

Левыкин В.М., Шевченко И.В.

Модель специализированной системы поддержки принятия решений для коррекции процесса выращивания монокристаллов

Разработана модель специализированной системы поддержки принятия решений для коррекции процесса выращивания монокристаллов. Структура системы содержит модели – источники данных для мониторинга процесса и иерархическую модель поиска решений.

The model of the purpose-oriented decision-support system for single-crystals growth adjustment is developed. The structure of the system comprises models that are the data providers for the process monitoring and hierarchy model of solution finding.

Розроблено модель спеціалізованої системи підтримки прийняття рішень для корекції процесу вирощування монокристалів. Структура системи містить моделі – джерела даних для моніторингу процесу та ієрархічну модель пошуку рішень.

Введение. Современный этап создания специализированных систем поддержки принятия решений (СППР) для диагностики и мониторинга параметров технологических процессов основан на методах, использующих принципы вычислительного интеллекта [1, 2]. Интеллектуальные СППР характеризуются способностью к накоплению опыта и адаптации к изменениям в особенностях решаемой задачи. Они не только позволяют менее квалифицированному персоналу проводить диагностирование с приемлемой надежностью, но и помогают опытным специалистам детально анализировать ситуацию и повышать эффективность принимаемых решений. Все сказанное в полной мере относится к проблеме информационной поддержки процесса управления качеством процесса выращивания монокристаллов по методу Чохральского. Несмотря на постоянное совершенствование соответствующих автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) до сих пор оставались нерешенными проблемы мониторинга температурных полей расплава и слитка из-за невозможности прямых измерений температуры в этих зонах. После разработки и внедрения специализированной системы мониторинга температурных полей в указанных зонах стало возможным разработать специализированную СППР «Советчик мастера» для помощи мастеру–технологу, контролирующему процесс выращивания. К такой СППР предъявляются следующие требования:

- использование временных зависимостей в базе знаний и учет временного фактора при поиске решения;

- поиск компромисса между точностью получаемого решения и затратами вычислительных ресурсов на его получение;
- получение достоверного результата при возможной неполноте исходных данных;
- выбор наиболее существенных событий, имеющих место в динамике технологического процесса;
- рациональная расстановка приоритетов решаемых задач.
- предупреждение возникновения нештатных ситуаций (НС) и корректный выход из критической ситуации.

Под нештатной ситуацией понимаем такую, которая возникает в ходе технологического процесса, не решается без вмешательства оператора и связана с необходимостью выбора конкретной альтернативы управления в условиях дефицита времени при наличии информации о состоянии объекта, критериев и решающих правил.

Постановка задачи

СППР реализует комплекс задач поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания для обеспечения мастера–технолога советами по ведению процесса выращивания на разных стадиях. В комплекс задач входят:

- анализ данных и идентификация ситуаций;
- формирование истории мониторинга температурных полей;
- обучение системы на примерах, генерация и верификация правил для выработки советов;
- выработка советов мастеру–технологу.

В процессе реализации данного комплекса задач СППР есть получателем выходного информационного потока от подсистемы мониторинга температурных полей, от АСУ ТП процесса выращивания и от технико-экономической подсистемы (ТЭП) АСУ предприятия. Входной информационный поток комплекса задач содержит массивы значений температуры в заданных точках расплава и слитка, массивы осевых и радиальных градиентов температуры в подкристалльной области и в слитке, значения скоростей вращения тигля и затравки, а также необходимые для принятия решений значения технико-экономических параметров производства. Выходной информационный поток представляет собой комплекс рекомендаций для мастера-технолога по выходу из критических и нештатных ситуаций.

Принципы функционирования СППР должны обеспечивать:

- сопряжение СППР с АСУ ТП и АСУ предприятия;
- рациональный выбор языка представления и обработки знаний о процессе выращивания с учетом как физических, так и технико-экономических параметров и их взаимосвязей;
- возможность пополнения базы знаний, обучения и дообучения системы;
- универсальность СППР в рамках рассматриваемых технологических процессов.

Цель данной статьи – разработка структуры СППР, ее модели, а также концепции распознавания ситуаций в ходе процесса выращивания.

Задача принятия решений

Задачу принятия решений по коррекции хода процесса выращивания необходимо рассматривать как задачу коррекции бизнес-процесса. Это связано с тем, что при выращивании монокристалла могут возникать критические и нештатные ситуации. При анализе и устранении НС приходится учитывать технико-экономические показатели, такие, как время, прошедшее с начала процесса, энергетические затраты, средний коэффициент выхода в готовую продукцию, средний коэффициент безвозвратных потерь материала, средняя цена готовой

продукции и др. Эти параметры должны учитываться при поиске решений в пространстве состояний производственного процесса [3].

Вербально задача формулируется следующим образом: задается некоторое подмножество начальных и конечных состояний и множество правил преобразования состояний. Требуется найти такую последовательность правил, которая позволяет управляемому объекту перейти из текущего состояния в желаемое или допустимое. Если искомая последовательность должна удовлетворять требованиям оптимальности, то имеем задачу поиска оптимального решения, если – требованиям допустимости, то задачу поиска удовлетворительного решения [2].

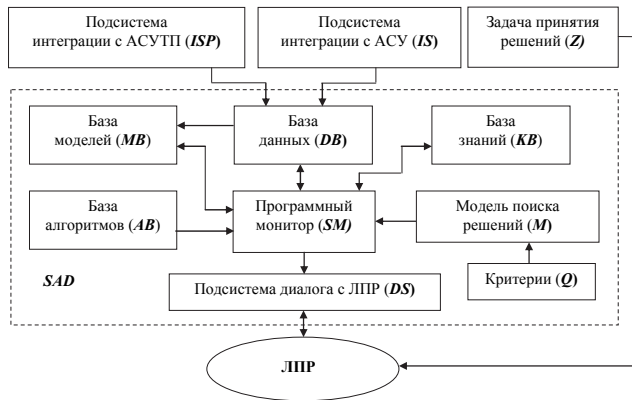
Задача принятия решений определяется моделью:

$$Z = \langle DM, T, S, S_d, S_0, S_k, P, Q \rangle, \quad (1)$$

где DM – модель проблемной ситуации в предметной области; T – множество моментов времени приема данных; S – множество текущих состояний (ситуаций); $S_d \in S$ – подмножество возможных (допустимых) состояний; $S_0 \in S$ – подмножество начальных состояний; $S_k \in S$ – подмножество конечных или целевых состояний; $P: S \rightarrow S$ – конечное множество правил преобразований. Каждое правило $P_i \in P$ есть функцией, реализующей отображение $P_i: S_i \rightarrow S$, где S_i – область определения P_i ; Q – множество критериев качества решения.

Структура СППР

Структура специализированной СППР (ССППР), показанной на рисунке, содержит все необходимые функциональные узлы, включая базу данных, базу знаний, базу моделей, базу алгоритмов, модель поиска решений и программный монитор, реализующий информационную технологию поддержки принятия оперативных решений. Отличительная черта ее структуры – назначение и состав базы математических моделей, позволяющие воспроизводить физические процессы в тепловом узле, осуществлять мониторинг процесса выращивания и, в конечном счете, реализовать информационную технологию управления качеством процесса выращивания.



Структура СППР

Модель структуры СППР

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 лицом, принимающим решение (ЛПР).

Основополагающими элементами интеллектуальных СППР есть модели представления проблемных ситуаций в предметной области, модели поиска решений, а также средства организации диалогового взаимодействия с пользователем (экспертом, ЛПР) и средства связи с другими информационными системами. Проблемная ситуация может описываться посредством некоторого выделенного множества признаков или посредством некоторой структуры, позволяющей отражать различные связи (отношения) между элементами проблемной области. В качестве таких структур можно использовать любые известные модели знаний. Чаще всего используются системы продукций или фреймовые структуры.

Модель поиска решений определяет допустимые преобразования ситуаций и набор стратегий применения этих преобразований. Для

применения СППР в режиме *советчика*, модели представления проблемной ситуации и поиска решения должны периодически корректироваться по результатам предыдущих процессов выращивания монокристаллов.

Модель поиска решений, предназначенную для решения задачи коррекции хода процесса выращивания, формально определим набором

$$MS = \langle DM, P_n, ST_n, P_{ген}, ST_{ген}, F_{ST}, F_P, F_S, F_M \rangle, \quad (3)$$

где *DM* – дескриптивная модель, описывающая проблемную ситуацию на языке высказываний нечеткой логики с учетом тенденций изменения ситуации; *P_n*, *ST_n*, – начальные множества продукций и стратегий, возможно пустые в исходном состоянии модели; *P_{ген}*, *ST_{ген}* – множества, используемые для генерации (пополнения) множеств *P_n* и *ST_n*; *F_{ST}* – правила выбора стратегий поиска *ST_n* и *ST_{ген}*; *F_P* и *F_S* – правила пополнения множеств *P_n* и *ST_n* в процессе поиска решения, *F_M* – правила модификации модели (расширения алфавита, модификации множеств *P_{ген}* и *ST_{ген}*, правил выбора, пополнения и т.д.). Множества *P_{ген}* и *ST_{ген}* могут быть заданы неявно, например, посредством некоторой системы ограничений.

Модель базы знаний *KB*, кроме отношений проблемной области, содержит метазнания, необходимые для быстрого переключения (выбора) необходимого фрагмента основной БЗ и генерации совета для пользователя СППР. В СППР используется гибридная нейро-нечеткая модель представления знаний, структура которой имеет следующий вид:

$$KB = \langle WNM, WND, RT, SR \rangle, \quad (4)$$

где *WNM* – весовые коэффициенты нейронной сети, выбирающей кластер одного из состояний процесса выращивания; *WFD* – матрицы нечетких продукций, позволяющих распознавать ситуацию с учетом одного из критериев решения задачи в данном кластере пространства состояний процесса; *RT* – таблица правил для интерпретации выходов и определения риска нарушения оптимальных условий выращивания путем выбранных критериев; *SR* – набор рекомендаций для выхода из критических и нестандартных ситуаций.

База моделей *MB* содержит:

- набор моделей для решения функциональных задач мониторинга и анализа температурных полей расплава и слитка, определения температуры фонового нагревателя и моделирования процесса кристаллизации, краткосрочного прогноза значения диаметра слитка. Эти модели служат для получения данных, необходимых для принятия решения;

- набор моделей взаимосвязи первичных данных (исходного набора признаков) и критериев оценки ситуации. В качестве критерия выступает мера близости нечеткой оценки текущей ситуации и нечеткого описания шаблонной критической (нештатной) ситуации.

База данных *DB* содержит данные следующих классов:

- исходные данные для тепловых расчетов, в том числе заданный диаметр слитка, масса загрузки, диаметр тигля, скорости вращения затравки и тигля, значения теплотехнических характеристик материалов и т.д.;

- первичные данные, полученные от физических датчиков, в том числе температура основного нагревателя, мощность, потребляемая фоновым нагревателем, температура расплава под слоем герметизатора, текущая масса слитка, скорость вертикального перемещения затравки и штока тигля и др.;

- массивы значений температуры в заданных точках расплава и слитка, массивы осевых и радиальных градиентов температуры в подкристалльной области и в слитке, значения скоростей вращения тигля и затравки;

- данные мониторинга температурных полей в течение процесса;

- данные в виде формулировок советов для мастера–технолога, выданных в течение процесса.

Системный монитор *SM* – основной программный модуль СППР, осуществляющий диспетчеризацию процесса анализа ситуации и генерации рекомендаций, запуск и остановку всех функциональных модулей СППР.

База алгоритмов представлена набором:

$$AB = \langle AK, AГП, АО, АУ, АД, AГВП, АФИ, АП, АВС \rangle, \quad (5)$$

где АК – алгоритмы кластеризации пространства первичных признаков ситуации; АГП – алгоритмы генерации примеров; АО – алгоритмы обучения нейронных сетей на примерах; АУ – алгоритмы управления коллективом нейронных сетей, распознающих ситуацию; АД – алгоритмы диагностики состояния процесса выращивания; АГВП – алгоритмы генерации и верификации правил для выработки советов; АФИ – алгоритмы формирования истории мониторинга температурных полей и истории генерации советов; АП – алгоритмы получения краткосрочного прогноза значения диаметра слитка; АВС – алгоритмы выработки советов мастеру–технологу. Эти алгоритмы реализованы в программном обеспечении СППР в виде функциональных модулей, работающих под управлением программы–монитора.

Подсистема интеграции с АСУ ТП – *ISP* описывается моделью:

$$ISP = \langle XM, XS \rangle, \quad (6)$$

где *XM* – множество входов подсистемы, отображающих данные мониторинга температурных полей в процессе выращивания; *XS* – множество входов подсистемы, отображающих данные, получаемые от существующей АСУ ТП.

Множество *XM* определяется набором:

$$XM = \{T_L, T_S, FF, GR, GZ\}, \quad (7)$$

где *T_L* – массив распределения температур в расплаве; *T_S* – массив распределения температур в кристалле; *FF* – направление прогиба фронта кристаллизации; *GR* – массив температурных градиентов по радиусу слитка; *GZ* – массив температурных градиентов по оси слитка;

Множество *XS* определяется вектором:

$$XS = \{T_{OH}, T_{ФН}, V_{Ш}, m_C, L_M, DD_C, L_C\}, \quad (8)$$

где *T_{OH}* – температура основного нагревателя; *T_{ФН}* – температура фонового нагревателя; *V_Ш* – скорость перемещения штока тигля; *m_C* – текущая масса слитка; *L_M* – уровень расплава в тигле, %; *DD_C* – текущее отклонение диаметра слитка; *L_C* – текущая длина слитка, %.

Подсистема интеграции с подсистемой ТЭП АСУ предприятия – *IS* описывается набором

$$IS = \langle XE, MR \rangle, \quad (9)$$

где *XE* – множество входов подсистемы, отображающих технико-экономические показатели процесса выращивания; *MR* – множество

запросов СППР на получение текущих значений экономических показателей.

Подсистему диалога с ЛПП – DS можно представить набором:

$$DS = \langle L(RD, SR(D_S, D_C)), MS, A, P_A \rangle, \quad (10)$$

где L – язык диалога; RD – правила формирования сообщений; SR – множество стандартных сообщений; D_S – множество заключений, определяющих текущее состояние процесса выращивания; D_C – множество советов по коррекции температурного режима выращивания; MS – стандартное сообщение, имеющее вид:

$$MS = \langle TM, SM, R, PM, \rangle, \quad (11)$$

где TM – время сообщения, соотнесенное с временем процесса выращивания; SM – ключевая тема сообщения; R – ссылка на предыдущее сообщение PM ; A – ответ пользователя; P_A – процедура выдачи советов.

Принципы диагностики состояния процесса выращивания

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 учетом 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. Этап выделения ситуаций наиболее ответственный. Взаимосвязанность и непрерывность всех протекающих в оборудовании процессов порождает ряд проблем, решение которых сложно формализовать. Анализ и классификация ситуаций основывается на анализе технологических режимов.

Выделим два основных режима протекания технологического процесса:

- нормальный (штатный) режим, когда процесс протекает в рамках технологических уставок и переменные состояния находятся в интервале $[(X_i)_0; (X_i)_{кр}]$, где $(X_i)_0$ – номинальные значения переменных, $(X_i)_{кр}$ – критиче-

ские значения переменных, при которых возможно возникновение критического режима;

- критический режим, когда требуется принятие незамедлительных мер по недопущению перехода в штатную ситуацию, переменные состояния находятся в интервале $[(X_i)_{кр}; (X_i)_{нс}]$, где $(X_i)_{нс}$ – значения переменных, при которых возможно возникновение штатных ситуаций.

Для распознавания режимов и определения ситуаций в общем случае необходимы следующие действия:

- формирование списка параметров, определяющих режимы и ситуации, т.е. составление словаря признаков;

- определение шкалы измерения признаков X и необходимости их нормирования;

- формирование списка S полных описаний возможных критических и штатных ситуаций относительно системы признаков X с указанием вероятностей их возникновения p и степени критичности k , т.е. составление алфавита классов, подлежащих распознаванию;

- выбор или разработка критериев оценки экономической целесообразности принятия решения в случае возникновения штатной ситуации.

В процессе решения задачи распознавания ситуации в соответствии с выбранными шкалами признаков определяются расстояния $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ между неизвестной ситуацией s^* и классами ситуаций из алфавита $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$; формируется подмножество $S' \subset S$ ситуаций, до которых расстояния $\{l_i\}$ минимальны (с использованием нечеткой логики или пороговых значений).

Множество ситуаций S' , ранжированных по степени критичности или вероятности возникновения, предъявляется ЛПП вместе с соответствующими советами. ЛПП принимает окончательное решение о выборе управляющих воздействий.

Для разработки СППР был сформирован перечень технологических и экономических параметров, необходимых для диагностирования критических режимов и штатных ситуаций в технологическом процессе выращивания монокристаллов арсенида галлия.

Технические параметры:

- масса загрузки, кг;
- диаметр цилиндрической части слитка, мм;
- средняя длина извлекаемого слитка, мм;
- среднее время плавления загрузки, час;
- среднее время выдержки расплава, час;
- среднее время подбора условий затравления, час;
- среднее время формирования верхнего конуса, час;
- среднее время, затрачиваемое на вытягивание цилиндрической части слитка длиной l_k (в мм), час;
 - среднее время формирования нижнего конуса, час;
 - коэффициент, учитывающий затраты времени на сплавление верхнего конуса (доля от затрат времени на его формирование);
 - коэффициент, учитывающий затраты времени на сплавление цилиндрической части слитка (доля от затрат времени на ее вытягивание);
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при плавлении, кВт; средняя потребляемая мощность основного нагревателя при выдержке расплава, кВт;
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при подборе условий затравления, кВт;
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при формировании верхнего конуса, кВт;
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при вытягивании цилиндрической части слитка, кВт;
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при формировании нижнего конуса, кВт;
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при сплавлении верхнего конуса, кВт;
 - средняя потребляемая мощность основного нагревателя при сплавлении цилиндрической части слитка, кВт;
 - средняя потребляемая мощность фонового нагревателя при вытягивании цилиндрической части слитка, кВт;
 - средняя скорость вытягивания цилиндрической части при «выборке расплава», мм/мин;
 - среднее время формирования нижнего конуса при «выборке расплава», час;
 - максимальное допустимое время, в течение которого тигель может выдерживать воздействие высокой температуры без выделения вредных примесей в расплав, час;
 - температура основного нагревателя, °C;
 - мощность фонового нагревателя, Вт;
 - скорость перемещения штока затравки, мм/мин;
 - текущая измеренная масса слитка, кг;
 - температура фонового нагревателя, °C;
 - текущий уровень расплава в тигле, %;
 - номер стадии процесса выращивания;
 - массив значений распределения температур в расплаве, °C;
 - массив значений распределения температур в слитке, °C;
 - массив значений температурных градиентов в зоне фронта кристаллизации;
 - массив значений температурных градиентов в слитке.

Технико-экономические параметры:

- средний коэффициент выхода в готовую продукцию;
- средний коэффициент безвозвратных потерь материала;
- средняя цена готовой продукции (ГП), грн/кг;
- средняя цена материала, идущего на повторную переплавку, грн/кг;
- цена электроэнергии, грн/кВт час;
- средняя стоимость ресурсов (ССР) (кроме электроэнергии, потребляемой нагревателем), расходуемых в единицу времени на этапе плавления, грн/час, включающая в себя следующие операции:
 - выдержка расплава, грн/час;
 - подбор условий затравления, грн/час;
 - формирование верхнего конуса, грн/час;
 - вытягивание цилиндрической части, грн/час;
 - формирование нижнего конуса, 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 провести декомпозицию пространства параметров и пространства состояний с тем, чтобы минимизировать неопределенность при распознавании, упростить и унифицировать структуру моделей, отображающих различные аспекты процесса выращивания. Для разработки комплекса унифицированных моделей наиболее пригодной представляется нейросетевая парадигма.

Согласно экспертным оценкам, алфавит классов, подлежащих распознаванию, содержит шесть классов ситуаций:

1. Растет риск увеличения плотности дислокаций (критическая ситуация).
2. Растет риск ухода диаметра за пределы допуска (критическая ситуация).
3. Уход диаметра за пределы допуска (срыв процесса, нештатная ситуация).
4. Вероятность недопустимого увеличения плотности дислокаций превысила заданный порог (срыв процесса, нештатная ситуация).
5. Риск повышения нестабильности значения радиуса слитка, риск двойникования, риск разложения кристалла (критическая ситуация).
6. Неисправность в измерительной системе АСУТП (срыв процесса, нештатная ситуация).

Можно выделить основные проблемы, присутствующие в задаче диагностирования состояния процесса выращивания:

- практическое отсутствие статистической устойчивости для имеющихся экспериментальных данных, что ставит под сомнение степень доверия к моделям, построенным методами теории вероятностей и классической математической статистики;

- недостаточная достоверность представления результатов прогнозирования хода процесса выращивания в виде детерминированных числовых данных или графиков, поскольку влияние некоторых факторов можно оценить только на вербальном уровне с определенной степенью истинности.

Учитывая данные обстоятельства, можно сделать вывод, что для формализации соответствующей модели распознавания и прогнозирования имеет смысл воспользоваться модульными иерархическими нечеткими или гибридными нейро-нечеткими моделями. Для адекватного отображения знаний необходимо определить *области компетенции* отдельных моделей, внутри которых дисперсия ошибки сравнительно стабильна.

Для оценивания информативности технологических параметров при распознавании указанных классов проводится экспертное оценивание, позволяющее сократить подпространства признаков для решения каждой задачи распознавания. Далее проводится кластеризация в полученных подпространствах и определение поверхностей отклика, отвечающих условиям распознавания указанных классов. Однако на полученных поверхностях отклика необходима более тонкая классификация для определения вероятности наличия критического режима и степени риска перехода в нештатную ситуацию. Для решения этой задачи используются вероятностные нейронные сети. Их выходы преобразуются нечеткими интерпретаторами в степень риска выхода из зоны нормального протекания процесса. Содержательно это формулируется как степень удаленности текущего

состояния процесса, от некоторого центра нечеткого кластера *штатной ситуации* и вычисляется через степень включения текущей нечеткой ситуации в нечеткую ситуацию нормального протекания процесса выращивания.

Заключение. Разработана модель специализированной СППР для коррекции процесса выращивания монокристаллов. Модель предусматривает интеграцию с АСУ ТП установки для выращивания монокристаллов и с подсистемой ТЭП АСУ предприятия. Это позволяет принимать решения по ходу процесса выращивания с учетом как физических, так и экономических показателей.

Предложена структура СППР, учитывающая специфику процесса принятия оперативных решений в реальном времени технологического процесса и содержащая модели-источники данных, воспроизводящие физические процессы в тепловом узле, что позволяет осуществлять мониторинг процесса выращивания и, в конечном счете, реализовать информационную технологию управления качеством процесса выращивания.

Разработана модель поиска решений (генерации рекомендаций) для мастера-технолога, основанная на распознавании ситуации и нечетком представлении проблемной ситуации и шаблонных критических и нештатных ситуаций с учетом тенденций их изменения.

1. *Методи обчислювального інтелекту в системах керування технологічними процесами феросплавного виробництва* / С.В. Бодяньський, Є.І. Кучеренко, О.І. Михальов та ін. – Дніпропетровськ: Нац. металургійна акад. України, 2011. – 420 с.
2. *Борисов В.А.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
3. *Тамм Б.Г., Пуусенн М.Э., Таваст Р.Р.* Анализ и моделирование производственных систем. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.

Поступила 12.12.2013

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

(Харьков, Кременчуг)

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

© Левыкин В.М., Шевченко И.В., 2014