП.ZAPITK*);
- установки и модификации параметров *MTXO<sub>ij</sub>* и *TXO<sub>i</sub>* (*ПП.MODIFI*);
- установки и модификации начальных значений ресурсов ТПП (*ПП.NACHAL*);
- установки и модификации состава статистик и откликов ИМ ТПП (*ПП.OTKLIK*).

Библиотека *LIB.ISMOD* содержит следующие процедуры испытания и исследования свойств моделей ТПП:

- оценка точности моделирования ТПП (*ТОCHNS*);
- верификация ИМ ТПП (*VERIFI*);
- оценка чувствительности откликов к изменениям параметров ИМ ТПП под реальные условия (*CALIBR*);
- проверка адекватности ИМ реальному ТПП (*ADEKVA*);
- определение рабочей области изменения параметров исследования (*RABOBL*);
- установки условий завершения имитации (*ULLZAV*).

Все эти процедуры представляют собой конкретную реализацию под данную предметную область общей методики испытания и исследования свойств ИМ, предложенную в [4].

Библиотека *LIB.INFORM* организует все интерфейсы между подсисте-

мами ПТКИ и пакетом статистической обработки и анализа данных ИЭ (*STATISTIKA* [6]). Совместное использование библиотек *LIB.RESHEN* и пакета прикладных программ *STATISTIKA* позволяет спланировать ИЭ, обработать результаты и принять решения согласно таким классическим критериям принятия решений, как критерии Вальда, Максвелла, Севиджа [5]. Библиотека генераторов внешней среды (*LIB.GENERT*) обладает стандартным набором законов распределений псевдослучайных чисел. Каждый из этих генераторов представляет собой процедуру, формирующую структуру транзактов  $TR_k$  и моделирующую выполнение технологических карт описания *ГТПП*.

Библиотека имитационных и аналитических подмоделей технологических операций и процессов (*LIB.IMITA*) включает «заготовки» подмоделей, из которых конструируется очередная структура ИМ ТПП или выбирается типовая структура  $GT XO_J$  для задания очередных значений параметров  $MT XO_{ij}$ . В качестве среды имитации *ГТПП* или  $GT XO_J$  используется технологическая оболочка СМ МІСІС. Квазипараллельное взаимодействие транзактов и процессов моделей ТПП реализуется УПМ СМ МІСІС. Информационное взаимодействие подсистем компонентов моделей *ГТПП* и  $GT XO_J$  осуществляется с помощью ИБД комплекса.

#### **4. Принципы формального представления ТПП**

При описании ТПП необходимо отразить следующие аспекты динамики реализации  $T XO_i$ :

- взаимосвязь разных цепочек реализации  $T XO_i$  и различия в структурах вхождения в  $T XO_i$  последовательностей  $\{MT XO_{ij}\}$ ;

- ограниченный состав и специализацию  $MT XO_{ij}$  по узлам обработки ( $УЗО_k$ ) этих операций;

- требуемое ресурсное обеспечение каждого  $УЗО_k$  для реализации  $k$ -й группы  $\{MT XO_{ijk}\}$ ;

- состав и структуру расположения в ТПП<sub>h</sub> операций «расщепления»  $RACH_{ij}$  и «объединения»  $OBIE_{ij}$  изделий, обрабатываемых в ходе реализации ТПП<sub>h</sub>.

Для реализации ТПП<sub>h</sub> используется иерархическое представление  $T XO_i$ , транзактный способ передачи информации о составе  $T XO_i$  и описание алгоритмов ветвей  $T XO_i$  с помощью процессов, которыми можно управлять последовательностью сигналов «открыть», «закрыть», «прервать» выполнение алгоритма процесса в среде СМ МІСІС [5]. Алгоритмы обработки  $l$ -го изделия ( $IZDEL_l$ ) в ТПП<sub>h</sub> определяются технологической картой ( $T XK_l$ ), которая формируется до начала стадии имитации ТПП<sub>h</sub> и записывается в «теле» транзакта  $TR_l$ . Кроме того, в «теле»  $TR_l$  накапливается также статистика использования изделием ( $IZDEL_l$ ) множества  $\{УЗР_k\}$  за время жизни транзакта в ТПП<sub>h</sub> ( $T_{жсткlh}$ ). Все «тела»  $TR_l$  располагаются в ИБД ПТКИ ТПП в областях с установленными заранее адресами  $Q_l$ . Поэтому в ИМ ТПП от одной очереди к другой движется только заголовок  $TR_l$ , состоящий из «триады»: идентификатор транзакта ( $l$ ), его приоритет ( $\pi_l$ ) и адрес «тела»  $TR_l(Q_l)$ . Маршрут движения этой «триады» ( $l, \pi_l, Q_l$ ) заранее запрограммирован в  $T XI_l$ .

Введены также понятия о следующих состояниях  $TR_l$ : нахождение  $TR_l$  в очереди к  $УЗО_k$  ( $C_{1lk}$ ); обработка изделия с помощью  $MT XO_{ij}$  в  $l$ -м технологическом узле ( $C_{zlk}$ ); выделение из  $TR_l$  на узле  $k$  параллельной ветви ( $C_{3lk}$ ), при этом отображается операция «расщепления»  $T XO_i$ ; объединение основного  $TR_l$  с дополнительным  $TR_m$

( $C_{4lk}$ ); «объединение» ветвей ТПП<sub>h</sub> с помощью  $TXI_l$  отображает различные состояния обработки изделия. Каждому состоянию  $TR_l$  соответствует свой УЗО<sub>k</sub>. Граф ( $GRMI_l$ ) возможных маршрутов движения  $TR_l$  определяет алгоритм  $TXI_l$ , который может быть детерминированным (порядок смены УЗО<sub>k</sub> неизменный), вероятностным (задаются матрицами вероятностей использования УЗО<sub>k+1</sub> после выполнения  $УЗР_k \parallel P_{kk+1} \parallel$ ) и смешанным.

Кроме описания технологии обработки  $l$ -го изделия в ТПП<sub>h</sub>, задаваемого с помощью  $TXK_l$ , в ИМ ТПП необходимо отобразить динамику использования УЗО<sub>k</sub> при реализации последовательности  $\{TXO_i\}$  с учетом появления в этой последовательности операций «расщепления» и «объединения» ветвей ТПП<sub>h</sub>. Для этого применяется механизм формирования из  $TR_l$  копий управляющих транзактов ( $UTRI_{lk}$ ). При появлении в графе  $GTXO_i$   $MTXO_{ij}$ , требующих смены УЗО<sub>k</sub> на УЗО<sub>k+1</sub>, из  $TR_l$  рождается новый управляющий транзакт ( $UTRI_{lk+1}$ ), который поступает в очередь к УЗО<sub>k+1</sub> и существует в модели до завершения его обслуживания устройством УЗО<sub>k+1</sub>. Таким образом, любое завершение обслуживания на УЗО<sub>k+1</sub> формирует переход  $TR_l$  в новое состояние. Сами же операции обработки изделий реализуются во время обслуживания  $UTRI_{lk}$  алгоритмом процесса УЗО<sub>k</sub>.

Поскольку УЗО<sub>k</sub> является базовым компонентом ИМ, то он параметризован и специализируется на обслуживании определенных групп  $MTXO_{ij}$ . Особенности алгоритма функционирования процессов УЗО<sub>k</sub> являются: выбор очередного  $UTRI_{lk}$  из общей очереди согласно приоритетам ( $\pi_l$ ); формирование списка требуемых ресурсов

каждого типа для выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $RES_{hk}$ ;  $h = \overline{1, H_K}$ ); формирование списка требуемого состава оборудования каждого типа для выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $OB_{mk}$ ,  $m = \overline{1, M_k}$ ); определение затрат времени на реализацию  $MTXO_{ij}$  ( $\tau_{ijk}$ ). Собственно реализация алгоритмов УЗО<sub>k</sub> начинается только после "захвата" требуемого состава ресурсов  $\{RES_{hk}\}$  и оборудования  $\{OB_{mk}\}$ . Имитация выполнения  $MTXO_{ij}$  на УЗО<sub>k</sub> сводится к временной задержке на УЗО<sub>k</sub> управляющего транзакта  $UTRI_{lk}$  на время  $\tau_{ijk}$ . Далее в моменты активизации  $k$ -го устройства ( $t_{ij} = t_0 + \tau_{ijk}$ , здесь  $t_0$  — модельное время) реализуется следующая последовательность действий: освобождение «захваченных» ресурсов и оборудования ТПП и формирование управляющих сигналов, поступающих на соответствующие устройства-имитаторы выполнения технологических операций, являющихся узлами  $GTXO_i$  ( $MTXO_{ij}$ ). Завершается операция обслуживания УЗО<sub>k</sub> выбором из входной очереди следующего  $UTRI_{lk+1}$  и весь цикл обслуживания уже нового управляющего транзакта повторяется аналогично обслуживанию предыдущего  $UTRI_{lk}$ .

Различаем три типа  $RES_{hk}$ : ресурсы, находящиеся в монопольном распоряжении УЗО<sub>k</sub> во время выполнения  $MTXO_{ij}$ ; одновременно используемые ресурсы нескольких УЗО<sub>k</sub> и затем возвращаемые по окончании выполнения  $MTXO_{ij}$ ; ресурсы, безвозмездно расходуемые на реализацию каждой  $MTXO_{ij}$ . К первому типу  $RES_{hk}$  относятся исполнители ( $ISPO_{ij}$ ), технологическая оснастка рабочих узлов ( $OSNA_{ij}$ ), стационарное оборудование ( $STOB_{ij}$ ). Второй тип ресурсов составляют средства информационного обеспечения

( $INFO_{ij}$ ). К третьему относятся материалы, комплектующие изделия ( $mt_{ij}$ ), энергетические затраты ( $EN_{ij}$ ), стоимость выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $CT_{ij}$ ). В общем случае каждый ресурс характеризуется вектором параметров, количество и тип которых могут быть различными, и задается при описании  $MTXO_{ij}$ .

Язык описания  $TKI_k$  ориентирован на верхний уровень представления  $ТПП_h$  с помощью графа  $GТПП_h$ . Связи между узлами  $GТПП_h$  детерминированы. Вероятностными могут быть только параметры расхода ресурсов  $ТПП_h$  при реализации  $MTXO_{ij}$  ( $OB_{ij}, mt_{ij}, IS_{ij}, ST_{ij}, \tau_{ij}$ ), для задания которых необходимо знать вид и параметры соответствующих функций распределения.

Вторым уровнем описания  $ТПП$  является представление динамики реализации  $TXO_i$  либо с помощью последовательности  $\{MTXO_{ij}\}$ , либо с помощью графов  $GTXO_i$ . Описание  $TXO_i$  с помощью  $GTXO_i$  имеет следующие особенности. Одноуровневый вероятностный сетевой график с вероятностным характером использования ресурсов предполагает полумарковское развитие процесса их расхода. Кроме параметра время выполнения операции  $\tau_{ij}$  в качестве аналогичного расхода можно рассматривать и другие ресурсы, такие, как стоимость операции ( $CT_{ij}$ ) и затраты материалов, комплектующих изделий ( $mt_{ij}$ ). По этим трем типам ресурсов сетевого графика  $TXO_i$  возможен поиск критического пути при вероятностном характере использования ресурсов  $ТПП_h$  для выполнения операций  $MTXO_{ij}$ .

Полумарковский характер развития процесса следования друг за другом последовательностей  $\{MTXO_{ij}\}$  ограничивается одним условием: в лю-

бом состоянии сетевого графика необходимо предусмотреть приход хотя бы одной детерминированной  $MTXO_{ij}$ . Таким образом, из любого сетевого графика состояния, отображающего алгоритм обработки изделий в  $GTXO_i$ , должны исходить как минимум одна детерминированная  $MTXO_{ij}$  и любое количество «кустов»  $MTXO_{ij}$  с заданными векторами вероятностей выполнения последующих  $MTXO_{ij}$ .

Итак, в ПТКИ ТПП реализован двухуровневый характер имитации  $ТПП_h$ : на нижнем уровне с помощью вероятностного графа представления технологических операций  $GTXO_i$  описана технология реализации  $TXO_i$ , а на верхнем — отображаются в  $GТПП$  детерминированные алгоритмы следования  $TXO_i$  и специальные операции изменения структуры  $ТПП$  «расщепления» и «объединения» последовательностей  $TXO_i$ .

### **5. Особенности технологии использования ПТКИ ТПП**

Нижний уровень описания  $ТПП$  с помощью  $GTXO_i$  используется при проектном моделировании состава и структуры  $TXO_i$ . Верхний уровень описания  $ТПП$  с помощью  $GТПП$  позволяет исследовать на ИМ  $ТПП$  различные варианты организации  $ТПП$ . Рассмотрим особенности технологии использования ПТКИ  $ТПП$  при выборе рациональной структуры технологических операций.

В графе  $GTXO_i$  предполагается полумарковский процесс следования  $MTXO_{ij}$ . В качестве исходной информации задается:

- матрица вероятностей следования друг за другом  $MTXO_{ij}$  ( $\|P_{ijf}\|$ );
- матрицы условных распределений ресурсов  $ТПП$  времени, стоимости, комплектующих изделий и материалов: ( $\|F_i(\tau_{ijf})\|, \|\bar{\Phi}_i(CT_{ijf})\|, \|H_i(mt_{ijf})\|$ );

— идентификатор той  $MTXO_{ij}$ , с которой начинается реализация последовательности микротехнологических операций ( $j_{0i}$ ) и количество элементов последовательности  $\{MTXO_{ij}\}$   $n_{0i}$  в  $TXO_i$ .

Вероятностный характер выбора  $MTXO_{ij}$  и значений требуемых ресурсов приводит к необходимости использования метода Монте-Карло при расчете параметров сетевого графика, отображающего алгоритм реализации  $TXO_i$ . В итоге вероятностный  $GTXO_i$  представляется последовательностью детерминированных сетевых графиков объемом  $N$ , параметры которых определяются по стандартным методикам (здесь  $N$  — количество реализаций  $GTXO_i$  по методу Монте-Карло). Таким образом, автоматически формируются выборки объемом  $N$  всех параметров сетевого графика [3], по которым затем вычисляются их математические ожидания и дисперсии. Далее определяются критические значения времени выполнения, стоимости и затрат материалов на реализацию  $TXO_i$ , представленную вероятностным графом  $GTXO_i$ , которые также имеют вероятностный характер. Для остальных же видов ресурсов в каждой реализации  $GTXO_i$  определяются их максимальные значения, требуемые при выполнении всех  $MTXO_{ij}$ . Затем определяются максимальные значения этих ресурсов во всех реализациях, которые и будут необходимы требованиями к составу ресурсов ТПП при имитации развития  $GTXO_i$ . После нахождения критического пути по любой из переменных ( $\tau_{ij}$ ,  $mt_{ij}$  и  $CT_{ij}$ ) осуществляется имитация на сетевом графике уже с детерминированными переходами и фактическими значениями параметров  $MTXO_{ij}$  при «захватах» и «освобождениях» соответствующих ресурсов ТПП.

Верхний уровень описания ТПП предполагает, что все  $TXO_i$  уже спроек-

тированы и для их выполнения заранее задан: состав исполнителей  $\{SP_{0k}\}$  как по количеству, так и по квалифицированному составу; список распределяемого оборудования ТПП ( $OB_{0h}$ ); средства информационного обеспечения ( $SRIN_0$ ); общее количество материалов и комплектующих изделий ( $mt_{0l}$ ); состав узлов обработки изделий, на которых реализуются  $MTXO_{ij}$  ( $УЗО_k$ ).

Целью исследования является определение пропускной способности вариантов ТПП и рациональных расходов ресурсов ТПП на реализацию  $GTPPW_h$ . Для этой цели определяются методом Монте-Карло математические ожидания и дисперсии времени жизни транзактов ( $MT_{ЖTRKh}$ ,  $DT_{ЖTRKh}$ )  $k$ -го типа при имитации ТПП<sub>h</sub>. Множества статистик ( $MT_{ЖTRKh}$  и  $DT_{ЖTRKh}$ ) определяют качество обработки изделий запланированным составом  $\{TXO_i\}$  при заданных ресурсах ТПП<sub>h</sub> и структуре рабочих площадей предприятия:

$$W_h = \sum_k 1 / MT_{ЖTRKh}.$$

В качестве статистик использования рабочих площадей предприятия применяются: множество коэффициентов загрузки узлов обработки  $\{\eta_{УЗОl}\}$ , длин очередей и времен ожидания управляющих транзактов в очередях к  $УЗО_l$  ( $l_{очУЗОl}$  и  $t_{очУЗОl}$ ); множество коэффициентов использования оборудования, комплектующих изделий и состава исполнителей  $\{\eta_{ОВК}$ ,  $\eta_{mtl}$  и  $\eta_{ISr}\}$ . Качество реализации технологических операций определяется следующим набором статистик моделирования: коэффициенты использования технологических операций  $\{\eta_{mxojh}\}$  и времена ожидания  $TR_h$  в очередях  $MTXO_{ihh}$  ( $t_{очТОijh}$ ).

По этим статистикам по окончании  $h$ -го варианта организации  $TXO_i$  на предприятии формируется вектор

отклика  $Y_h$ , компонентами которого являются множества интегральных характеристик использования рабочих площадей  $\{\eta_{уз0fh}\}$ , ресурсов ТПП $_h$  ( $\{\eta_{ОВЛh}\}, \{\eta_{млh}\}, \{\eta_{iSr_h}\}$ ), технологических операций  $\{\eta_{ТХОih}\}$ , микротехнологических операций  $\{\eta_{МТХОih}\}$ , качество обслуживания запросов на обработку изделий  $\{T_{ЖТРKh}\}$ . Для последней группы откликов требуется минимизация их значений, в то время как для остальных необходимо стремиться к максимизации их значений. Поэтому для приведения всех компонентов к одному типу вместо  $T_{ЖТРKh}$  в качестве откликов используются обратные величины. Вторым шагом преобразования этой части компонент вектора откликов является операция приведения их к одному масштабу изменения (на интервале  $[0,1]$ ). Для этого проводится нормировка обратных величин  $T_{ЖТРKh}$  максимальной величиной ( $max_{kh}/T_{ЖТРKh}$ ). Далее ставится задача поиска такого состава ресурсов ТПП $_h$ , который обеспечивал бы максимальное значение компонент вектора  $Y_h$ .

1. Гулятев А.К. MATLAB.5.2 — Имитационное моделирование в среде Windows: Практик. пособие. — С.-Пб.: КОРОНА принт, 1999. — 288 с.

2. Основы имитационного и статистического моделирования: Учеб. пособие / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, В.П. Кирилица и др. — Мн.: Дизайн ПРО. 1997. — 288 с.
3. Максимей И.В., Серегина В.С. Задачи и модели исследований операций. Ч.2: Методы нелинейного и стохастического программирования: Учеб. пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 103 с.
4. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988. — 232 с.
5. Задачи и модели исследования операций. Ч.3: Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: Учеб. пособие / И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.П. Жогаль и др. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 150 с.
6. Айвазян С.А. Программное обеспечение ПЭВМ по статистическому анализу данных // Заводская лаборатория. — 1991. — № 1. — С. 54–58.

Получено 25.05.02

#### Об авторах

*Максимей Иван Васильевич,*

доктор технических наук, профессор  
кафедры МПУ ГГУ им. Ф. Скорины

*Левчук Виктор Дмитриевич,*

кандидат технических наук, доцент  
кафедры МПУ ГГУ им. Ф. Скорины

*Попова Елена Олеговна,*

аспирант ГГУ им. Ф. Скорины

*Поташенко Александр Михайлович,*

ассистент кафедры АСОИТ ГГУ им.  
Ф. Скорины

*Место работы авторов:*

Гомельский государственный университет им.  
Ф. Скорины, Беларусь

Тел.: (0232) 56 4237