

У ДК 658.012:681.324

И.А. Балакирева, ст. преподаватель; А.В. Скاتков, д-р техн. наук, проф.

г. Севастополь, Студгородок, СевНТУ, 99053

E-mail: kvt@sevgtu.sebastopol.ua

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

Рассматривается подход к построению интеллектуальной системы управления многономенклатурными технологическими процессами микроэлектроники, основанной на применении экспертного регулятора. Приводится структура экспертного регулятора на примере управления режимами настройки технологического процесса магнетронного напыления резистивных сплавов.

Создание новых технологий микроэлектроники предъявляет все более жесткие требования к качеству функционирования АСУ ТП. Совершенствование систем управления путем разработки новых типов исполнительных устройств дает определенный эффект. Однако значительная часть проблем, таких как повышение быстродействия, инвариантность к внешним воздействиям, изменение характеристик объекта управления и т.д., данным подходом решаются не в полной мере. Наиболее перспективным направлением совершенствования АСУ ТП является применение интеллектуальных технологий управления [1].

В данной статье рассматривается подход к решению поставленной задачи, в котором для управления режимами настройки технологическими процессами (ТП) микроэлектроники (МЭ) предлагается использовать экспертный регулятор (ЭР).

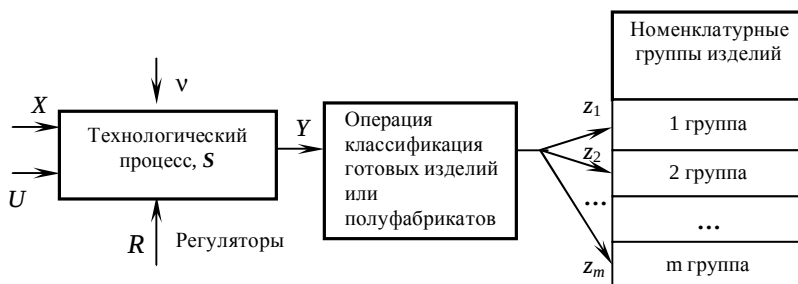
ЭР предназначен для активной самодиагностики объекта управления, которая включает в себя определение возможных отклонений в системе на основе анализа изменений параметров объекта. На ЭР возложены функции компенсации обнаруженных изменений, определения оптимальных значений управляющих воздействий на объект таким образом, чтобы система регулирования удовлетворяла целям управления.

Поскольку ЭР является составной структурной частью АСУ ТП, постановка задачи его разработки может быть осуществлена в рамках принятой терминологии и описания АСУ ТП [2]. Тем не менее, специфика многономенклатурных ТП МЭ определяет

функции и архитектуру применяемых ЭР. В связи с этим целесообразно определить особенности многономенклатурных ТП и цели управления, которые являются определяющими при разработке систем управления.

Воздействие случайных факторов на ход ТП МЭ определяет вероятностный характер результата производства, который заключается в следующем. Значения управляющих параметров $U = (u_1, u_2, \dots, u_l)$ на входе ТП определяют значения выходных параметров выпускаемых изделий $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$. Воздействие случайных факторов v на ход ТП приводит к разбросу значений выходных параметров относительно некоторого центра распределения – математического ожидания $m_Y(U)$ с соответствующей функцией плотности распределения $f(m_Y(U))$. Если область допустимого изменения выходных параметров изделий разбить на некоторое число подобластей с заранее определенными границами, то изделия, выпускаемые при фиксированном значении управляющих воздействий и соответствующим им центре распределения выходных параметров, можно отнести к различным группам в зависимости от значений этих параметров.

Подмножество выходных параметров ТП, по значениям которых определяется принадлежность изделий к той или иной группе, определим как классификационные признаки выпускаемых изделий. Тогда множество изделий, значения классификационных признаков которых принадлежат некоторой области с заранее определенными границами, представляют собой определенную номенклатурную группу. Разбив область изменения классификационных признаков изделий на группы, и определив границы этих групп, по завершению технологического цикла готовые изделия или полуфабрикаты можно отнести к той или иной номенклатурной группе в зависимости от значений классификационных признаков изделий. Математическая модель операции классификации изделий или полуфабрикатов (рисунок 1) выражает вероятностную связь между объемами выхода изделий в



номенклатурные группы и объемом запуска их на классификацию и представлена в виде системы уравнений:

$$z_i = p_i(X, U, v, S, R) \cdot N, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где z_i – объем выхода изделий в i -тую номенклатурную группу; $p_i(X, U, v, s, R)$ – вероятность выхода изделий в i -тую номенклатурную группу, в общем случае определяемая значениями входных параметров ТП, не подлежащих управлению – X , управляющими воздействиями – U , воздействиями случайных факторов v , состоянием самого ТП – S и значениями регулирующих воздействий – R ; N – объем запуска изделий на классификацию. В соответствии с (1) вероятность выхода изделий в ту или иную классификационную группу описывается законом распределения значений классификационных признаков изделий $f(m_Y(U))$ и определяется центром распределения – математическим ожиданием значений этих признаков.

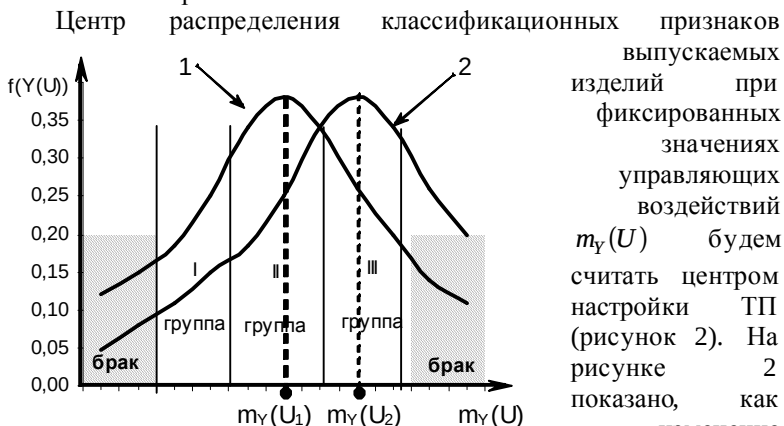


Рисунок 2 – Условные функции плотности распределения выходных параметров изделий при различных значениях математического ожидания $m_Y(U_1)$ и $m_Y(U_2)$

выпускаемых изделий при фиксированных значениях управляющих воздействий $m_Y(U)$ будем считать центром настройки ТП (рисунок 2). На рисунке 2 показано, как изменение положения математического ожидания

классификационного признака, определяемое значениями управляющих воздействий ТП, приводит к изменению вероятности выпуска изделий в ту или иную номенклатурную группу.

Таким образом, изменяя координаты центра настройки ТП в допустимой области варьирования классификационных признаков, можно осуществить выбор таких технологических режимов, при которых критерий качества функционирования ТП достигал бы своего экстремального значения. В данной работе решается задача

синтеза ЭР, применяемого для определения режимов функционирования ТП магнетронного напыления резистивных сплавов (ТП МН), при которых обеспечивается минимальный объем запуска изделий в производство при заданном номенклатурном плане. При этом математическая модель задачи имеет следующий вид

$$\sum_{j=1}^n P_j N \rightarrow \min \quad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} P_j N \geq q_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где P_j – интенсивность использования j -того центра настройки ТП, равная отношению интервала времени использования центра к

длительности ТП, причем $\sum_{j=1}^n P_j = 1$; N – объем запуска изделий в

производство; $P_j N$ – объем запуска изделий при использовании j -го режима; p_{ij} – вероятность выхода изделий в i -тую номенклатурную группу, изготовленных при j -том технологическом режиме; q_i – требуемый по плану объем выпуска изделий в i -тую

номенклатурную группу. Общий план выпуска изделий $Q = \sum_{i=1}^m q_i$.

При известных центрах настройки ТП $m_{Yj}, j = \overline{1, n}$ можно определить компоненты матрицы $P = (p_{ij})$, равные

$$p_{ij} = \int \dots \int_{G_i} f(Y|m_{Yj}) dY, \quad \text{где } f(Y|m_{Yj}) - \text{условная функция плотности}$$

совместного распределения классификационных признаков изделий Y с центром распределения m_{Yj} ; G_i – область изменения классификационных признаков изделий в i -той номенклатурной группе. При известной матрице вероятностей $P = (p_{ij})$ модель (2),

(3) представляет собой задачу линейного программирования. Для определения соотношения величин объема запуска изделий N в производство и планового задания Q вводится коэффициент запуска, равный $K_{зан} = N/Q$.

Система автоматизированного управления ТП МН изображена на рисунке 3. В соответствии с особенностями многономенклатурными ТП МЭ и спецификой решаемых задач управления, основные структурные элементы АСУ ТП имеют следующий смысл.

Регистрирующее устройство представляет собой операцию классификации (1) Z в соответствии со значениями классификационных признаков готовых изделий или полуфабрикатов. Номенклатурные группы изделий ТП МН формируются по значениям удельного поверхностного сопротивления и адгезии напыленных слоев [3]. Эти параметры являются классификационными признаками изделий ТП МН.

В качестве системы управления выступают оперативно-технические службы цеха, которые должны обеспечить выпуск изделий в соответствии с номенклатурным планом и наименьшими затратами при их выпуске Q . Параметр Q включает в себя сведения о плановом задании для производства: набор классификационных признаков, по которым формируется номенклатурный план; границы номенклатурных групп по каждому из признаков; объемы выпуска изделий в каждую из групп.

Интеллектуальное регистрирующее устройство – ЭР – в соответствии с алгоритмом управления A и реально существующей производственной ситуацией Q выдает рекомендацию об использовании определенного технологического режима W оператору-технологу, который в данном случае является лицом, принимающим решение (ЛПР). Параметр W представляет собой сведения о координатах центров настройки ТП МН для каждого из признаков, интенсивности использования центров настройки и значения управляющих воздействий, при которых обеспечивается выработанная ЭР настройка центров ТП.

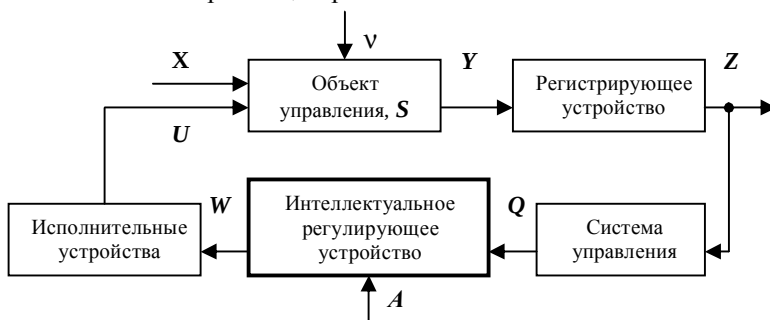


Рисунок 3 – Структура и функциональные связи АСУ ТП магнетронного напыления резистивных сплавов

Установка заданных технологических режимов осуществляется исполнительными устройствами. В системе управления ТП МН исполнительные устройства задают значения рабочего напряжения и температуру нагрева рабочей камеры магнетронной установки.

Основываясь на цели управления и учитывая специфику многономенклатурных ТП МЭ, определим архитектуру (рисунок 4) и этапы проектирования ЭР.

ЭР обладает базой знаний (БЗ), в которой представляются теоретические и эмпирические знания из предметной области

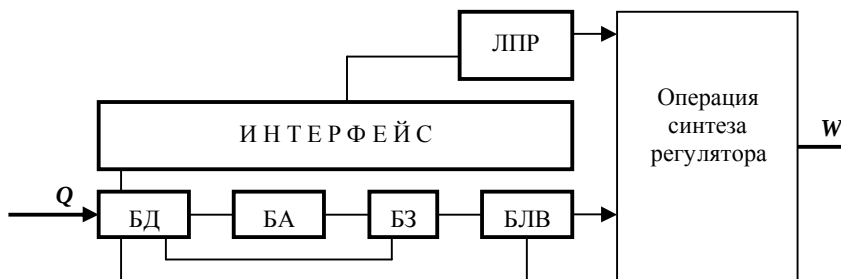


Рисунок 4 – Архитектура экспертного регулятора

теории автоматического управления и пленочной технологии. В базе данных (БД) ЭР хранятся текущие параметры объекта управления и характеристики процессов в системе – Q . На основе базы алгоритмов (БА) осуществляется обработка данных об объекте управления, определяются оптимальные параметры функционирования ТП. Экспертные заключения формируются в блоке логического вывода (БЛВ). В ЭР предусмотрен интерфейс с пользователем для организации интерактивного режима по наполнению базы знаний теоретическими сведениями в области регулирования, определению целей управления, формированию сообщений ЛПР о протекании ТП и объяснению принятых решений. На основании экспертных заключений БЛВ и решений ЛПР синтезируется регулятор в виде значений управляющих воздействий – W , и передается исполнительным устройствам АСУ ТП. Процесс проектирования и работы ЭР состоит из трех этапов.

На первом этапе решаются задачи проектирования системы управления: выбирается структура модели объекта, идентифицируются ее параметры, синтезируются параметры регулятора по заданному критерию качества. На втором этапе проводится обучение ЭР при изменении параметров объекта

управления – ТП, и формируются эмпирические знания о зависимости показателей качества от изменения показателей объекта и регулятора. После завершения этапов настройки и обучения осуществляется переход к рабочему режиму, в котором происходит непрерывное слежение за функционированием ТП и ЭР выполняет самодиагностику исполнительных устройств и их адаптацию.

В соответствии с указанным объемом функциональных задач ЭР должен располагать теоретическими знаниями о свойствах системы управления и эмпирическими, получаемыми в результате обучения путем анализа свойств объекта управления.

Теоретические знания представляют собой сведения о допустимых диапазонах изменения входных и выходных параметров ТП МН. Так же к ним относятся заключения, полученные на основе сформулированных и доказанных теорем об условиях существования решения задач определения оптимальных режимов настройки ТП МН, и определяются области эффективного использования алгоритмов параметрической идентификации и оптимизации режимов настройки ТП МН.

Эмпирические знания формируются в результате функционально-статистического анализа параметров ТП МН. Эти знания представляют собой параметры законов распределения удельного поверхностного сопротивления и адгезии напыленных слоев, зависимости значений классификационных признаков от величины управляющих воздействий в виде кусочно-линейных регрессионных моделей, результаты исследования характера изменения критерия качества ТП МН в зависимости от параметров решаемой задачи. Совокупность теоретических и эмпирических знаний позволяет формировать экспертные заключения о развитии ТП в виде рекомендаций ЛПР.

Реализации ЭР на основе программно-диалогового комплекса выполнена с учетом предложенных принципов. Результаты вычислительных экспериментов доказали практическую эффективность ЭР. В таблице 1 представлены результаты вычислений объема запуска изделий, определяемые до и после внедрения ЭР. Коэффициенты запуска определялись при формировании трех номенклатурных групп по значениям удельного поверхностного сопротивления и адгезии напыленных слоев для различных видов номенклатурных планов и коэффициентов равномерности планов:

$$K_q = \min\{q_i\} / \max\{q_i\}, i = \overline{1, m}.$$

Таблица 1 – Сравнительные результаты решения задачи минимизации коэффициента запуска до и после внедрения экспертного регулятора

Параметры задачи	Виды планов	Монотонный			Центрально-симметричный			Мультимодальный		
	K_q	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8
Коэффициент запуска	-	2,4	1,89	1,74	1,06	1,99	3,87	8,45	6,23	5,58
	ЭР	1,45	1,35	1,56	1,05	1,16	1,33	2,02	1,81	1,54

Установлено, что применение ЭР позволяет выбрать такие режимы настройки ТП МН, при которых снижается коэффициент запуска изделий в производство от 1,6 до 3,5 раз в зависимости от параметров решаемой задачи.

Предложенный подход к построению ЭР для ТП МН в дальнейшем может найти применение при проектировании АСУ ТП в условиях многономенклатурного производства изделий различных типов.

Библиографический список

1. Макаров И.М. Новое поколение интеллектуальных регуляторов / И.М. Макаров, В.М. Лохин // Приборы и системы управления. — 1997. — № 3. — С. 2–6.
2. Егоров С.В. Технологические процессы как объекты управления / С.В. Егоров. — М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1988. — 96 с.
3. Технология тонких пленок. Справочник [в 2-х т.]: Пер. с англ.; Под ред. М.Н. Елинсона, Г.Г. Смолка — М.: Сов. радио, 1977. — Т. 1. — 662 с., Т. 2. — 766 с.

Поступила в редакцию 6.09.2004 г.