

# МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING

УДК 04.94, 658.5.012.1

DOI: 10.17587/it.24.705-713

Ю. А. Зак, д-р техн. наук, науч. консультант,  
Аахен, Германия

## Принципы построения систем имитационного моделирования производственных систем

*Рассмотрены основные задачи, функции, принципы построения, основные компоненты и архитектура, объем необходимой информации для построения системы имитационного моделирования производства. Результаты проведенных имитационных экспериментов могут быть использованы для определения оптимальной структуры, состава технологических модулей и распределения персональных ресурсов, направлений материальных потоков, выбора стратегии, параметров и пунктов контроля незавершенного производства, размеров партии обрабатываемых изделий, а также алгоритмов управления технологическим процессом. Решения на основании этих результатов могут использоваться как на стадии оперативного и календарного планирования, так и на стадии проектирования, выбора состава и технических характеристик производственных модулей и технологической подготовки производства.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, управление материальными потоками, алгоритмы выборочного контроля, объемы информации, базы данных, графический интерфейс

### Введение

Имитационное моделирование уже в течение многих лет находит широкое применение при анализе и поиске наиболее эффективных способов организации и проектирования технологических процессов, при построении оперативных и календарных планов выпуска продукции, управлении материальными потоками и маневрировании трудовыми ресурсами [1–7, 11–13].

Применение этих методов наиболее эффективно в условиях средне- и мелкосерийного производства, когда в зависимости от структуры предприятия, имеющегося портфеля и установленных сроков выполнения заказов, состояния оборудования, запасов сырья, полуфабрикатов и незавершенного производства, наличия трудовых ресурсов необходимо найти наиболее эффективный по технико-экономическим показателям календарный план работы предприятия, обеспечивающий выполнение всех ограничений на сроки поставки готовой продукции [8, 9, 11]. В этих условиях производственный процесс должен быть не только экономически эффективным, но и в значительной степени

гибким, легко перестраивать свою структуру в зависимости от требований рынка, быстро и с минимальными затратами реагировать на различные требования потребителей.

Разрабатываемая система имитационного моделирования должна быстро и эффективно определить:

— "узкое место" в технологической цепочке в данной конкретной производственной ситуации;

— мероприятия, позволяющие существенно сократить время выполнения некоторого подмножества заказов и повысить производительность производства или отдельных его технологических модулей;

— состав наиболее эффективного оборудования, необходимого для выполнения каждого заказа;

— резервы сокращения времени производства изделий и запасов незавершенного производства;

— надежность выполнения каждого из заказов в установленные сроки;

— наиболее эффективные стратегии и параметры выборочного контроля на различных стадиях производства;

— эффективное распределение во времени загрузки оборудования, трудовых и материальных ресурсов.

Другой областью применения систем имитационного моделирования являются проектирование, техническое перевооружение производства, ввод в производство новых изделий и производственных мощностей, внедрение новых более прогрессивных технологических процессов и систем автоматизации. При решении этих задач имитационное моделирование принимаемых решений позволяет наиболее эффективно выбрать состав оборудования, транспортных модулей объемов буферных накопителей, средств и стратегии контроля правильности выполнения технологических операций и обеспечения высокого качества изделия на всех стадиях его изготовления.

Все технологические процессы очень тесно взаимосвязаны друг с другом. Некоторые изменения, вносимые на определенных стадиях технологического процесса, оказывают существенное влияние на дальнейший ход производства и зачастую оказывают трудно предсказуемые воздействия. Лицу, принимающему решение, зачастую трудно комплексно и системно оценить последствия принимаемых им локальных решений на поведение всей системы в целом. В этих условиях только системно ориентированные математические или имитационные модели позволяют осуществить комплексный анализ производства. Ввиду сложности системных взаимосвязей, динамического характера, многомерности реальных производственных систем аналитические модели позволяют получить их математическое описание только в сильно упрощенном виде. Многие не учитываемые в этих моделях факторы и погрешности оказывают существенное влияние на качество принимаемого на основе этих моделей решения. В этих условиях (см., например, [6, 7]) только гибкие имитационные модели производственного процесса, учитывающие все особенности реального производства, позволяют осуществить объективный анализ состояния как отдельных локальных процессов, так и всего производства.

### **1. Основные задачи, функции и принципы построения системы**

Использование систем имитационного моделирования в оперативном управлении сред-

не- и мелкосерийным производством должно помочь в решении следующих задач:

- выбор наиболее эффективного состава производственных модулей, буферных накопителей, направлений технологических и транспортных потоков, а также распределения трудовых ресурсов в целях выполнения всего комплекса производственных заданий в установленные сроки и с наилучшими экономическими показателями;
- быстрая реорганизация и перепланирование производства в соответствии с потребностями потребителей и состоянием производственных, материальных и трудовых ресурсов, а также незавершенного производства;
- сокращение времени выполнения заказов и объема запасов незавершенного производства;
- повышение вероятности завершения выполнения заказов в установленные договорными сроки;
- выбор правильной стратегии, а также параметров выборочного контроля незавершенного производства в целях определения наиболее эффективного компромисса между правильным определением некондиционных изделий на ранних стадиях технологического процесса, уменьшением связанных с этим экономических потерь и сокращением сроков выполнения заказов потребителей;
- повышение коэффициентов загрузки технологического оборудования;
- сокращение производственных расходов и процента брака;
- повышение квалификации персонала, принимающего решение по вопросам планирования и управления производством, на основе приобретенного ими опыта работы с имитационной моделью, лучшего понимания всех взаимосвязей в технологической цепочке.

Основные принципы построения программной системы заключаются в следующем:

- гибкость и открытость разрабатываемой системы, возможность ее легкой перестройки, расширения и включения новых программных модулей;
- модульная структура;
- возможность осуществлять моделирование как отдельных блоков, подсистем, так и всей системы в целом;
- простой графический интерфейс как на этапе построения имитационной модели объекта, так и в процессе ввода исходных данных

при решении оперативных задач планирования и управления и анализе полученных результатов;

- различные способы отражения, а также ясность в представлении и анализе как структуры моделируемого производства, так и результатов выполненного анализа и вычислений;
- наличие баз данных для хранения имитационных моделей, исходных данных и результатов выполняемых расчетов, обеспечивающих быстрый доступ и корректировку всей информации;
- возможность выполнения расчетов с учетом реального календарного времени;
- возможность вариации используемых производственных модулей, материальных и трудовых ресурсов, алгоритмов управления технологическими установками.

Имитационные модели в зависимости от постановки и содержания решаемой задачи могут рассматриваться как модели анализа текущего состояния производства, прогноза его будущего поведения, а также оптимизации ее параметров.

Имитационное моделирование предусматривает проведение одного или серии экспериментов, в процессе которых проводится анализ динамики системы в различных условиях. При этом в процессе экспериментов варьируются параметры состояния, входные данные и управляющие воздействия. Для производственных систем характерны также вариации структуры объекта, состава и использования во времени работы технологического оборудования и трудовых ресурсов. Хотя проведение таких экспериментов зачастую требует значительных вычислительных ресурсов, процесс выполнения их, а также полученные промежуточные и окончательные результаты более понятны лицу, принимающему решение (ЛПР), чем выводы, сделанные на основе аналитических моделей. Однако в результате проведения таких экспериментов не гарантировано получение наиболее эффективного решения поставленной проблемы.

Наибольшее распространение для анализа производства получили имитационные модели с дискретным временем, которые можно строить на основе следующих принципов [1–7, 12, 13]:

1) ситуационного подхода, основанного на рассмотрении новых состояний всех элементов системы в результате совершения определенных событий в каком-либо одном из ее элементов.

В качестве таких событий могут рассматриваться время завершения выполнения заказа либо необходимости останова или переналадки производственных модулей; достижение граничного уровня запасов в каком-либо из накопителей, израсходование лимита какого-то вида материальных или трудовых ресурсов и т. п.;

2) подхода, основанного на анализе каждой из транзакций, следующих последовательно друг за другом в определенные дискретные моменты времени (*transaction flow*). Транзакции — это временные системные динамические компоненты системы. Они определяют относительные временные интервалы, по завершению которых могут изменяться состояния отдельных блоков моделируемой системы, т. е. изменения объемов выпускаемой продукции, объемы запасов накопителей и состояния, т. е. активности, отдельных производственных модулей. В процессе прохождения отдельных транзакций определяются состояния всех последовательно и параллельно расположенных динамических объектов (производственных модулей) и технологических операций. Каждый производственный модуль выполняет определенные функции и характеризуется векторами входных и выходных параметров, значения которых изменяются в результате прохождения каждой из транзакций. В дискретных динамических детерминированных или стохастических имитационных моделях состояние всех блоков системы рассчитывается на каждом шаге транзакции, т. е. промежуточные состояния системы на каждом шаге расчетов служат основой и исходными данными для дальнейших шагов вычислений и могут сравниваться с результатами, полученными на реальном объекте. При прохождении транзакций каждая рабочая станция может оказаться свободной или занятой. Возникающее при этом действие в соответствии с заданным приоритетом или алгоритмом принятия решений может повлечь за собой некоторое событие или переадресовку для выполнения на другие блоки системы.

Наибольшее распространение в имитационном моделировании получил концепт, ориентированный на анализ материальных потоков (ситуационный подход и подход, ориентированный на анализе транзакций [1–6]), широкое применение находит также объектно-ориентированный подход [1, 2, 4, 5], в основе которого лежит последовательность обработки изделий.

В публикациях (см., например, [1, 2, 5–7]) описано большое число эффективных применений систем имитационного моделирования в автомобильной, электронной, химической, целлюлозно-бумажной, текстильной, пищевой промышленности и в машиностроении. Рынок программной продукции включает более 120 программных систем.

Системы имитационного моделирования, ориентированные на решение специальных задач, используют языки программирования GPSS, Modula-2, Simula, Simgen, SLAM, Pascal, C, C++, Java и позволяют пользователю при создании имитационной модели объекта создать любую структуру производственного комплекса, легко описать все материальные потоки, функции отдельных блоков, в приемлемой форме представить результаты выполненных расчетов, расширить область применения системы, введя дополнительные функции. Однако для предприятий малой и средней мощности, у которых зачастую нет высококвалифицированных специалистов по информатике и программированию, выполнение таких работ по адаптации системы не представляется возможным. Им нужны простые в эксплуатации программные системы, в которых выполнение всех этих функций должно осуществляться с помощью простого графического интерфейса.

## 2. Основные компоненты системы

Программная система имитационного моделирования промышленных объектов в дискретном времени должна содержать следующие компоненты [1, 3–9, 11]:

- переменные состояния, генераторы и счетчики дискретного системного времени и транзакций;
- методы и алгоритмы обнаружения и регистрации свершившихся событий (изменения состояния отдельных объектов);
- динамические структуры данных изменения состояния объектов во времени;
- библиотеку алгоритмов управления очередями;
- генераторы случайных чисел с различными функциями распределения;
- библиотеку программ интерпретации, статистического анализа и оценки полученных результатов;
- базы данных и протоколы хранения, представления и преобразования всей инфор-



Рис. 1. Основные элементы системы

мации об объекте, входных и промежуточных результатов экспериментов, а также выходной информации;

- графический интерфейс с пользователем;
- графическое и табличное представление результатов анализа, анимацию хода производственных процессов.

Основные элементы системы имитационного моделирования производства приведены на рис. 1.

## 3. Иерархическая структура организации производства

Технологическая схема организации производства может быть представлена в виде иерархической сети (рис. 2, см. третью сторону обложки). Каждый узел более высокого уровня этой сети может быть развернут в виде некоторой сети более низкого уровня. При этом предусматривается не только последовательное, но и параллельное соединение этих узлов, а также все возможные альтернативы направления технологических потоков. Каждый узел этой иерархической сети может определять производственный, складской, накопительный, транспортный модуль кондиционной или отбракованной продукции или пост контроля, а также отдельные технологические операции и вспомогательные операции (профилактический контроль и ремонт оборудования и т. п.). Узел более высокого уровня иерархии определяет более сложные технологические модули: группы оборудования, роботизированные посты, автоматические линии, участки и цеха производства. Каждый из этих узлов должен содержать всю необходимую для моделирования входную информацию, которая хранится

в банке данных входной информации, а также информацию, полученную в результате расчетов и содержащуюся в банке данных результатов расчетов. Отметим, что в банке данных может храниться информация не только об одном, но также и о нескольких производствах. Такое представление технологического процесса позволяет проводить имитационное моделирование на различных уровнях иерархии с разным уровнем детализации. Можно рассматривать детализованную схему расчетов, рассматривая каждую из технологических и вспомогательных операций, а также на разных уровнях укрупнения (технологические модули, участки или цеха производства). Кроме того, можно осуществлять имитационное моделирование только определенных отдельных структурных единиц различных уровней иерархии. При этом необходимо осуществить интеграцию соответствующих входных данных на основе содержащихся в системе алгоритмов расчетов. При расчетах на всех уровнях иерархии должно быть предусмотрено время переналадки оборудования и подготовительно-заключительных операций.

#### **4. Особенности использования систем имитационного моделирования в машиностроении, электронике промышленности и приборостроении**

##### **4.1. Основные требования, предъявляемые к системе**

Системы имитационного моделирования, ориентированные на широкое использование в производстве электронной аппаратуры, в машиностроении и приборостроении, должны удовлетворять следующим специфическим требованиям:

1. Современное производство электронной аппаратуры предусматривает большое число операций контроля на различных стадиях технологического процесса. Система имитационного моделирования должна предоставить пользователю широкие возможности выбора стратегии и параметров выборочного контроля, а также связанные с этими решениями оценки потребности в контрольном оборудовании, трудовых ресурсов, иметь в своем составе алгоритмы расчетов вероятности и стоимости выпуска брака и изменении времени производственного цикла.

2. Так как многие производства представляют собой объединение технологических процессов различной длительности, которые могут протекать как в течение рабочего времени, так и за его пределами (например, процессы сушки, охлаждения, разогрева изделий, затвердевания покрытий и т. п.), процесс моделирования должен выполняться в реальном календарном времени.

3. В зависимости от потребностей производства один и тот же человек может выполнять в различные моменты времени одну или сразу несколько разных технологических операций, обслуживать один или несколько производственных модулей. Поэтому в системе должны быть предусмотрены в процессе имитационных экспериментов возможности манипулирования трудовыми ресурсами.

4. Необходимо предоставить возможность пользователю проводить эксперименты как с укрупненной имитационной моделью производства, когда некоторая совокупность объектов объединяется в укрупненные блоки, так и с наиболее высокой степенью точности, с учетом каждой технологической операции и каждой единицы оборудования. При этом в качестве объекта моделирования может выбираться любая структурная единица из заданной иерархии моделей производства. Должна быть предоставлена возможность в процессе моделирования выбора различных алгоритмов и режимов работы производственного модуля, а также количества и квалификации обслуживающего персонала.

5. Все имитационные эксперименты проводятся в реальном времени. Поэтому в системе должно быть предусмотрено программное обеспечение для графического ввода и корректировки фактического календарного времени работы производства. При этом учитываются выходные и праздничные дни, число и продолжительность рабочих смен, времена перерывов и пауз, возможности введения дополнительных часов работы.

##### **4.2. Параметры объектов имитационной модели**

Основными типами объектов имитационной модели являются:

— рабочие станции, т. е. различного вида обрабатывающие модули — станки, реакторы, промышленные роботы, технологические уста-

новки, машинные комплексы, гибкие производственные модули и др.;

- транспортные модули;
- модули контроля;
- буферные емкости, склады материалов и готовой продукции, накопители заданной емкости;
- управление транзакциями.

На рис. 3 и 4 показаны взаимосвязи входных, варьируемых параметров и данных, рас-

считанных на основе выполненных имитационных экспериментов, соответственно для производственных модулей и буферных накопителей производственной системы.

При выборе в графическом режиме из соответствующего каталога некоторого объекта в другом окне выводится таблица его технико-экономических показателей, которые можно корректировать и дополнять. Предоставляются также возможности ввода в реальном времени

необходимого объема трудовых ресурсов для обслуживания каждого объекта. Алгоритмом предусмотрена возможность выбора из базы данных для каждого структурного модуля в каждый дискретный момент времени числа обслуживающего персонала, связанные с этим изменения производительности объекта и необходимость внесения изменений в ход имитационного эксперимента.

При динамическом отображении состояния производства в процессе моделирования фактически работающие производственные модули в каждый момент времени в отличие от объектов или структурных единиц, находящихся в режиме простоя или переналадки, отражаются другим цветом или в режиме мерцания.



Рис. 3. Взаимосвязи входных, варьируемых и выходных параметров производственных, транспортных и контрольных операций моделируемой системы



Рис. 4. Взаимосвязи входных, варьируемых и выходных параметров буферных накопителей производственной системы

#### 4.3. Определение стратегии и параметров выборочного контроля на различных стадиях технологического процесса

Большое значение в системах управления производством электронной аппаратуры имеет выбор наиболее эффективной стратегии выборочного контроля. Решение вопросов, какое число выполненных ранее технологических операций на данном контрольном модуле должно быть подвержено контролю, а также какова должна быть частота выборочного контроля (контролируется ли каждое изделие, либо каждое 5, 10, 20, 50-е и т. д.), во многом определяет процент результирующего брака, вре-

мя производственного цикла, а также объемы материальных и трудовых затрат на производство. Каждая контрольная операция может либо выявить все дефекты и ошибки, допущенные на всех предыдущих стадиях изготовления изделия, либо дефекты, допущенные при выполнении технологических операций на нескольких последних производственных модулях. Ужесточение операций выборочного контроля снижает процент брака и материальных затрат на производство, однако может привести к увеличению времени выполнения заказов, уменьшить надежность выполнения производственных заказов в установленные графиком сроки и, кроме того, требует большего объема персональных ресурсов.

Правильный компромисс в решении этих вопросов может быть выбран в процессе имитационного моделирования в зависимости от конкретной производственной ситуации. На основе анализа выбранных экспертом нескольких вариантов организации выборочного контроля при выполнении заданного объема заказов по результатам имитационного моделирования выбирается наиболее приемлемый по совокупности всех технико-экономических показателей вариант. Системой ведется статистический анализ фактического процента на каждой стадии технологического процесса, а также рассчитывается на основе методов, изложенных в работе [10], процент необнаруженных некондиционных изделий после операций тестирования (в зависимости от параметров выборочного контроля). В алгоритм имитационного моделирования включены расчеты ожидаемого числа кондиционных и бракованных изделий на выходе каждого производственного и контрольного модуля на основе построенных статистических зависимостей. Реализация этой важной функции системы существенно повышает эффективность управления качеством выпускаемой продукции.

#### ***4.4. Последовательность выполняемых расчетов***

В процессе имитационного моделирования осуществляется следующая последовательность расчетов:

- определение различных альтернативных вариантов структуры производственного комплекса, состава и технических характеристик используемых технологических модулей, вы-

бор алгоритмов управления оборудованием, правил и приоритетов распределения материальных потоков, выбор параметров выборочного контроля на различных стадиях производства;

- определение в зависимости от объемов заказов состояния запасов материалов, комплектующих и незавершенного производства на основании решающих правил и аналитических расчетов альтернативных размеров партий производимых изделий для структурных подразделений и отдельных производственных модулей;
- грубая оценка времени изготовления каждой партии изделий и определение "узких мест";
- формирование различных вариантов использования во времени персональных ресурсов, введение (при необходимости) дополнительных смен и сверхурочных работ;
- проведение комплекса динамических имитационных экспериментов для различных вариантов принимаемых решений, формирование банка данных полученных результатов моделирования;
- представление всех необходимых результатов работы и технико-экономических показателей производства в удобных для пользователя графическом и табличном видах, а также в динамике изменения состояния отдельных объектов;
- выполнение анализа полученных результатов моделирования и выбор наиболее эффективного решения.

#### **5. Алгоритм имитационного моделирования**

Логическая схема алгоритма имитационного моделирования приведена на рис. 5. Ниже даны пояснения функций отдельных блоков алгоритма.

1. Определение и контроль полноты представления технологических связей, структуры интегрированных в технологической схеме производственных модулей.

2. Определение относительного и абсолютного временных диапазонов функционирования технологической схемы. Разбиение всего диапазона моделирования на временные интервалы.

3. Выбор всех производственных модулей (узлов сети) на каждом уровне иерархии. Ввод необходимой входной информации о техноло-

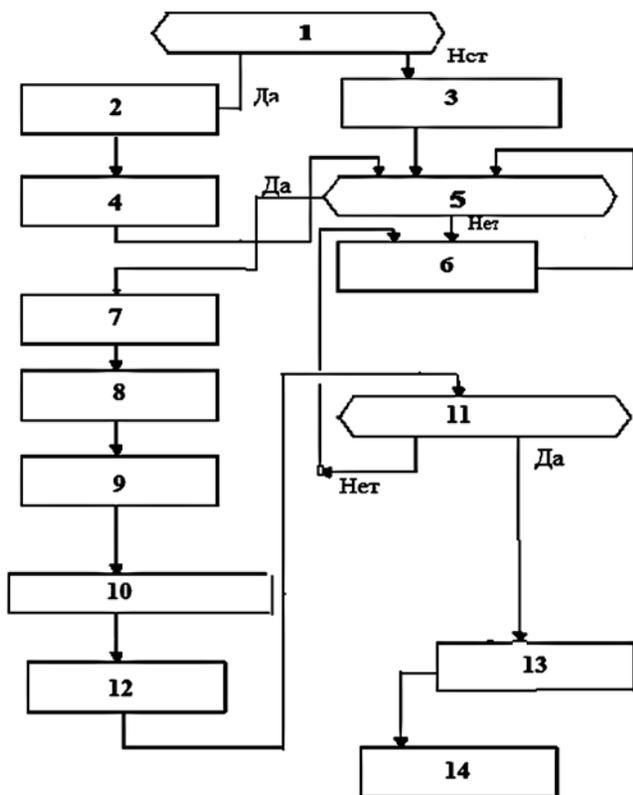


Рис. 5. Блок-схема алгоритма имитационного моделирования

гических возможностях и свойствах этих модулей из банка данных входной информации. Начало моделирования с модуля, стоящего первым в технологической цепочке.

4. Идентификация относительного номера временного интервала ( $Z\_Int = 0$ ) и номера первого стоящего в цепочке производственного модуля ( $Mod\_Num = 0$ ).

5. Определение, имеет ли рассматриваемый производственный модуль все необходимые для функционирования ресурсы. Расчет в зависимости от наличия материальных и персональных ресурсов производительности и технологических возможностей.

6. Выбор следующего стоящего в технологической цепочке производственного модуля.

7. Определение необходимого расчетного алгоритма в зависимости от выбранного типа этого производственного модуля.

8. Расчет для этого модуля к концу рассматриваемого временного интервала следующих параметров:

- произведенное (или контролируемое, транспортируемое, направленное в накопитель или в следующий модуль) число изделий;

- число отбракованных изделий, обнаруженных в процессе контроля или направленных для дальнейшей обработки;

- объем запаса в буферной емкости или на складе.

9. Определение состояния этого модуля (возможность активности в следующем временном интервале) в зависимости от наличия необходимых ресурсов и размера минимальной партии обрабатываемых изделий.

10. Ввод всех расчетных данных в банк данных результатов расчетов.

11. Проверка, является ли рассматриваемый производственный модуль последним в технологической цепочке.

12. Переход к следующему стоящему в технологической цепочке производственному модулю.

13. Пересчет результатов расчетов в режим реального времени. Ввод этих данных в банк данных результатов расчетов.

14. Завершение алгоритма имитационного моделирования для данного комплекта исходных данных.

Основные этапы внедрения системы имитационного моделирования и проведения экспериментальных расчетов на предприятии представлены в работе автора [11].

## Заключение

В публикациях [8, 9, 11] описана разработанная под руководством автора система имитационного моделирования, соответствующая всем сформулированным выше принципам и требованиям. Приведены все графические интерфейсы формирования структуры моделируемого объекта, ввода календарного времени работы, необходимого объема входных данных для каждого из производственных и контрольных модулей, распределения персональных ресурсов во времени, выбора объектов и детализации выполнения имитационных экспериментов, а также определения перечня контролируемых объектов и требуемых форм представления результатов выполненных расчетов. Представлены формы графических зависимостей изменения параметров во времени в виде кривых изменения параметров в течение календарного времени суток и столбчатых диаграмм, вид которых изменяется в течение заданного диапазона времени.

Система ориентирована на проектирование и решение задач оперативно-календарного планирования для предприятий электронной промышленности и машиностроения и позволяет:

— в процессе планирования и управления производством определять наиболее эффективные партии обработки изделий, стратегии и параметры выборочного контроля на всех стадиях технологического процесса, выбирать алгоритмы управления технологическими модулями, правильно распределять во времени материальные и трудовые ресурсы;

— на стадии проектирования и ввода в производство новых изделий определить наиболее эффективную гибкую производственную структуру предприятия, состав и взаимосвязи технологических модулей, объемы буферных накопителей, требуемый объем трудовых ресурсов.

#### Список литературы

1. Лоу А. М., Кельтон В. Д. Имитационное моделирование, 3-е изд. СПб.: Питер, 2004. 848 с.
2. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2004.
3. Томашевский В. Н., Жданова Е. Г. Имитационное моделирование в среде GPSS. М.: Бестселлер, 2003. 416 с.

4. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.

5. Кобелев Н. Б. Введение в общую теорию имитационного моделирования. Пособие для разработчиков имитационных моделей и их пользователей. М.: ООО Принт-Сервис, 2007. 128 с.

6. Kramer U., Neculau M. Simulationstechnik. Hanser Fachbuch, 1998.

7. Hopp W. J., Spearman M. L. Factory Physics-Foundations of Manufacturing Management. Chicago: Irwin-Verlag, 1996.

8. Zack Yu., Starke G. Process simulation. Mikrosystemtechnik. Production Techniques for Application specific Mikrosensors (G.Köler, T. Schroeter, G. Tshulena), Shaker Verlag, 2004. P. 291–323.

9. Starke G., Zack Yu., Friedrich A. P., Drichel E. Simulationswerkzeug bei der Herstellung von mikroelektronischen Komponenten // FB/IE Zeitschrift für Unternehmensentwicklung und Industrial Engineering. 2003. Vol. 52, N. 5. P. 204–212.

10. Беляев Ю. К. Вероятностные методы выборочного контроля. М.: Наука. Физматгиз, 1975. 438 с.

11. Zack Yu. A. Simulation systems of small and medium batch production: The functions and structure // Automation & Remote Control. Jan 2015. Vol. 76, Is. 1. P. 187–191.

12. Таха Х. А. Имитационное моделирование Гл. 18 // Введение в исследование операций = Operations Research: An Introduction. 7-е изд. М.: Вильямс, 2007. С. 697–737.

13. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. МГТУ им. Баумана, 2008. С. 697–737.

Yu. A. Zack, D. Sc., e-mail: yuriy\_zack@hotmail.com, Aachen, Germany

## Principles of Construction of Systems of Imitation Modeling of Production Systems

*The main tasks, functions, principles of construction, main components and architecture, the amount of necessary information for building the system of simulation production are considered. As a result of the simulation experiments carried out, they can be used to determine the optimal structure, the composition of technological modules and the distribution of personal resources, the directions of material flows, the choice of strategies, parameters and inspection points for uncompleted production, the size of the batch of processed products, and algorithmic control of the technological process. Solutions based on these results can be used both at the stage of operational and scheduling, and at the design stage, selecting the composition and technical characteristics of the production modules and the technological preparation of the production.*

**Keywords:** simulation modeling, material flow control, selective control algorithms, information volumes, databases, graphical interface

DOI: 10.17587/it.24.705-713

#### References

1. Lou A. M., Kelton V. D. *Imitazionnoje modelirovanije*, 3 izd. Sankt Petersburg, Piter, 2004, 848 p. (in Russian).
2. Kudryavzeva E. M. *GPSS World. Osnovi imitazionnogo modelirovanija raslichnich system*, Moscow, DMK Press, 2004. (in Russian).
3. Tomashevsky V. N., Zhdanova E. G. *Imitazionnoje modelirovanije v srede GPSS*, Moscow, Bestseller, 2003, 416 p. (in Russian).
4. Karpov Yu. G. *Imitazionnoje modelirovanije sistem. Vvednije v modelirovanije s AnyLogic*. Sankt Petersburg, BKHV-Peterburg, 2005, 400 p. (in Russian).
5. Koblelev N. B. *Vvednije v obshuju teoriju imitazionnogo modelirovanija. Posobije dlya rasrabotchikov imitazionnich modelej*, Moscow, Print-Servis, 2007, 128 p. (in Russian).
6. Kramer U., Neculau M. *Simulationstechnik*, Hanser Fachbuch, 1998.
7. Hopp W. J., Spearman M. L. *Factory Physics-Foundations of Manufacturing Management*, Irwin-Verlag, Chicago, 1996.

8. Zack Yu., Starke G. Process simulation. *Mikrosystemtechnik. Production Techniques for Application specific Mikrosensors* (G. Köler, T. Schroeter, G. Tshulena), Shaker Verlag, 2004, pp. 291–323.

9. Starke G., Zack Yu., Friedrich A. P., Drichel E. Simulationswerkzeug bei der Herstellung von mikroelektronischen Komponenten, *FB/IE Zeitschrift für Unternehmensentwicklung und Industrial Engineering*, 2003, vol. 52, no. 5, pp. 204–212.

10. Belyajev Yu. K. *Verojatnostnije metodi viborochnoho kontrolya*, Moscow, Nauka, Fizmatgiz, 1975, 438 p. (in Russian).

11. Zack Yu. A. Simulation systems of small and medium batch production: The functions and structure, *Automation & Remote Control*, Jan 2015, vol. 76, is. 1, pp. 187–191.

12. Таха Х. А. Имитационное моделирование, *Vvednije v issledovanije operazij. Operations Research: An Introduction*. 7-е изд, Moscow, Viljams, 2007, pp. 697–737 (in Russian).

13. Strogalev V. P., Tolkacheva I. O. *Imitazionnoje modelirovanije*, MGTU im. Baumana, 2008, pp. 697–737 (in Russian).