

В.М. Левыкин, И.В. Шевченко

Метод построения информационной технологии диагностики состояния сложного технологического процесса

Предложен метод построения прикладной информационной технологии диагностики состояния сложного технологического процесса, позволяющий с единых системных позиций подходить к проектированию прикладных информационных технологий диагностики и коррекции сложных технологических процессов.

The method of applied information technology design for complex industrial processes diagnostics which provides the unified systematic approach to design engineering of applied information technologies for diagnostics and correction of complex industrial processes is considered.

Запропоновано метод побудови прикладної інформаційної технології діагностики стану складного технологічного процесу, який дозволяє з єдиних системних позицій підходити до проектування прикладних інформаційних технологій діагностики та корекції складних технологічних процесів.

Введение. В настоящее время наблюдается быстрый прогресс в практическом применении интеллектуальных информационных технологий, используемых при проектировании, разработке и эксплуатации систем мониторинга, диагностики и поддержки принятия решений по коррекции хода сложных технологических процессов (ТП). Такие процессы имеют определенную общую специфику.

- *Необходимость управления большим набором физических параметров.* С возрастанием сложности и размерности объекта управления, с увеличением объема осведомительной информации человек–оператор теряет способность самостоятельно перерабатывать информацию в оперативном режиме [1].

- *Отсутствие масштабной инвариантности.* Условия получения продукта существенно зависят от незначительных изменений в конструкции оборудования. Например, при выращивании монокристаллов полупроводников изменение конфигурации любого элемента теплового узла может коренным образом изменить тепловую картину процесса. Это приводит к низкой эффективности аналитических и численных методов моделирования процесса и, как следствие, к проведению серии крайне трудоемких экспериментов для оптимизации режимов выращивания [2].

- *Проблема неустойчивости.* Во время технологического процесса изменяется влияние

параметров на его течение. Неустойчивость касается как статических, так и динамических характеристик. Например, по мере роста монокристалла кардинально меняются тепловые поля внутри установки, конвекционные потоки внутри расплава и т.д.

Таким образом, управление сложным ТП во многом опирается на личный опыт операторов и нередко осуществляется ими на интуитивном уровне. Как правило, с потерей опытных работников на технологической линии резко снижается качество и возрастает брак выпускаемой продукции.

С другой стороны, отсутствует единый системный подход в разработке систем мониторинга и диагностики сложных ТП. Это можно объяснить следующими причинами:

- √ принципиальная невозможность единого формального описания всех возможных видов технического состояния, явлений и процессов из-за применения разнообразного математического аппарата для различных целей анализа;

- √ наличие большого количества форм представления данных и, соответственно, типов моделей представления знаний об объекте мониторинга, обусловленное существованием специализированных подходов;

- √ отсутствие теоретического и экспериментального обоснования структуры и состава ин-

формационных технологий, способных обеспечить эффективное решение задач мониторинга сложной технической системы (СТС).

Исходя из вышеизложенного проблема создания на концептуальном уровне метода разработки информационных технологий мониторинга, диагностики и поддержки принятия оперативных решений по коррекции сложных ТП актуальна.

Цель статьи – разработка с единых системных позиций метода построения информационной технологии (ИТ) диагностики состояния сложного ТП с возможностью распознавания ситуаций и поддержки принятия оперативных решений по коррекции процесса.

Постановка задачи

Прикладная информационная технология осуществляет поддержку функционирования информационной системы, имеющей свою организационную и функциональную структуру, математические, технические и информационные средства. В данном случае состав ИТ должен обеспечивать решение задачи диагностики состояния сложного ТП.

Согласно стандартному определению информационная технология есть совокупность методов, приемов и программно-технологических средств, объединенных в технологическую цепочку для обеспечения сбора, хранения, обработки и вывода информации [3]. Любая технология подразумевает также наличие моделей и алгоритмов. Алгоритмы реализуются как информационные процессы, многообразие которых определяется как спецификой предметных областей, так и соответствующими методами и моделями [3].

Поставим задачу построения ИТ как задачу создания комплекса взаимосвязанных информационных процессов, использующих определенные методы и модели и направленных на решение задачи диагностики сложного ТП. Согласно определению, метод – это обобщенный способ решения задач определенного класса. Для решения указанной задачи необходим метод, позволяющий синтезировать рациональный состав информационных технологий подобного назначения.

Метод построения ИТ диагностики сложного ТП

Этапы метода заключаются в следующем.

Этап 1. Формирование модели ИТ.

Разрабатывая информационную технологию необходимо определить ее статическую часть – структуру данных (*DS*) и комплекс математических методов и моделей (*CMM*), а также описать динамическую составляющую информационной технологии – информационные процессы (*IP*) и их взаимодействие между собой (*IPI*). Исходя из этого информационная технология должна представляться набором:

$$IT = \langle DS, CMM, IP, IPI \rangle. \quad (1)$$

Каждый информационный процесс представляется блоком, имеющим информационные входы, управляющие входы, выходы и используемые ресурсы (рис. 1). В качестве ресурсов выступают методы, модели и данные/знания, привлекаемые по мере необходимости для реализации процесса.

Этап 2. Формирование структуры системы диагностики (СППР).



Рис. 1. Информационный процесс

Формально структуру системы поддержки принятия решений *SAD* представим в виде модели:

$$SAD = \langle MS(DM), KB, MB, DB, SM, AB, ISP, IS, DS \rangle, \quad (2)$$

где *MS* – модель поиска решений; *DM* – модель проблемной ситуации в предметной области; *KB* – база знаний; *MB* – база моделей; *DB* – база данных; *SM* – программный монитор; *AB* – база алгоритмов; *ISP* – подсистема интеграции с АСУ ТП; *IS* – подсистема интеграции с подсистемой ТЭП АСУ предприятия; *DS* – подсистема диалога с ЛПП.

Этап 3. Формирование состава базы данных и базы знаний.

Структура данных *DS* определяет информационный комплекс – базу данных значимых

технологических параметров и базу знаний по распознаванию ситуаций, возникающих в ходе технологического процесса.

База данных должна содержать данные следующих классов:

- исходные данные по физическим параметрам объекта мониторинга;
- первичные данные, полученные от физических датчиков в ходе технологического процесса;
- вторичные данные – результаты косвенных измерений;
- значения признаков ситуаций;
- массивы параметров функций принадлежности и другие параметры систем нечеткого логического вывода.

База знаний содержит:

- решающие правила распознавания ситуаций;
- массивы параметров нейронных сетей, если таковые используются для распознавания ситуаций или моделирования процессов;
- формулировки рекомендаций по коррекции ТП в случае возникновения такой необходимости;
- метаправила коррекции содержимого базы знаний.

Этап 4. Формирование комплекса математических методов и моделей.

Комплекс математических методов и моделей *СММ* должен содержать:

- модель проблемной ситуации в предметной области (*МПС*);
- модель качества конечного продукта в виде совокупности показателей, характеризующих физические свойства конечного продукта (*МҚ*);
- набор математических методов и моделей для расчета значений параметров процесса, которые невозможно измерить прямыми методами (*МІМ*);
- набор методов и моделей для решения задач мониторинга технологического процесса, включая распознавание ситуации (*ММ*);
- модели поиска решений для коррекции хода технологического процесса (*МСС*);

- модели преобразования первичных данных в значения признаков ситуации (*МТРС*);
- модель структуры *СППР*.

Этап 5. Формирование структуры комплекса информационных процессов.

Комплекс информационных процессов представим набором:

$$IP = \langle IPC, IPDPP, IPM, IPDC, IPDS, IPDR, IPRM, IPFH, IPS \rangle, \quad (3)$$

где *IPC* – информационный процесс координации; *IPDPP* – информационные процессы предварительной обработки данных; *IPM* – информационные процессы косвенных измерений параметров технологического процесса; *IPDC* – информационные процессы преобразования данных в признаки ситуаций; *IPDS* – информационные процессы диагностики ситуаций; *IPDR* – информационные процессы выработки рекомендаций оператору; *IPRM* – информационные процессы модификации правил распознавания; *IPFH* – информационные процессы формирования истории мониторинга; *IPS* – вспомогательные процессы.

Этап 6. Разработка схемы информационной технологии.

Каждый процесс обработки информации использует определенный метод, одну или несколько моделей, один или несколько алгоритмов. Не рассматривая модельный и алгоритмический уровень процессов (этот уровень полностью зависит от конкретной задачи), рассмотрим взаимодействие процессов как иерархическую структуру, в которой центральное управляющее звено – процесс координации *IPC* (рис. 2).

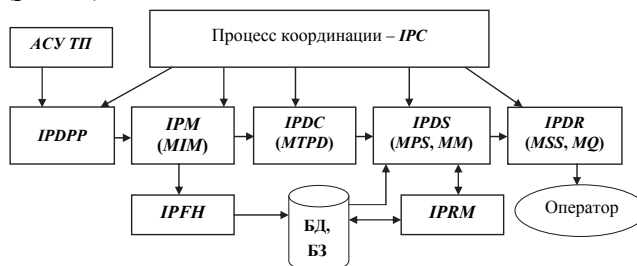


Рис. 2. Общая схема информационной технологии диагностики сложного технологического процесса

Основные информационные процессы решения задачи диагностики представляют со-

бой технологическую цепочку в соответствии с этапами решения указанной задачи. Дополнительные и вспомогательные процессы, также управляемые координатором, направлены на решение задач коррекции баз данных и знаний, организации диалога с пользователем и т.п. Для каждого информационного процесса обработки указаны методы и модели, используемые в данном процессе.

Таким образом, сформулированы этапы метода построения информационной технологии диагностики состояния сложного технологического процесса.

В качестве примера рассмотрим построение ИТ диагностики и поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания монокристаллов полупроводников.

Этап 1. В соответствии с выражением (1) построим структуру данных, комплекс математических методов и моделей, опишем информационные процессы и их взаимодействие. Ввиду ограниченного объема статьи описание отдельных этапов процесса построения сокращено.

Этап 2. Формирование структуры системы диагностики (СППР). Структура системы диагностики соответствует выражению (2).

Этап 3. База данных системы диагностики процесса выращивания монокристаллов включает ряд параметров, значения которых передаются из измерительной подсистемы АСУ ТП процесса выращивания, а именно:

- Исходные данные по физическим параметрам объекта мониторинга: масса загрузки; масса герметизатора; заданный диаметр слитка; радиус затравки; длина затравки; скорость вращения затравки; скорость вращения тигля; диаметр тигля; высота тигля; внутренний диаметр экрана; высота экрана; плотность полупроводникового материала в твердом состоянии; плотность полупроводникового материала в расплаве; теплопроводность полупроводникового материала в твердом состоянии; теплопроводность полупроводникового материала в расплаве; излучательная способность слитка; излучательная способность B_2O_3 ; температура плавления полупроводникового материала; кристаллографическое направление плоскости роста.

- Первичные данные, полученные от физических датчиков в ходе технологического процесса: температура основного нагревателя; мощность фонового нагревателя; скорость перемещения штока затравки; скорость перемещения штока тигля; температура расплава под слоем герметизатора; текущая масса слитка.

- Вторичные данные – результаты косвенных измерений и расчетов: температура фонового нагревателя; уровень расплава в тигле; массив значений температуры на поверхности герметизатора; массив значений температуры на поверхности тигля; текущий диаметр слитка; – текущая длина слитка; теплопроводность $GaAs$ в зоне фронта кристаллизации; температура в заданных точках расплава; температура в заданных точках кристалла; эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности слитка; номер стадии процесса выращивания.

- Конечные данные системы мониторинга: массив распределения температур в расплаве; – массив распределения температур в кристалле; радиальные температурные градиенты в зоне фронта кристаллизации; осевые температурные градиенты в слитке.

- Признаки ситуаций:
 - тенденция отклонения текущего значения диаметра слитка;
 - тенденция отклонения температуры основного нагревателя;
 - тенденция отклонения температуры фонового нагревателя;
 - тенденция отклонения скорости вытягивания;
 - радиальный градиент на уровне +1см над уровнем расплава;
 - осевой градиент на фронте кристаллизации;
 - осевой градиент в слитке на уровнях от одного до 12 см;
 - неравномерность осевого градиента в слитке на уровнях от одного до 12 см;

База знаний системы мониторинга температурных полей содержит:

- таблицы правил переключения структуры нейронной сети, вычисляющей температуру в расплаве и в слитке;

- массивы весовых коэффициентов нейронной сети, вычисляющей температуру в расплаве и в слитке.

База знаний системы диагностики процесса выращивания содержит:

- Алфавит ситуаций, подлежащих распознаванию, а именно:

- штатная ситуация;
- рост риска ухода диаметра слитка за пределы допуска;

- уход диаметра за пределы допуска;
- рост риска увеличения плотности дислокаций;

- вероятность недопустимого увеличения плотности дислокаций превышения заданного порога;

- рост риска замедления или остановки процесса кристаллизации.

- рост риска повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск разложения кристалла;

- неисправность в АСУ ТП.

- Продукционные нечеткие правила распознавания ситуаций.

- Массивы параметров функций принадлежности и весовых коэффициентов посылок для систем нечеткого логического вывода.

- Формулировки рекомендаций по коррекции процесса выращивания.

Этап 4. Формирование состава комплекса математических методов и моделей. Комплекс математических методов и моделей системы диагностики содержит:

- Модель структуры СППР по коррекции хода процесса выращивания. Согласно данной модели осуществляется разработка архитектуры СППР.

- Вербальную модель проблемной ситуации в предметной области – описание ситуаций и их признаков, описание причинно-следственных связей между значениями признаков и возникающими ситуациями.

- Модель качества конечного продукта в виде совокупности показателей, характеризующих физические свойства монокристалла (технические условия).

- Модели преобразования первичных данных в значения признаков.

Данный комплекс моделей позволяет интерпретировать наблюдаемые значения параметров процесса как признаки возникающих ситуаций. Это связано с тем, что во многих случаях мгновенные значения параметров не несут необходимой для распознавания информации. К таким моделям относятся:

- √ модель тренда отклонения текущего значения диаметра слитка (М1):

$$X1 = (\Delta D[t-2] + \Delta D[t-1] + \Delta D[t])/3, \quad (4)$$

где $\Delta D[t-2]$, $\Delta D[t-1]$, $\Delta D[t]$ – вычисленные значения ухода на временных точках $t-2$, $t-1$ и t соответственно;

- √ модель тренда отклонения температуры основного нагревателя (М2):

$$X2 = (\Delta T_{\text{он}}[t-2] + \Delta T_{\text{он}}[t-1] + \Delta T_{\text{он}}[t])/3; \quad (5)$$

- √ модель тренда отклонения температуры фонового нагревателя (М3):

$$X3 = (\Delta T_{\text{фн}}[t-2] + \Delta T_{\text{фн}}[t-1] + \Delta T_{\text{фн}}[t])/3; \quad (6)$$

- √ модель тренда отклонения скорости вытягивания (М4):

$$X4 = (\Delta V[t-2] + \Delta V[t-1] + \Delta V[t])/3. \quad (7)$$

- Нечеткая модель М5 распознавания ситуаций (не приводится).

- Продукционная модель М6 для выбора решений для коррекции хода процесса выращивания (не приводится).

Этап 5. Формирование состава комплекса информационных процессов. В соответствии с выражением (3) определим информационные процессы.

ИП1. Координация выполнения процессов ИП1...ИП7.

ИП2. Предварительная обработка данных, полученных от системы мониторинга. Проводится нормирование данных и агрегирование – распределение данных по рабочим массивам системы диагностики.

ИП3. Преобразование данных в признаки ситуаций – модели М1–М4. Процедуры вычисления скользящих средних с учетом трех последних замеров и знака результата.

ИП4. Распознавание ситуаций. Используется нечеткая модель распознавания М5 и база знаний БЗ.1. Процесс выполняется по следующему алгоритму:

Шаг 1. Фиксация текущих значений признаков ситуаций.

Шаг 2. Расчет текущих значений степеней принадлежности для признаков ситуаций и фиксация результатов фазификации в рабочей матрице логического вывода.

Шаг 3. Вычисление степеней истинности правил в БЗ диагностики ситуаций с учетом весовых коэффициентов каждой посылки каждого правила.

Шаг 4. Аккумуляция результатов, полученных на шаге 3. Определение правила, имеющего наибольшую степень истинности.

Шаг 5. Вычисление числового и лингвистического значения степени критичности ситуации.

Шаг 6. Генерация сообщения для оператора с указанием текущей ситуации и степени критичности.

Шаг 7. Конец.

ИП5. Выработка рекомендаций. Используется продукционная модель логического вывода М6. Процесс выполняется по следующему алгоритму:

Шаг 1. Фиксация результатов распознавания ситуации.

Шаг 2. Вычисление степеней истинности левых частей правил в БЗ по выдаче рекомендаций.

Шаг 3. Определение правила, имеющего наибольшую степень истинности.

Шаг 4. Выдача рекомендации для оператора установок в соответствии с выбранным правилом.

Шаг 5. Конец.

ИП6. Вывод сообщений и рекомендаций.

ИП7. Коррекция баз знаний.

ИП8. Сохранение значений признаков и имен ситуаций в БД и БЗ

Ввиду ограниченного объема статьи описание процессов ИП5...ИП8 не приводятся.

Этап 6. Разработка схемы информационной технологии. Структура ИТ показана на рис. 3. Технология реализована в виде подсистем «Мониторинг» и «Советчик» в рамках информационно-аналитической системы управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников.

Заключение. Впервые предложен метод построения прикладной информационной технологии диагностики состояния сложного технологического процесса. Метод включает такие этапы, как формирование:

- модели информационной технологии;
- структуры системы диагностики;

- состава базы данных и базы знаний;
- комплекса математических методов и моделей с учетом решаемых функциональных задач;
- структуры комплекса информационных процессов;
- разработки схемы информационной технологии.

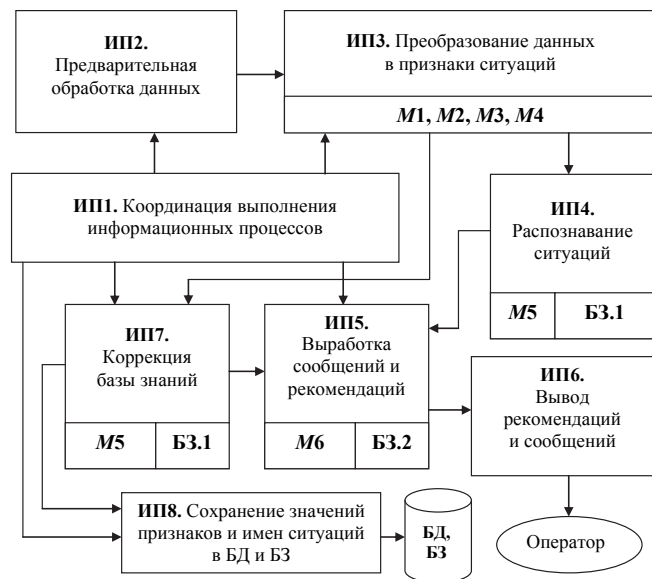


Рис. 3. Общая схема информационной технологии поддержки принятия оперативных решений

Метод позволяет с единых системных позиций подходить к проектированию прикладных информационных технологий диагностики и коррекции хода сложных технологических процессов.

1. Тамм Г., Пуусенн МЭ., Таваст Р.Р. Анализ и моделирование производственных систем. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.
2. Суздаль В.С. Алгоритмизация управления процессами выращивания монокристаллов из расплава // Сб. науч. тр. Харьковского гос. политех. ун-та. – 1998. – 6, Ч. 1. – С. 421–425.
3. Коголовский М.Р. Перспективные технологии информационных систем. – М.: ДМК Пресс; Компания АйТи, 2003. – 288 с.

Поступила 18.03.2014

Тел. для справок: +38 057 702-1451, +38 066 396-0785

(Харьков, Кременчуг)

E-mail: levykinvictor@gmail.com, athome050@yandex.ru

© В.М. Левыкин, И.В. Шевченко, 2014