

УДК 681.518.5+681.5

М. Ю. Шестопалов, Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Моделирование систем отказоустойчивого управления технологическими процессами

Рассматриваются вопросы разработки систем отказоустойчивого управления классом многостадийных технологических процессов циклического действия. Модели таких процессов формируются с учетом специфики образования и развития неисправностей на стадиях и циклах процесса. Ранжирование способов получения и использования диагностической информации обуславливает иерархический характер моделей и различие в способах нейтрализации неисправностей и предотвращения отказов.

Многостадийные технологические процессы, неисправности, отказоустойчивое управление, модели, вакуумный процесс нанесения композиционных покрытий

Современные требования к техническим процессам делают необходимой разработку так называемых толерантных систем, способных в процессе функционирования производить реконфигурации системы управления с целью уменьшения влияния возникающих неисправностей и предотвращения полного отказа процесса [1]–[3]. Отказоустойчивое управление становится тем более необходимым для многостадийных технологических процессов циклического действия, при которых последовательно выполняется множество стадий со своими функциями и целями и может наблюдаться поток неисправностей, приводящий к возрастанию риска отказа по мере выполнения процесса [4].

Для управления классом многостадийных процессов требуется разработка моделей, учитывающих специфику взаимодействия стадий и циклов в плане обеспечения отказоустойчивости всего технологического процесса (ТП).

Многостадийные ТП состоят из ряда производственных стадий, через которые проходят обрабатываемые в процессе вещества. Многостадийные ТП – множество одностадийных ТП, объединенных единой целью функционирования для получения готовой продукции. Примерами многостадийного ТП циклического действия являются процесс плавки металла в доменной печи, нанесение композиционных покрытий в вакуумных установках, используемых в электронной промышленности при изготовлении устройств микросхемотехники, и многие др.

Разработка методов построения систем отказоустойчивого управления (СОУ) многостадийными технологическими процессами циклического действия базируется на дискретно-событийных моделях.

События-неисправности можно рассматривать как возмущения среды вышележащего уровня. Концепция иерархической среды логически приводит к принятию концепции иерархического управления, когда отказоустойчивость обеспечивается созданием системы супервизорного, вышележащего по отношению к основной системе обеспечения отказоустойчивости основная система оказывается объектом отказоустойчивого управления (ООУ).

Дискретными состояниями, входами и выходами ООУ (событиями) являются множества систем: исправная (номинальная) система; системы неисправные; системы, свойства которых восстановлены после первой неисправности; системы, скорректированные один, два и более раз.

Имеет смысл считать фундаментальными свойствами ООУ *диагностируемость* и *восстанавливаемость*, которые в определенном смысле являются аналогами таких понятий, как наблюдаемость и управляемость состояния динамических объектов.

Под диагностируемостью понимается возможность определения символа системы из допустимого множества посредством обработки текущей информации в виде данных измерений и априорной информации в виде структурированных моделей системы.

Под восстанавливаемостью понимается существование на допустимом множестве скорректированной системы с приемлемым качеством. Другими словами, качество неисправной системы удается восстановить с помощью конечного числа реконфигураций – корректирующих действий в виде подстроек параметров, реструктуризации операторов подсистем или изменения их топологии [1].

Современные технологические системы представляют совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих объектов по переработке материальных, энергетических и информационных потоков, в которой осуществляется определенная последовательность процессов, обеспечивающих достижение конечной цели производства. Технологическим системам свойственны признаки больших систем:

- наличие собственных целей подсистем и общей цели функционирования;
- большое количество элементов, составляющих систему, и большое число параметров, характеризующих ее функционирование;
- сложность поведения системы ввиду большого числа взаимосвязей между составляющими;
- наличие внешних неконтролируемых воздействий;
- неопределенность параметров, которая объясняется неполнотой знаний о природе технологических процессов, широким спектром возмущающих и управляющих воздействий, присутствующих в реальных системах, и сложным характером их взаимовлияния.

С повышением сложности технологических систем растет вероятность неисправностей их компонентов и подсистем.

Модели СОУ ТП. В связи с тем, что многостадийный ТП представляем как множество самостоятельных одностадийных процессов, рассмотрим подход к формированию моделей отдельного непрерывного ТП.

Системы отказоустойчивого управления ТП имеют иерархическую организацию. Технологический процесс (рис. 1), оборудованный измерительными элементами ИЭ₀, доставляющими текущую информацию о состоянии объекта, и исполнительными механизмами ИМ₀, способными реализовать управляющие воздействия, представляет собой так называемый расширенный объект управления нулевого уровня иерархии O₀ в номинальной среде функционирования F₀.

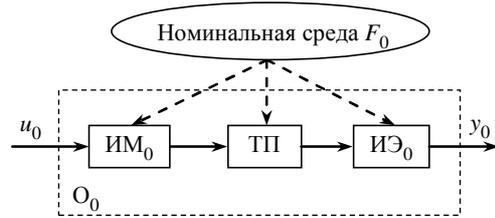


Рис. 1

Если рабочий режим объекта неустойчив или/и возмущения f_0 вызывают недопустимые отклонения состояния объекта O₀ от заданного режима g_0 , то необходимо создать систему управления, обеспечивающую нормальное протекание процесса в номинальной среде функционирования. На рис. 2 изображена концептуальная модель системы с отрицательной обратной связью – основная система управления СУ ТП первого уровня иерархии S₁.

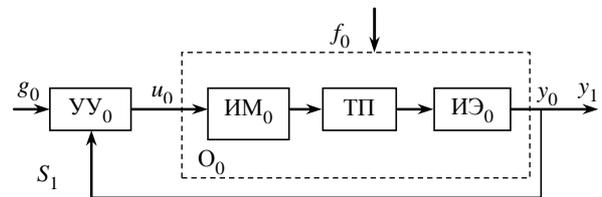


Рис. 2

В рамках классической и современной теории управления техническими системами и технологическими процессами разработаны методы и инструментальные средства проектирования систем управления из условий устойчивости движений и инвариантности управляемых переменных к возмущениям. Однако в тех случаях, когда необходимо создавать системы отказоустойчивого управления, возможности стандартных процедур проектирования должны быть существенно расширены.

Необходимо разрабатывать новые концептуальные и математические модели СОУ, методы анализа и синтеза, а также инструментальные средства расчета и компьютерной имитации.

Понятие среды вышележащего уровня иерархии как источника неисправностей F₁ логически приводит к концепции системы вышележащего по отношению к основной системе уровня управления. СУ ТП S₁, дополненная подсистемой диагностики (измерительным элементом ИЭ₁) и механизмом реконфигурирования МР (исполнительным механизмом ИМ₁), оказывается объектом отказоустойчивого управления O₁ (рис. 3). Выходом объекта отказоустойчивого управления (ООУ) O₁ является диагноз Y₁ о техническом со-

стоянии основной СУ ТП, а входами – неисправности F_1 и воздействия по реконфигурированию U_1 .

Нижние индексы в обозначениях элементов и переменных указывают на уровень иерархии.



Рис. 3

Активные отказоустойчивые системы, как и подавляющее большинство систем автоматического управления и регулирования, реализуют принцип отрицательной обратной связи. На рис. 4 изображена концептуальная модель активной СОУ второго уровня иерархии S_2 , реализующей принцип обратной связи. Анализ соответствия технического состояния Y_1 основной СУ ТП S_1 заданию G_1 и принятие решения U_1 о реконфигурировании выполняет супервизор – управляющее устройство первого уровня иерархии УУ₁.

Концептуальную модель СОУ S_2 определим как пару – бинарное несимметричное отношение M на множестве D следующих понятий:

$$K = \langle D, M \rangle ;$$

$D = \{ \text{Основная СУ ТП в номинальной среде; Среда функционирования } F_1 \text{ как источник неисправностей;}$

$\text{Подсистема диагностики СД (ИЭ1); Супервизор УУ}_1; \text{Механизм реконфигурирования МР (ИМ1)} \}$.

Элементом бинарного отношения – упорядоченным парам

$$M = \{ (\text{СУ ТП } S_1, \text{ Среда } F_1), (\text{СУ ТП } S_1, \text{ МР}), (\text{СД, СУ ТП } S_1),$$

$$(\text{Супервизор, СД}), (\text{МР, Супервизор}) \}$$

отвечают сигналы – носители информации: y_1 – о состоянии СУ S_1 как динамической системы; f_1 – о системных неисправностях; Y_1 – о поставленном диагнозе; U_1 – о воздействиях, реконфигурирующих СУ ТП.

Активные СОУ имеют иерархическую организацию (рис. 4); управляющее устройство верхнего уровня – супервизор – на основе информации о техническом состоянии основной СУ принимает решение о ее реконфигурировании, т. е. о переключении восстановленной системы со своими целями.

Модели СОУ многостадийными ТП. На концептуальной модели СОУ ТП (рис. 4) переменная G_1 – задание на входе супервизора – указывает на возможность изменения номинальной системы управления.

Номинальную систему необходимо менять в случае СУ многостадийными ТП. В качестве примера здесь рассматривается многостадийный ТП циклического действия – процесс нанесения многослойных композиционных покрытий в вакууме [5]–[9]. Стадии ТП заключаются в созда-

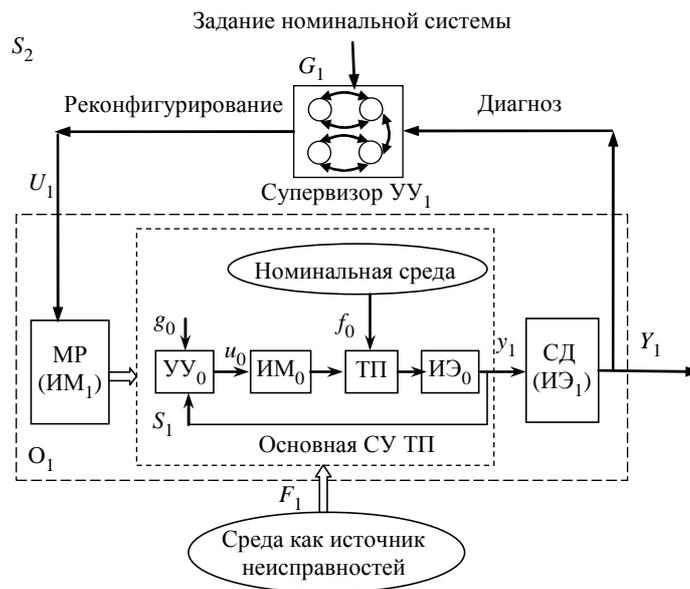


Рис. 4

нии низкого и высокого вакуума в рабочих объемах, нагреве подложек, создании инертной среды, собственно напылении и других операциях.

После завершения очередной стадии происходит переход на следующую стадию процесса с иными функциями в соответствии с технологическими регламентами (рис. 5).

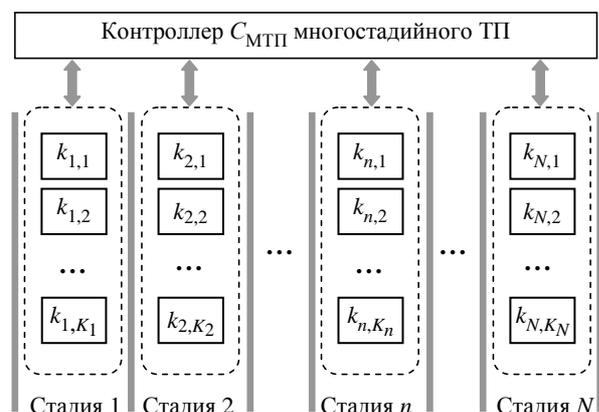


Рис. 5

На каждой стадии активируется один из наборов функциональных устройств и подсистем управления K_n , обеспечивающих выполнение функций и достижение целей n -й стадии. При прохождении стадий контроллер C_{MTP} по заложенному в него технологией алгоритму переключает процесс на следующую $(n + 1)$ -ю стадию. При этом определяется требуемый набор функциональных устройств и подсистем для выполнения целей стадии.

Смену стадий ТП логично интерпретировать как изменение целей и конфигурации локальных подсистем. Цели подсистем управления стадиями могут заключаться в стабилизации режимов, программном или терминальном управлении состоянием объекта, поддержании экстремальных значений переменных или адаптации к условиям функционирования. Каждая стадия ТП со своими и общесистемными функциями и целями выполняется соответствующей подсистемой управления. Достижение новых целей связано с реконфигурированием систем – выбором соответствующих управляемых переменных и измерительных элементов, управляющих воздействий и исполнительных механизмов, принципов и алгоритмов управления, а также – объекта управления.

Непрерывный ТП является одностадийным процессом, т. е. частным случаем многостадийных ТП. И наоборот, для отдельной стадии многостадийного ТП справедлива концептуальная модель отказоустойчивого управления (рис. 4).

Концептуальная модель СУ номинальным многостадийным ТП аналогична рис. 4 и также имеет 2 уровня иерархии. Отличие заключается в том, что измерительный элемент ИЭ₁ доставляет текущую информацию о «штатном» завершении стадии, а исполнительный механизм ИМ₁ подключает подсистему управления последующей стадией. Супервизор УУ₁ – *координатор* – переключает локальные подсистемы на основе априорной информации о последовательности стадий и текущей информации о состоянии процесса. Переключения происходят по сигналам таймера в случае принципа разомкнутого программного управления. Принципы обратной связи или комбинированного управления реализуются, если переключения подсистем зависят от достижения переменными ТП установленных порогов, т. е. границ областей в пространстве состояний, и от возмущений среды.

Концептуальная модель СОУ многостадийным ТП оказывается трехуровневой (рис. 6).

Последовательное выполнение стадий и циклический характер ТП определяют специфику отказоустойчивого управления:

- последовательное выполнение стадий может приводить к нарастанию потока неисправностей, а возникшие (зародившиеся) в течение выполняемого цикла неисправности могут развиваться (усугубляться) на последующих циклах ТП;

- переход на последующую стадию сопровождается ростом цены отказов и увеличением риска невыполнения целей всего ТП;

- как правило, выделяется главная по назначению и по важности стадия, по отношению к которой остальные стадии являются подготовительными. Основной целью отказоустойчивого управления многостадийным процессом является предотвращение отказа на главной стадии ТП.

Из перечисленного следует ряд дополнительных задач по организации отказоустойчивого управления многостадийным ТП циклического действия:

- интеграция (накопление) диагностической информации в цикле по мере выполнения стадий и от цикла к циклу ТП;

- прогнозирование развития неисправностей;

- использование экспертных знаний и нечеткой логики принятия решений по обеспечению отказоустойчивости ввиду многообразия и различия физической природы диагностических признаков.

Средствами обеспечения отказоустойчивого управления многостадийными циклическими процессами являются:

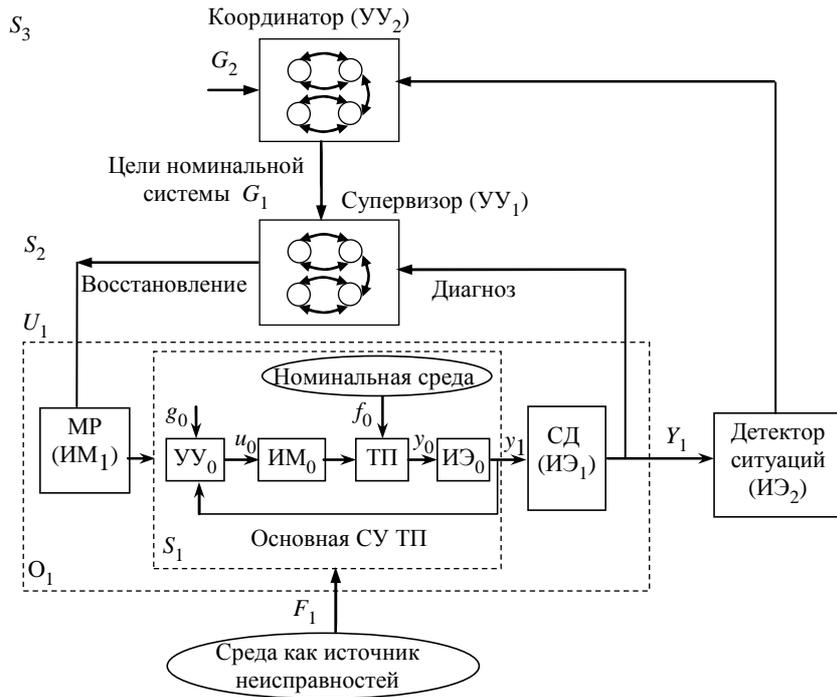


Рис. 6

– реконфигурирование системы управления отдельной стадией;

– остановка (прерывание) ТП до момента начала главной стадии, отказ на которой имеет серьезные последствия.

Повторение выполнения всех стадий делает многостадийный ТП циклическим. При переходе к новому циклу ситуация в плане развития неисправностей может усугубляться. Кроме того, может возрасти и цена ТП (например, для вакуумного процесса нанесения многослойных композиционных покрытий), что только повышает требования к отказоустойчивости СУ ТП.

В СОУ такими процессам необходимо предусмотреть еще один, четвертый уровень иерархии супервизора S₄ с координатором УУ₄, располагающимся над структурой СОУ, изображенной на рис. 6.

Событием для системы S₄ будет самое редкое по частоте наступления завершения последней стадии очередного цикла. На этом уровне необходимо отслеживать и оценивать ситуацию с развитием неисправностей от цикла к циклу и прогнозировать ее на следующий цикл.

Реконфигурирующим воздействием системы S₄ будет запрет на проведение нового цикла для предотвращения отказа ТП.

Формирование состава диагностических признаков циклических многостадийных ТП. Диагностическая надстройка над ТП представляет собой многоуровневую интеллектуальную систему обработки данных.

На нижнем для СОУ уровне (L = 2) происходит формирование диагностических признаков (ДП) различных типов для конкретного диагностируемого устройства. В процессе формирования ДП используется экспертная информация о ключевых для ТП показателях работоспособности и эффективности устройства. Также должна быть использована нечеткая логика для выработки оценки эффективности устройства.

Пусть существует процесс, который содержит P циклов. Каждый цикл состоит из N стадий. Будем считать, что на каждом p-м цикле сохраняются число стадий, порядок их следования, а также состав ДП.

На каждом p-м цикле диагностическая информация о стадиях представляет собой множество:

$$DP^p = \{DP^{1,p}, DP^{2,p}, \dots, DP^{n,p}, \dots, DP^{N,p}\},$$

где множество ДП n-й стадии p-го цикла $DP^{n,p}$ определим таким образом:

$$DP^n = \{F_n, H_n, A_n\},$$

$$\begin{cases} F_n = \{f_{n1}(t), f_{n2}(t), \dots, f_{nk}(t)\}, \\ H_n = \{h_{n1}(t), h_{n2}(t), \dots, h_{nl}(t)\}, \quad n = 1, N. \\ A_n = \{a_{n1}(t), a_{n2}(t), \dots, a_{nz}(t)\}, \end{cases}$$

В этом выражении индекс « p » опущен, так как от цикла к циклу состав ДП сохраняется; меняются только их значения. ДП подразделяются на 3 группы:

- F_n – 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 функционального устройства, на основе контролируемых переменных которого этот признак оценивается. НДП может принимать значения, которые количественно характеризуют неисправность или недостаточную эффективность устройства и могут быть использованы для формирования реконфигурирующего воздействия. При определенных значениях признака система диагностики может вырабатывать сигнал к окончанию стадии или сигнал о невыполнении требования стадии, что будет являться причиной завершения всего цикла. Одновременно значения этого признака могут учитываться при составлении диагностических функционалов, способных оценить отказоустойчивость системы от стадии к стадии при выполнении цикла. Также эти признаки следует использовать при формировании прогноза состояния устройства на последующих циклах.

- H_n – множество *логических* диагностических признаков (ЛДП), принимающих значения на множестве $\{0,1\}$. Значение 1 сигнализирует о наличии неисправности, которая должна привести к завершению стадии с невыполненными требованиями к этой стадии. Соответственно, при этом следующая стадия не начинается и цикл завершается.

- A_n – множество *четких* диагностических признаков (ЧДП), принимающих значения на множестве целых чисел. Каждое значение ЧДП целым числом характеризует некоторое состояние устройства на основе контролируемых переменных, по которым этот признак оценивается. ЧДП может принимать значения, которые характеризуют неисправность или недостаточную эффективность системы; при определенных значениях признака система диагностики может вырабатывать сигнал к окончанию стадии или сигнал о невыполнении требования стадии, что послужит причиной завершения всего цикла. Эти признаки

по сравнению с четкими ДП могут нести более полные сведения о состояниях прибора – «хорошо», «нормально», «плохо», «неудовлетворительно» – и могут быть использованы для формирования реконфигурирующего воздействия, а также для визуализации состояния системы на конкретной стадии.

Однако в силу грубости оценки состояния устройства ЧДП не следует применять при оценке накопления диагностического риска при следовании стадий ТП и при формировании прогноза от цикла к циклу.

Признаки обладают наследуемой структурой, где базовым родительским признаком является ЛДП. Соответственно, ЧДП является в том числе и ЛДП, а НДП является также и ЧДП.

Такое разделение диагностических признаков предложено, исходя из удобства их совместного использования супервизором.

ДП рассчитываются системой диагностики на основе контролируемых переменных.

Для многостадийного ТП обозначим $n = \overline{1, N}$ – номер выполняемой стадии, где N – число стадий всего ТП.

Один p -й ($p = \overline{1, P}$) цикл ТП будет представлять собой последовательное прохождение всех N стадий (P – общее число циклов ТП).

Примем следующие положения, закладываемые в разработку СОУ многостадийным процессом:

- каждая стадия является самостоятельным ТП со своими функциями, участвующими в достижении целей всего процесса, однако ряд функциональных устройств СУ S_1^n ($n = \overline{1, N}$), являющихся потенциальными источниками неисправностей, могут функционировать на нескольких стадиях (вплоть до всех стадий ТП);

- на разных стадиях, очевидно, могут применяться одни и те же устройства, используемые для выявления и определения одних и тех же ДП;

- некоторый ДП диагностируемого устройства, функционирующего на ряде стадий, может изменять свое значение по ходу процесса и может выявляться и оцениваться многократно на разных стадиях.

Порядок постадийного определения ДП СОУ многостадийного ТП иллюстрируется табл. 1.

Пусть $D^{n, p}$ – множество ДП, определяемых системой диагностики на n -й стадии p -го цикла.

Верхняя треугольная часть таблицы иллюстрирует постадийное определение диагностических признаков.

Таблица 1

	Стадии						
	1	2	3	...	n	...	N
Состав определяемых ДП	$DP^{1,p}$	$DP^{1,p}$	$DP^{1,p}$	...	$DP^{1,p}$	...	$DP^{1,p}$
	$DP^{2,p-1}$	$DP^{2,p}$	$DP^{2,p}$	...	$DP^{2,p}$	...	$DP^{2,p}$
	$DP^{3,p-1}$	$DP^{3,p-1}$	$DP^{3,p}$	...	$DP^{3,p}$	...	$DP^{3,p}$

	$DP^{n,p-1}$	$DP^{n,p-1}$	$DP^{n,p-1}$	...	$DP^{n,p}$	...	$DP^{n,p}$

	$DP^{N,p-1}$	$DP^{N,p-1}$	$DP^{N,p-1}$	...	$DP^{N,p-1}$	...	$DP^{N,p}$
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Оценка диагностического состояния МТП	$Y^{1,p}$	$Y^{2,p}$	$Y^{3,p}$	...	$Y^{n,p}$	...	$Y^{N,p}$

Для рассматриваемых *циклических* многостадийных ТП будем считать, что все циклы одного ТП идентичны друг другу по составу и порядку следования стадий, а также по составу ДП.

Порядок постадийного определения ДП СОУ *циклического* многостадийного ТП также схож с показанным в табл. 1, но со следующими отличиями:

- таблица переопределяется на каждом цикле, поэтому всем ее элементам должен быть приписан номер цикла;

- в качестве ДП, до вычисления которых еще «не дошла очередь» на активной стадии, могут быть использованы ДП от предыдущего цикла.

В результате диагностическая информация приобретает вид, доопределенный нижнетреугольной частью табл. 1 (Формирование ДП для СОУ S3).

Таким образом, для *циклических* многостадийных ТП оценка диагностического состояния, используемая в СОУ S_2 , может также учитывать предысторию от предыдущего цикла:

$$Y^{n,p} = f(DP^{i,p}, DP^{i,p-1}, i, n),$$

$$i = \overline{1, m_n}, n = \overline{1, N}.$$

Система диагностики фиксирует номер n выполняемой стадии и по ее завершении фиксирует значения тех ДП, которые СОУ S_2 использует для постановки диагноза Y^n (табл. 1). Этот диагноз по смыслу представляет собой некоторую интегральную оценку, вычисляемую по значениям ДП, определенным до n -й стадии включительно. Здесь m_n – количество ДП на n -й стадии.

Значения оценки Y^n ($n = \overline{1, N}$) диагностического состояния многостадийного ТП занесены в последнюю строку табл. 1.

Таким образом, значение оценки накопившегося риска по окончании очередной стадии является диагнозом отказоустойчивого состояния многостадийного ТП.

На основе экспертной информации должно быть сформировано и сообщено супервизору УУ₂ значение \hat{Y}^n , являющееся допустимым значением оценки Y^n . Супервизор УУ₂ по завершении n -й стадии вырабатывает рассогласование $e^n = \hat{Y}^n - Y^n$, которое характеризует «запас» отказоустойчивости до окончания многостадийного процесса. На основе рассогласования e^n супервизор УУ₂ принимает решение о реконфигурирующем воздействии, которое повлияет на продолжение процесса, т. е. на последующую стадию.

Оценка Y^n носит интегральный характер и, по сути, должна представлять собой некоторый функционал аддитивной формы; ДП в пределах одной стадии, и тем более для разных стадий, характеризуют неисправности различных устройств и имеют разную физическую природу и размерность. Поэтому требуется нормировка и приведение ДП к относительным единицам. Здесь как раз и будет необходима интеллектуализация процедуры формирования состава ДП с привлечением эксперта и НДП.

Выделенный правый N -й столбец табл. 1 содержит последние, актуальные значения всех ДП по окончании цикла. Этот транспонированный столбец расположим в p -й строке следующей табл. 2 (Формирование ДП для СОУ S4), где p – номер цикла.

По мере выполнения циклов ТП будем получать информацию по каждому ДП для оценки изменения диагностической ситуации от цикла к циклу.

Таблица 2

ЦИКЛЫ ↑	Номер цикла	Состав определяемых ДП						
	P	$DP^{1,P}$	$DP^{2,P}$	$DP^{3,P}$...	$DP^{n,P}$...	$DP^{N,P}$
...	
p	$DP^{1,p}$	$DP^{2,p}$	$DP^{3,p}$	...	$DP^{n,p}$	...	$DP^{N,p}$
...	
3	$DP^{1,3}$	$DP^{2,3}$	$DP^{3,3}$	...	$DP^{n,3}$	...	$DP^{N,3}$
2	$DP^{1,2}$	$DP^{2,2}$	$DP^{3,2}$	...	$DP^{n,2}$	...	$DP^{N,2}$
1	$DP^{1,1}$	$DP^{2,1}$	$DP^{3,1}$	...	$DP^{n,1}$	...	$DP^{N,1}$
Прогноз диагностического состояния ЦМТП		$EX^p(DP^1)$	$EX^p(DP^2)$	$EX^p(DP^3)$...	$EX^p(DP^n)$...	$EX^p(DP^N)$

Для СОУ S_4 система диагностики выполняет следующие действия:

- получает сигнал от последней N -й стадии цикла о завершении этой стадии и, соответственно, всего p -го цикла;
- из p -й строки табл. 2 фиксирует подмножество используемых СОУ S_4 ДП со своими значениями;
- сопоставляет каждый из этих ДП с его значениями на предыдущих циклах (столбец табл. 2) и формирует прогноз его изменения на следующий $(p + 1)$ -й цикл.

Множество прогнозов EX^p является диагнозом циклического ТП, характеризующим риск выполнения следующего $(p + 1)$ -го цикла:

$$EX^p = f(DP^{i,p}, i), p = \overline{2, P}, i = \overline{1, p}.$$

В последнюю строку табл. 2 занесены прогнозируемые значения ДП, которые они должны принять на следующем $(p + 1)$ -м цикле.

Таким образом, постановка диагноза в СОУ S_4 – определение прогнозируемых значений отдельных ДП на следующий $(p + 1)$ -й цикл.

Следует отметить, что при такой организации прогноз (экстраполяция) производится сопоставлением значения конкретного ДП на p -м цикле со значениями этого же ДП на предыдущих циклах. Такой подход снимает проблему нормировки ДП.

Могут быть использованы различные методы прогнозирования развития неисправностей, учитывающие специфику конкретного ТП.

В СОУ S_4 заносятся допустимые экспертные значения для каждого прогнозируемого ДП. При превышении допустимого значения СОУ S_4 останавливает весь ТП, предотвращая возможность отказа на следующем цикле.

Программный комплекс моделирования СОУ вакуумным процессом нанесения композиционных покрытий. Описанный подход к формированию моделей СОУ многостадийными ТП циклического действия использован в программном комплексе моделирования системы отказоустойчивого управления вакуумным процессом нанесения композиционных покрытий [10]. Комплекс позволяет имитировать неисправности подсистем обеспечения низкого и высокого вакуума, нагрева корпуса диффузионного вакуумного насоса и напыляемых подложек, падение эффективности собственно магнетрона и других устройств. Имеется возможность задавать интенсивность нарастания неисправностей от цикла к циклу, увеличивать цену ТП по мере выполнения циклов. Предусмотрен удобный интерфейс. При моделировании осуществляется наглядная визуализация выполнения стадий и циклов и функционирования СОУ, проводящей реконфигурации с целью нейтрализации неисправностей и останавливающей ТП для предотвращения отказа на главной стадии процесса.

В заключение отметим, что 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 сопутствует 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 зацикливанием процесса, если одна бригада осуществляет несколько операций за смену.

Отказоустойчивое управление является необходимым современным условием организации подобных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имаев Д. Х., Шестопапов М. Ю. Системы, толерантные к неисправностям, – инновационное направление в управлении сложными процессами // Инновации. 2012. № 07 (165). С. 109–112.

2. Diagnosis and Fault-Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, M. Staroswiecki, J. Sroder. NY; NJ: Springer-Verlag, 2004.

3. Iserman R. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY: Springer-Verlag, 2006.

4. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопапов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Изд. центр «Академия», 2009.

5. Инновационный подход к проектированию системы отказоустойчивого управления технологическим процессом вакуумного нанесения композиционных покрытий / М. Ю. Шестопапов, В. Т. Барченко, Л. Б. Пошехонов, А. В. Беспалов // Инновации. 2012. № 07 (165). С. 122–142.

6. Барченко В. Т., Быстров Ю. А., Колгин Е. А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб.: Энергоатомиздат, 2001.

7. Многофункциональная модульная автоматизированная установка для реализации процессов ионно-вакуумной обработки / В. Т. Барченко, К. В. Павлов, И. А. Сенчило, А. М. Смирнов, А. Б. Шкапин // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 25. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2002.

8. Барченко В. Т., Удовиченко С. Ю. Плазменные эмиссионные системы. СПб.: ООО «Техномедиа» / Элмор, 2008.

9. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В. Т. Барченко, О. Л. Вересов, О. И. Гребнев и др.; под общ. ред. В. Т. Барченко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661314 Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). Программный комплекс моделирования системы отказоустойчивого управления технологическим процессом вакуумного нанесения композиционных покрытий / М. Ю. Шестопапов, Л. Б. Пошехонов, В. Т. Барченко, А. В. Беспалов. Опубл. 05.12.2013.

M. Yu. Shestopalov, D. H. Imaev, L. B. Poshekhnov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

SIMULATOR OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS

Problems of cyclic multistage fault-tolerant systems control design are considered. It was shown that mathematical models of such systems should be developed with respect to the emergence and evolution of failures on process stages and cycles. Procedure of the hierarchization of system diagnostic information obtaining and utilization methods was developed. It was shown that hierarchical structure of the diagnostic information affects the ways of failure prevention.

Multistage technological processes, failures, fault-tolerant control, models, vacuum unit composite coatings
