

На правах рукописи

УДК 62-52

Куликов Игорь Николаевич

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КЛАСТЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
ПОТОКОВ ПОЛУФАБРИКАТОВ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (машиностроение)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель:

Колесник Леонид Леонидович,
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Кристалль Марк Григорьевич,
доктор технических наук, профессор, кафедра
«Автоматизация производственных процессов»
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»
Сушенцов Николай Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Конструирование и
производство радиоэлектронной аппаратуры»
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
технологический университет»

Ведущая организация:

Открытое Акционерное Общество Научно-
исследовательский институт точного
машиностроения (**ОАО НИИТМ**)

Защита состоится « » _____ 2019 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://bmstu.ru/>

Телефон для справок: +7 (499) 267 09 63

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.06
доктор технических наук, доцент



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Технологии микроэлектронного производства сегодня используют многокластерное оборудование – многокластерные технологические комплексы (МТК) (Рисунок 1), в котором реализуется замкнутый технологический цикл без выгрузки изделий в атмосферную среду рабочего помещения, что позволяет проводить высокоточные многоступенчатые технологические обработки при обеспечении автоматического контроля техпроцессов, межоперационных испытаний и оперативного структурного анализа. При этом технологическая линия может быть многосвязанной – состоять из нескольких кластерных систем с возможностью трансляции полуфабрикатов между кластерами через модули передачи, переворота и складирования.

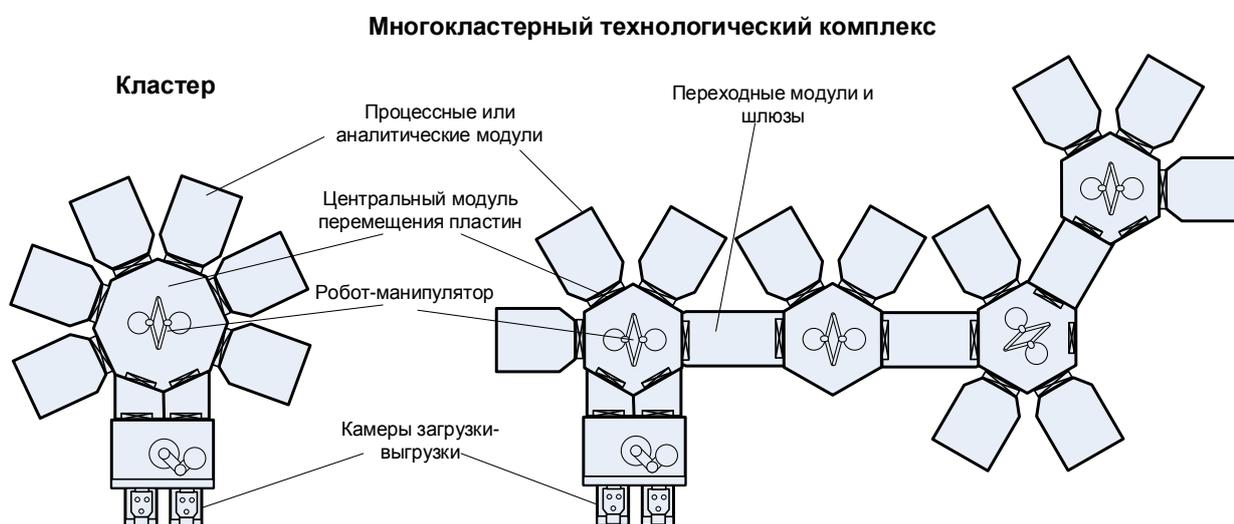


Рисунок 1. Принципиальная схема МТК

Вопросами структурно-компоновочных решений вакуумных установок, а также автоматизации производственных линий в машиностроении занимались отечественные специалисты Л.И. Волчкевич, Ю.В. Панфилов, В.В. Одинокоев, В.В. Губанов, А.И. Дащенко, И.А. Клусов, А.И. Конюх, Н.М. Султан-Заде, Б.И. Черпаков, В.И. Авцин, Л.С. Брон и др. Тем не менее, вариативность композиций МТК не полностью описываются существующими аналитическими методами, а именно, не учитывают сложную динамику технологических процессов, не позволяют достоверно рассчитать расписания запуска полуфабрикатов. Поэтому необходима разработка нового класса методов и моделей, основанных на системных представлениях полупроводникового производства, пространственно-временном и имитационном моделировании и алгоритмизации технологических процессов.

Целью диссертационной работы является разработка методики повышения эффективности использования автоматизированного кластерного оборудования в полупроводниковом производстве на основе имитационных моделей потоков полуфабрикатов как на этапе проектирования нового оборудования, так и во время его эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Анализ автоматизированных производственных процессов в полупроводниковом производстве, основных требований, предъявляемых к ним и путей повышения их эффективности.
- Анализ существующих структур систем управления кластерным оборудованием в микроэлектронике.
- Разработка логико-алгоритмических моделей описания технологических процессов для задач автоматизированного управления кластерными системами.
- Разработка имитационной модели потоков полуфабрикатов МТК.
- Разработка методов планирования графика запуска полуфабрикатов.

Методы исследования. Выбор методов исследования обусловлен логикой и последовательностью действий системного характера, направленных на анализ современных тенденций, связанных с развитием технологий полупроводникового производства. Для исходного системного описания производственных процессов используется теоретико-множественное представление. Формализованное логическое представление маршрутных технологических процессов осуществляется алгоритмическими методами и моделями. Для построения структурных представлений производственных процессов использованы знаниеориентированные модели. Для динамического анализа работы кластерной установки с целью оптимизации структурно-компоновочных решений и графика запуска полуфабрикатов используются методы имитационного моделирования.

Научная новизна.

1. Разработан автоматизированный способ подготовки исходных данных для имитационной модели многокластерных технологических комплексов (МТК), учитывающий типы технологических модулей и топологию транспортной сети комплекса.
2. Впервые разработана имитационная модель функционирования автоматизированных МТК для многономенклатурного производства изделий микроэлектроники, позволяющая выбирать рациональные компоновочные решения МТК и графики запуска полупроводниковых пластин.

3. Установлена взаимосвязь производительности МТК от их компоновки, количества технологических модулей и графика запуска полупроводниковых пластин при многономенклатурном производстве. При этом показано, что объединение потоков полупроводниковых пластин, обрабатываемых по разным рецептам в одном МТК, приводит к увеличению производительности с одновременным снижением количества технологических модулей.

Практическая значимость работы.

1. Созданная методика может использоваться при проектировании новых МТК, а также для совершенствования процессов в существующих.
2. Имитационная модель реализована в форме специализированной прикладной программы, позволяющей в интерактивном режиме анализировать процессы в кластерной установке.
3. Предлагаемая специализированная прикладная программа предоставляет удобный, наглядный и информативный инструмент, позволяющий осуществлять выбор компоновок и графиков запуска полупроводниковых пластин в кластерном оборудовании (не более 3 кластеров с 4 модулями в каждом кластере).
4. Найденный с помощью специализированной прикладной программы вариант компоновки кластерного оборудования, используемого на ПАО «Микрон», позволяет увеличить производительность установки в периметре рассматриваемых операций на 18%.

Положения, выносимые на защиту.

1. Автоматизированный способ подготовки исходных данных для имитационной модели МТК, учитывающий типы технологических модулей и топологию транспортной сети комплекса.
2. Имитационная модель функционирования автоматизированных МТК для многономенклатурного производства изделий микроэлектроники, позволяющая выбирать рациональные компоновочные решения МТК и графики запуска полупроводниковых пластин.
3. Методика выбора компоновки установки и графика запуска полупроводниковых пластин при многономенклатурном производстве, обеспечивающих максимальную производительность МТК для заданных маршрутов обработки и программ выпуска.
4. Результаты расчета, показывающие, что объединение потоков полупроводниковых пластин, обрабатываемых по разным рецептам в одном МТК, приводит к увеличению производительности с одновременным снижением количества технологических модулей.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва (2014, 2015, 2016, 2017, 2018), на II Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной науки», г. Белгород (2014), на конференции «Международная научно-практическая конференция «Пути применения научных достижений: тенденции, перспективы и технологии развития», г. Санкт-Петербург (2015), на международной научной конференции «SCIENCE XXI CENTURY», Чехия, г. Карловы Вары (2015), на XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Крым (2018).

Внедрение результатов работы. Материалы диссертационной работы и полученные результаты используются в учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана при подготовке бакалавров по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Наноинженерия». Результаты работы используются на предприятии ОАО «НИИТМ» при проектировании новых образцов оборудования.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 8 научных работах, из них 7 – статьи в Перечне рецензируемых научных изданий – ВАК РФ и 1 статья в Перечне международных научных изданий в системе Scopus. Общий объем составляет 5,0625 п. л.

Достоверность результатов работы достигается использованием общепринятых достоверных методов, строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных законах механики. Теоретические результаты подтверждаются численными и натурными экспериментами.

Личный вклад автора. Диссертация является законченной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основная роль в получении и обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов принадлежит автору работы. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 128 наименований и приложения. Работа содержит 179 страниц, 65 рисунков, 17 таблиц и приложение на 49 страницах.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задач и краткая аннотация содержания работы по

разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и сформулированы защищаемые положения.

В первой главе проведен анализ особенностей автоматизированных производственных процессов и систем в полупроводниковом производстве, их преимущества и недостатки. Показано, что одной из задач, стоящих перед кластерными системами, является снижение длительности простоев (θ_i на Рисунке 2).

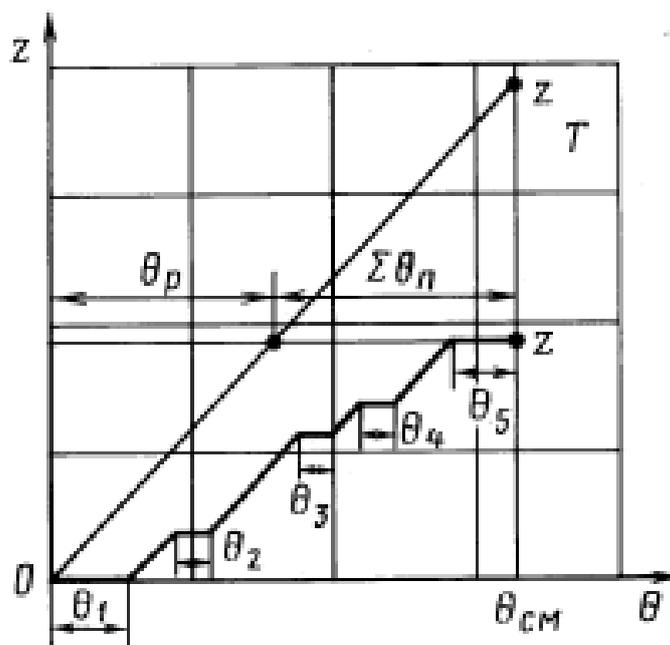


Рисунок 2. Диаграмма времени работы и простоев при эксплуатации машин

Анализ показал, что МТК характеризуются сложной структурой объектов и процессов многоцелевого функционирования, многоуровневостью, множеством структурно-компоновочных решений, многообразием технологических процессов, инвариантностью технологических маршрутов обработки, многономенклатурностью и вероятностным характером функционирования. Даже незначительные изменения в конфигурации установки или в технологическом процессе могут иметь существенное влияние на ее эффективность (под эффективностью следует понимать производительность, универсальность, многономенклатурность, мобильность, занимаемую площадь, дополнительные габаритные размеры, масса, удобство настройки/использования, различные экономические показатели).

Показано, что в процессе эксплуатации установок возникает задача нахождения оптимальной последовательности обработки партий пластин при многономенклатурном производстве (Рисунок 3), что требует разработки соответствующих математических методов и моделей, которые ориентированы

на анализ новых схем организации автоматизированного полупроводникового производства.

Предложена методика повышения эффективности использования кластерных установок (Рисунок 4) как уже эксплуатируемых, так и вновь проектируемых. При проектировании новых установок: 1) анализируются требования заказчика и эксплуатанта к программе выпуска и рецептам 2) с последующим определением минимально возможной композиции установки. Это достигается за счет решения задачи синтеза на основе многопараметрического и многокритериального подхода (Рисунок 5). Для эксплуатируемых установок анализируется существующая компоновка и рецепты.

Затем формируются все возможные варианты компоновок, на которых с помощью разработанной имитационной модели и моделей планирования графиков запуска производится моделирование потоков полуфабрикатов для последующего их анализа. Полученные варианты сравниваются между собой для нахождения наиболее рационального.

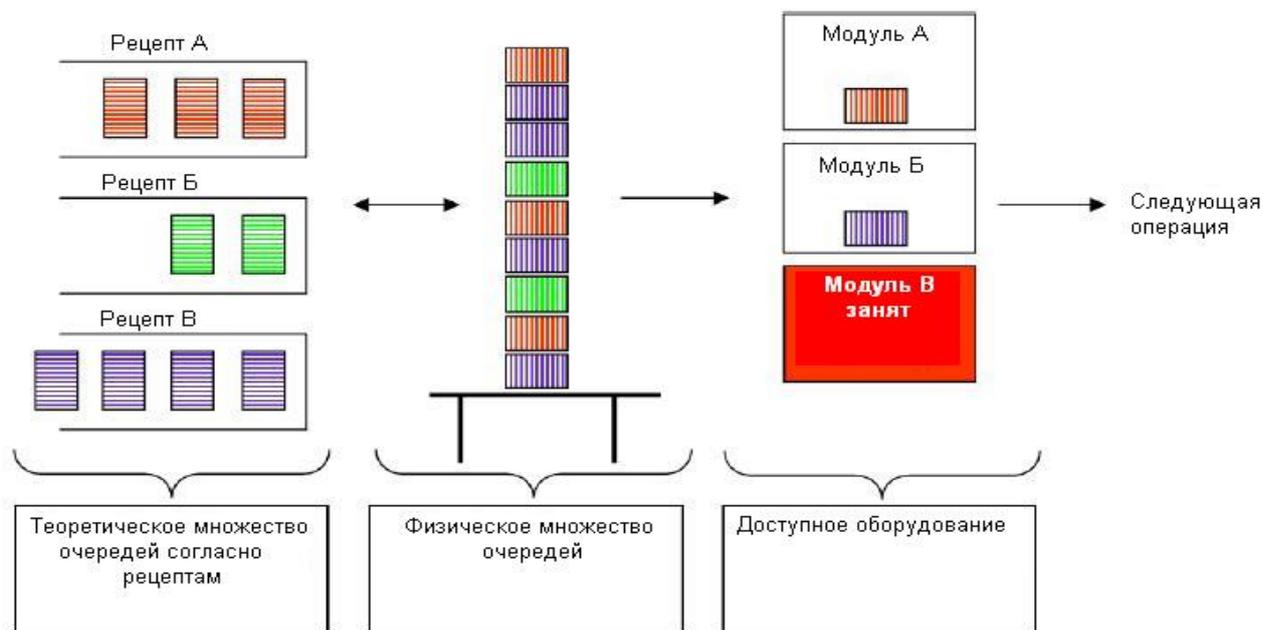


Рисунок 3. Нетривиальность последовательности обработки пластин

Определены факторы, которые не позволяют использовать существующие промышленные решения по организации и планированию производства для производственного цеха в машиностроительном производстве.

Проведен анализ подходов для моделирования процессов высокодинамичных и гибких кластерных систем, который показал, что наиболее эффективным методом анализа динамики таких систем, охватывающим все составляющие потоковых процессов, является метод имитационного моделирования.

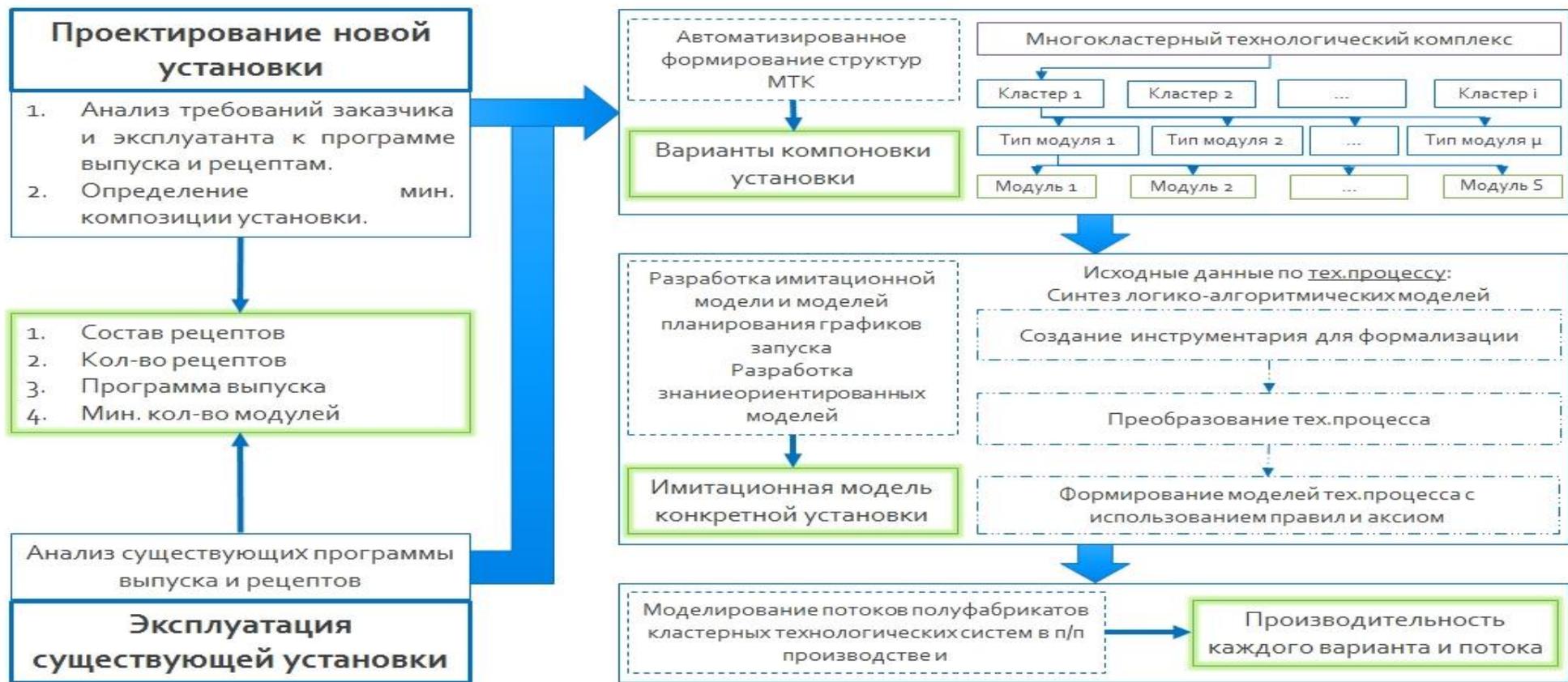


Рисунок 4. Общий вид методики повышения эффективности использования кластерных установок



Рисунок 5. Задача синтеза на основе многопараметрического и многокритериального подхода

Во второй главе исследованы структуры кластерного комплекса на основе учета топологии транспортных связей для задачи формирования транспортной системы МТК. Разработан метод формирования вариантов структур и состава кластеров МТК, основанный на производящих функциях, которые позволяют автоматизировано получить возможные варианты МТК, и лексикографическом упорядочивании вариантов, которое можно использовать для сравнения полученных вариантов. Данный метод является усовершенствованием методов теории перечисления для структурного анализа распределенных производственных комплексов путем учета типов технологических модулей и топологии транспортной сети в МТК.

Предложен синтез формализованных моделей описания технологического процесса полупроводникового производства посредством разработанного языка регулярных схем потоков полуфабрикатов, который представляет собой язык моделирования, предназначенный для отображения в компактной символьной форме сложных технологических процессов полупроводникового производства на МТК произвольной структуры с целью последующего анализа, моделирования и выполнения преобразований. Возможность выполнения формальных преобразований над моделями существенно упрощает и ускоряет анализ моделей сложных потоковых процессов в МТК с помощью методов имитационного моделирования.

В третьей главе разработана имитационная модель потоков полуфабрикатов, с помощью которых можно построить модель МТК любой архитектуры. Имитационная модель состоит из программных модулей, каждый из которых отражает отдельный элемент динамики поведения МТК (например, занятие, освобождение отдельных процессных модулей, постановка в очередь (накопитель) партии полуфабрикатов, имитация занятости отдельных устройств, например, работа-манипулятора). Взаимодействуя между собой, эти программные модули создают картину поведения МТК в пространстве состояний и событий. Эта картина отражает основные моменты функционирования МТК.

Функционирование модели осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом формирования списка событий, их анализа и реализации с целью управления состоянием структурных элементов имитационной модели МТК. Данный алгоритм реализует функционирование внутреннего механизма, который основывается на дискретно-событийном принципе, который заключается в следующем. На каждом шаге моделирования обрабатывается одно событие E_j из упорядоченного по времени списка будущих событий. В начале моделирования список будущих событий содержит только

начальное событие E_n (время $T=0$) и конечное событие E_k (время T равно времени моделирования). В дальнейшем выполнение одного события вызывает планирование одного или нескольких последующих событий (Рисунок 6).

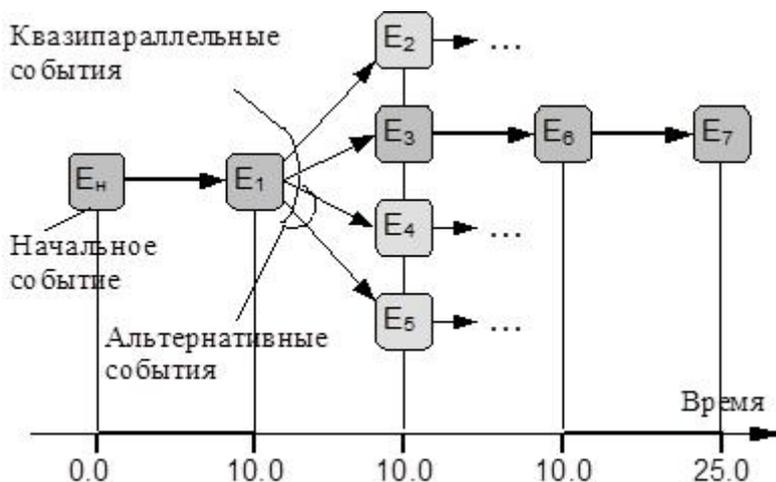


Рисунок 6. Механизм планирования и реализации событий

Для описания разрабатываемой имитационной модели формируется граф-схема логики функционирования МТК, в которой вершинами графа являются события, а дуги указывают на их логико-временную связь. События программируются как отдельные модули (подпрограммы или процедуры моделирующей программы). Модули могут: изменять системные переменные; генерировать время задержек; проверять условия взаимосвязи событий; планировать или исключать следующие события.

В качестве структуры, которая максимально приближена к особенностям установок полупроводникового производства, была выбрана блочная структура. Блочная концепция структуризации, также наиболее полно отвечающая принципам объектно-ориентированного моделирования, предполагает описание моделируемого процесса в виде комбинации блоков, выбираемых из некоторого зафиксированного, но расширяемого набора (Таблица 1). Количество типовых блоков (элементов), применяемых для построения имитационных моделей МТК выбрано минимальным, но достаточным для составления моделей МТК любой архитектуры и наиболее типичных классов процессов.

Таблица 1.

Типовые элементы моделирования МТК

| <i>Наименование блока</i> | <i>Описание функций блока</i> |
|---------------------------|---|
| Генератор заявок (БГЗ) | Используется для генерации заявок различных типов в систему |
| Обслуживание (БОБ) | Используется для представления любого процесса или операции. Блок можно подвергать декомпозиции без ограничений |

Таблица 1 (продолжение)

| | |
|------------------------------|---|
| Точка сбора (БТСБ) | Блок может работать в нескольких режимах: - объединение нескольких потоков; - пакетирование (соединение нескольких заявок (полуфабрикатов) в группу (партию)) |
| Разделение (БР) | Блок может работать в нескольких режимах: - разделение материального потока на несколько потоков; - разъединения заявки (партии) на заявки меньшей валентности; - копирование заявки |
| Точка синхронизации (БТСХ) | Блок служит для синхронизации дальнейшего движения нескольких потоков полуфабрикатов |
| Поместить в накопитель (БПН) | Блок используется для сохранения заявки в буферном объекте – накопителе |
| Извлечь из накопителя (БИН) | Блок используется для извлечения заявки из буферного объекта – накопителя |
| Генератор отказов (БГО) | Служит для имитации отказа оборудования структурных элементов МТК |
| Терминатор (БТ) | Служит для отметки завершения конкретной последовательности выполнения операций |

Опишем внутренние механизмы моделирования для типовых блоков.

1. Блок генератор заявок (БГЗ). БГЗ задают порядок поступления заявок (полуфабрикатов) в МТК. Длительность интервалов времени между поступлениями заявок, а также их количество задается вероятностным распределением или план-графиком. При этом общее количество генерируемых заявок может быть ограничено.
2. Блок обслуживание (БОБ) используется для представления любой активности.
3. Блок точка сбора (БТСБ) предназначен для реализации важной, с точки зрения МТК, операции сборки указанного количества заявок в одну (партию). В момент поступления заявки на вход к блоку она устанавливается в очередь синхронизации и находится в ней, пока не поступит указанное число требований.
4. Блок разделения (БР) предназначен для операции разделения потока заявок. При этом БР может также работать в режиме генерации копий исходной заявки. Количество порожденных заявок определяется числом выходов и количеством указанных копий по каждому из них.

5. Блок точка синхронизации (БТСХ) осуществляет контроль за соблюдением условий синхронизации и ограничений на выполнение задач (операций): выполнение задачи начнется при выполнении заданного числа предыдущих задач; синхронизации выполнения задач относительно директивных сроков («не позже, чем...», «не раньше, чем...», «так, как только возможно» и др.).
6. Для моделирования операций хранения используются блок помещения в накопитель (БПН) и блок извлечения из накопителя (БИН).
7. Блок генератора отказов (БГО) предназначен для моделирования случайных и запланированных прерываний процесса (перерывы, регламентные работы и т.д.).

Предлагается следующая схема имитационного моделирования МТК:

1. Формирование структуры МТК в визуальном графовом представлении, которое включает:

- транспортные модули;
- накопители;
- технологические модули МТК;
- транспортные участки между кластерами МТК.

2. Задание ранних и поздних сроков обслуживания технологических модулей.

3. Выбор возможных критериев оптимизации перемещений полуфабрикатов (по времени - T_{cp} ; по стоимости - $C_{затр}$; компромиссный критерий в виде свертки T_{cp} и $C_{затр}$, с учетом веса (значимости) составляющих критериев).

4. Задание в транспортной сети с множеством пунктов: исходных пунктов начала движения полуфабрикатов и конечных пунктов.

5. Задание состава и характеристик роботов-манипуляторов.

6. Задание параметров транспортной сети в виде расстояний между модулями (кластерами), характеристик (ограничений) маршрутов (допустимая скорость перемещения, максимально допустимые габариты, стоимость перемещений и т.д.)

В процессе моделирования, а также по его завершению формируются результаты эксперимента, по которым проводится оценка работы блоков, обслуживающих устройств и других структурных элементов имитационной модели МТК.

Благодаря многовариантному расчету на имитационной модели выбираются рациональные маршруты движения полуфабрикатов в зависимости

от поставленных задач, например, для максимальной загрузки оборудования или максимальной производительности и т.д.

В четвертой главе рассматриваются различные варианты составления и корректировки графика запуска полуфабрикатов, показаны различные ситуации, которые требуют дополнительной корректировки графика запуска с помощью соответствующих алгоритмов.

Кроме того, представлена компьютерная имитационная модель потоков полуфабрикатов и расчета характеристик МТК (в виде специализированной программы).

Для построения агентной имитационной модели потоков полуфабрикатов была выбрана среда моделирования AnyLogic, в которой были реализованы классы объектов (входной буфер, кластер, транспорт, модуль, тип модуля, пластина, робот, операция), позволяющих задать логику кластерной системы практически любой сложности. Для упрощения взаимодействия с пользователем был разработан универсальный интерфейс, часть которого показана на Рисунке 7.

Экраны ввода исходных параметров

| Основные параметры | | Длительность операции | | Соответствие «Операция-Модуль» | | Дополнительное соответствие «Операция-Модуль» | |
|-----------------------------------|------|-----------------------|----------------|--------------------------------|-----------|---|-----------|
| Item | # | Operation | Duration (Sec) | Module | Operation | Module | Operation |
| Quantity Of Type 1 Wafers | 8 | 1 | 30 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| Quantity Of Type 2 Wafers | 7 | 2 | 96 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Arms in Robot | 2 | 3 | 30 | 3 | 13 | 1 | 12 |
| Quantity Of Operations Wafer 1 | 5 | 4 | 94 | 4 | 11 | 5 | 14 |
| Quantity Of Operations Wafer 2 | 6 | 5 | 36 | 5 | 3 | 6 | 14 |
| Quantity Of Modules | 9 | 6 | 165 | 6 | 4 | 9 | 16 |
| Angular Velocity (PI*radians/sec) | 0,11 | 7 | 57 | 7 | 15 | 7 | 5 |
| | | 8 | 117 | 8 | 15 | 4 | 17 |
| | | 9 | 73 | 9 | 5 | | |
| | | 10 | 89 | | | | |

Рисунок 7. Интерфейс компьютерной имитационной модели, разработанной в среде AnyLogic

Имитационная модель обеспечивает моделирование МТК различной топологии и реализует разработанные алгоритмы формирования потоков полуфабрикатов.

Было проведено сравнение производительности двух установок Applied Materials Endura с производительностью одной моделируемой установки. Исследовался технологический процесс производства процессора, часть операций которого реализуется в цехе термического напыления на установках Applied Materials ENDURA (Рисунок 8).



Рисунок 8. Установка Applied Materials ENDURA

Технологический маршрут производства процессора состоит из 268 операций, разделенных на функциональные группы, такие как: механическая обработка, фотолитография, травление, очистка, окисление, напыление. Для каждой группы определены свои рецепты и соответствующее оборудование. В рамках участка напыления реализуются (кроме прочих) две последовательные операции (Рисунок 9), параметры которых показаны в Таблице 2.

Таблица 2.

Операции при производстве процессора
(исходные данные, полученные от ПАО «Микрон»)

| Операция №1 | Операция №2 |
|---|--|
| Установка №4 (все камеры) | Установка №2 (нет камер F и D) |
| Рецепт F(30)->C/D(85)->A->1/2(67)->B(55) | Рецепт C(40)->A(40)->1(25)->2/3(221)->B(51) |
| F – ориентатор, C/D – нагрев, A – проходная/остывание, 1, 2, 3 – напыление алюминия, B – напыление титана | |
| Время на 25 пластин – 60 мин | Время на 25 пластин – 70 мин |
| Бездействующие камеры: 3, 4, E | Бездействующие камеры: E, 4 |
| Рабочие модули: F, D, C, 1, 2, B | Рабочие модули: C, 1, 2, 3, B |

Как можно видеть из таблицы, в рецептах есть пересекающиеся операции, но различные по своей длительности. При последовательной обработке на двух разных установках очевидно, что производительность $P = \frac{25+25}{(60+70)*60} = 23,076$ пластин в час.

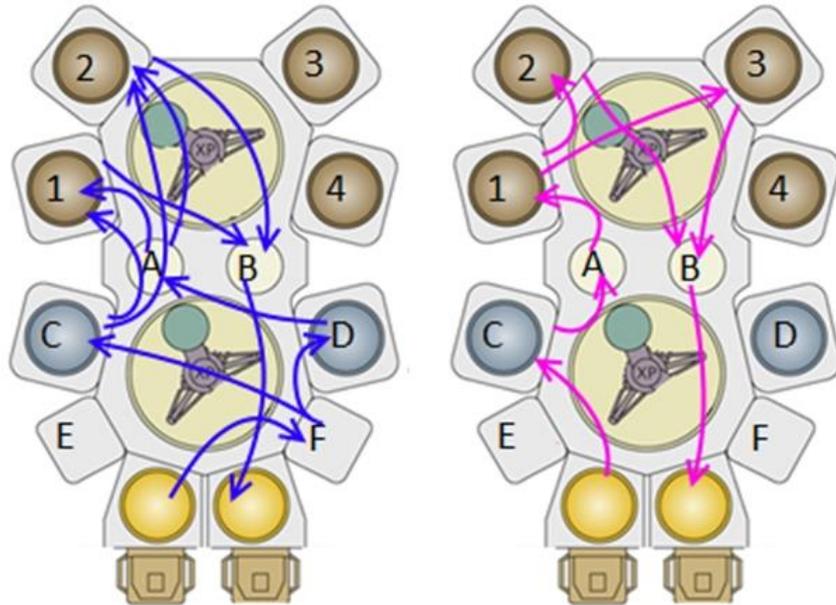


Рисунок 9. Рецепты установок ПАО «Микрон»

В моделируемом варианте (Рисунок 10) предлагается совместить потоки двух разных установок в одну, а также «расшить» наиболее узкое место – операцию с длительностью 221 с. – путем добавления параллельных модулей вместо неиспользуемых.

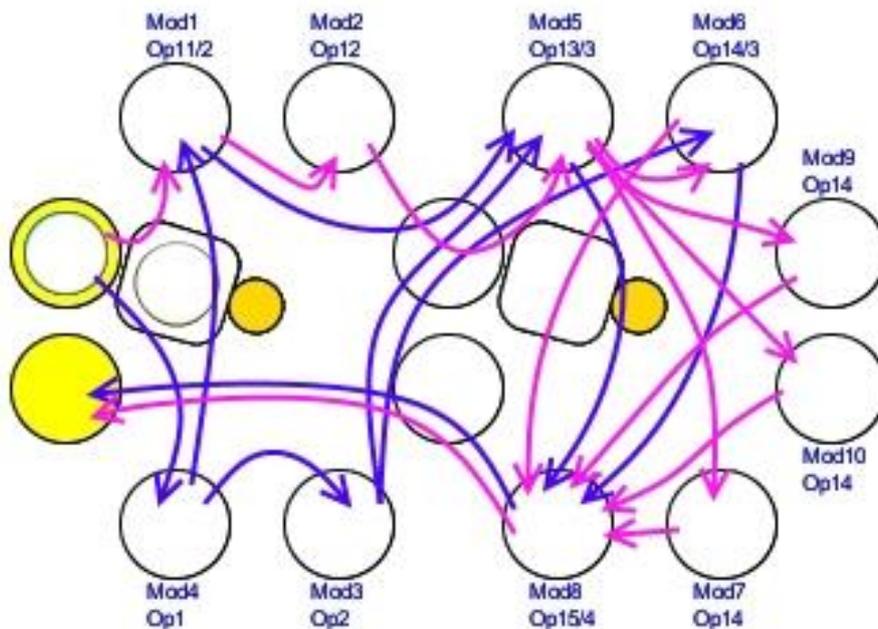


Рисунок 10. Предлагаемая установка с совмещенными потоками полуфабрикатов

По результатам моделирования были определены графики запуска, соответствующие максимальной производительности, которая составляет 27,288 пластин в час, и минимальной производительности (Рисунок 11).

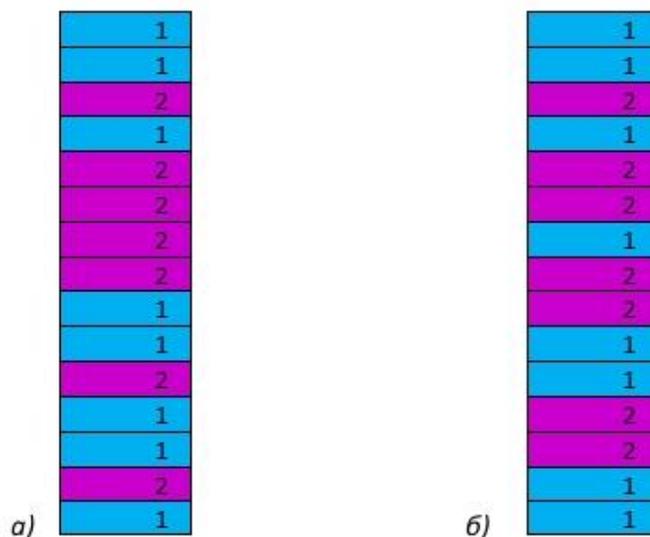


Рисунок 11. Графики запуска, соответствующий максимальной (а) и минимальной (б) производительности

Было определено, что производительность предложенного варианта установки увеличилась по сравнению с исходной производительностью на $\Delta = \frac{(27,288 - 23,076)}{23,076} \cdot 100\% \approx 18\%$. Таким образом, можно дать рекомендации по оптимизации существующей компоновки и графикам запуска установок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате анализа особенностей автоматизированных производственных процессов и кластерной компоновки технологических комплексов микросистемных производств предложена методика повышения эффективности использования кластерного оборудования как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации на основе имитационной модели потоков полуфабрикатов.

2. Разработан метод формирования вариантов структур и состава многокластерных технологических комплексов, основанный на производящих функциях и лексикографическом упорядочивании вариантов.

3. Разработан язык моделирования регулярных схем потоков полуфабрикатов, который обеспечивает унификацию процедур тождественных и равносильных преобразований алгоритмических моделей сети процессов в многокластерных технологических комплексах, что существенно упрощает и

ускоряет анализ моделей процессов в полупроводниковом производстве с помощью имитационного моделирования.

4. Разработана имитационная модель потоков полуфабрикатов, которая позволяет анализировать и производить поиск решений, связанных с графиками запуска полуфабрикатов в многокластерных технологических комплексах любой композиции с учетом ресурсных ограничений.

5. Разработан метод маршрутизации, основанный на имитационном моделировании и «числовых волнах», которые распространяются в транспортной сети многокластерных технологических комплексов.

6. Построены модели для задач планирования перемещений полуфабрикатов в многокластерных технологических комплексах, связанные с двумя основными критериями эффективности, используемыми во внутритранспортной логистике микроэлектронного производства: время доставки и стоимость перемещений.

7. Разработана онтологическая модель знаний, которая обеспечивает адаптивность, открытость и быструю модифицируемость имитационной модели и решает задачу формирования единого информационного пространства управления потоками полуфабрикатов в многокластерных технологических комплексах, позволяя интегрировать эти процессы в деятельность предприятия.

8. Разработанная имитационная модель потоков полуфабрикатов была реализована в виде авторской программы с помощью программного комплекса AnyLogic.

9. Исследованы конкретные маршрутные технологические процессы производства полупроводниковых приборов на эксплуатируемых установках, разработана соответствующая имитационная модель, предложены варианты по повышению их эффективности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Куликов И.Н., Рябов В.Т., Шубников А.В. Имитационное моделирование кластерного технологического оборудования в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. 2013. № 9. С.3-6. (0,5625 п.л.).
2. Куликов И.Н., Шубников А.В. Объединенный (интегрированный) онлайн контроль полуфабриката и процесса его производства в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. 2015. № 9. С.43-47. (0,6875 п.л.).

3. Куликов И.Н., Рябов В.Т., Шубников А.В. Исследование структурных схем полуфабрикатов в кластерном технологическом оборудовании в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. 2014. № 11. С.28-35. (1,0625 п.л.).
4. Куликов И.Н. Имитационное моделирование управления потоками полуфабрикатов в многокластерном технологическом комплексе // Образование. Наука. Научные кадры. 2015. №5. С.271-275. (0,8125 п.л.).
5. Куликов И.Н., Шубников А.В. Автоматизация формирования структур мультикластерных технологических комплексов // Автоматизация и современные технологии. 2015. №12. С.7-13. (0,625 п.л.).
6. Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Исследование влияния количества модулей многокластерного технологического комплекса и выполняемые ими операции на общую производительность установки с использованием имитационного моделирования // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 119–124. doi:10.20914/2310-1202-2018-2-119-124. (0,625 п.л./0,4375 п.л.).
7. Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Исследование влияния компоновки модулей многокластерного технологического комплекса на общую производительность установки с использованием имитационного моделирования // Автоматизация и современные технологии. 2018. №12. С.542-545. (0,5 п.л./0,375 п.л.).
8. I.N. Kulikov, Knowledge-based Management Model of Semi- Finished Product Flows in the Multicluster Tools (MCT) in Semiconductor Production, Indian Journal of Science & Technology, Volume 9, Issue 29, August 2016. P.324-328 DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i29/89077 (0,1875 п.л.).