

Интегрированная модель технологического процесса полупроводникового производства

Д. т. н, проф. Бескровный И. М. ОАО «Ангстрем – М», Москва

Производители компьютеров непрестанно борются за сохранение темпов технического прогресса. В последнее время они начали подходить к границам физических возможностей материала, с которым работают. С уменьшением размеров микроэлектронных элементов неизбежно достигается точка, в которой элементы перестают функционировать как следует — например, если толщина изоляционного слоя транзисторов из двуокиси кремния (SiO_2) уменьшится до нескольких атомных слоев, электроны начинают проскакивать сквозь этот изолятор.

Чрезвычайно обостряются также проблемы теплоотвода и подачи мощности. Для обеспечения возможности дальнейшего уменьшения размеров транзисторов и ради достижения требуемой скорости их переключения толщина изолирующих окислов в затворах будет доведена до нескольких молекул, и для предохранения структуры кристалла от пробоев придется использовать низкие напряжения. Представители Intel полагают, что через десять лет микросхемы будут работать с напряжением около 1 В и потреблять мощность от 40 до 50 Вт, что соответствует силе тока 50 А и более. Проблемы равномерного распределения столь сильного тока внутри кристалла и рассеивания огромного количества тепла потребуют серьезных исследований.

Будет ли достигнут физический предел современных методов изготовления кремниевых приборов к 2017 г (как предсказывают многие специалисты), что будет означать невозможность формировать пригодные для практического использования транзисторы еще меньших размеров. Это зависит, в первую очередь, от успехов в проектировании и освоении новых технологических процессов. В свою очередь, процесс проектирования не может быть достаточно эффективным без использования методов математического моделирования как отдельных технологических процессов, так всего производственно-технологического цикла (ПТЦ).

В настоящее время создано, апробировано и используется значительное количество моделей технологических процессов в микроэлектронике [1-4]. Например, математическая модель процесса экспонирования позитивного фоторезиста на основе векторного приближения, позволяющая корректно учитывать эффекты поляризации излучения, возникающие при высоких значениях числовой апертуры проекционной оптики. Сюда относятся также математическая модель формирования изображения двухзеркальной оптической системой (объективом) с уменьшением для целей рентгенолитографии; модель формирования скрытого изображения при экспонировании химически усиленных фоторезистов рентгеновским излучением; физико-математическая модель процессов зарождения дефектов и отказов токопроводящих дорожек с учетом их поликристаллической структуры.

Эти и другие, подобные им, модели отображают с помощью математических соотношений физико-химические процессы, происходящие в исходном материале в процессе его обработки, и позволяют получить информацию о возможно достижимых параметрах создаваемых микроэлектронных компонентов. Полученные результаты затем могут использоваться при проектировании и внедрении производственно-технологических участков (ПТУ) для промышленного выпуска этих компонентов.

Однако для того, чтобы создать интегрированную модель полного производственно-технологического цикла на основе подобных моделей, которые в настоящей работе будем называть физико-технологическими, необходимо обеспечить возможность их взаимного согласования по входу-выходу. Кроме того, интегрированная модель производственно-технологического процесса должна включать такой нестандартный элемент, как модель оператора полупроводникового производства (ОППП).

Технологический процесс полупроводникового производства, как и любой другой технологический процесс, является управляемым. Значит, его интегрированная модель должна быть представлена в виде модели управления. Смысл управления в зависимости от решаемой задачи можно формулировать двояко: либо это управление состоянием объекта путем подачи на него управляющих воздействий с целью приведения объекта в желаемое состояние, либо управление поведением объекта (субъекта). В любом случае управляющие воздействия на объект подаются с целью обеспечения заданных режимов происходящих в объекте процессов. Концептуальная блок-схема системы управления первого типа представлена на рис. 1.



Рис.1

При математическом моделировании управляемая система должна отображаться передаточной функцией, то есть неким оператором, трансформирующим множество управляющих воздействий во множество выходных состояний. При наличии обратной связи, информация о множестве выходных состояний поступает на элемент сравнения, куда подается множество целевых (нормативных) состояний. В качестве элемента сравнения используется оператор, формирующий разницу между фактическим состоянием объекта и задаваемым состоянием. Далее блок управляющих воздействий формирует то множество воздействий, которое и приводит в конечном итоге объект в целевое состояние.

В принципе на концептуальном уровне приведенная блок-схема применима к системе управления любого уровня и сложности. Но конструктивной (в смысле возможности математического моделирования) блок-схема, представленная на рис.1 является только для таких систем автоматического регулирования, в которых каждый из образующих систему блоков поддается описанию с помощью передаточной функции и, соответственно, может быть представлен в таком виде, как это показано на рис. 2.

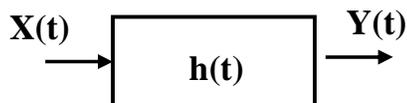


Рис.2

В соответствии с принятой в теории САУ методологией изображение на рис. 2 эквивалентно записи математической формулы, имеющей следующий вид

$$y(t) = \int_0^t x(t-t)h_1(t)dt, \quad (1)$$

Эта запись означает, что если на вход блока поступает воздействие в виде функции $f(x)$, то форму выходного сигнала системы можно определить в соответствии с приведенным выше соотношением, называемым интегральной сверткой передаточной функции блока $h(t)$ и функции входного воздействия $x(t)$.

Но для моделирования производственного участка по выпуску изделий микроэлектроники указанный подход неприменим по двум основным причинам. Первая заключается в том, что технологический участок на производстве по своей структуре относится к эргатическим (человеко-машинным) системам, в которых в качестве активных элементов входят люди (операторы). Концептуально производственный участок, как эргатическая система, может быть представлен блок-схемой, показанной на рис. 3.

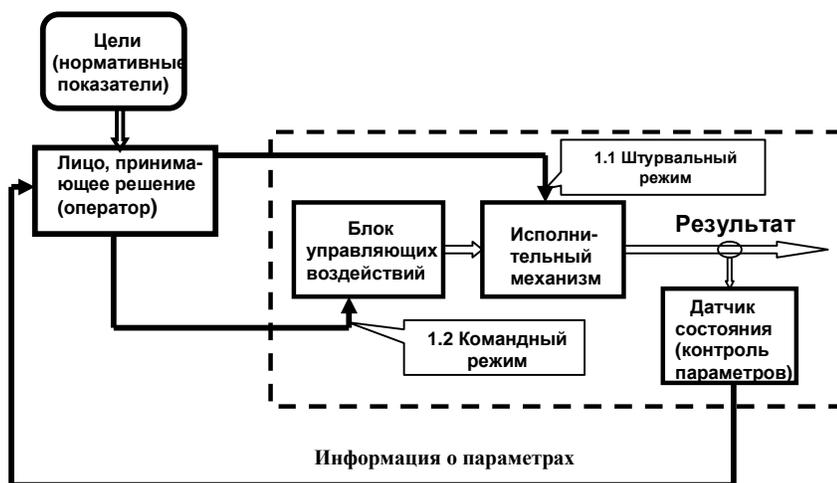


Рис 3.

Как видно из рис. 3, функции элемента сравнения выполняет ОПШП, в обязанности которого входит контроль параметров продукции, выходящей с данного рабочего места, и сравнение контролируемых показателей с нормативными требованиями. В отличие от систем автоматического регулирования, в которых взаимодействие элементов и блоков осуществляется на основе физических процессов, в данном случае в контуре управления появляются цепи, в которых циркулируют потоки информации. Это, во-первых, поток данных о технологических параметрах процесса и о параметрах изделия. Далее, это совокупность нормативных требований, за соблюдением которых оператор обязан следить.

Сам процесс сравнения это уже не физический процесс сопоставления физических величин, а информационный процесс, продуктом которого являются решения оператора. И, наконец, весьма специфичным является канал передачи управляющих воздействий от оператора. Это может осуществляться двояко. Оператор может регулировать отдельные параметры, непосредственно воздействуя на исполнительный механизм. Такой режим

управления будем называть штурвальным. Либо оператор, в соответствии с принимаемыми решениями воздействует на некий блок управляющих воздействий, с выхода которого производится уже регулирование параметров. Такой режим будем называть командным.

В любом случае построить замкнутую модель системы управления для ПТУ на основе только концепции передаточных функций не представляется возможным. Методологической основы для описания каналов передачи и обработки информации с помощью передаточных функций пока что не разработаны. Более того, даже тот блок, в котором непосредственно осуществляются физико-химические процессы обработки исходного сырья и превращения его в компоненты микроэлектроники, также не может быть представлен в виде стандартного блока «вход-выход», показанного на рис. 2.

Точнее, концептуально представить его в таком виде можно, но это представление будет совершенно не конструктивным. Причиной тому являются следующие обстоятельства. Во-первых, для физико-технологических процессов характерны значительные временные задержки между моментами подачи управляющих воздействий и появлением отклика на выходе. Далее, показатели качества производимых компонентов - это комплексный набор параметров, не сводимых к единому показателю, что исключает возможность их автоматического сравнения с заданными нормативными требованиями. Такое сравнение может осуществляться только на основе информационных потоков.

Таким образом, при управлении технологическими процессами в микроэлектронике нет возможности установить строгую детерминистическую связь между изменением значения какого-либо входного параметра и спродуцированным им изменением параметра выходного продукта. Кроме того, бывает так, что это результирующее изменение нельзя однозначно отнести к улучшению или ухудшению качества изделия.

Итак, при моделировании полного производственно-технологического цикла возникает ситуация когда:

- причинно-следственная связь между входным воздействием и откликом системы не поддается математическому описанию;
- отклик системы появляется со значительной временной задержкой относительно момента поступления входного воздействия;
- характер отклика таков, что качество его не поддается четкой количественной оценке.

В этом случае в силу перечисленных выше особенностей становится невозможным применение математического аппарата, развитого для исследования следящих систем, а значит и модельное представление систем, характеризующихся этими особенностями в виде *следающих*, становится неконструктивным.

Процесс управления в таких ситуациях обычно носит нормативно-ограничительный характер и осуществляется в рамках системы адаптивного управления, блок-схема которой представлена на рис. 4. В режиме адаптивного управления, когда неизвестны детерминистические функциональные соотношения между входным воздействием и изменением параметров конечного продукта, управление осуществляется путем задания некоторого набора параметров технологического режима. При этом подразумевается, что качественные и количественные показатели выпуска конечного продукта соответствуют требованиям, если эти технологические параметры поддерживаются в установленных нормативных пределах. Для технологических систем и процессов это могут быть такие, например, показатели как температура, давление, состав исходного сырья, время выдержки, чистота воздуха в гермозоне и т. п.

В развитых системах адаптивного управления контур обратной связи содержит в себе все основные звенья, показанные на рис. 4. В этом контуре обеспечивается систематический сбор данных о состоянии системы и о параметрах конечного продукта.

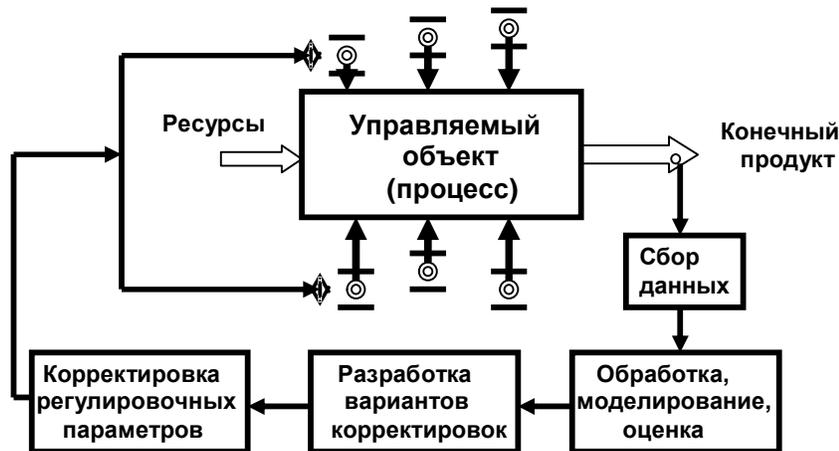


Рис. 4.

Эти данные обрабатываются, производится их оценка на основе разработанных моделей и далее, в зависимости от полученных результатов разрабатываются варианты корректировки регулирующих параметров. На основе этих корректировок производятся необходимые изменения нормативных регулировочных параметров, а далее локальные системы управления обеспечивают поддержание этих параметров в новых установленных пределах.

Корректировки в значения регулирующих параметров вносятся и в том случае, если это диктуется изменившимися условиями и характером воздействия внешней среды. При этом могут вводиться не только количественные изменения в нормативные показатели, но и сам набор этих показателей может претерпевать существенные изменения. Благодаря этому системы адаптивного управления легко приспосабливаются к изменению требований внешней среды и из всех известных систем управления обладают наибольшей живучестью. При этом установленные границы регулировочных параметров могут задаваться и не в конкретных количественных показателях, а в виде некоторых косвенных условий, что обеспечивает еще большую адаптивность системы к конкретным обстоятельствам.

На практике, в зависимости от степени разработанности технологического процесса и степени оснащённости производства средствами и системами автоматизированного управления, ряд блоков, таких как «обработка, моделирование, оценка», «разработка вариантов корректировок», могут быть не представлены в явном виде. В этом случае функции этих блоков осуществляет непосредственно ОППП и именно на него ложится ответственность за правильность принимаемых решений и, в конечном итоге, за качество выпускаемых изделий.

Безусловно, что, на практике осуществляется и обработка полученных данных, и их оценка и разработка на основе этих оценок вариантов корректировки регулирующих па-

раметров. То есть, контур регулирования замкнут. А иначе никакое производство попросту не смогло бы функционировать. Проблема состоит в том, что в рабочем контуре, работающем в реальном масштабе времени, процесс выработки решений по необходимости является весьма длительным. Одной из главных причин является то обстоятельство, что изменение нормативных регулировочных параметров может осуществляться только после внесения изменений во весь комплекс производственно-технологической документации. А это процесс, который может продолжаться месяцы и месяцы.

Так, что первая и важнейшая цель, достигаемая при реализации интегрированной модели, состоит в получении возможности многократного (в сотни и тысячи раз) сокращения времени, требуемого на проведение корректировки параметров. Второе, также крайне важное преимущество, состоит в том, что в процессе модельной отработки вполне можно испытывать те параметры, которые являются рискованными, с позиций имеющихся знаний о технологическом процессе, и испытывать такие режимы в реальном производстве недопустимо.

Между тем, порою именно парадоксальные, на первый взгляд, технологические решения иногда могут обеспечить кардинальный прорыв в направлении повышения качества изделий.

Рассмотрим кратко возможную последовательность действий по разработке и реализации предлагаемой модели. Ясно, что исходной базой должна явиться совокупность физико-технологических моделей, относящихся к моделируемому производственно-технологическому циклу. Это могут быть модели того класса, которые упомянуты в начале статьи. По каждой из таких моделей проводится доработка, позволяющая использовать их в режиме «вход-выход», где входными являются параметры и режимы производственно-технологического процесса, а выходными – параметры производимых компонентов.

Наличие такого комплекса моделей уже позволяет организовать процесс моделирования, при условии, что на начальных этапах функции остальных блоков будут осуществляться экспериментаторами, моделирующими действия ОППП и остальных специалистов производственно-технологического участка. Но такой вариант реализации имеет определенные недостатки. Во-первых, быстродействие такой модели будет весьма низким, что обусловлено низким (по сравнению с другими элементами) быстродействием индивида. Это существенно ограничит возможности набора достаточной статистики при имитационном моделировании.

Во-вторых, результаты этого моделирования будут не вполне адекватными, поскольку будут основаны на специфических характеристиках лишь одного, пусть и самого опытного ОППП. Можно провести несколько серий имитационных экспериментов с разными индивидами в качестве ОППП, а затем путем статистической обработки обобщить полученные результаты. Но практичность такого подхода представляется сомнительной, поскольку требует весьма значительных затрат времени.

Для того чтобы модель, позволяла осуществлять эффективную реализацию имитационных экспериментов, элемент сравнения необходимо заменить модельным блоком, достаточно адекватно отображающим поведение ОППП. Проблема эта не тривиальна. В большинстве работ, посвященных моделированию эргатических систем, специфика личности, как активного элемента системы, практически не учитывается.

Обычно узел, отображающий активный элемент, в блок-схемах следящих систем представляется в виде четырехполюсника, как это показано на рис. 5. Функциони-

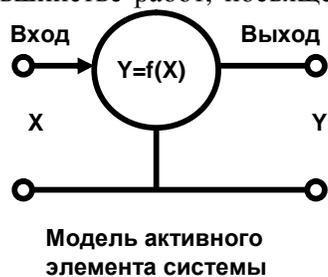


Рис. 5

рование четырехполосника однозначно определяется его передаточной функцией $Y=f(X)$. И если на вход четырехполосника поступает сигнал X , имеющий заданные параметры, то на выходе заведомо появляется сигнал Y в соответствии с передаточной функцией узла.

Совсем иная ситуация имеет место, когда в качестве активного элемента в эргатической системе функционирует личность. Основной особенностью поведения личности является ее целеустремленность - качество, проявляющееся в том, что в любом окружении ни структура действий личности, ни структура ее функций не могут быть заданы извне однозначно, а определяются, в конечном итоге, *собственным выбором* личности. Именно *выбор решений* составляет содержательный аспект управления, осуществляемого ОППП на рабочем месте. С учетом этого четырехполосник, представленный на рис. 5, надлежит преобразовать к виду, показанному на рис. 6.

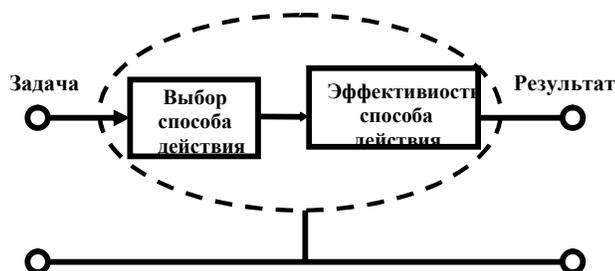


Рис. 6 Кибернетическая модель личности как активного элемента системы

Таким образом, моделируя ОППП как активный элемент следящей системы, необходимо, в первую очередь, отобразить его свойства именно в *состоянии выбора*.

Только в состоянии выбора полностью проявляется такая специфическая особенность личности, как целеустремленность, и только в этом состоянии индивид

как элемент системы обладает “сугубо человеческими” свойствами, носителем которых не может быть никакой искусственный элемент или система. Однако, несмотря на всю специфичность этих свойств, та их совокупность, которая является существенной с точки зрения индивида как активного элемента системы управления, поддается представлению с помощью математических моделей.

Можно считать, что исчерпывающей характеристикой индивида как активного элемента системы являются его следующие свойства: *вероятность выбора* индивидом определенного *способа* действий C_i в заданном окружении S , *эффективность* для индивида *выбранного способа* действий и *удельная ценность* V_j определенного результата G_j , для достижения которого был выбран способ действий C_i . Указанные характеристики задаются следующими функциями:

- *вероятность* P_i выбора индивидом способа действий C_i в окружении S есть функция

$$P_i = P\{C_i \text{ } \frac{1}{2} A \text{ находится в } S\},$$

- *эффективность* E_{ij} реализации выбранного способа действий C_i , определяется как вероятность того, что способ C_i будет продуцировать именно тот результат G_j , который был выбран индивидом как предпочтительный, то есть

$$E_{ij} = P\{G_j \text{ } \frac{1}{2} A \text{ выберет } C_i, \text{ находясь в } S\}.$$

Определение функции для удельной ценности V_j будет дано позднее.

Итак, личность в ситуации выбора характеризуется тремя вероятностными функциями, приведенными в таблице 1.

Эти функции f , g , и h являются как бы тремя измерениями личности, полностью описывая ее поведение в роли активного элемента эргатической системы. Важно отметить, что каждая из трех вероятностей, указанных в табл. 1, является функцией всех трех аргументов и, таким образом, все вероятности являются взаимозависимыми.

В общем случае величина $P\{G_j\}$ определяется выражением

$$P\{G_j\} = \sum_i E_{ij},$$

то есть, она равна сумме произведений вероятностей выбора каждого способа действий на вероятность того, что, будучи выбранным, этот способ продуцирует результат G_j .

Но вероятности выбора способов действий и эффективности этих способов являются функциями одних и тех же аргументов S_k , G_j , C_i , поэтому

$$P\{G_j\} = f\{ [C_i], [G_j], [S_k] \}.$$

Таким образом, роль индивида в ситуации выбора состоит в преобразовании свойств ситуации выбора в вероятность выбора способов действий, эффективность выбранных способов действий и удельные ценности получаемых результатов. Сами по себе эти величины являются не объективными, а субъективными в том смысле, что объективная оценка каждой из величин подвергается трансформации в сознании субъекта, принимающего решение.

Важное замечание относится к удельной ценности ожидаемого результата. Для данного субъекта ожидаемая удельная ценность любого результата EV прямо пропорциональна шансам на его достижение:

$$EV = \sum_i \sum_j P_i E_{ij} V_j$$

и при нулевых шансах на достижения любой результат, сколь привлекательным он бы ни казался, имеет для индивида, в конце-концов, нулевую ценность.

Сомножители в правой части выражения, определяющего удельную ценность результата, сами являются функциями ситуации выбора, значит

$$EV = p\{ [C_i], [G_j], [S_k] \}.$$

Теперь можно определить математическую модель личности, выступающей в роли активного элемента системы управления технологическим процессом, как математическую функцию p , связывающую ожидаемую удельную ценность в любой ситуации выбора со свойствами возможных способов действий, их возможных результатов и существенными переменными окружения.

Параметры ситуации выбора	Функции	Аргументы функции		
		Способы действий	Возможные результаты	Окружение
Вероятность выбора	$P_i = f\{$	$[C_i],$	$[G_j],$	$[S_k]\}$
Эффективность выбора	$E_i = g\{$	$[C_i],$	$[G_j],$	$[S_k]\}$
Удельная ценность	$V_j = h\{$	$[C_i],$	$[G_j],$	$[S_k]\}$

Таблица 1. Вероятностные характеристики личности

Любое решение, принимаемое ОППП, базируется на его персональных системных параметрах. И концептуальную модель ОППП можно представить так, как это показано на рис. 7. Предлагаемая модель представляет ОППП как исполнительный элемент, трансформирующий поставленную задачу в требуемый результат с вероятностью, зависящей от вероятности выбора подходящего способа действий и эффективности этого способа по отношению к требуемому результату. При этом как вероятность выбора адекватного способа, так и его эффективность определяются такими системными свойствами ОППП, как *привычность, знание, мотивация*.

В процессе взаимодействия ОППП с остальными элементами управления технологическим процессом параметры его системных свойств поддаются информационному управлению на основе циркулирующих в системе сообщений.

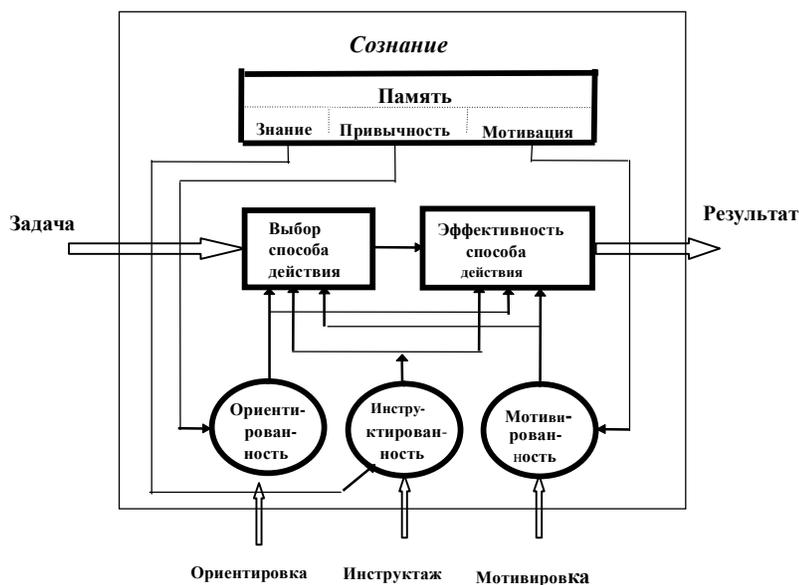


Рис. 7

Таким образом, ОППП в эргатической системе управления технологическим процессом является не просто активным элементом, способным преобразовать поступающий сигнал без понижения его уровня и усилить этот сигнал, но и *управляемым*, то есть таким элементом, передаточная функция которого в каждый момент времени определяется воздействующими на дополнительные входы управлениями. Эта особенность личности до сих пор практически не учитывалась, а все известные модели эргатических систем построены по принципу, который условно можно назвать “одноконтурным”, или, пожалуй, точнее, “одномерным”. То есть, при построении общей модели системы замыкаются только контуры управления, в которых активные элементы включаются как четырехполюсники своими функциональными входами и выходами, тогда как наличие управляющих входов (по ориентировке, инструктажу и мотивации) не учитывается. Между тем, любая эргатическая система, помимо функционального контура, в котором все цепи между входом и выходом системы проходят через функциональные интерфейсы активных элементов, должна содержать еще и контуры управления мотивацией, знаниями, и ориентацией каждого ОППП, участвующего в управлении.

На практике, конечно, такие контуры существуют, и именно они определяют в конечном итоге уровень эффективности эргатической системы и, в конечном итоге, качество

выпускаемой продукции. Так, привычность какого-либо образа действий формируется у личности всей совокупностью существующих форм общественного воспитания и взаимодействия в коллективе, знания - действующей системой обучения, инструктажа и т. п., мотивация - принятой системой стимулирования, административного воздействия, в том числе и принуждения и т. д.

Однако отсутствие конструктивного подхода к учету этих контуров управления функционированием активных элементов не позволяет увязать характер и существо управляющих воздействий в этих контурах с функциональными целями и назначением эргатической системы и, хотя бы приблизительно, прогнозировать последствия этих управлений. Так, что проблема разработки методологии моделирования эргатических систем на основе комплексного учета характеристик личности, отображаемых моделью, представленной на рис. 7., является весьма актуальной на ближайшую перспективу.

Предлагаемый подход к построению интегрированной модели технологического процесса полупроводникового производства как раз и ориентирован на создание инструмента, позволяющего на основе имитационного моделирования существенно повысить эффективность процесса накопления опыта и новых знаний и перманентного их внедрения непосредственно в полупроводниковое производство.

Исходные данные по системным параметрам ОППП «ориентированность», «инструментированность» и «мотивированность» можно получить путем измерения указанных параметров у группы конкретных операторов. Полученные результаты затем, после статистической обработки, могут быть обобщены и сведены к параметрам «среднестатистического» ОППП. Для измерения каждого из параметров наблюдаемый оператор должен быть поставлен в ситуацию, в которой доминирующим фактором, влияющим на принятие решения, является измеряемый параметр.

Естественно, что с учетом специфики полупроводникового производства способ измерения этих параметров ОППП требует более детального рассмотрения, что может быть осуществлено только на основе анализа информационных потоков, циркулирующих в системе управления технологическим процессом. Поэтому логичным следующим шагом в рассмотрении проблемы моделирования производственно-технологических процессов микроэлектроники является анализ и моделирование этих информационных потоков. Понятно, что все эти проблемы требуют отдельного рассмотрения.

Литература

1. Волчихин В.И. Воячек А.И. Смогунов В.В. Модель гетерогенных структур микросистемной техники// Ж. Микросистемная техника. – 2000. - № 3.
2. Захаров А.Г. Котов В.Н. Кракотец Н.А. Моделирование процесса геттерирования примесей в кремний// Ж. Микросистемная техника. – 2001. - № 1.
3. Абрамов И.И. Игнатенко С.А. Новик Е.Г. Моделирование сток-затворных характеристик одноэлектронных транзисторов// Ж. Микросистемная техника. – 2003. - № 5.
4. Соболев А.Н. Физические эффекты как основа структурных элементов микросистемотехники// Ж. Микросистемная техника. – 2003. - № 11.