

Инновационный подход к проектированию системы отказоустойчивого управления технологическим процессом вакуумного нанесения композиционных покрытий



М. Ю. Шестопалов,
к. т. н., доцент, проректор
по научной работе
e-mail: shestopalov_08@mail.ru



В. Т. Барченко,
к. т. н., доцент, зам. заведующего кафедрой
по научно-исследовательской работе,
кафедра электронных приборов и устройств



Л. Б. Пошехонов,
к. т. н., доцент, кафедра автоматики
и процессов управления



А. В. Беспалов
к. т. н., ассистент, кафедра систем
автоматического управления

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

На примере технологии вакуумного нанесения композиционных покрытий рассматривается класс многостадийных циклических технологических процессов и предлагается подход к организации системы отказоустойчивого управления. Предложен формализм описания диагностических признаков неисправностей с учетом степени влияния их последствий на процесс, сформирован состав функций супервизора диагностического уровня, накапливающего информацию о развитии неисправностей и формирующего свои составляющие в управляющих воздействиях с учетом результатов текущей диагностики блоков и подсистем, цены процесса и других факторов. Предложена структура системы отказоустойчивого управления рассматриваемым процессом.

Ключевые слова: технологический процесс, неисправность, диагностический признак, отказоустойчивое управление, супервизор, вакуумная установка, композиционные покрытия.

Введение

В современных условиях разрабатываются и уже существуют сложные системы и технологические процессы, для которых обычная их автоматизация с использованием традиционного подхода, обеспечивающего только требования динамики системы, уже не удовлетворяет современным требованиям [1]. Необходимо учитывать, кроме показателей качества поведения СУ, и такие факторы, как экономические риски, безопасность и др. Продолжительная работа

сложной системы в условиях сильных воздействий окружающей среды в виде сигнальных и параметрических возмущений приводит к зарождению и развитию неисправностей в функциональных блоках и подсистемах, что в конечном итоге может привести к отказу всей системы. Применение диагностики в плане обнаружения, локализации и прогнозирования неисправностей в оффлайн-режиме уже не удовлетворяет современным требованиям надежного функционирования системы. Требуется онлайн-диагностика и выработка управляющих воздействий на основе диагностической информа-

ции для оперативной нейтрализации неисправностей с целью успешного завершения процесса управления с минимальными потерями качества и ресурсов, в частности, временных. Такой подход означает создание толерантной к неисправностям системы, уменьшает влияние неисправностей и позволяет предотвратить отказ, который вызовет необратимые или катастрофические последствия [1–4].

1. Вакуумный процесс нанесения композиционных покрытий как объект автоматизации и диагностирования

Характерным примером подхода, требующего создания системы отказоустойчивого управления, является ТП нанесения различных композиционных покрытий в вакуумных установках [5–8]. Рассмотрим особенности этого ТП с позиций разработки системы отказоустойчивого управления.

1. Многообразие различных устройств и подсистем, функционирующих с жесткими требованиями к техническим характеристикам выполняемых функций.
2. Многостадийность процесса. ТП содержит множество стадий со своими функциями и целями, которые выполняются в строгой технологической последовательности. Имеется возможность выделить «главную» по назначению и по важности стадию процесса; такой стадией является собственно процесс нанесения покрытия. По отношению к нему остальные стадии, будучи необходимыми, являются по смыслу обеспечивающими технологию.
3. Цикличность процесса. Нанесение многослойных композиционных покрытий обуславливает многократное повторение процесса в цикле с инициализацией условий протекания каждого цикла.

Перечисленные особенности позволяют сформировать следующие основные позиции, которые должны быть положены в основу проектирования системы отказоустойчивого управления рассматриваемого ТП.

1. Неисправность какого-либо функционального устройства или подсистемы на главной стадии процесса будет рассматриваться как *отказ* всей системы, так как вызовет необратимые последствия и приведет к потере продукта. В связи с этим основной целью безотказного управления является предотвращение данной ситуации. Неисправности на остальных стадиях ТП могут быть обнаружены как зарождающиеся с привлечением их количественной оценки или как уже произошедшие. Для обеспечения толерантности к таким неисправностям необходимо предусмотреть возможность реконфигурации системы управления, а в случае невыполнения требований стадии — остановку процесса до начала главной стадии.
2. Нанесение многослойных покрытий повышает стоимость продукта от цикла к циклу и усугубляет последствия отказа на главной стадии очередного цикла. Это обстоятельство требует накопления диагностической информации от каждого цикла для анализа характера развития зарождающихся

Номер стадии	Назначение стадии
1	Откачка форвакуумным насосом собственного объема
2	Откачка форвакуумным насосом объема высоковакуумного насоса
3	Нагрев корпуса высоковакуумного насоса, создание высокого вакуума
4	Напуск атмосферы в технологическую камеру, регламентные работы
5	Откачка форвакуумным насосом объема технологической камеры
6	Создание в технологической камере высокого вакуума
7	Нагрев напыляемых подложек инфракрасными лампами
8	Напуск аргона и финишная ионная очистка камеры и подложек
9	Откачка продуктов очистки и создание в камере высокого вакуума
10	Напуск смеси аргона с азотом в технологическую камеру
11	Кондиционирование мишени и напыление слоя требуемой толщины
12	Охлаждение изделий и подсистем
13	Напуск атмосферного воздуха

неисправностей и формирования управляющих воздействий на систему с учетом цены возможного отказа.

Перечислим стадии ТП нанесения в модернизированной вакуумной установке УВН-71П1 тонкопленочных покрытий на основе соединений тантала [5] (табл. 1).

Выделена стадия 11 (табл. 1), которая как раз и является для данного ТП той главной стадией, отказ на которой требуется предотвратить действием диагностической системы.

2. Формализация описания процесса отказоустойчивого управления

На рис. 1 представлен граф многостадийного циклического процесса; вершинам графа соответствуют стадии ТП.

В случае обнаружения, оценивания и классификации неисправности на n -й стадии супервизор принимает решение о реконфигурации, а в случае отсутствия такой возможности — об остановке цикла. Если реконфигурация была предпринята (n -я стадия над выделенной частью графа) и позволила успешно завершить стадию, то осуществляется переход на стадию $n+1$. Если реконфигурация не нейтрализовала неисправность, то цикл также прерывается.

Пусть рассматриваемый ТП состоит из P циклов, каждый из которых содержит N стадий $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, где каждая стадия цикла описывается следующим набором параметров (признаков)

$$s_i = \{b_i, e_i, q_i\}. \quad (1)$$

Здесь $b_i \in \{0, 1\}$ — сигнал начала стадии, $e_i \in \{0, 1\}$ — сигнал окончания стадии, $q_i \in \{0, 1\}$ — сигнал об обеспечении требований к стадии. Для этих трех параметров:

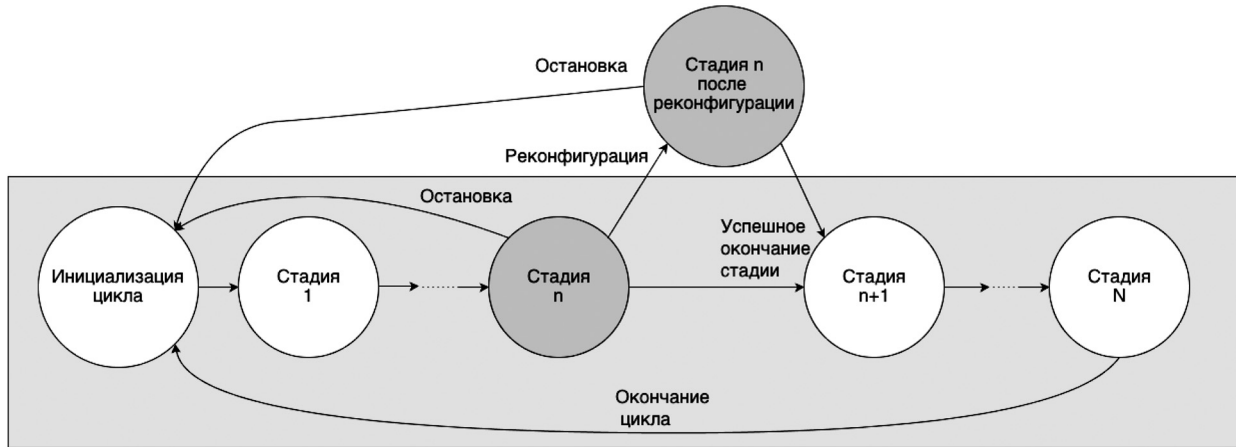


Рис. 1. Граф многостадийного циклического процесса

0 — невыполнение условия, 1 — выполнение условия. В случае идеальных условий (в номинальном режиме), сигнал окончания стадии и сигнал обеспечения требования стадии совпадают.

Эти три параметра связаны следующими соотношениями.

Если $b_i=0$, то $e_i=0$. Это условие определяет, что стадия не может закончиться, если она не началась. Если $b_i=0$, то $q_i=0$. Это условие определяет, что если стадия не началась, то ее требование еще не может быть выполнено. При $b_1=1, b_i=q_{i-1} \wedge e_{i-1} \wedge b_{i-1}$ для $i = 2, \dots, N$. Это означает, что следующая стадия может начаться, если предыдущая началась, если она закончилась, и ее требования выполнены.

Каждый цикл обладает некоторым набором требований Q к стадиям и условий окончания E . Каждое требование и условие рассчитывается на основе контролируемых (фазовых) переменных в ходе конкретной стадии.

Формирование диагностических признаков предлагается осуществить следующим образом.

Пусть существует процесс, описанный выше, который содержит в себе P циклов. На каждом p -м цикле диагностическая информация о стадиях представляет собой множество $DL_p = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}$, где вектор диагностической информации каждой i -й стадии определяется таким образом:

$$l_i = F_i, H_i, A_i, \begin{cases} F_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ik}\} \\ H_i = \{h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{il}\}, i = \overline{1, N}. \\ A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iz}\} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь F_i — множество нечетких диагностических признаков (НДП), принимающих значения на множестве вещественных чисел в ограниченном с двух сторон интервале. Интервал разделен на отрезки, которые соответствуют некоторому значению лингвистической переменной диагностического признака. Каждый НДП количественно характеризует состояние и степень эффективности некоторого прибора, на основе контролируемых переменных которого этот признак оценивается.

H_i — множество логических диагностических признаков (ЛДП), принимающих значения на множестве $\{0, 1\}$. Значение 1 сигнализирует о наличии неис-

правности, которая должна привести к завершению стадии и цикла с невыполненными требованиями к этой стадии.

A_i — множество четких диагностических признаков (ЧДП), принимающих значения на множестве целых чисел. Каждое значение ЧДП качественно характеризует некоторое состояние прибора на основе контролируемых переменных, по которым этот признак оценивается. Для каждой стадии формируется свой набор диагностических признаков.

На каждой стадии также рассчитываются диагностические функции $d_e(t), d_q(t), d_f(t)$, определяющие возможность окончания стадии и выполнение требования стадии:

$$\begin{aligned} d_q(t) &= f(F_p, H_p, A_p, Y(t), I(t)), d_e(t) = f(V_p, I(t), t), \\ d_f(t) &= f(V_p, F_p, A_p, d_e(t), t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $d_q(t)$ — диагностическая функция выполнения требования стадии, $d_e(t)$ — диагностическая функция остановки стадии, $d_f(t)$ — диагностическая функция оценки наличия зарождающейся неисправности, $Y(t)$ — функционал оценки работоспособности системы, $I(t)$ — векторная функция некоторой внешней информации, влияющей на диагностику (например, задающей цену процесса в зависимости от количества ранее нанесенных слоев).

Каждый диагностический признак в p -м цикле рассчитывается на основе контролируемых переменных стадии, уже оцененных диагностических признаков и информации предыдущего цикла:

$$DL_p \{f_{ji}\} = f(V_p, f_{j(r<i)}, DL_{p-1} \{f_{ji}\}, I(t), t), \quad (4)$$

$$DL_p \{h_{ji}\} = h(V_p, h_{j(r<i)}, DL_{p-1} \{h_{ji}\}, I(t), t), \quad (5)$$

$$DL_p \{a_{ji}\} = a(V_p, a_{j(r<i)}, DL_{p-1} \{a_{ji}\}, I(t), t), \quad (6)$$

где $DL_p \{...\}$ — некоторое множество диагностических признаков p -го цикла, r — индекс текущего диагностического признака в списке диагностических признаков данной стадии, $f_{j(r<i)}$ — все нечеткие диагностические признаки, вычисленные на этой стадии до текущего признака.

По нечетким диагностическим признакам F_i может быть рассчитан прогноз состояния $PL_{K+1}(f_{ji})$ на основе диагностической информации за P циклов:

$$PL_{K+1}(f_{ji}) = DL_K\{f_{ji}\} + \langle DL_n\{f_{ji}\} - DL_{n-1}\{f_{ji}\} \rangle_{n=2, \bar{K}}, \quad (7)$$

где $\langle \dots \rangle$ – усреднение по всем элементам.

На основе величин $Y(t)$ и $PL_{K+1}(f_{ji})$ оценивается целесообразность проведения технического обслуживания прибора для предотвращения назревающего отказа.

Функционал от всех доступных F_i определен следующим образом:

$$Y(t) = f(UF_p, I(t), PL_K(f_{ji})), \quad (8)$$

где $f(UF_p, I(t), PL_K(f_{ji}))$ – некоторое отображение $R^N \rightarrow R^1$. Функционал используется для оценки состояния процесса в целом, а не только эффективности работы отдельных блоков и подсистем. На основе значения функционала формируется управляющий сигнал остановки $u(Y(t))$, который объединяется с сигналом удовлетворения требования стадии. Реализация взаимодействия диагностической надстройки с системой для одной стадии представлена на рис. 2.

Стадия i передает диагностическому уровню фазовые переменные V . Вместе диагностический уровень и уровень управления формируют управляющие сигналы: $e(i)$ – сигнал об окончании i -й стадии от системы управления; $q(i)$ – сигнал о выполнении требования i -й стадии от системы управления; $d_e(i)$ – сигнал об окончании i -й стадии от системы диагностики; $d_q(i)$ – сигнал о выполнении требования i -й стадии

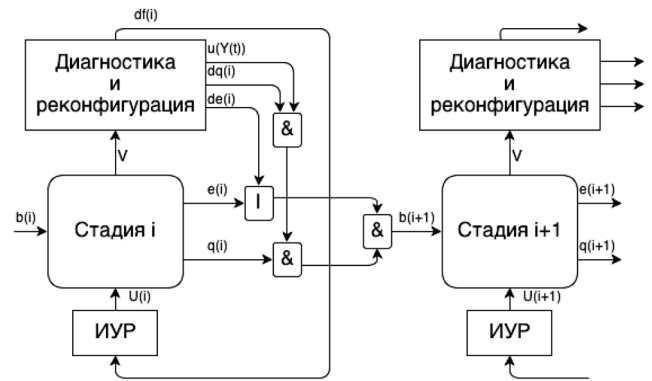


Рис. 2. Реализация формализма диагностики для одной стадии

от системы диагностики; $d_f(i)$ – сигнал о зарождении неисправности на i -й стадии от системы диагностики; $u(Y(t))$ – сигнал об остановке от диагностического функционала.

Объединение этих двоичных сигналов по правилам логического вывода дает возможность получить сигнал к началу следующей стадии $b(i+1)$ или дает управляющий сигнал исполнительному устройству реконфигурации (ИУР) для проведения реконфигурации.

В качестве реализации предложенного формализма системы отказоустойчивого управления предлагается следующая структура (рис. 3).

Диагностическая система вырабатывает управляющие сигналы для ТП в соответствии с результатами диагностики. Она состоит из двух уровней.

- уровень вычисления диагностических признаков (ДП) на стадиях цикла по формуле (3);

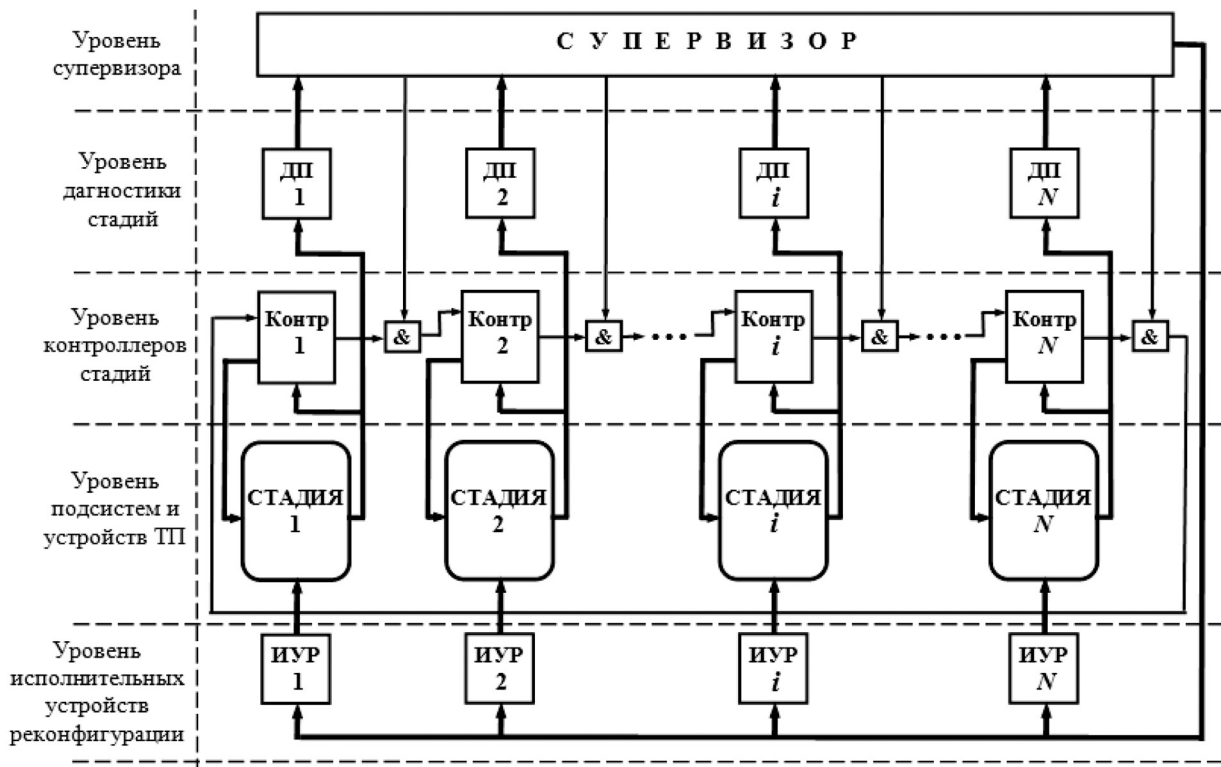


Рис. 3. Реализация формализма диагностики, настроенной над многостадийной системой

- супервизорный уровень. Оценка значения функционала по формуле (9).

На рис. 3 уровень вычисления ДП является переходным между процессом и супервизорным уровнем, на котором принимаются решения. На уровне вычисления ДП на каждой стадии формируется вектор признаков, значение которых может указывать на степень эффективности задействованных на стадии устройств, или говорить об их неисправности.

Супервизорный уровень обрабатывает полученные ДП и на основе анализа формирует собственные управляющие воздействия.

Управляющие сигналы уровня стадии формируются в соответствии с текущими значениями стадийных ДП. Если ДП указывают на то, что для каких-то устройств можно провести реконфигурацию в ходе стадии для того, чтобы удовлетворить ее требованиям, то вырабатывается сигнал, подающийся на ИУР неисправного прибора для проведения реконфигурации и поддержания его работоспособности (уровень исполнительных устройств реконфигурации).

Таким образом, супервизор вырабатывает управляющие сигналы трех уровней:

- управляющий сигнал уровня стадии,
- управляющий сигнал уровня ТП,
- управляющий сигнал уровня цикла.

Управляющие сигналы уровня ТП формируются в ходе выполнения стадий. На основе значений ДП и предыстории их изменений за предыдущие стадии и циклы вычисляются дополнительные сигналы окончания стадии и сигналы выполнения требования.

Управляющие сигналы уровня цикла формируются в соответствии с оценкой супервизорным уровнем динамики ДП в ходе предыдущих циклов.

Заключение

Описанный подход и формализм реализованы в программном комплексе моделирования системы отказоустойчивого управления вакуумным процессом нанесения композиционных покрытий.

Многие ТП подпадают под рассматриваемый класс многостадийных, циклических, в которых ряд стадий — подготовительные, а одна — по сути является главной операцией. Для таких ТП уместен предлагаемый подход, основанный на ранжировании неисправностей в зависимости от их последствий. Перечислим ряд характерных примеров такого класса ТП:

- производство металлов, где главной стадии собственно плавки сопутствуют множество предварительных и заключительных обеспечивающих технологии стадий,
- информационный процесс — сбор информации, ее сортировка, классификация, анализ и — главная стадия — выработка заключения на основе некоторой машины вывода,

- сложная медицинская операция с применением комплекса оборудования — многостадийный процесс с подготовкой и собственно главной стадией (например, трансплантацией органа), с заикливанием процесса, если одна бригада осуществляет несколько операций за смену.

Отказоустойчивое управление является необходимым современным условием организации подобных процессов.

Список использованных источников

1. Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов. Системы, толерантные к неисправностям, — инновационное направление в управлении сложными процессами//Иновации, № 7, 2012.
2. А. А. Алексеев, Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009.
3. M. Blanke, M. Kinnaert, M. Staroswiecki, J. Sroder. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. NY, NJ: Springer-Verlag, 2004.
4. R. Iserman. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY: Springer-Verlag, 2006.
5. В. Т. Барченко, Ю. А. Быстров, Е. А. Колгин. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб.: Энергоатомиздат, 2001.
6. В. Т. Барченко, К. В. Павлов, И. А. Сенчило, А. М. Смирнов, А. Б. Шкапин. Многофункциональная модульная автоматизированная установка для реализации процессов ионно-вакуумной обработки//Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб., Вып. 25., СПб.: СЗТУ, 2002.
7. В. Т. Барченко, С. Ю. Удовиченко. Плазменные эмиссионные системы. СПб.: ООО «Техномедиа», Изд-во «Элмор», 2008.
8. В. Т. Барченко, О. Л. Вересов, О. И. Гребнев, В. А. Груздев, В. Г. Залесский, А. А. Лисенков/Под общей ред. В. Т. Барченко. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливемыми катодами для ионно-плазменных технологий. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.

An innovative approach to the design of fault-tolerant process control vacuum deposition of composite coatings

M. Yu. Shestopalov, PhD, Vice-Rector for Research, ETU.

V. T. Barchenko, PhD, ETU.

L. B. Poshekhonov, PhD, ETU.

A. V. Bepalov, PhD, ETU.

On the example of technology vacuum deposition of composite coatings is considered a class of multistage cyclic processes and proposed approach to fault-tolerant control systems. We propose a formalism for the description of the diagnostic signs of failure, taking into account the degree of influence of their impact on the process, formed part of the diagnostic functions of the supervisor level, collecting information on the development and shaping of faults in their components and control actions in the light of current diagnostic blocks and subsystems, process rates, and other factors. The structure of a fault-tolerant control system under consideration process.

Keywords: process, the fault diagnostic feature, fault-tolerant management, supervisor, vacuum unit, the composite coatings.