

УДК 621.315.592

ДИАГНОСТИКА НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СИТУАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

И. В. Шевченко, С. А. Грицаков, Н. Н. Дымченко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: athome050@yandex.ru

Разработана нечеткая адаптивная модель для диагностики неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов полупроводников. В предложенной модели для настройки правил используются индивидуальные весовые коэффициенты функций принадлежности по каждому признаку и по каждому правилу. Значения весовых коэффициентов оптимизированы для каждого правила при помощи эволюционного алгоритма. Дополнительно в модели оценивается степень критичности ситуации. Извлечены знания из полученной от экспертов информации, проведена группировка параметров относительно классов ситуаций. Разработана иерархическая база знаний для диагностики и выдачи рекомендаций по коррекции хода процесса выращивания монокристаллов, включающая модуль реагирования на одновременное возникновение двух или более критических ситуаций одновременно.

Ключевые слова: диагностика критических ситуаций, нечеткая адаптивная модель, степень критичности ситуации, иерархическая база знаний, поддержка принятия оперативных решений.

ДІАГНОСТИКА НЕСПРИЯТЛИВИХ СИТУАЦІЙ В ПРОЦЕСІ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ

І. В. Шевченко, С.О. Грицаков, М. М. Димченко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: athome050@yandex.ru

Розроблено нечітка адаптивна модель для діагностики несприятливих ситуацій у процесі вирощування монокристалів напівпровідників. У запропонованій моделі для настройки правил використовуються індивідуальні вагові коефіцієнти функцій належності за кожною ознакою і по кожному правилу. Значення вагових коефіцієнтів оптимізовані для кожного правила за допомогою еволюційного алгоритму. Додатково в моделі оцінюється ступінь критичності ситуації. Отримані знання з експертної інформації, проведено групування параметрів щодо класів ситуацій. Розроблено ієрархічну базу знань для діагностики та видачі рекомендацій щодо корекції ходу процесу вирощування монокристалів, що включає модуль реагування на одночасне виникнення двох або більше критичних ситуацій одночасно.

Ключові слова: діагностика критичних ситуацій, нечітка адаптивна модель, ступінь критичності ситуації, ієрархічна база знань, підтримка прийняття оперативних рішень.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время наблюдается быстрый прогресс практического применения интеллектуальных информационных технологий, которые, в частности, используются при проектировании, разработке и эксплуатации систем мониторинга и поддержки принятия решений по коррекции хода сложных технологических процессов. Безусловно, к таким процессам следует отнести процесс выращивания монокристаллов методом Чохральского. Суть метода заключается в том, что поликристаллический материал (например, кремний) помещается в тигель, расплавляется, после чего в расплав опускается небольшой затравочный монокристалл. Затем затравочный монокристалл постепенно поднимается из расплава и на нем образуется слиток с монокристаллической структурой. Этот процесс имеет специфику, общую для сложных технологических процессов, а именно:

1. *Необходимость управления большим набором параметров* (температурой нагревателей, скоростью вытягивания, положением тигля относительно нагревателя, давлением и расходом инертного газа и т.д.), влияющих на рост монокристалла.

2. *Отсутствие масштабной инвариантности.* Условия получения продукта существенно зависят от незначительных изменений в конструкции оборудования. Например, 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.

3. *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. Существует ряд приемов, направленных на стабилизацию условий проведения технологического процесса [1]. Однако эти меры позволяют лишь уменьшить указанную неустойчивость, поэтому управляющий алгоритм должен меняться в ходе процесса выращивания.

Таким образом, управление процессом выращивания и коррекция значений уставок стабилизируемых параметров во многом опирается на личный опыт мастера-технолога и нередко осуществляется на интуитивном уровне. Как правило, с потерей опытных работников на технологической линии резко снижается качество и возрастает брак выпускаемой продукции.

Исходя из вышеизложенного, проблема создания информационной технологии поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания монокристаллов является актуальной.

Цель работы – разработка моделей, процедур и базы знаний для диагностирования неблагоприят-

ных ситуаций и выдачи рекомендаций по их устранению в процессе выращивания монокристаллов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Современные системы управления ростовыми установками должны обеспечивать воспроизводимость результатов технологических процессов при достаточно высоких значениях показателей качества выращенных кристаллов, которые определяются техническими условиями и требованиями заказчика. Это может быть достигнуто только путем использования в контурах управления математических моделей с настраиваемыми параметрами, систем оперативной идентификации этих моделей и систем оптимизации режимов. При таком подходе влияние на процесс «человеческого фактора» сводится к минимуму.

Вопросу создания методов и моделей для систем управления процессом выращивания уделялось большое внимание с самого начала промышленного производства монокристаллов полупроводников. Подробный анализ развития автоматизации управления процессом выращивания монокристаллов по методу Чохральского представлен в работе [1].

Общие и частные подходы к проектированию автоматизированных систем управления процессом выращивания слитков по методу Чохральского достаточно подробно изложены в работе [2], а примером реализации этих подходов и принципов может служить автоматизированная система, описанная в работе [3]. В этой двухуровневой системе реализована настройка всех локальных контуров регулирования параметров процесса от центральной ЭВМ. При этом обеспечена возможность с помощью одной ЭВМ управлять работой нескольких установок; информационная база системы основана на использовании промышленных СУБД; обеспечена информационная связь с другими технологическими участками производства; заложена возможность идентификации управляемых процессов и адаптации параметров используемых моделей.

Однако контролируемые в большинстве существующих систем параметры лишь косвенно влияют на качество выращиваемого слитка. Факторами, прямо влияющими на возникновение структурных дефектов, являются, прежде всего, температурные напряжения в выращенном слитке, несимметричность теплового поля ростовой камеры, изменение формы фронта кристаллизации, происходящее из-за неконтролируемых колебаний температуры расплава. Поэтому с точки зрения технологов крайне желательным контролировать осевые и радиальные температурные градиенты в слитке и в расплаве, особенно в зоне фронта кристаллизации. С появлением возможности мониторинга температурных полей расплава и слитка [4] стало возможным создание системы диагностики неблагоприятных режимов и выдачи рекомендаций по их устранению.

В данной работе закладываются основы создания СППР, задачей которой является помощь мастеру-технологу, контролирующему процесс выращивания монокристаллов полупроводников. К СППР предъявляются следующие требования: использование временных зависимостей в базе знаний и учет временного фактора при поиске решения; получение

достоверного результата при возможной неполноте исходных данных; выбор наиболее существенных событий, имеющих место в динамике технологического процесса; предупреждение возникновения неблагоприятных ситуаций (НС) и корректный выход из критической ситуации.

Под неблагоприятной ситуацией будем понимать такую ситуацию, которая возникает в ходе технологического процесса, не разрешается без вмешательства оператора и связана с необходимостью выбора конкретной альтернативы управления в условиях дефицита времени при наличии информации о состоянии объекта, критериев оценки ситуации и решающих правил.

Таким образом, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модели и алгоритмы диагностирования и поддержки принятия решений в процессе выращивания монокристаллов.

2. Выполнить программную реализацию разработанных моделей и проверить их работоспособность на реальных практических задачах.

Структурирование информации. Общая методика построения комплекса моделей и алгоритмов диагностирования ситуаций и выдачи рекомендаций по ходу технологического процесса включает в себя следующие этапы [5]:

1. Структурирование состояний процесса и составление словарей ситуаций и признаков.

2. Отбор (группировка) информативных признаков для каждой ситуации и нормирование шкал признаков.

3. Формулировка вербальных правил распознавания возможных критических и нештатных ситуаций относительно групп признаков. Кластеризация признаков.

4. Выбор типа моделей распознавания.

5. Разработка моделей и процедур, преобразующих первичные параметры процесса в признаки ситуаций.

6. Разработка модели распознавания и баз знаний для диагностики и выработки рекомендаций.

В основу структурирования оперативной технологической информации положим выделение режимов и ситуаций. Режим, как понятие технологическое, определяется вектором значений технологических параметров в данный момент времени. Ситуация с точки зрения управления – объективная или субъективная оценка некоторого подмножества параметров процесса (эндогенных факторов), некоторого подмножества параметров внешней среды (экзогенных факторов) и связей между ними, имеющих место в настоящее время и являющихся результатом развития управляемого процесса во времени и пространстве. Анализ и классификация ситуаций основывается на анализе технологических режимов.

Выделим два основных режима протекания технологического процесса:

- 1) *Нормальный режим* (штатная ситуация), когда процесс протекает в рамках технологических установок и переменные состояния находятся в интервале $[(X_i)_0 ; (X_i)_{кр}]$, где $(X_i)_0$ – номинальные значения переменных, $(X_i)_{кр}$ – критические значения переменных, при которых возможно возникновение критического режима;

2) *Критический режим* (критическая ситуация), когда требуется принятие незамедлительных мер по недопущению перехода в нештатную ситуацию, переменные состояния находятся в интервале $[(X_i)_{кр}; (X_i)_{нс}]$, где $(X_i)_{нс}$ – значения переменных, при которых практически неизбежно возникновение нештатных ситуаций.

Сформируем перечень (словарь) классов ситуаций, подлежащих диагностике:

1. Ситуация нормальная (штатная).
2. Растет риск ухода диаметра слитка за пределы допуска (критическая ситуация).
3. Уход диаметра за пределы допуска (срыв процесса, нештатная ситуация).
4. Растет риск увеличения плотности дислокаций (критическая ситуация).
5. Вероятность недопустимого увеличения плотности дислокаций превысила заданный порог (срыв процесса, нештатная ситуация).
6. Растет риск замедления или остановки процесса кристаллизации (критическая ситуация).
7. Растет риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск разложения кристалла (критическая ситуация).
8. Неисправность в АСУТП или возникновение более двух критических ситуаций одновременно (нештатная ситуация).

На основании анализа процесса выращивания был сформирован первичный набор параметров, необходимых для диагностирования критических режимов и нештатных ситуаций и принятия оперативных решений в технологических процессах выращивания монокристаллов арсенида галлия и кремния.

Технические параметры:

1. Масса загрузки, кг.
2. Заданный диаметр цилиндрической части слитка, мм.
3. Средняя длина извлекаемого слитка, мм.
4. Среднее время плавления загрузки, час.
5. Среднее время выдержки расплава, час.
6. Среднее время подбора условий затравления, час.
7. Среднее время формирования верхнего конуса, час.
8. Среднее время, затрачиваемое на вытягивание цилиндрической части слитка длиной l_k (в мм), час.
9. Средняя потребляемая мощность основного нагревателя на всех стадиях процесса, кВт.
10. Средняя потребляемая мощность фоновго нагревателя на всех стадиях процесса, кВт.
11. Максимальное допустимое время, в течение которого тигель может выдерживать воздействие высокой температуры без выделения вредных примесей в расплав, час.
12. Текущая измеренная масса слитка, кг.
13. Текущее значение уставки температуры основного нагревателя, °С.
14. Текущее значение температуры основного нагревателя, °С.
15. Текущее значение уставки температуры фоновго нагревателя, °С.
16. Текущее значение температуры фоновго нагревателя, °С.

17. Номинальная скорость перемещения штока затравки, мм/мин.

18. Текущее значение уставки диаметра слитка.

19. Текущее значение диаметра слитка, мм.

20. Массив значений распределения температур в расплаве, °С.

21. Массив значений распределения температур в слитке, °С.

22. Массив значений температурных градиентов в зоне фронта кристаллизации.

23. Массив значений температурных градиентов в слитке.

24. Текущий уровень расплава в тигле, %.

Технико-экономические параметры:

25. Средняя цена готовой продукции (ГП), грн./кг.

26. Средняя цена материала, идущего на повторную переплавку, грн./кг.

27. Цена электроэнергии, грн./кВт-час.

28. Средняя стоимость ресурсов (кроме электроэнергии, потребляемой нагревателями), расходуемых в единицу времени в процессе выращивания, грн./час.

Приведенный перечень параметров наглядно иллюстрирует сложность и взаимосвязанность процессов, происходящих при выращивании монокристаллов. Это не позволяет иметь единое, полное и формализованное описание технологического процесса в целом. Целесообразно произвести декомпозицию пространства параметров и пространств состояний с тем, чтобы минимизировать неопределенность при распознавании, упростить и унифицировать структуру моделей, отображающих различные аспекты процесса выращивания.

Из приведенного перечня можно выделить группу параметров, непосредственно относящихся в режиму процесса выращивания и прямо или косвенно влияющих на появление критической ситуации (13...23). Остальные величины учитываются при принятии решения по выходу из нештатных ситуаций [6].

Выбор типа моделей распознавания. Для определения возможности применения методов статистики при решении задач диагностики процесса выращивания были проанализированы данные о процессах выращивания монокристаллов арсенида галлия и кремния за 2010–2013 годы. Эти данные представляют собой электронные таблицы фиксируемых измерительной системой значений параметров температуры (температура основного и фоновго нагревателей) и значений диаметра слитка. Кроме того, имеются данные о значениях градиентов температуры по оси слитка. Данные были сгруппированы по диаметрам выращиваемых монокристаллов и по материалу (GaAs и Si).

Ретроспективный анализ данных показал следующее:

1. Коэффициент однородности выборок составляет 34...39 %.
2. Наблюдается гетероскедастичность остатков при попытках построения регрессионной модели.
3. Выборки содержат «аномальные» значения, которые с большой частотой совпадают со срывами процесса выращивания.
4. Имеются значительные пропуски данных, ко-

торые невозможно восстановить традиционными методами.

Таким образом, решение задач диагностирования процесса выращивания наталкивается на проблему неопределенности, которая заключается в практическом отсутствии статистической устойчивости в имеющихся экспериментальных данных. Это ставит под сомнение степень доверия к моделям, построенным методами теории вероятностей и классической математической статистики;

Учитывая данные обстоятельства, можно сделать вывод, что для формализации соответствующей модели распознавания и прогнозирования имеет смысл использовать модульные иерархические нечеткие или гибридные нейронечеткие модели. Для адекватного отображения знаний необходимо определить "области компетенции" отдельных моделей, внутри которых дисперсия ошибки сравнительно стабильна. Для разработки указанных моделей необходимо подготовить базу знаний (БЗ) на основе той информации, которой располагают разработчики. Для представления иерархической связи моделей логического вывода, могут использоваться нечеткие множества более высоких порядков. Это удобно для построения рекомендаций по коррекции процесса выращивания.

Следующим этапом является группировка параметров по ситуации. Под группировкой мы понимаем разделение однородной совокупности наблюдений на группы по какому-либо диагностическому признаку. Группировка позволяет устранить аномальные наблюдения, выделить интервалы значений параметров и использовать экспертные оценки влияния признаков на распознавание классов.

Первоначально каждый параметр был рассмотрен экспертами на качественном уровне. Результаты группировки первичных параметров показаны в табл. 1.

Таблица 1 – Группировка первичных параметров

Ситуация	Первичный параметр
Штатная ситуация	13...23
Растет риск ухода диаметра слитка за пределы допуска	18, 19
Уход диаметра за пределы допуска	18, 19
Растет риск увеличения плотности дислокаций	23
Вероятность недопустимого увеличения плотности дислокаций превысила заданный порог	23
Растет риск замедления или остановки процесса кристаллизации	23
Растет риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск двойникования, риск разложения кристалла	23
Неисправность в АСУТП	13...19

Некоторые параметры необходимо рассмотреть в совокупности и в динамике протекания процесса выращивания. Так, параметры 18 и 19 (текущее значение диаметра слитка и текущее значение уставки диаметра слитка) необходимо объединить в один

параметр – “текущее значение отклонения диаметра слитка от уставки”. Параметры 13 и 14 необходимо объединить в параметр “текущее значение отклонения температуры основного нагревателя от уставки”. Параметры 15 и 16 – в параметр “текущее значение отклонения температуры фоновго нагревателя от уставки”.

Далее, необходимо учесть, что для диагностики процесса важны не текущие значения некоторых параметров, а тенденции их изменения как признаки перехода в другой режим или ситуацию. К таким признакам относятся: тенденция отклонения диаметра слитка; тенденция отклонения температуры основного и фоновго нагревателей; тенденция отклонения скорости вытягивания.

Разработка моделей и процедур интерпретации значений параметров в значения признаков. После формирования пространства первичных параметров разработчик решает, как именно реализовать преобразование измеренных значений в значения признаков. В данном случае на первом этапе осуществляется нормирование параметров к интервалу [0,1] при помощи линейного преобразования $x' = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$. При этом значения x_{min} и x_{max} по каждому параметру задает эксперт. Ниже приведены модели и процедуры интерпретации значений параметров и их градации на уровне лингвистических оценок (термов) – тем самым формируем пространство признаков.

Отклонение текущего значения диаметра слитка. Для отслеживания тенденции воспользуемся скользящим средним на предыдущих временных интервалах измерения. Модель выбрана линейной вида:

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

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.

Термы: “малое”, “среднее”, “большое”.

Отклонение температуры основного нагревателя. По аналогии с выражением (1) запишем:

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

Термы: “малое”, “среднее”, “большое”.

Отклонение температуры фоновго нагревателя.

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

Термы: “малое”, “среднее”, “большое”.

Отклонение скорости вытягивания:

$$X4 = (\Delta V[t-2] + \Delta V[t-1] + \Delta V[t])/3. \quad (4)$$

Термы: “малое”, “среднее”, “большое”.

Радиальный градиент (на уровне +1 см над уровнем расплава). Значения признака в термах: “низкий”; “пониженный”; “нормальный”; “повышенный”; “высокий (превышение порога).

Осевой градиент на фронте кристаллизации. Значения признака в термах: “низкий”, “нормальный”.

Осевой градиент в слитке (на уровнях от 1 до

12 см). Для измерения выбирается максимальное значение G_{zmax} из массива градиентов и нормируется. Значения признака в терминах: “нормальный”, “высокий”.

Неравномерность осевого градиента в слитке (на уровнях от 1 до 12 см). Для измерения неравномерности производим следующие действия:

1. Вычисляется средний градиент на длине слитка (1...12 см) G_{z0} .

2. Максимальное значение осевого градиента соотносится со средним значением и вычисляется значение неравномерности (unevenness):

$$U = \left(1 - \frac{G_{z0}}{G_{zmax}}\right) \cdot \quad (5)$$

Полученная величина фиксируется в терминах: “нормальная”, “высокая”.

Для каждого из указанных лингвистических значений должны быть определены кластеры – базовые диапазоны четких значений и их центры.

С учетом предыдущих результатов составим правила <комплексы признаков> →<диагностируемые ситуации>:

1. ЕСЛИ <Отклонение диаметра малое>И<Отклонение температуры ОН малое>И<Отклонение температуры ФН малое><Отклонение скорости вытягивания малое>И<Радиальный градиент на уровне +1 в норме>И<Осевой градиент на ФК в норме>И<Осевой градиент в слитке в норме>И<Неравномерность осевого градиента в слитке в норме>ТО <Ситуация штатная>.

2. ЕСЛИ <Отклонение диаметра слитка среднее>И <Отклонение температуры ОН среднее> И <Отклонение температуры ФН среднее> ТО <Растет риск ухода диаметра за пределы допуска (критическая ситуация)>.

3. ЕСЛИ <Отклонение диаметра слитка большое>ТО <Диаметр за пределами допуска (нештатная ситуация)>

4. ЕСЛИ <Радиальный градиент на уровне +1 повышенный> ИЛИ

<Осевой градиент в слитке большой>ИЛИ <Неравномерность осевого градиента в слитке высокая>ТО <Растет риск увеличения плотности дислокаций (критическая ситуация)>

5. ЕСЛИ <Радиальный градиент на уровне +1 высокий> И <Осевой градиент в слитке большой>И <Неравномерность осевого градиента в слитке высокая>ТО <Вероятность недопустимого увеличения плотности дислокаций превысила заданный порог (срыв процесса, штатная ситуация)>.

6. ЕСЛИ< Осевой градиент на фронте кристаллизации низкий>ТО <Риск замедления или остановка процесса кристаллизации (критическая ситуация)>

7. ЕСЛИ <Радиальный градиент на уровне +1, низкий >ТО<Растет риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск разложения кристалла (критическая ситуация)>

8. ЕСЛИ <Отклонение диаметра слитка среднее (+)>И (<Отклонение температуры основного нагре-

вателя среднее (+)>ИЛИ <Отклонение температуры фонового нагревателя среднее (+)>ИЛИ <Отклонение скорости вытягивания среднее (+)>) ИЛИ <Отклонение диаметра слитка среднее (-)>И (<Отклонение температуры основного нагревателя среднее (-)>ИЛИ <Отклонение температуры фонового нагревателя среднее (-)>ИЛИ <Отклонение скорости вытягивания среднее (-)>) ТО <Неисправность в измерительной системе АСУТП (нештатная ситуация)>. (Тенденция увеличения/уменьшения диаметра на фоне стабильных или увеличивающихся/уменьшающихся показаний температуры Тон, Тфн, или скорости вытягивания говорит о неисправности АСУТП).

Кластеризация признаков. На следующем этапе была проведена итерационная человеко-машинная процедура одномерной кластеризации физических параметров-признаков с целью первичного определения границ и центров диапазонов, определяющих влияние параметра на распознавание класса ситуации. Процедура состоит из следующих этапов:

1. Устанавливается исходное значение границы кластера. Каждый эксперт уточняет это значение, в результате чего образуется диапазон значений $x_{bmin} < x_b < x_{bmax}$.

2. Для полученного диапазона $[x_{bmin}, x_{bmax}]$ производится расчет среднего значения в качестве новой исходной границы кластера. Если полученное значение отличается от предыдущего менее, чем на заданную величину ε , то граничная точка найдена. Иначе переход к п. 1.

Значение ε выбирается таким, чтобы границы кластеров перекрывались. Это обеспечивает непрерывность нечетких функций оценки признака.

Далее по такой же методике были определены координаты центров кластеров. Результаты кластеризации (с учетом нормирования) приведены в табл. 2.

Разработка модели распознавания и базы знаний для диагностики и выработки рекомендаций. В качестве основы выбрана нечеткая модель Мамдани, которая хорошо зарекомендовала себя в решении подобных задач [7]. Кластеризация признаков и предварительная формулировка правил обеспечивают полную прозрачность модели. На первом этапе разработки построим функции принадлежности для указанных выше лингвистических переменных. Основные условия, которым должна удовлетворять «разумно построенная система функций принадлежности», описываются в [7]. Приведем их с краткими пояснениями. Обозначим: m – количество термов в лингвистической переменной $ЛП_i$, i – порядковый номер признака, j – порядковый номер терма.

1. Условие нумерации: термы можно перенумеровать слева направо:

$$\forall j = 1, \dots, m-1, a_{ij} \leq a_{i,j+1}; b_{ij} \leq b_{i,j+1}. \quad (6)$$

2. Граничные условия для функций принадлежности:

$$\mu_{i1}(a_i) = \mu_{im}(b_i) = 1 \cdot \quad (7)$$

3. Условия нормальности:

$$\forall j = 1..m_i, \max_{[a_{ij}, b_{ij}]} \mu_{ij}(x_i) = 1 \quad (8)$$

4. Непрерывность функций принадлежности. Имеется в виду, что не существует точек на шкале универсального множества, где все функции принадлежности лингвистической переменной $ЛЛ_i$ равны нулю (рис. 1).

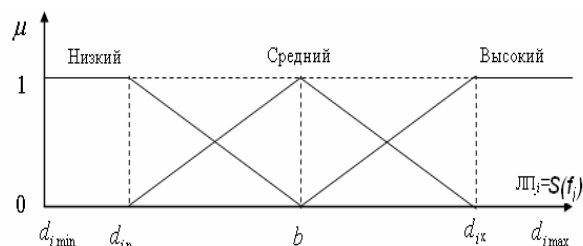


Рисунок 1 – Пример распределения функций принадлежности

Таблица 2 – Границы и координаты центров кластеров

Наименование признака	Наименование кластера	Левая граница	Центр	Правая граница
Отклонение диаметра (абс. величина)	Малое	0,0	0,14	0,33
	Среднее	0,30	0,44	0,56
	Большое	0,50	0,78	1,0
Отклонение температуры основного нагревателя	Малое	0,0	0,15	0,36
	Среднее	0,32	0,51	0,66
	Большое	0,63	0,82	1,0
Отклонение температуры фонового нагревателя	Малое	0,0	0,15	0,34
	Среднее	0,30	0,52	0,72
	Большое	0,68	0,87	1,0
Отклонение скорости вытягивания	Малое	0,0	0,16	0,35
	Среднее	0,31	0,51	0,67
	Большое	0,62	0,76	1,0
Радиальный градиент на уровне +1 см	Низкий	0,0	0,11	0,23
	Пониженный	0,20	0,31	0,43
	Нормальный	0,41	0,51	0,65
	Повышенный	0,62	0,71	0,78
	Высокий	0,69	0,88	1,0
Осевой градиент на фронте кристаллизации	Низкий	0,0	0,23	0,55
	Нормальный	0,51	0,81	1,0
Осевой градиент в слитке	Нормальный	0,0	0,27	0,59
	Высокий	0,65	0,81	1,0
Неравномерность Осевого градиента в слитке	Нормальная	0,0	0,24	0,57
	Высокая	0,58	0,79	1,0

Построение матрицы знаний для диагностики процесса выращивания. Базу знаний в модели Мамдани можно трактовать как разбиение пространства влияющих факторов на зоны с размытыми границами, внутри которых функция отклика принимает нечеткое значение. Количество таких нечетких зон равно числу правил.

В процессе кластеризации было обнаружено, что плотности разных кластеров одного и того же признака различны. Другими словами, различна информативность признаков по отношению к каждому правилу.

Согласно [8] признак $x_n, 1 \leq n \leq N$ полезен в совокупности с другими $N-1$ признаками, если при его исключении из набора $X(x_1...x_N)$ происходит уменьшение средней вероятности ошибки распознавания [8]. На основании этого утверждения индивидуализируем значимость посылок antecedентов для каждого правила.

В данном случае это не вызовет противоречий между отдельными правилами, так как у каждого правила своя «область компетенции».

С учетом того, что выбраны треугольные ФП и их базовые подмножества уже сформированы экспертами, введём весовые коэффициенты w^{ji} для каждой посылки в каждом правиле. Значения коэффициентов ограничим диапазоном [0,5...1]. Единичное значение эквивалентно стопроцентной значимости посылки.

Разработанная модель нечеткого вывода после вычисления значений функций принадлежности $\mu^{d_j}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ входного вектора X^* для всех значений $d_j, j=1..m$ выходной переменной выглядит следующим образом:

$$\bigcup_{p=1}^k \bigcap_{i=1}^n [(x_i = A_i^{jp}) w_i^{jkp}] \rightarrow D \quad (9)$$

При этом логические операции И (\wedge) и ИЛИ (\vee) над значениями функций принадлежности заменяются операциями \min и \max :

$$\begin{aligned} \mu(a) \wedge \mu(b) &= \min[\mu(a), \mu(b)], \\ \mu(a) \vee \mu(b) &= \max[\mu(a), \mu(b)]. \end{aligned}$$

Построим структуру БЗ диагностики ситуаций. Если количество признаков ситуаций n , а число ситуаций m , то с учетом введения коэффициентов w^j база нечетких знаний в общем виде может быть представлена в виде табл. 3.

Элемент A_i^{jp} , находящийся на пересечении i -го столбца и j_p -й строки соответствует лингвистической оценке параметра x_i в строке матрицы знаний с номером j_p . Лингвистическую оценку A_i^{jp} выбираем

из терм-множеств, которые соответствуют переменной x_i , описывающей состояние процесса т.е. $A_i^{jp} \in T_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, k_j}$. Адаптация и дообучение разработанной модели возможны путем изменения весовых коэффициентов w^j . Множество ситуаций S , ранжированных по степени критичности, предъявляется ЛППР вместе с соответствующими рекомендациями. ЛППР принимает окончательное решение о выборе управляющих воздействий.

Таблица 3 – Структура базы нечетких знаний диагностики

№ п/п	Входные переменные и коэффициенты индивидуальной настройки посылок								Выходная переменная
	x_1		x_2		... x_i ...		x_n		
1_1	A_1^{11}	w_1^{11}	A_2^{11}	w_2^{11}	A_i^{11}	w_i^{11}	A_n^{11}	w_n^{11}	d_1
1_2	A_1^{12}	w_1^{12}	A_2^{12}	w_2^{12}	A_i^{12}	w_i^{12}	A_n^{12}	w_n^{12}	
...	
1_{k1}	$A_1^{1k_1}$	$w_1^{1k_1}$	$A_2^{1k_1}$	$w_2^{1k_1}$	$A_i^{1k_1}$	$w_i^{1k_1}$	$A_n^{1k_1}$	$w_n^{1k_1}$	
...
j_1	A_1^{j1}	w_1^{j1}	A_2^{j1}	w_2^{j1}	A_i^{j1}	w_i^{j1}	A_n^{j1}	w_n^{j1}	d_j
j_2	A_1^{j2}	w_1^{j2}	A_2^{j2}	w_2^{j2}	A_i^{j2}	w_i^{j2}	A_n^{j2}	w_n^{j2}	
...	
j_{kp}	$A_1^{jk_p}$	$w_1^{jk_p}$	$A_2^{jk_p}$	$w_2^{jk_p}$	$A_i^{jk_p}$	$w_i^{jk_p}$	$A_n^{jk_p}$	$w_n^{jk_p}$	
...
m_1	A_1^{m1}	w_1^{m1}	A_2^{m1}	w_2^{m1}	A_i^{m1}	w_i^{m1}	A_n^{m1}	w_n^{m1}	d_m
m_2	A_1^{m2}	w_1^{m2}	A_2^{m2}	w_2^{m2}	A_i^{m2}	w_i^{m2}	A_n^{m2}	w_n^{m2}	
...	
m_{km}	$A_1^{mk_m}$	$w_1^{mk_m}$	$A_2^{mk_m}$	$w_2^{mk_m}$	$A_i^{mk_m}$	$w_i^{mk_m}$	$A_n^{mk_m}$	$w_n^{mk_m}$	

Определение степени критичности ситуации.

На первом этапе процедуры определения критичности для каждого признака x_i из правила, определяющего ситуацию s , фиксируем значение x_i как расстояние от центра кластера номинального режима до текущей рабочей точки. На втором этапе вычисляется степень критичности как взвешенная сумма значений признаков. В результате получим степень критичности данной ситуации:

$$K_s = \sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i x_i, \quad (10)$$

где α_i – весовой коэффициент значимости признака с точки зрения критичности ситуации. Для оценивания значимости признаков в конкретной ситуации использовался метод парных сравнений.

На третьем этапе для лингвистической оценки критичности ситуации вводится переменная с тремя значениями: «Малая» (в центре кластера номинального режима); «Средняя» – в центре кластера критического режима; «Высокая» – от критической зоны и выше. Нечеткая шкала оценки степени критичности приведена на рис. 2.

После распознавания ситуации и оценки её критичности СППР должна выдать рекомендацию по коррекции хода процесса выращивания.

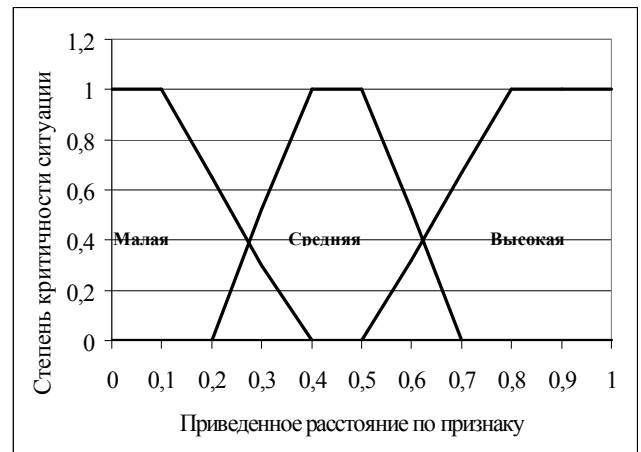


Рисунок 2 – Лингвистические оценки степени критичности ситуаций

Построение базы знаний для поддержки принятия решений. Рассмотренные выше ситуации имеют две категории – критические и нештатные. В данной работе рассматривается коррекция критических ситуаций основываются на анализе множества технических и технико-экономических показателей и здесь не рассматриваются.

Сформулюємо рекомендації оператору в критических ситуаціях.

1. *Ростет риск ухода диаметра за пределы допуска.*

Как было показано [1–3], причины ухода диаметра связаны либо с изменением тепловых условий, либо с неконтролируемым изменением величины скорости вытягивания затравки. Если изменение диаметра вызвано отказом элементов АСУТП, силовых элементов питания нагревателя или привода подъема затравки, то ситуация быстро перейдет в нештатную. Однако даже при исправных системах контроля и управления по мере роста монокристалла и изменении уровня расплава хаотически изменяются конвекционные потоки в расплаве и это невозможно учесть в “классических” моделях и алгоритмах управления. Поэтому оператору необходимо вначале проверить стабильность температур нагревателей и скорости вытягивания и, если эти параметры в норме, скорректировать уставку температуры одного или обоих нагревателей. Коррекция уставки должна соответствовать измеренному уходу температуры за последний период измерения. Это объясняется тем, что скорость и самопроизвольного, и принудительного изменения температуры зависит только от тепловой постоянной нагревателя [1].

Таким образом, можно сформулировать рекомендацию в ситуации 2 – “Ростет риск ухода диаметра за пределы допуска”: <“Проверить стабильность Тон и Тфн. При необходимости изменить уставку Тон или Тфн на величину ухода температуры с обратным знаком”>.

2. *Ростет риск увеличения плотности дислокаций (критическая ситуация).*

Причинами увеличения плотности дислокаций могут быть:

а) повышенный радиальный градиент на уровне +1 см. Причиной повышения радиального градиента в слитке на уровне герметизатора может быть заниженная (в данных тепловых условиях) температура фонового нагревателя, который находится непосредственно под слоем герметизатора. Таким образом, при сигнале “Радиальный градиент на уровне +1 *повышенный*” необходимо изменить уставку температуры ФН в сторону увеличения на 5...10%.

б) Большой осевой градиент в слитке или высокая неравномерность осевого градиента в слитке. Неблагоприятная ситуация по осевым градиентам в слитке является следствием неправильного размещения теплового экрана, окружающего остывающий слиток. Исправить ситуацию путем изменения температуры нагревателей можно примерно в 20 % случаев. Можно рекомендовать уменьшить температуру основного нагревателя на 5–10 %. В любом случае подсистема должна зарегистрировать данное событие, чтобы технологи произвели расчет оптимальных размеров и положения теплового экрана для данного диаметра слитка и данной конструкции теплового узла. Таким образом, сформулируем рекомендацию в ситуации 2: “Неправильная экранировка слитка. Уменьшить температуру основного нагревателя на 5–10 %.”

3. *Риск замедления или остановка процесса кристаллизации.* Причина – низкий осевой градиент на фронте кристаллизации. Так же, как и в предыдущей ситуации, чаще всего причиной является неправиль-

ная экранировка слитка. Однако в данном случае рекомендуется умеренно повышать температуру основного нагревателя. Формулировка рекомендации: “Неправильная экранировка слитка. Увеличить температуру основного нагревателя на 5–10 %.”

4. *Ростет риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск двойникования, риск разложения кристалла.* Причины – низкий радиальный градиент на уровне +1 см. Устраняется ситуация уменьшением температуры ФН.

Формулировка рекомендации: “необходимо изменить уставку температуры ФН в сторону увеличения на 5–10 %.”

Для определения структуры базы знаний по выдаче рекомендаций сформулируем правила выдачи каждой рекомендации (*advise*). Номера рекомендаций совпадают с номерами ситуаций:

A2. ЕСЛИ <Ростет риск ухода диаметра за пределы допуска (S₂)>, ТО <Проверить стабильность Тон и Тфн. При необходимости изменить уставку Тон на величину ухода температуры с обратным знаком>.

A4.1. ЕСЛИ <Ростет риск увеличения плотности дислокаций (S₄)> И <Повышен радиальный градиент на уровне +1 см> ТО <Изменить уставку температуры ФН в сторону увеличения на 5–10 %>.

A4.2. ЕСЛИ <Ростет риск увеличения плотности дислокаций (S₄)> И <Большой осевой градиент в слитке> ИЛИ <Высокая неравномерность осевого градиента в слитке> ТО <Неправильная экранировка слитка. Уменьшить температуру основного нагревателя на 5–10 %>.

A6. ЕСЛИ <Ростет риск замедления или остановки процесса кристаллизации (S₆)> ТО <Неправильная экранировка слитка. Увеличить температуру основного нагревателя на 5–10 %>.

A7. ЕСЛИ <Ростет риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск двойникования, риск разложения кристалла (S₇)> ТО <Необходимо изменить уставку температуры ФН в сторону увеличения на 5–10 %>.

Правила A2, A6, A7 имеют элементарную структуру. Правила A4 имеют ссылки на термины из базы знаний по диагностике процесса. Это означает, что мы имеем дело с иерархической базой знаний.

Оператор принимает и реализует рекомендации, если степень критичности ситуаций средняя или высокая. Если у двух ситуаций степень критичности одинакова, то необходимо выдать рекомендации с учётом совместного появления ситуаций. Появление трех и более критических ситуаций само по себе является нештатной ситуацией и свидетельствует о полной разладке системы мониторинга и управления. Поскольку рекомендации по выходу из нештатных ситуаций здесь не рассматриваются, приведем с пояснениями матрицу попарной совместности критических ситуаций (табл. 4).

Здесь: 1 – совместное появление состояний вызывает эквивалентные рекомендации; 0 – совместное появления состояний не вызывает противоречивых рекомендаций; A24 – совместное появление состояний S2 и S4 требует выдачи особой рекомендации; A26 – совместное появление состояний S2 и S6 требует выдачи особой рекомендации; A46x5 – совместное появление состояний S4, S6 и признака x5 требует выдачи особой рекомендации.

Таблиця 4 – Матриця совместимости состояний

	S2	S4	S6	S7
S2	1	A24	A26	0
S4		1	A46x5	1
S6			1	1
S7				1

A24: Уставку ОН не изменять. Уставку ФН увеличить на 5%, если диаметр слитка стабильно растёт. Уставку ФН уменьшать на 5 %, если диаметр слитка стабильно уменьшается.

A26: Если $K_{S2} > K_{S6}$, то при уменьшении диаметра слитка уменьшить скорость вытягивания на 5 %, а при увеличении диаметра увеличить скорость вытягивания на 5 % .

Если $K_{S2} \leq K_{S6}$, то при уменьшении диаметра слитка уменьшить скорость вытягивания на 5 %, а при увеличении диаметра увеличить скорость вытягивания на 5 %. В любом случае увеличить на 5 % уставку температуры ОН.

A46x5: Увеличить на 5 % уставку ФН.

База знаний по выдаче рекомендаций с учетом совместного появления ситуаций показана в табл. 5.

Таблиця 5 – База нечетких знаний по выдаче рекомендаций

№ п/п	Входные переменные		Коэффициент критичности	Формулировка рекомендации
1	S1	1	$K_{S1} = \text{''малая''}$	<Ситуация штатная>
2	S2	1	$K_{S2} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Проверить стабильность Тон и Тфн. При необходимости изменить уставку ОН или ФН на величину ухода температуры с обратным знаком>
3	S4	$x_5 = \text{''повышенный''}$	$K_{S3} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Изменить уставку температуры ФН в сторону увеличения на 5–10 %>
4	S4	$x_7 = \text{''высокий''}$	$K_{S4} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Неправильная экранировка слитка. Уменьшить температуру основного нагревателя на 5–10%>
	S4	$x_8 = \text{''высокая''}$		
5	S7	1	$K_{S7} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Необходимо изменить уставку температуры ФН в сторону увеличения на 5–10 %>
6	S6	1	$K_{S6} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Неправильная экранировка слитка. Увеличить температуру основного нагревателя на 5–10 %>
7	$S2 \wedge S4$	1	$K_{S2} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$ $K_{S4} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Уставку ОН не изменять. Уставку ФН увеличить на 5 %, если диаметр слитка стабильно растёт. Уставку ФН уменьшать на 5 %, если диаметр слитка стабильно уменьшается>
8	$S2 \wedge S6$	1	$K_{S2} > K_{S6}$	<При уменьшении диаметра уменьшить на 5 % скорость вытягивания, а при увеличении диаметра увеличить на 5 % скорость вытягивания>
9	$S2 \wedge S6$	1	$K_{S2} \leq K_{S6}$	<При уменьшении диаметра уменьшить на 5 % скорость вытягивания, а при увеличении диаметра увеличить на 5 % скорость вытягивания. В любом случае увеличить на 5 % уставку ОН>
10	$S4 \wedge S6$	$x_5 = \text{''повышенный''}$	$K_{S4} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$ $K_{S6} = \text{''средняя''} \vee \text{''высокая''}$	<Увеличить на 5 % уставку ФН>

Для настройки модели и её проверки была разработана программа-прототип СППР для коррекции хода процесса выращивания арсенида галлия. Настройка модели произведена следующим образом. Эксперты (4 чел.), независимо друг от друга, составили таблицу ситуаций, в которую каждый из них внес по пять примеров для каждой из восьми ситуаций. Таким образом, генеральная совокупность составила 160 примеров. Для настройки использовалось 80 примеров и еще 80 – для последующего тестирования модели. Подбор значений весовых коэффициентов производился при помощи эволюционного алгоритма, который генерирует популяцию решений, реализует мутацию, отбор и уточнение координат решений-лидеров. Обучающие и тестовые данные размещены в текстовом файле. На рис. 3 показаны результаты испытаний модели до обучения (значения всех весовых коэффициентов равны 1) и после обучения. Видно, что после обучения модель заметно лучше распознает ситуации.

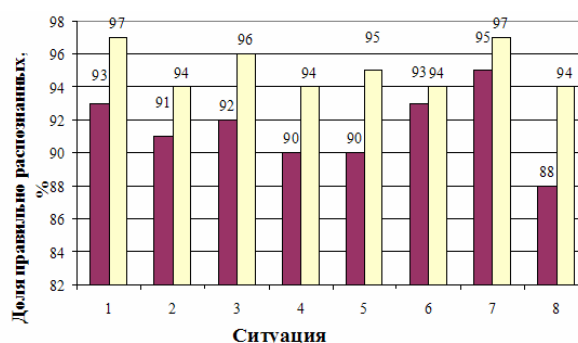


Рисунок 3 – Доля распознанных ситуаций до обучения модели и после обучения

ВЫВОДЫ. Разработана нечеткая адаптивная модель для диагностики неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов полупроводников и выработки рекомендаций по коррекции хода процесса выращивания.

В предложенной модели для настройки правил

используются индивидуальные весовые коэффициенты функций принадлежности по каждому признаку и по каждому правилу. Значения весовых коэффициентов оптимизированы для каждого правила при помощи эволюционного алгоритма. Дополнительно в модели оценивается степень критичности ситуации.

Извлечены знания из полученной от экспертов информации, произведена группировка параметров относительно классов ситуаций. Разработана иерархическая база знаний для диагностики и выдачи рекомендаций по коррекции хода процесса выращивания монокристаллов, включающая модуль реагирования на одновременное возникновение двух или более критических ситуаций одновременно.

Разработана программа, реализующая функции СППР при выращивании монокристаллов арсенида галлия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суздаль В.С. Архитектура АСУ ТП получения монокристаллов из расплава // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – Вып. 119. – С. 15–18.
2. Riedling K. Autonomous liquid encapsulated Czochralski (LEC) growth of single crystal GaAs by “intelligent” digital control // *Journal of Crystal Growth*. – 1988. – № 89. – PP. 435–446.

ADVERSE SITUATION DIAGNOSTICS IN THE PROCESS OF SINGLE-CRYSTAL SEMICONDUCTORS GROWING

I. Shevchenko, S. Grishakov, N. Dymchenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: athome050@yandex.ru

This article presents a fuzzy adaptive model, developed by the authors, to detect adverse situations in the process of semiconductor single-crystals growing. The developed model uses, for rules customization, individual weight coefficients of membership functions for each factor or rule. The weight coefficients values were optimized for each rule through the evolutionary algorithm. In addition, the model estimates the criticality level of a situation. It was gained the knowledge from the experts' information, and all the parameters were grouped according to the situation class. As a research result the hierarchical knowledge base was created to troubleshoot and make recommendations as for correction of the single-crystal growth running. This database comprises the module responding to two and more critical situations occurring simultaneously.

Key words: critical situations diagnostics, fuzzy adaptive model, situation criticality level, hierarchical knowledge base, operational decision support.

REFERENCES

1. Suzdal, V.S., (2000), “Architecture of APCS for single-crystals melt-growing”, *Visnyk NTU “KhPI”*, iss. 119, pp. 15–18.
2. Riedling, K. (1988), “Autonomous liquid encapsulated Czochralski (LEC) growth of single crystal GaAs by “intelligent” digital control”, *Journal of Crystal Growth*, no. 89, pp. 435–446.
3. Oksanich A.P., Petrenko, V.R., Pritchyn, S.E. (2007), “Architecture and functionality of two-level control system for growing silicon from the melt”, *Radioelectronics and Informatics*, no. 4 (39), pp. 49–53.
4. Oksanich A.P., Shevchenko, I.V., Krasnopolskaya, Yu.A. (2010), “Method and neural-net model for calculation of temperature field of the melt during the growing by the Czochralski method”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 1(72), part 1, pp. 54–60.

3. Архитектура і функціональність дворівневої системи управління вирощуванням злитків кремнію / А.П. Оксанич, В.Р. Петренко, С.Э. Притчин // *Радиоэлектроника та інформатика*. – 2007. – № 4 (39). – С. 49–53.

4. Метод и нейросетевая модель расчёта температурного поля расплава в процессе выращивания методом Чохральского / А.П. Оксанич, И.В. Шевченко, Ю.А. Краснопольская // *Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского*. – 2010. – Вып. 1/2010 (72), част. 1. – С. 54–60.

5. Гаврилова Т.А., Червинская К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. – М.: Радио и связь, 1992. – 200 с.

6. Оптимизация решений при возникновении нештатных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов кремния / А.П. Оксанич, В.Р. Петренко, Л.Г. Шепель // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2007. – Вип. 3/2007 (44), част. 2. – С. 164–168.

7. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия, 2006. – 193 с.

8. Файзильберг Л. Математические методы оценки полезности диагностических признаков: монография. – К.: Освіта України, 2010. – 152 с.

5. Gavrilova, T.A., Chervinslaya, K.R. (1992), *Izvlachenie i strukturirovanie znaniy dlia ekspertnykh system* [Knowledge acquisition and structuring for expert systems], Radio i Sviaz, Moscow, Russia.

6. Oksanich A.P., Petrenko, V.R., Shepel, L.G. (2007), “Decision optimization in the case of contingency in the single-crystal growing process”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 3(44), part 2, pp. 164–168.

7. Rutkovskaya, D., Pilinskii, M., Rutkovskii, L. (2006), *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems], Goriachaya liniya, Moscow, Russia.

8. Fainzilberg, L. (2010), *Matematicheskie metody otsenki poleznosti diagnosticheskikh priznakov* [Mathematical estimation methods for the diagnostic features utility], monograph, Osvita Ukrainy, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла 24.01.2014.