

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА МОДЕЛИ ГПС В ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Введение

Одним из наиболее важных факторов, которые определяют эффективность гибкой производственной системы (ГПС), является качество управления, его соответствие специфическим особенностям ГПС. Значимость и сложность задач управления обусловлена иерархической структурой, функциональными особенностями, динамичностью, территориальной распределенностью элементов и модулей ГПС, необходимостью эффективного использования основного и вспомогательного оборудования, даже кратковременные простои которого ведут к значительным экономическим потерям. Методы моделирования ГПС должны учитывать свойства построения ГПС и протекающих в ней процессов. Помимо упомянутых выше особенностей ГПС определяющими являются такие свойства как дискретность производственных процессов, конвейерный характер материальных потоков, цикличность в последовательностях технологического функционирования, требующих синхронизации и координации событий и процессов, происходящих в системе. Гибкость производственной системы определяется ее способностью путем параметрических и структурных изменений в определенных диапазонах начального определения данной системы реагировать на изменения ее текущей задачи или условий (среды) ее выполнения при соблюдении приемлемых диапазонов временных и других затрат.

Сложность такого класса систем, многозадачность их систем управления, возможность использования ЭВМ на всех этапах синтеза/анализа системы способствовало концепции многоагентных систем и распределенного объектного программирования.

Постановка задачи

Вышеперечисленное позволяет говорить об актуальности разработки алгоритма проектирования моделей, который бы предусматривал использование базового структурированного набора, состоящих из набора классов, состоящих из объектов и объединяющих их отношений. Данный подход позволяет унифицировать проектные решения в рамках систем определенного класса, установить рациональный порядок их принятия и начинать проектирование с некоторого исходного “каркаса”, удовлетворяющего начальным требованиям системы. Для этого необходима концептуальная модель проекта, которая выстраивается путем

© О.И. Лисовиченко, Л.С. Ямпольский, А.А. Лавров, Е.С. Пуховский
, 2007

формализации характерных для систем определенного класса содержательных понятий и связывания их набором отношений в единое целое. Такая формализация базируется на результатах анализа ряда подобных систем, в ходе которого определяются характерные общие свойства и понятия последних. С этой точки зрения алгоритм и базовая структура являются средством как компактного представления знаний, так объективного проектирования модели ГПС и создания целевой функции требуемых решения задач определенного класса.

Использование базовой структуры позволяет существенно облегчить решение основной задачи объектно-ориентированного проектирования: помогает определить состав программных объектов и правила их взаимодействия. Очевидно, что для сложной системы эта задача должна решаться поэтапно.

Алгоритм синтеза модели ГПС

Применяя простые и логичные средства, пользователь должен иметь возможность сформировать модель ГПС для определения основных компоновочных решений, ключевых параметров и внешнего облика расположения модулей в системе. Наличие управляющих моделей позволяет обеспечить управление всей моделью изделия сверху-вниз, широко распараллелить работу и выдавать ассоциативные данные (геометрия и ключевые параметры) для рабочего проектирования подмодулей и узлов с различными параметрами. В управлении внешними ссылками широко используются специализированные функции контроля и управления ассоциативными связями между компонентами модели. Наличие такого подхода позволяет организовать эффективный процесс проектирования и бесконфликтного проведения изменений в изделиях любой степени сложности.

Существуют две концепции проектирования любой системы: сверху вниз (нисходящее проектирование) и снизу вверх (восходящее проектирование). На практике используется разумное сочетание этих концепций. Довольно распространенным представлением процесса проектирования является следующее: на каждом уровне представления проекта решаются две задачи - синтез и анализ, причем под синтезом понимается получение структуры системы в виде соединенных между собой структурных модулей данного уровня, а под анализом - составление и решение математической модели этой структуры. Изначально проектирование модели предлагается реализовывать по методу нисходящего проектирования (рис. 1), заключающегося в том, что разработка модели ГПС начинается с определения компоновочной структуры системы, на основе которой затем определяются входящие в систему модули.

Рассмотрим этапы проектирования по нисходящему методу — от идеи к решению задач процессов функционирования модели ГПС.

Этап 1. Проектирование системы начинается с *ввода объекта компоновочных структур из БД (КС)* [2]. Типы КС определяются в зависимости от принципа межоперационного транспортирования деталей.

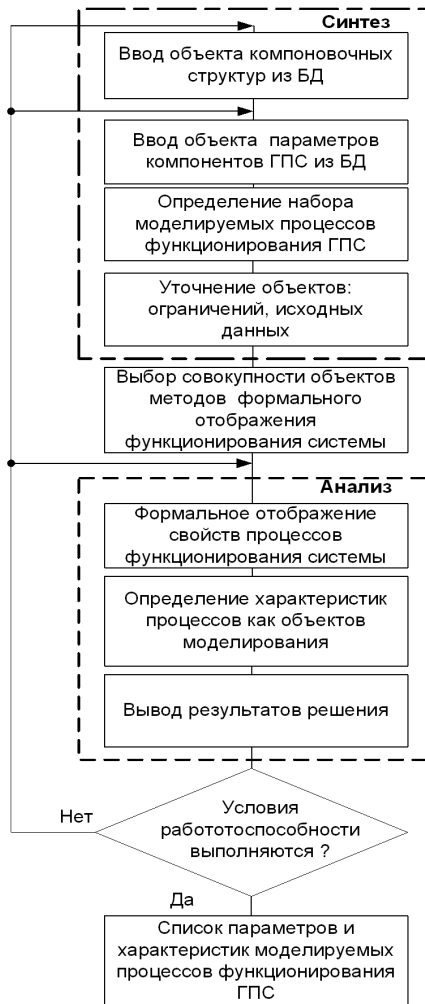


Рис. 1 – Обобщенный алгоритм проектирования модели ГПС методом нисходящего проектирования

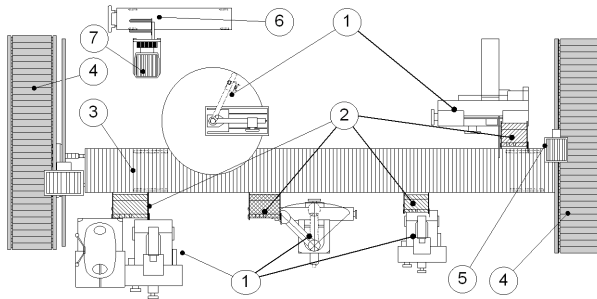


Рис. 2 – Компонентная структура ГАЛ: 1- ГПМ; 2 - разгрузочно/загрузочные позиции ГПМ; 3 – транспортная линия; 4 – АС заготовок/деталей; 5 - робот-штабелер; 6 – АС инструмента; 7 - АТМ

Гибкие автоматизированные линии (ГАЛ) строятся по принципу межоперационного транспортирования деталей “станок-станок” и реализуют структурно-компонентные решения автоматизированных линий массового производства (рис. 2).

Некоторые КС ГПС строятся по принципу межоперационного транспортирования деталей “станок-склад-станок”, реализуют структурно-компонентные решения гибких автоматизированных участков (ГАУ) (рис 3) и делятся на централизованные и децентрализованные. Централизованная КС определяется наличием централизованного межоперационного склада-накопителя (АС) с одним или несколькими автономными транспортными модулями (АТМ).

Децентрализованная КС характеризуется наличием у каждого станка накопителя, который обслуживается также одним или несколькими АТМ. Эти пристаночные накопители, как и межоперационный склад, обеспечивают хранение запаса заготовок или полуфабрикатов на продолжительный период работы ГПС. Преобладающим правилом построения КС ГПС для мелкосерийного производства есть соединения принципов централизованного и децентрализованного построения, т.е. использование централизованного межоперационного склада-накопителя вместе с пристаночными накопителями ограниченной емкости.

Этап 2. После выбора приемлемой КС необходимо из БД *ввести объект параметров компонентов ГПС* : ГПМ, складов, роботов-манипуляторов, АТМ, роботов-штабелеров и т.д., а также определить допустимые временные параметры функционирования каждого модуля.

Этап 3. Выбор структуры системы и характеристики модулей позволяют перейти к *определению набора объектов моделируемых процессов функционирования ГПС*, свойства которых необходимо формально отобразить аналитическими методами для их дальнейшего моделирования и изучения. Также на этом этапе осуществляется процесс уточнения состава и порядка действий, процедур и работ, обеспечиваю-

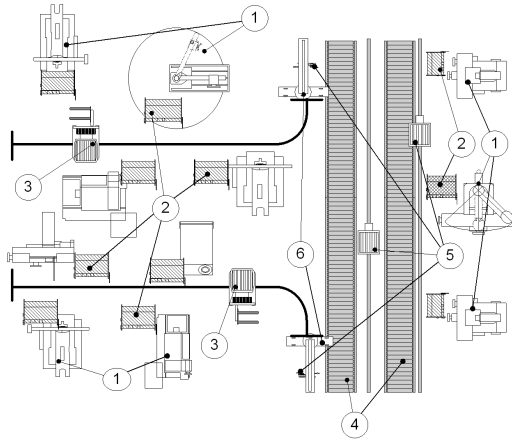


Рис. 3 – Компонентная структура ГАУ: 1 - ГПМ; 2 - разгрузочно/загрузочные позиции ГПМ; 3 – АТМ; 4 – АС заготовок/ деталей / инструмента; 5 - робот-штабелер; 6 – разгрузочно/загрузочные позиции склада

при создании информационной системы с заданными свойствами при одновременном определении сроков выполнения отдельных этапов и стадий разработки с целью получения необходимой номенклатуры изделий.

Кроме основных формообразующих процессов, такими процессами могут быть:

1. Планирование и организационные процессы: прием календарного задания; прием внутренней информации о наличии заготовок, инструментов, расходных материалов; формирование сменных заданий; прием информации о текущем выполнении плановых заданий.

2. Управление комплексом оборудования: прием заявки на обработку детали; проверка полученной информации на текущую допустимость задания; формирование заданий персоналу и управляющим подсистемам (управление станочным комплексом); формирование технологической информации: времен переходов, списка инструментов, номеров спутников и др.

3. Управление станочным комплексом: хранение информации о состоянии станочного комплекса и формирование соответствующих воздействий по переводу оборудования в рабочее состояние; выбор станков для обработки деталей; формирование заявки АТСС на загрузку соответствующего инструмента; прием от АСИО информации по конкретно загруженным инструментам, в том числе, по коррекциям на инструмент; формирование заявки АТСС на подготовку заготовки и ее доставку на станок; контроль обработки на станке; формирование информации о ходе обработки.

4. АСИО (Автоматизированная система инструментально-го обеспечения): формирование заявки для информационного склада по деталям; управление инструментальным складом; управление доставкой инструмента на станки; контроль стойкости инструмента и управление его заменой; быстрая замена инструмента при его поломке; прогнозирование замены инструмента по фактическим размерам детали; управление измерительными устройствами.

5. АТСС (Автоматизированная транспортно-складская система): управление позициями загрузки/разгрузки; управление складом деталей; управление доставкой детали на спутнике к соответствующему станку со склада по заявке; управление доставкой детали от станка к станку; управление доставкой детали на склад.

Все эти процессы определенным образом связаны между собой (например, первый зависит от двух других, а также от установленной дисциплины обслуживания, но не является для них интегральным).

Этап 4. Когда известен набор моделируемых процессов, переходят к **уточнению объектов ограничений и объектов исходных данных.** Это предусматривает подробную пооперационную количественную информацию о процессах моделирования, необходимую для адекватного отображения и моделирования каждой операции. Например, в исходных данных для моделирования системы могут быть указаны:

- номенклатура изделий, узлов и деталей, подлежащих изготовлению и сборке;
- месячная программа выпуска по каждому наименованию изделий и деталей;
- подетальный перечень с указанием количества подлежащих выпуску запасных частей;
- режим работы участка или линии;
- заводской технологический маршрут, определяющий характер заготовки и последовательность прохождения по ГПМ;
- коэффициент, учитывающий различие в весе (массе);
- коэффициент сложности;
- коэффициент, учитывающий другие особенности объекта

и т.д.

Этап 5. В большинстве **методов формального отображения процессов функционирования системы** и получения количественных решений лежит идея использования математических моделей оптимизации.

Для описания многих свойств процессов функционирования систем разработаны общие подходы и методы получения количественных решений. Это стало возможным вследствие того, что по своей форме многие процессы тождественны, причем, процессы одного и того же класса возникают в самых различных объектах. Помимо этого, каждый объект

объединяет одинаковый вид математической модели для их описания. В настоящее время наибольшее распространение получили методы формального отображения процессов функционирования систем:

Теория автоматов [3, 4, 5] обеспечивает развитый аппарат описания и анализа переходов между состояниями системы, но не отображает причинно-следственные (каузальные) отношения, а также так называемый “истинный параллелизм” (в частности, адекватное отображение отношения частичного порядка событий); кроме того, композиция моделей и их иерархическое представление в пределах этого аппарата несколько осложнены.

Процессные алгебры (напр. CSP [15, 18] – Communicating Sequential Processes) обеспечивают развитые наборы операций композиции, компактное синтаксическое представление; но в тот же время они не имеют достаточно эффективных средств представления причинно-следственных отношений и ограничены в отображении истинного параллелизма.

Марковские процессы [8, 12] и теория очередей учитывают стохастичной характер поведения системы и дают ее количественные характеристики относительно определенных промежутков времени или наборов задач; но они абстрагируются от причинно-следственных отношений, внутреннего строения системы.

Разностные уравнения базируются на смене состояний, и поэтому не являются эффективными при необходимости учитывать сложные аспекты недетерминизма, которые вызывают взаимное блокирование оборотов и т.д.

Макс-плюс алгебра [16, 17, 19] позволяет формировать уравнение состояний дискретной системы и делать определенные заключения относительно ее поведения, но требует специфического представления, и ее применение довольно ограничено.

Сети Петри [7, 10] эффективно решают первоочередное требование - эффективно отображают асинхронность и истинный параллелизм в системе и имеют мощные средства анализа поведения; тем не менее, их недостатком есть недостаточная композиционность и недостаточная развитость синтаксического описания.

Теория расписаний [6, 13, 14] позволяет решать различные задачи. Теория расписаний использует, с одной стороны, понятие исполняемого процесса (оператор, операция, задача, работа), а с другой, – используемого ресурса (машина, процессор, прибор, пункт, человек). Задача может состоять, например, в достижении минимума суммарного времени выполнения набора операций путём оптимального закрепления их за ресурсами системы. Сами операции могут быть зависимыми и независимыми. Другая постановка задачи может заключаться в оптимизации порядка прохождения задачи через систему.

Исследования показали, что ни один из перечисленных методов не обладает достаточно универсальным для адекватного и полного отображения всего многообразия особенностей протекающих в ГПС процессов, а поэтому и появляется необходимость оптимального выбора методов ,

т.е. формирование наилучшего сочетания методов по определенному критерию из всех допустимых набором или альтернатив для достижения максимально адекватного формального отображения свойств процессов функционирования системы (табл. 1). Все математические модели принятия решений имеют вид уравнения, в котором общий критерий функционирования (критерий оптимизации) системы в целом приравнивается некоторому соотношению, связывающему между собой множество управляемых и неуправляемых переменных, определяющих поведение системы. В общем виде это выражение может представлять систему аналитических или статистических уравнений или неравенств.

Таблица 1

Свойства процессов и методы их формального отображения

		1	2	3	...	$k_{св}$
		Описание динамики процесса	Количественные характеристики	Качественные характеристики		Синтаксическое описание
1	Теория автоматов	+	+-	+		+
2	Теория графов	-	-+	+-		+
3	Сети Петри, в т..	+	+-	+		-+
	Временные СП	+	*	-+		-+
	Раскрашенные СП	+	*	*		-
4	Системы массового обслуживания		+			
	Марковские процессы	-+	+	-+		+
	Теория очередей	-+	+	-+		+
5	Алгебры процессов	+	-	+		+
6	Диоидные (max, min+) алгебры	-+	*	*		-+
...						
n_{mt}	Методы формальных спецификаций	+	-	+		*

Критерий оптимальности сочетания методов должен представлять собой количественную оценку (меру) формального отображения свойств системы с помощью моделей на базе методов из этого сочетания. При обосновании критерия эффективности необходимо учитывать как характер решаемой проблемы и специфику производства, так и ограниченность различных подходов к выбору формальных средств представления особенностей функционирования процессов в ГПС.

Для оценки качества формального отображения свойств системы могут использоваться аддитивные критерии $F = \sum_{j=1}^n \lambda_j F_j$, в которых учи-

тываются весовые коэффициенты λ_j частных критериев F_j , причем $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$. Рейтинговую оценку критериев проводят эксперты, которые оценивают каждый критерий определенным числом баллов исходя из их важности. Ниже рассмотрены два метода рейтинговой оценки критериев качества с помощью экспертов: метод ранжирования; метод парных сравнений [1].

Метод ранжирования. Пусть имеются m экспертов, которые оценивают n -критериев. Каждый эксперт проводит ранжирование критериев путем присваивания номеров от 1 до n в соответствии с уменьшением степени важности этих критериев, при этом заполняется следующая таблица:

		критерии			
		1	2	...	n
эксперты	1	x_{11}	x_{12}		x_{1n}
	2	x_{21}	x_{22}		x_{2n}
	⋮				
	m	x_{m1}	x_{m2}		x_{mn}

Здесь x_{ij} – номер, который i -ый эксперт присвоил j -ому критерию. В дальнейшем удобно пересчитать эту таблицу, присваивая более важному критерию большее число y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$). Введем новые веса $y_{ij} = n - x_{ij}$. Теперь наиболее важный критерий имеет оценку $n - 1$, а наименее важный – нуль. Весовые коэффициенты в аддитивном критерии определяется таким образом: $\lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^m y_{ik}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}}$, $k = 1, 2, \dots, n$.

Степень согласованности результатов работы экспертов определяется коэффициентом:

$$w = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где: $S = \sum_{j=1}^n d_j^2$, $d_j = 0.5m(n + 1) - \sum_{i=1}^m x_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Значения w изменяются в пределах $w \in [0; 1]$.

Если: $w = 1$ – все эксперты дают одинаковые оценки; $w = 0$ – мнения экспертов несогласованны. В зависимости от величины коэффициента w результаты оценки критериев либо принимаются, либо отвергаются.

Метод парных сравнений. Этот метод применяется, когда эксперты затрудняются в оценке важности критериев в баллах. В этом случае каждый k -ый эксперт заполняет следующую таблицу:

Здесь $a_{ij}^k = 1$, ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$), если i -ый критерий предпочтительнее j -ого критерия, $a_{ij} = 0$, в противном случае.

Для каждого эксперта имеем такую таблицу, т.е. всего m таблиц. Далее происходит объединение таблиц в одну путем суммирования чисел,

	1	2	j	n
1	a_{11}	a_{12}		a_{1n}
2	a_{21}	a_{22}		a_{2n}
i				\dots
n	a_{n1}	a_{n2}	\dots	a_{nn}

стоящих в соответствующих клетках.

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^m a_{ij}^k.$$

Определим весовые коэффициенты:

$$\lambda_k = \frac{\sum_{j=1}^n b_{kj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \quad (k = 1, 2, \dots, m)$$

Этот метод также предусматривает определение степени согласованности экспертов.

$$\gamma = \frac{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{b_{ij}}^2}{C_m^2 C_n^2} - 1,$$

где $C_v^r = \frac{v!}{r!(v-r)!}$ – число сочетаний из v по r . Максимальное значение коэффициента согласия $\gamma_{\max} = 1$. Минимальное значение $\gamma_{\min} = -\frac{1}{m-1}$ для m – четного и $\gamma_{\min} = -\frac{1}{m}$ – для m нечетного.

Итак, для таблицы 1, степень согласованности ($\omega = 0.85$), поэтому можем записать адекватность методов формального отображения свойств процессов (табл. 2):

На начальных этапах выбор подходящего метода из альтернативных вариантов обусловлен объективными и субъективными факторами неопределенности. К объективным факторам принадлежат неполнота множества исходных данных, отсутствие квалифицированных специалистов, а также ограничения, обусловленные внешней средой. Субъективные факторы определяются опытом и интуицией экспертов, их отношением и личной заинтересованностью в вариантах выбора. Аналитическими методами определить влияние таких причин на конечный выбор достаточно сложно. Вместе с тем, используя аппарат нейронных сетей и методы теории нечетких множеств, такую неопределенность можно существенно уменьшить, принимая рациональные решения о выборе удовлетворяющего исходные требования набора методов для адекватного описания свойств процессов [11].

Этапы 6, 7. После определения набора методов формального отображения процессов функционирования системы переходим к непосредственному описанию или **отображению свойств процессов функционирования системы**. Для этого задействуем объект соответствующего

Таблица 2.

Оценка адекватности методов формального отображения свойств

		1	2	3		$k_{св}$
		Описание динамики процесса	Количественные характеристики	Качественные характеристики	...	Синтаксическое описание
1	Теория автоматов	0.8	0.4 – 0.8	0.6 – 0.8		0.2
2	Теория графов	0.5	0.2	0.8		0.3
3	Сети Петри	0.9	0.3	0.7		0.3
	Временные СП	0.7	0.8	0.5 – 0.7		0.2
	Раскрашенные СП	0.7	0.6 – 0.8	0.4 – 0.7		0.1
4	Системы массового обслуживания	0.4	0.7	0.3		0.1
	Марковские процессы	0.3	0.5 – 0.8	0.5		0.1
	Теория очередей	0.2	0.4 – 0.7	0.3		0.1
5	Алгебры процессов	0.3	0.2	0.8		0.8
6	Диоидные (max, min+) алгебры	0.2	0.7	0.5 – 0.7		0.3
...						0.8
$n_{лт}$	Методы формальных спецификаций	0.6 – 0.9	0.4	0.4 – 0.8		0.4

метода, задаем входные данные и ограничения. Затем определяем интересующие нас конечные показатели и точки мониторинга процесса вычислений [9].

В зависимости от решаемой задачи критериями оптимизации могут быть показатели, минимизирующие затраты ресурсов (время, трудоемкость, себестоимость) или максимизирующие результаты (прибыль, число обработанных деталей и т.д.). Управляемыми переменными могут быть такие величины, как размер и продолжительность производственных циклов, число выпускаемых изделий, цена каждого изделия и т.д. Значимость каждой управляемой переменной может быть установлена пользователем, моделирующем ГПС. Может возникнуть необходимость добавления к основной модели ряда выражений, описывающих ограничения, которые налагаются на возможные значения управляемых переменных (на рис. 1 обозначение возвратов). Ограничениями могут быть денежные, сроки выполнения работ, состав технических средств или другие ресурсы. Эти ограничения могут выражаться как дополнительным набором уравнений, неравенств так и непосредственно добавлением еще одного метода в БД.

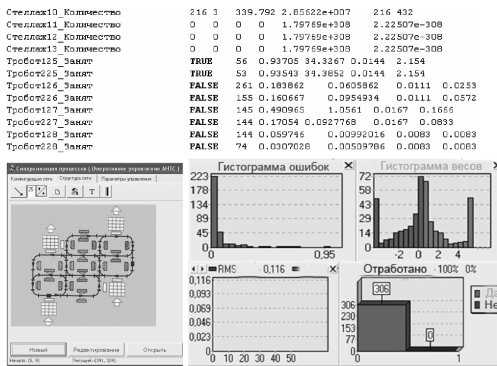


Рис. 4 – Варианты отображения информации

Этап 8. Для просмотра как конечных, так и промежуточных результатов вычислений необходимо задействовать объект **вывода результатов решения**. В зависимости от выбранных методов в среде моделирования реализована возможность отображать информацию в текстовом, табличном и графическом режимах (рис. 4).

Этап 9. В процессе моделирования собирается статистика о выбранных показателях качества функционирования системы в целом или отдельных ее блоков (участков, элементов). На основе анализа полученной информации принимается решение о выборе приемлемого варианта параметров системы, а также выдвигаются требования к параметрам отдельных функциональных блоков, имитирующих определенные операции или обрабатывающих определенные ограничения. Обработка ре-

зультатов может заключаться также в нахождении доверительных интервалов для локальных и интегральных оценок путем выполнения нескольких прогонов модели с различными начальными числами базового генератора.

Этап 10. Процедура интерпретации результатов моделирования заключается в формулировке выводов о моделируемой системе при различных сочетаниях входных параметров и их уровней, а также в оценке влияния структуры этой системы или ее отдельных модулей на значения контролируемых характеристик. Процесс интерпретации сопровождается оценкой адекватности поведения, как самой модели, так и ее модулей. При сравнении результатов могут использоваться статистические данные функционирования реальных систем-прототипов.

Предлагаемая система моделирования ориентирована на пользователя - непрофессионала в области программирования и обработки данных. Это достигается тем, что в основе применения системы лежит объектно-ориентированный язык, предназначенный для описания структуры исследуемого объекта с помощью объектов, информационных связей между ними и сигналов управления, позволяющих имитировать алгоритмы функционирования этих устройств или определять необходимые характеристики. Сама среда моделирования [9] состоит из подсистем. На рис. 5 представлен алгоритм использования подсистем самой среды моделирования.

Вывод

Сложность моделирования заключается в том, чтобы правильно определить наиболее важные (релевантные) в данном случае факторы и описать их влияние. Задачами моделирования ГПС являются сравнение вариантов проектирования системы, исследование свойств и оптимизация. В статье предложен подход к созданию объектно-ориентированной среды, позволяющий эффективно решать указанные задачи за счет обеспечения унифицированной методологической и программной поддержки всех фаз создания системы.

Литература

1. Автоматизированное управление технологическими процессами: Учебное пособие/ Под ред. Яковлева В.Б. –Л.: Изд-во Ленингр. Унта, 1988. –224 с.
2. Автоматизированные системы технологической подготовки робототехнического производства./ - Л.С. Ямпольский, О.М. Калинин. – К.: Вища школа, 1987.
3. Бауэр В. Введение в теорию конечных автоматов. –М.: Радио и связь, 1987.
4. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. М.:Физматгиз, 1962.
5. Каган Б.М. Электронные вычислительные машины и системы. - М.: Энергия, 1979. –528 с.

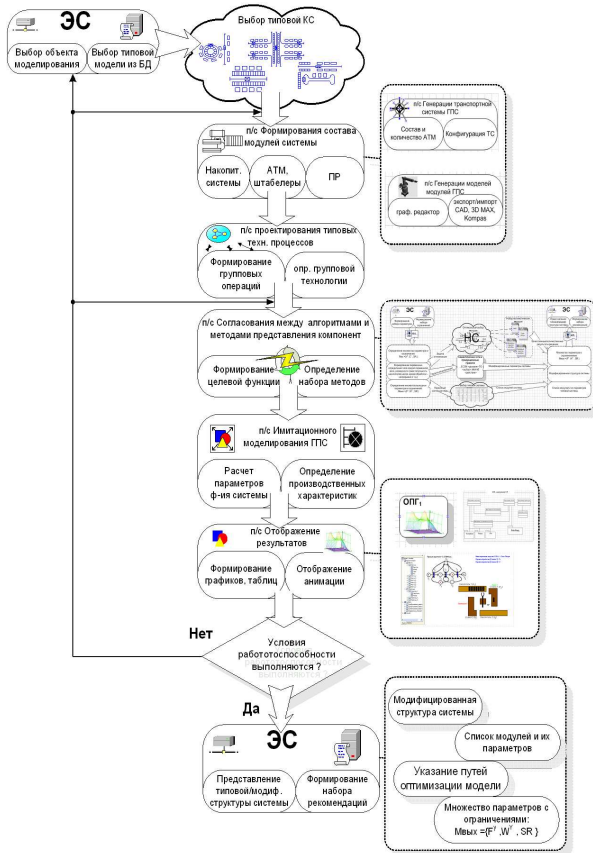


Рис. 5 – Алгоритм механизма моделирования системы в объектно-ориентированной среде моделирования

6. Конвей Р.В. Теория расписаний: Пер. с англ./Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат.лит., 1975.-359 с.
7. Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. -160 с.
8. Кудрявцев Е.М. Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. –М.: Радио и связь, 1984. –184 с.
9. Лисовиченко О.И., Лавров А.А. Подход к созданию объектно-ориентированной среды моделирования производственных систем // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Адаптивні системи автоматичного управління”.-Дніпропетровськ: ДНВП Системні технології, 2006-Вип. 9(29).- С. - .
10. Методы параллельного микропрограммирования/ Под ред. Бандман О.Л.- Новосибирск, Наука, 1981. –180 с.
11. Олейник В.В., Лисовиченко О.И., Ямпольский Л.С. Рациональный выбор формализмов семантически-согласованной среды при моделировании компьютерно-интегрированных производственных систем; // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Адаптивні системи автоматичного управління”.-Дніпропетровськ: ДНВП Системні технології,2006-Вип.9(29).-С.93-101.
12. Саати Г.А. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. - М.: Советское радио, 1971.-520 с.
13. Танаев В. С., Шкурба В. В. Введение в теорию расписаний. - М., Наука, 1975. -256с.
14. Теория расписаний и вычислительные машины / Под ред. Э.Г.Коффмана. –М.: Наука, 1984. - 336 с.
15. Хоар Ч.. Взаимодействующие последовательные процессы. М.: Мир, 1989.
16. Akian M., Bapat R.B.,and Gaubert S. Asymptotics of the Perron eigenvalue and eigenvector using max algebra.inpreparation,1996.
17. Bapat R.B., Stanford D.,and Pvan den Driessche. Pattern properties and spectral inequalities in max algebra. SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications, 16(3):964–976,1995.
18. Butler M.J. A Practical Approach To Combining CSP and B. Declarative Systems and Software Engineering Group, Technical Report DSSE-TR-99-2, February 1999.
19. Gaubert S. On the Burnside problem for semigroups of matrices in the $(\max,+)$ algebra. SemigroupForum, 52:271–292,1996.