

УДК 621.002:519.87

Г. Н. ЗДОР, Е. Р. НОВИЧИХИНА

**ПОЛИМОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕХАНООБРАБОТКИ**

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 13.08.2010)

Введение. Объектом исследования являются механообрабатывающие участки и линии машино- и приборостроения, которые в дальнейшем будем обобщенно называть производственными системами (ПС). Область исследования – прогнозирование с помощью математического моделирования показателей функционирования ПС, таких как выработка, производительность, длительность производственного цикла, время или вероятность выполнения к сроку планового задания, использование оборудования, заполнение накопителей, загрузка персонала и пр. Непосредственно предметом исследования являются компьютерные моделирующие системы (МС) ПС, которые широко применяются на этапе проектирования. Такие МС состоят из нескольких взаимодополняющих частных моделей (ЧМ), которые взаимодействуют под общим управлением модели-диспетчера, называемой метамоделью (ММ). Текущим продуктом МС является готовая и отлаженная комплексная модель (КМ) конкретной ПС. Исследование объекта при помощи МС получило название полимодельного анализа.

Суть проблемы МС [1] заключается в следующем. Они создаются под конкретный класс ПС и известный набор технических, управленческих и организационных решений. При появлении новых объектов и решений требуется переделка МС. При этом сам процесс разработки или модификации требует значительных затрат времени (несколько человеко-месяцев).

Цель исследования – расширение универсальности МС, а также снижение трудоемкости их разработки и модификации путем унификации составляющих МС и автоматизации наладки КМ.

Постановка задач исследования. Обзор известных подходов при построении МС для ПС приведен в [1]. Отметим, что ни один из них не обеспечивает достижение поставленной цели в должной мере, поэтому первой задачей исследования будет выработка общей концепции универсальной и малотрудоемкой МС. Для выявления сопутствующих задач рассмотрим концепции, наиболее близкие к предлагаемой.

Концепция агрегативных систем с саморазворачивающимися алгоритмами [2] обеспечивает максимальные общность и универсальность. Однако агрегативное описание очень громоздкое и, как следствие, трудоемкое. Кроме того, оно предназначено только для имитационного метода моделирования, который сам по себе является самым трудоемким. По этой причине воспользуемся агрегативным описанием, но ограничимся только межмодельным уровнем, а внутри ЧМ от агрегатирования и обязательного применения имитации откажемся. Предстоит осуществить интерпретацию агрегата применительно к ЧМ и ММ ПС, унифицировать входные и выходные контакты агрегатов, привязав их к системе данных ПС, предложить схему сопряжения с неизменными каналами связи.

Концепция многомодельных моделирующих структур и эволюционного моделирования [3] потенциально должна повышать универсальность КМ за счет адаптивности и снижать трудоемкость за счет автоматизма модификаций (рис. 1). Однако это касается только этапа эксплуатации и только долгоживущих КМ, нацеленных на задачи поиска или поддержки управленческих ре-

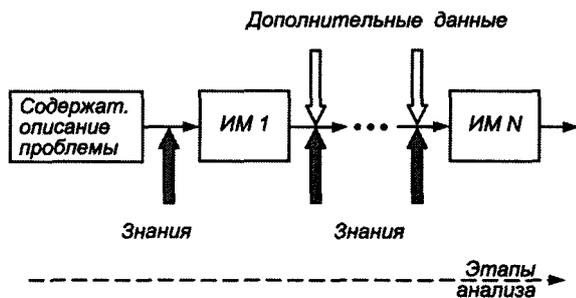


Рис. 1. Эволюция моделей в процессе анализа системы [3]: ИМ – имитационная модель

все вопросы по ее реализации. Предстоит обеспечить соответствие ЧМ МС следующим требованиям [3]: единый формат информационной среды; обмен знаниями и данными; легкость настройки на конкретные условия; использование результатов работы друг друга; динамическая модификация в процессе эксплуатации (в нашем случае в процессе формирования и наладки) по мере накопления знаний и данных об объекте.

Концепция частичного укрупнения моделей [4] представляет попытку получить КМ ПС, используя только аналитические марковские модели, которые сами по себе являются малотрудоемкими и универсальными по отношению к объектам. Дополнительным источником снижения трудоемкости формирования КМ должно служить поочередное рассмотрение ЧМ, каждый раз со сведением всего остального модельного окружения к укрупненным результирующим потокам событий. Такой подход правомерен для марковских моделей, в которых по определению предполагается независимость потоков. Однако это допущение совершенно не соответствует условиям ПС, в результате чего происходит неконтролируемое снижение адекватности модели. Кроме того, марковские модели способны охватить только малую часть влияющих факторов и имеют ограниченную информативность. Часть задач анализа ПС под силу только имитационному моделированию [5]. Воспользуемся идеей частичного укрупнения, но для этого предстоит найти способы его распространения на любые методы моделирования и учета взаимовлияния выходных потоков ЧМ.

Отметим, что предлагаемая в данной работе концепция не является просто сборкой перечисленных полезных идей и помимо них содержит новые принципиальные решения.

Таким образом, получаем список главных задач исследования:

1. Разработать общую концепцию универсальной и малотрудоемкой МС.
2. Предложить единую систему показателей ПС для межмодельного обмена данными.
3. Унифицировать структуру и интерфейс ЧМ.
4. Разработать универсальный алгоритм автоматического формирования, настройки и наладки КМ.

Методика исследования. Использовались методология системного анализа и исследования операций. В разработанной МС применяется аналитическое моделирование методами теории массового обслуживания (ТМО) и динамики средних (ДС), имитационное моделирование (ИМ) дискретно-событийного типа, статистическое моделирование (СМ) методом Монте-Карло. Из предметных областей технологии машиностроения и организации производства использовались положения теорий производительности и надежности, методы технического нормирования, объемного временного баланса (ОВБ), оценки эффективности.

Результаты исследования и их обсуждение. Суть предлагаемой концепции заключается в следующем (рис. 2):

анализ ПС должен вестись несколькими относительно простыми ЧМ, специализированными по функциям (аспектам, факторам), но универсальными по отношению к объектам;

новому использованию МС должен предшествовать итерационный наладочный режим ее работы, в процессе которого происходят взаимное дополнение и уточнение ЧМ;

шений. Нас же интересуют прогнозирующие КМ для проектирования, в которых объекты постоянно сменяются и модели формируются заново, превращаясь фактически в одноразовые. По этой причине воспользуемся идеей самосовершенствования МС, но ограничимся рамками сеанса формирования и наладки КМ без претензий на эволюцию и синергетику.

Отметим, что концепция эволюционирующих моделирующих структур сравнительно молода и применительно к ПС практических наработок пока не имеет, поэтому к нерешенным относятся

все ЧМ должны содержать одинаковое ядро эндогенных переменных (переменных состояния и выходных переменных), достаточных для определения всех главных показателей функционирования ПС и использующихся для межмодельного обмена данными;

в каждой итерации запуск всех ЧМ должен осуществляться параллельно и независимо, только после этого между ними производится одновременный обмен полученными результатами – факторными поправками к переменным состояния;

признаком завершения процесса взаимоуточнения ЧМ и условием окончания итераций по наладке КМ должны считаться стабилизация и совпадение с заданной точностью одноименных показателей функционирования ПС на выходе всех ЧМ.

Для краткости будем называть вышеприведенные положения концепции соответственно полимодельностью, итерационностью, эндогенной идентичностью, параллельностью и межмодельной сходимостью.

Первые два положения не новы и являются обязательными условиями системного подхода. Особенность заключается только в способах их реализации под поставленную цель. Новизна заключается в сочетании трех последних положений, которые являются связными и для получения эффекта эмерджентности должны применяться совместно.

Положение эндогенной идентичности исходит из того, что все выделенные показатели функционирования ПС однозначно отражаются в модели ограниченным набором зависимых переменных. Отражение может быть непосредственным, когда показатель прямо совпадает с выходной переменной, или опосредованным, когда показателю соответствует одна или несколько переменных состояния, связывающих его и исходные данные очевидной арифметической зависимостью. Например, имея сохраняемую переменную «суммарное время нахождения i -го станка в состоянии машинной обработки» $T_{\text{маш}}$ и зная из техпроцесса машинное время детали-операции $t_{\text{маш}}$, можно прямым счетом определить выработку станка за период T ($N = T_{\text{маш}} / t_{\text{маш}}$), производительность ($U = N / T$), коэффициент использования ($K_{\text{и}} = T_{\text{маш}} / T$). Имея значения переменной для всех станков и привлекая другие исходные данные, можно рассчитать ряд показателей для ПС в целом.

Условно будем называть такие эндогенные переменные показателеобразующими, чтобы выделять их из других имеющихся эндогенных переменных. Если снабдить все ЧМ полным набором показателеобразующих переменных, то каждая из них превращается из части КМ в самостоятельный экземпляр общей модели ПС. Она будет учитывать все значимые факторы, но с неравномерной детализацией, способна даже в одиночку выдать все показатели функционирования ПС. Это не ведет к усложнению ЧМ и не означает отказ от принципа (преимуществ) их специализации. Ведь ЧМ определяет и изменяет только те переменные, на которые влияет ее специализация, а остальные получает в готовом виде через исходные данные от других ЧМ. Если таковые в КМ отсутствуют, пока еще не запускались или не полностью перекрывают значимые факторы, то предусмотрены среднестатистические или нормативные значения по умолчанию (по принципу «усредненный учет лучше никакого»). Показатели ПС, выдаваемые разными ЧМ, дублируются, но отличаются по значению до тех пор, пока итерационное взаимное уточнение ЧМ не завершится.

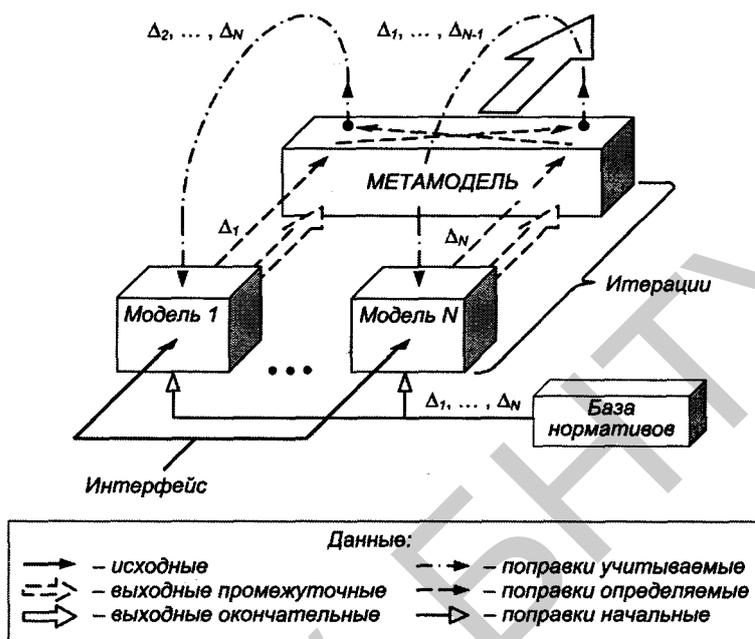


Рис. 2. Схема модельного анализа ПС по предлагаемой концепции

Эндогенная идентичность создает базу общей среды данных для интеграции и взаимодействия ЧМ. В [1] обосновываются требования к универсальной системе показателеобразующих переменных МС: информативность, согласованность, единый формат данных, сопоставимость, традиционность, автономность. Показано, что основой такой системы может служить объемный временной баланс основного технологического оборудования (ОТО) и деталей:

$$T_{\phi} = \sum T_{(i)} = T_3 + T_{o.p} = T_{\text{маш}} + T_{\text{пр}} + T_{o.p} =$$

$$T_{\text{маш}} + T_{\text{у.с}} + T_{\text{изм}} + T_{\text{т.о}} + T_{\text{о.о}} + T_{\text{отд}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{пер}} + T_{\text{нак}} + T_{\text{тр}} + T_{\text{снх}} + T_{\text{орг}} + T_{o.p},$$

$$T_{\text{ц}} = \sum T_{\text{д}(j)} = T_{\text{маш.д}} + T_{\text{з.в}} + T_{\text{тр.о}} + T_{\text{н}} + T_{\text{т}} + T_{o.з},$$

где T_{ϕ} – фонд рабочего времени ОТО; $T_{(i)}$ – суммарное время нахождения ОТО в i -м состоянии за рассматриваемый период T_{ϕ} ; T_3 – время загрузки оборудования работой (наличия заказов); $T_{o.p}$ – время отсутствия работы (недостаточно заказов в плане или неритмичное их поступление); $T_{\text{маш}}$ – время машинной обработки (работа по управляющей программе); $T_{\text{пр}}$ – время простоев по различным причинам при наличии работы; $T_{\text{у.с}}$ – время установки, снятия и закрепления детали; $T_{\text{изм}}$ – время измерений; $T_{\text{т.о}}$ – время технического обслуживания в процессе обработки; $T_{\text{о.о}}$ – время организационного обслуживания в течение смены; $T_{\text{отд}}$ – время на отдых; $T_{\text{рем}}$ – время ремонта; $T_{\text{пер}}$ – время переналадки (подготовительно-заключительное); $T_{\text{нак}}$ – время приемки-выдачи локального накопителя; $T_{\text{тр}}$ – время простоя при транспортном обслуживании; $T_{\text{снх}}$ – время простоя из-за неполной синхронизации со смежными операциями (голодание, блокировка); $T_{\text{орг}}$ – время организационных и прочих простоев; $T_{\text{ц}}$ – длительность производственного цикла детали; $T_{\text{д}(j)}$ – суммарное время нахождения детали в j -м состоянии за период $T_{\text{ц}}$; $T_{\text{маш.д}}$ – время машинной обработки детали; $T_{\text{з.в}}$ – время загрузки-выгрузки; $T_{\text{тр.о}}$ – время нахождения в транспортной оснастке до ее заполнения; $T_{\text{н}}$ – время нахождения в накопителях; $T_{\text{т}}$ – время транспортировки; $T_{o.з}$ – время ожидания запуска.

Для сопоставимости выходные переменные лучше представить в виде долевых коэффициентов:

$$K_{(i)} = T_{(i)} / T_{\phi} \quad (K_{(i)} = [0, 1], \sum K_{(i)} = 1),$$

$$K_{\text{д}(j)} = T_{\text{д}(j)} / T_{\text{ц}} \quad (K_{\text{д}(j)} = [0, 1], \sum K_{\text{д}(j)} = 1).$$

Использование долевых коэффициентов также и в качестве переменных состояния для межмодельного обмена осложнено, так как они не отвечают требованию автономности. Требование означает, что изменение (уточнение) значения одной переменной не должно влиять на значения других переменных в ОВБ. Изменение же любого долевого коэффициента ЧМ влечет изменение других коэффициентов, так как $\sum K_{(i)} = 1$. Можно сделать вывод, что необходимо перейти от коэффициентов типа «доля» в постоянном целом к коэффициентам типа «довесок» к общей основе. Для всех ЧМ и для данного периода моделирования единственным общим и неизменным компонентом в структуре фонда времени оборудования и деталей является суммарное время обработки $T_{\text{маш}}$, которое заключено в плановых заданиях. Тогда переменные состояния предлагается представить в виде удельных коэффициентов:

$$F_{(i)} = T_{(i)} / T_{\text{маш}} \quad (F_{(i)} \geq 0, \sum F_{(i)} > 1),$$

$$F_{\text{д}(j)} = T_{\text{д}(j)} / T_{\text{маш.д}} \quad (F_{\text{д}(j)} \geq 0, \sum F_{\text{д}(j)} > 1).$$

Физический смысл удельного коэффициента $F_{(i)}$ для ОТО: время простоя по данной причине, приходящееся на каждую единицу машинного времени работы. При этом продуктивное состояние обработки также представляется удельным коэффициентом использования по машинному времени с постоянным значением $F_{\text{и}} = 1$. Физический смысл удельного коэффициента $F_{\text{д}(j)}$ для детали: непроизводительное время по данной причине, приходящееся на каждую единицу машинного времени обработки. В отличие от долевых коэффициентов удельные коэффициенты могут иметь значения больше 1.

Удельные коэффициенты удобны для укрупненного учета различных факторов. В этом случае действие фактора можно отразить в модели фиктивным увеличением времени обработки каждой детали: $t'_{\text{маш}} = t_{\text{маш}} (1 + F_{(i)})$.

Удельные коэффициенты, найденные одной ЧМ, легко, единообразно и независимо интегрируются в другие ЧМ. Предположим, что в некоторой ЧМ баланс времени выполнения всех плановых заданий отдельной p -й рабочей позиции (РП) выглядит следующим образом:

$$T_{\text{вып}(p)} = \sum_{k=1}^K [T_{\text{маш}(k)} (1 + F_{\text{у.с}} + F_{\text{изм}} + F_{\text{т.о}} + F_{\text{о.о}} + F_{\text{отд}} + F_{\text{рем}} + F_{\text{пер}} + F_{\text{нак}} + F_{\text{тр}} + F_{\text{снх}} + F_{\text{орг}} + F_{\text{о.р}}) Q_{(k)} (1 + B_{(k)})],$$

где $T_{\text{маш}(k)}$ – суммарное машинное время обработки на данной РП одной детали k -го заказа, Q – размер партии, B – доля брака, коэффициент $F_{\text{тр}}$ рассчитан исходя из номинального времени транспортирования с учетом величины транспортной партии. Предположим также, что другая ЧМ детально имитировала транспортное обслуживание и дополнительно учла простои РП, связанные с отказами транспорта и с ожиданием в очереди к нему. Эта модель сформировала свое увеличенное значение коэффициента $F_{\text{тр}}$. Очевидно, что первоначальное значение $F_{\text{тр}}$ в первой модели может быть заменено на новое уточненное значение, что не повлияет на значения других коэффициентов. При этом корректно отразится физический смысл уточнения и не будет затронута картина влияния других факторов.

Эндогенная идентичность совместно с агрегативным описанием создает предпосылки для унификации и автономности моделей МС. Все ЧМ и ММ представляются внешне абсолютно одинаковыми агрегатами (рис. 3). Агрегаты имеют один набор входных и выходных контактов с фиксированным смыслом сигнала (данных) для каждого. Не задействованные в конкретной модели данные отражаются в унифицированном агрегате отсутствием канала связи с соответствующими контактами («висячие клеммы»), отсутствием на этих контактах сигнала (всегда «пустой» сигнал) или игнорированием сигнала. Унифицированные агрегаты программно реализуются модулями на базе одной универсальной оболочки. Завершенные модули отличаются друг от друга интерпретацией сочетания входных сигналов и алгоритмами их преобразования в выходные сигналы.

Положение параллельности является альтернативой традиционному последовательному способу обмена информацией в МС, который предусматривает одностороннюю передачу результатов после срабатывания очередной ЧМ (рис. 1, рис. 4, а). При предлагаемой параллельной схеме (рис. 4, б) ЧМ не приступают к обмену информацией, пока не отработают все модели. Таким образом, связи по принципу «один с одним» или «один со многими» заменяются связями «все со всеми». В этом случае не требуется индивидуальная пригонка смежных ЧМ, а диспетчирование ММ сводится к одной простой и неизменной схеме.

Параллельность совместно с эндогенной идентичностью создает предпосылки единого алгоритма функционирования ММ при автоматической настройке КМ. Действительно, для ММ все ЧМ являются абсолютно одинаковыми и равноправными «черными ящиками». Вне зависимости от количества ЧМ и разграничения функций между ними на все ЧМ необходимо одновременно подать все результаты предыдущей итерации, со всех снять отклики, вновь подать новые результаты и так до тех пор, пока одноименные отклики не стабилизируются и не сравниваются.

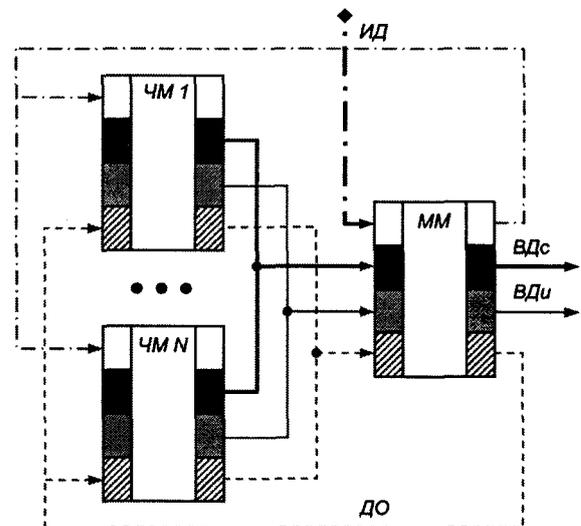


Рис. 3. Модульная структура МС: ИД – исходные данные; ДО – данные обмена; ВДс и ВДи – выходные данные сводные и идентифицированные

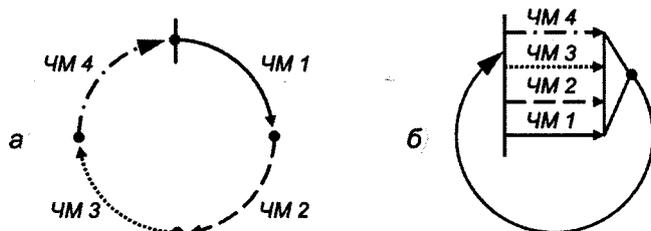


Рис. 4. Схемы запусков ЧМ и обмена информацией внутри итерации: а – последовательная; б – параллельная

Параллельность также устраняет неоднозначность толкования причин изменения промежуточных и окончательных результатов, вызванную их зависимостью от последовательности запусков ЧМ и неодинаковым уровнем вложения поправок. Это упрощает алгоритм анализа и интерпретации, что дополнительно снижает трудоемкость разработки. Кроме того, параллельность ведет к сокращению числа необходимых итераций и затрат компьютерного времени.

Предлагаемая концепция теряет смысл, если одноименные результаты ЧМ не будут статистически сходиться к одинаковому значению. Известно, что при представлении дискретных ПС с конечным числом достижимых состояний, как это обычно принято, процесс функционирования является эргодическим и установившийся режим теоретически существует [6]. Однако это еще не означает, что установившийся режим будет существовать и у комплекса взаимозависимых ЧМ, если они подобраны неправильно. Можно предположить, что сходимость является необходимым, но конечно-недостаточным, условием адекватности КМ. Для обеспечения сходимости главное внимание должно быть уделено четкому разграничению функций между ЧМ, исключающему перекрытие влияний и двойной счет. Для случая, когда одновременно несколько ЧМ выдают одну поправку, предусматривается система их приоритетов.

Для единообразия, однозначности и сопоставимости оценки сходимости желательно иметь один критерий. В качестве такового предлагается коэффициент использования ОТО по машинному времени $K_{и}$. Он чувствителен ко всем исходным данным, связан со всеми выходными данными и является традиционным показателем эффективности ПС. В МС должен быть предусмотрен выбор пользователем уровня идентификации $K_{и}$: средний по всему ОТО ПС или по ОТО указанной рабочей позиции (приоритетной, лимитирующей, выпускной).

Практическая реализация результатов исследования. Предлагаемая концепция нашла воплощение в программном пакете PIMMS [7], базовая комплектация которого представлена в таблице.

Состав и функции моделей PIMMS

Модель, метод, уровень	Учитываемые аспекты	Основная функция (специализация)
«Ресурсы», ОВБ + СМ, 1	Детали, техпроцессы, заказы, ресурсы ОТО	Определение простоев рабочих позиций (РП), связанных с особенностями плановых работ
«Потоки», ИМ, 2	Организация производства, оперативное планирование, диспетчирование, ресурсы вспомогательного оборудования	Определение простоев РП, связанных с логикой функционирования ПС и с обслуживанием транспортно-накопительной системой
«Состояния», ДС, 3	Управление в рабочих позициях	Определение простоев РП, связанных с внутренней логикой их функционирования и с внешними воздействиями
«Персонал», ТМО, 3	Персонал	Определение простоев РП, связанных с работой оперативного и обслуживающего персонала
«Метамодель», СМ, 0	Все вышеперечисленные в комплексе	Организация взаимодействия ЧМ и обобщение результатов

В МС акцент сделан на универсальные и малотрудоемкие аналитические методы моделирования. Имитация используется только там, где без нее действительно нельзя обойтись – при отражении организационных и оперативно-управленческих аспектов с решающим значением фактора выбора.

Настройка на любой объект осуществляется чисто параметрически, т. е. только путем изменения исходных данных без перепрограммирования. Настройка на аспект производится выборочным подключением ЧМ, настройка на степень детализации – выборочными ответами на запросы подробных исходных данных.

Отчет формируется автоматически – выводятся все возможные для данных условий результаты, как в пакетах GPSS или AutoMod.

В приведенной комплектации КМ сходимость результатов наблюдалась при всех условиях. При этом остаточные флуктуации находились в пределах $\Delta K_{\text{н}} = \pm 0,05$. В некоторых случаях наладочный режим требовал нескольких часов компьютерного времени, что, однако, не означает большую трудоемкость, так как процесс осуществляется автоматически без участия человека.

Выводы

1. Предложенная концепция полимодельного анализа ПС обеспечивает расширение универсальности и снижение трудоемкости создания МС за счет совместного использования следующих принципов: идентичность состава эндогенных переменных у всех ЧМ; параллельность запусков всех ЧМ с последующим одновременным взаимообменом результатами внутри каждой итерации; остановка итераций при сравнении значений одноименных показателей у всех ЧМ.

2. В качестве универсальной системы показателей для межмодельного обмена данными в МС целесообразно использовать удельные коэффициенты нахождения ОТО в различных состояниях, минимально достаточный состав которых содержит 13 наименований.

3. Статистическая сходимость с точностью до остаточных флуктуаций одноименных результатов у всех ЧМ может рассматриваться как необходимое условие правильности подбора и корректности разграничения функций ЧМ в МС.

4. Практическая реализация предлагаемой концепции в программном пакете PIMMS подтвердила ее эффективность и показала приемлемую погрешность прогнозирования, которая не превышает 5%.

Литература

1. Новичихин Р. В., Новичихина Е. Р. Моделирование производственных систем обработки деталей в машино- и приборостроении. Мн., 2010.
2. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М., 1978.
3. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М., 2003.
4. Кузовлев В. И., Шкатов П. Н. Математические методы анализа производительности и надежности САПР. М., 1990.
5. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS. СПб., 2004.
6. Маталыцкий М. А., Тихоненко О. М., Паньков А. В. Теория массового обслуживания и ее применения. Гродно, 2008.
7. Новичихина Е. Р., Шардыко П. П. Моделирование производственных систем в среде PIMMS. Мн., 2008.

G. N. ZDOR, E. R. NOVICHIKHINA

POLYMODEL ANALYSIS OF MACHINE PROCESSING SYSTEMS

Summary

Complex modeling of machine processing systems simultaneously by several partial models specialized on taking into account determined factor is considered. It is offered a concept of complex model, allowing to reduce labour content of the development of the partial models and to automate their mutual specification. The results of the offered concept realization in the software package PIMMS are given. Inaccuracy of determining of the operating factors of machine processing system does not exceed 5%.