

# Отказоустойчивое управление циклическими многостадийными технологическими процессами



**М. Ю. Шестопапов,**  
к. т. н., доцент, проректор  
по научной работе, зав. кафедрой АПУ,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)  
e-mail: shestopalov\_08@mail.ru

*В статье рассматриваются проблемы управления сложными технологическими процессами. Анализируется модель системы отказоустойчивого управления (СОУ). Приводится система управления многостадийного номинального технологического процесса.*

**Ключевые слова:** циклический многостадийный технологический процесс, неисправность, отказоустойчивое управление, иерархические модели, структуры, диагностический признак, супервизор.

## Введение

Управление современными сложными технологическими процессами (ТП), как правило, сопровождается возникновением и развитием различного типа неисправностей, что при отсутствии контроля и реагирования на них может приводить к отказам подсистем и функциональных устройств. Эти отказы могут вызвать аварии или значительные экономические потери [1]. В результате появляется необходимость создания систем отказоустойчивого управления (СОУ), которые в процессе управления должны выполнять следующие функции:

- обнаруживать, идентифицировать зарождающиеся неисправности и контролировать процесс их развития,
- нейтрализовать по возможности действие неисправностей, реконфигурируя неисправные подсистемы,
- при отсутствии возможности восстановления неисправных подсистем и критическом развитии ситуации корректно завершать процесс управления для предотвращения назревающего отказа [2].

Актуальность создания СОУ тем более важна при организации циклических многостадийных ТП по следующим причинам:

- от различных групп оборудования, образующих «стадийные» системы многостадийного ТП, может иметь место поток неисправностей, повышающий риск отказа по мере выполнения всего ТП,
- при многократном воспроизведении многостадийного ТП (циклический процесс) может происходить развитие отдельных неисправностей от цикла к циклу с тенденцией стремления к отказу.

Характерным примером циклического многостадийного ТП является процесс нанесения многослойных композиционных покрытий на основе соединений тантала, проходящий в условиях глубокого вакуума [3].

Характерные черты циклических многостадийных ТП определяют иерархический характер моделей СОУ [3–5].

Формирование моделей СОУ циклическими многостадийными ТП будем осуществлять в два этапа. На первом этапе проектируется собственно система управления (СУ) ТП, организующая номинальный процесс в соответствии с применяемой технологией, в предположении отсутствия неисправностей. На втором этапе проектируется СОУ, согласованная с системой управления номинальным ТП [2].

## 1. Система управления стадией многостадийного номинального ТП

Пусть многостадийный ТП содержит  $n = \overline{0, N}$  стадий. Нулевая стадия ( $n=0$ ) — инициализационная; из нее цикл стартует и в нее возвращается по завершении.

Многостадийный ТП образуется множеством одностадийных (непрерывных) процессов, выполняющих свои функции и цели.

На рис. 1 изображена структурная схема модели системы управления  $CS_1^n$   $n$ -й,  $n = \overline{1, N}$  стадией многостадийного ТП.

Нижний индекс в приведенных и последующих обозначениях будет означать уровень иерархии модели.

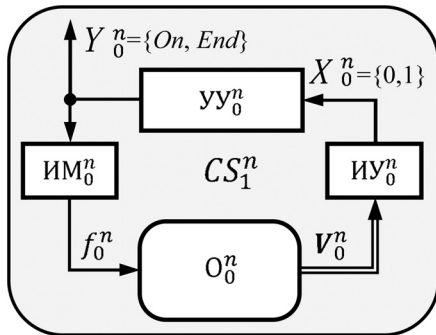


Рис. 1. Система управления  $n$ -й стадией многостадийного ТП

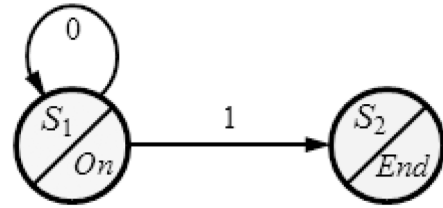


Рис. 2. Граф конечного автомата системы управления  $n$ -й стадии

СУ  $CS_1^n$  первого уровня образована подсистемами нулевого уровня иерархии:

- $O_0^n$  – объект управления, включающий в себя подмножество подсистем и функциональных устройств, задействованных на  $n$ -й стадии для выполнения функций и целей стадии;
- $ИМ_0^n$  – исполнительный механизм, конфигурирующий подмножество требуемых подсистем из общего множества функциональных устройств ТП, и формирующий управляющее воздействие  $f_0^n$ ;
- $ИУ_0^n$  – измерительное устройство, которое по вектору  $V_0^n$  значимых для  $n$ -й стадии переменных фиксирует событие достижения целей стадии и формирует входной алфавит  $X_0^n$  конечного автомата управляющего устройства;
- $УУ_0^n$  – управляющее устройство – конечный автомат с выходным алфавитом  $Y_0^n$ ;

В рассматриваемом контексте нас будут интересовать следующие действия, которые должны быть выполнены системой управления  $n$ -й,  $n = \overline{1, N}$  стадией:

- конфигурация из общего множества подсистем и функциональных устройств системы, являющейся объектом управления для  $CS_1^n$ ;
- формирование управляющих воздействий и запуск процесса управления с переходом на  $n$ -ю стадию по сигналу от «координатора стадий» (устройства высшего уровня, управляющего порядком следования стадий);
- собственно процесс управления;
- завершение процесса и передача информации координатору о завершении стадии.

Представленная модель СУ  $CS_1^n$  позволяет проводить процесс управления на стадиях с использованием простого управляющего устройства, граф конечного автомата которого изображен на рис. 2.

Состоянию  $S_1$ , которое вызвано символом «0» входного алфавита, соответствует сам процесс на стадии. Входной символ «1» появляется при достижении целей стадии (переход в состояние  $S_2$ ) после которого следует действие координатора по переходу на следующую стадию.

## 2. Система отказоустойчивого управления стадией многостадийного ТП

Номинальный ТП, проходящий в предположении отсутствия неисправностей, заведомо должен приводить к достижению целей стадий. При этом координа-

тор стадий, назначая к выполнению стадии в требуемой последовательности, обеспечит выполнение цикла многостадийного ТП.

Наличие неисправности в подсистемах и устройствах  $O_0^n$  может сделать невозможным выполнение целей стадии и всего процесса. Сформируем на следующем уровне иерархии СОУ для  $n$ -й стадии  $FTS_2^n$ ; для этой СОУ система  $CS_1^n$  будет теперь являться объектом управления.

На стадийную СОУ  $FTS_2^n$  возложим следующие функции:

- проведение диагностики системы  $CS_1^n$ ;
- нейтрализация неисправности путем реконфигурирования СУ и перехода к выполнению целей реконфигурированной системой (при наличии такой возможности);
- выявление факта невозможности достижения целей стадии (как при отсутствии, так и при наличии средств восстановления) и корректное завершение стадии и ТП при невыполненных требованиях, т. е. предотвращение неконтролируемого отказа.

Теперь под управлением координатора стадий будут находиться СОУ  $FTS_2^n$ ,  $n = \overline{1, N}$ .

Структура стадийной СОУ изображена на рис. 3.

Объектом управления СОУ  $FTS_2^n$  во время выполнения  $n$ -й стадии является одна система из множества СУ  $CS_1^{n,m}$ ,  $m = \overline{0, M}$ . Здесь  $CS_1^{n,0}$  – номинальная система, с которой и начинается процесс выполнения стадии в предположении отсутствия неисправностей. Если на стадии возможны действия по проведению реконфигураций, то осуществляются переходы на  $CS_1^{n,1}$  – система после первой реконфигурации,  $CS_1^{n,2}$  – система после второй реконфигурации и т. д. Здесь  $M$  – максимальное число реконфигураций на  $n$ -й стадии.

Система диагностики  $СД_1^n$  воспринимает от управляющего устройства – конечного автомата  $УУ_0^n$  (рис. 1) функционирующей в данный момент времени системы  $CS_1^{n,m}$  символы выходного алфавита  $Y_0^n$ , сигнализирующие о нахождении стадии в процессе выполнения или об успешном завершении стадии. Кроме этого, на  $СД_1^n$  поступает вектор  $V_0^n$  значимых для  $n$ -й стадии переменных. По ним система диагностики вычисляет множество  $\mathcal{D}^n$  диагностических признаков (ДП) трех типов, определяемых на  $n$ -й стадии для СОУ всех уровней [3–5]. Система диагностики формирует входной алфавит  $X_1^n$  для супервизора  $УУ_1^n$ .

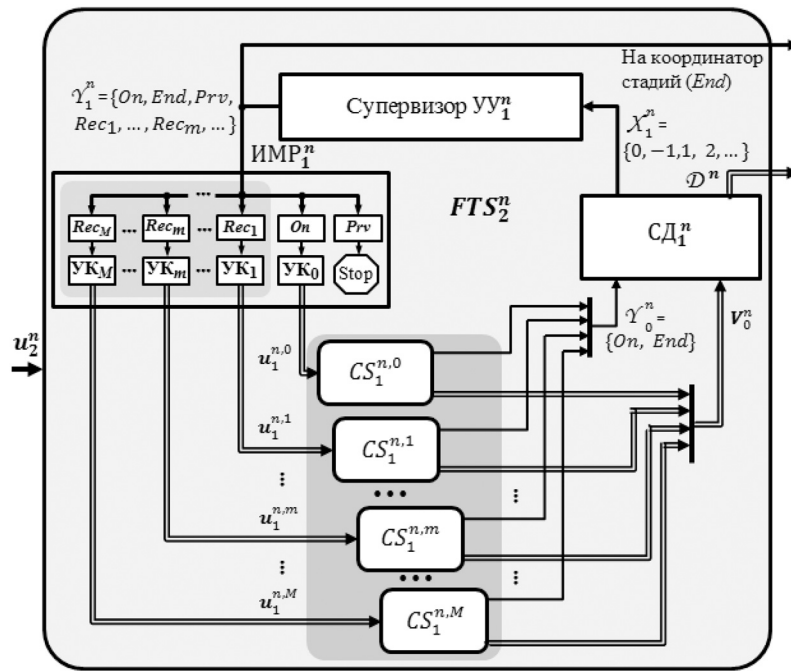


Рис. 3. Система отказоустойчивого управления  $n$ -й стадией многостадийного ТП

Супервизор — конечный автомат, граф которого изображен на рис. 4. Автомат  $УУ_1^n$  имеет следующие состояния:  $S_{1,m}$  — состояние процесса выполнения стадии номинальной системой ( $m=0$ ) или системой после реконфигурации ( $m=1, M$ );  $S_2$  — состояние успешного завершения стадии с выполненными требованиями;  $S_3$  — состояние предотвращения отказа путем корректного завершения стадии.

Для стадий, на которых имеется только диагностика, но не предусмотрены реконфигурации,

выделенная темным тоном часть графа на рис. 4 отсутствует.

Исполнительный механизм реконфигураций  $ИМП_1^n$  (рис. 3) содержит дешифратор, преобразующий выходной алфавит супервизора  $УУ_1^n$  в управляющие сигналы на устройства конфигурации  $УК_m$ , которые формируют номинальную  $CS_1^{n,0}$  и реконфигурированные системы  $CS_1^{n,m}$  из множества всех подсистем и функциональных устройств, обеспечивающих  $n$ -ю стадию.

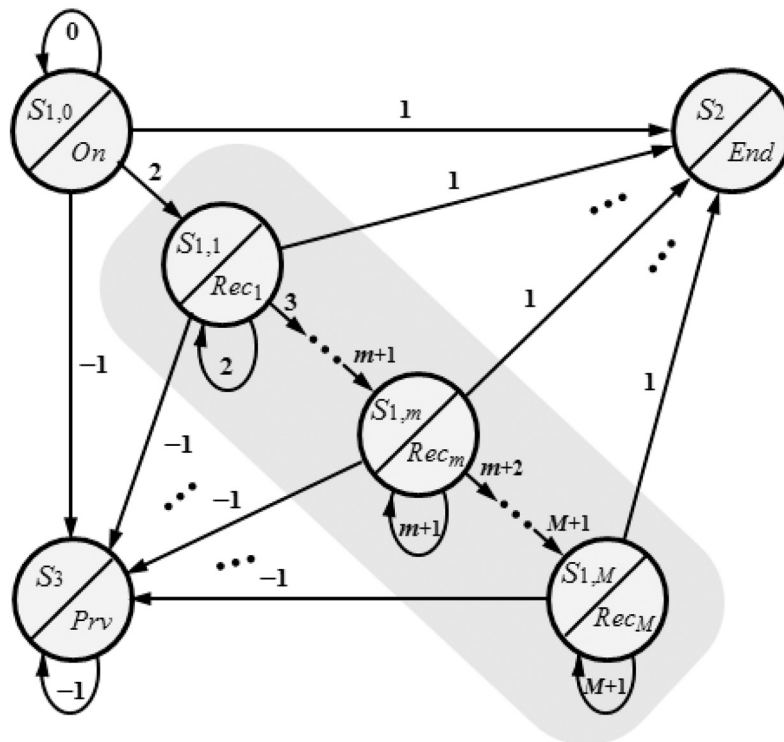


Рис. 4. Граф конечного автомата супервизора СОУ  $n$ -й стадией многостадийного ТП

### 3. Система отказоустойчивого управления циклическим многостадийным ТП

Для сложного ТП отсутствует возможность априори проанализировать всевозможные комбинации появления неисправностей на стадиях, в результате накопления которых возрастает совокупный риск отказа системы. Если ограничиться рассмотренным выше уровнем стадийных СОУ и с позиций обеспечения отказоустойчивости рассматривать многостадийный процесс просто как несвязанное множество отдельных ТП на стадиях, то может произойти отказ на уровне циклов и, следовательно, всего ТП.

Системный подход обязывает рассматривать многостадийный ТП как совокупность взаимосвязанных в плане отказоустойчивости стадийных процессов; в СОУ эти взаимосвязи порождаются неисправностями стадийных СУ. Таким образом, следует ввести понятие неисправности цикла, под которым будем понимать превышение допустимого совокупного риска отказа от потока неисправностей в процессе выполнения цикла (при допустимых значениях диагностических признаков неисправностей на отдельных стадиях).

Циклический ТП с позиции отказоустойчивости предлагается рассматривать как совокупность взаимосвязанных циклов. Эти связи порождаются развитием неисправностей от цикла к циклу. Предлагается ввести понятие неисправности ТП – прогнозируемое превышение допустимых значений ДП на предстоящем цикле.

Обнаружение неисправности на стадии означает превышение допустимого значения какого-либо ДП.

Обнаружение неисправности цикла есть превышение допустимого совокупного риска возникновения отказа.

Обнаружение неисправности ТП – прогноз отказа на предстоящем цикле.

Изложенное здесь предопределяет иерархическую структуру модели СОУ циклического многостадийного ТП, где на каждом уровне решаются свои задачи отказоустойчивого управления.

На уровне стадий: диагностика, восстановление системы в случае предусмотренной реконфигурации, корректная остановка процесса при невозможности восстановления.

Неисправность на уровне цикла обусловлена совместным действием отдельных неисправностей на стадиях. Возможные реконфигурации уже предусмотрены на уровне стадий. Поэтому реконфигурация на уровне цикла заключается только в корректном прерывании цикла для предотвращения назревающего отказа.

Аналогичная ситуация имеет место в СОУ уровня ТП – реконфигурирующим действием будет являться запрет на проведение нового цикла для предотвращения вероятного возникновения отказа на нем.

На рис. 5 представлена иерархическая модель всей СОУ циклического многостадийного ТП.

Собственно СУ многостадийным процессом  $CS_3$  образована множеством стадийных СОУ  $FTS_2^n$ , изме-

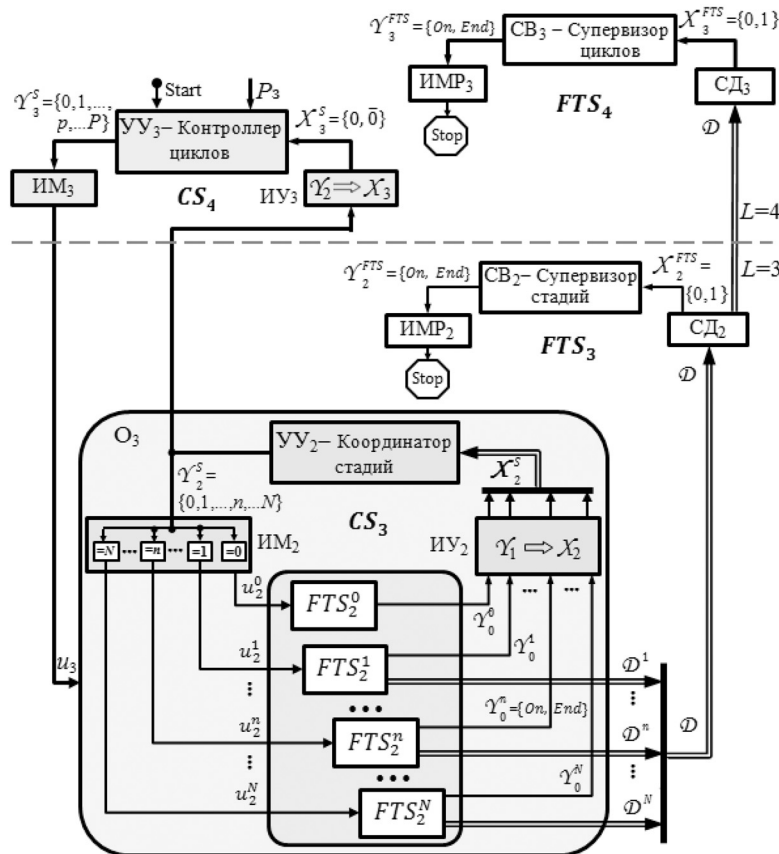


Рис. 5. СОУ циклического многостадийного ТП

рительным устройством ИУ<sub>2</sub>, управляющим устройством — координатором стадий УУ<sub>2</sub> и исполнительным механизмом ИМ<sub>2</sub>. Назначение перечисленных устройств и обозначения ясны из изложенного выше материала.

На этом же уровне иерархии ( $L=3$ ) в модели располагается СОУ многостадийного процесса  $FTS_3$ , обеспечивающая отказоустойчивое управление на уровне цикла. Система диагностики СД<sub>2</sub> анализирует ДП, которые представляют собой количественные оценки влияния неисправностей, и формирует оценку риска отказа от потери качества многостадийного процесса из-за потока неисправностей в течение цикла. При превышении формируемого на основе экспертной информации допустимого значения оценки риска отказа супервизор СВ<sub>2</sub> формирует команду на остановку цикла, а исполнительный механизм ИМ<sub>2</sub> корректно завершает цикл и весь ТП.

На высшем уровне иерархии ( $L=4$ ) в модели располагается СОУ  $FTS_4$  ТП в целом, основа действия которого заключается в прогнозировании развития неисправностей от цикла к циклу и остановке ТП перед началом цикла, на котором должен произойти отказ.

## Заключение

Предложенная организация СОУ многостадийным циклическим ТП реализована при разработке программного комплекса моделирования системы отказоустойчивого управления вакуумным процессом нанесения композиционных покрытий [2, 6].

### Список использованных источников

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

2. Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопапов. Системы, толерантные к неисправностям, — инновационное направление в управлении сложными процессами//Иновации, № 7, 2012.
3. М. Ю. Шестопапов, В. Т. Барченко, Л. Б. Пошехонов, А. В. Беспалов. Инновационный подход к проектированию системы отказоустойчивого управления технологическим процессом вакуумного нанесения композиционных покрытий//Иновации, № 10, 2013.
4. M. Yu. Shestopalov. Integrated Approach to Design of Fault-Tolerant Control Systems//Proceedings of the IEEE Russia. North West Section. vol. 5. 2013 Department of Automation and Control Processes St.Petersburg State Electrotechnical University «LETI».
5. М. Ю. Шестопапов, Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов. Моделирование систем отказоустойчивого управления технологическими процессами//Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», № 8, 2014.
6. М. Ю. Шестопапов, Л. Б. Пошехонов, В. Т. Барченко, А. В. Беспалов. Программный комплекс моделирования системы отказоустойчивого управления технологическим процессом вакуумного нанесения композиционных покрытий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661314 от 05.12.2013 г. Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент).

## Fault-tolerant control cyclic multi-stage process

**M. Yu. Shestopalov**, PhD, associate professor, Vice-Rector, Head of Department of Automation and Control Processes, St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI» n. a. V. I. Ulyanov (Lenin).

Managing modern complex technological processes (TP) is usually accompanied by the emergence and development of various types of faults that in the absence of monitoring and responding to them can lead to failure of subsystems and functional devices. These failures can cause an accident or significant economic loss. As the result appears necessity in creation of failover management systems (MCS).

**Keywords:** cyclic multistep process, fault, fault-tolerant control, hierarchical models, structures, diagnostic feature, supervisor.

*В соответствии с постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 2 декабря 2014 г. № 1089 «О ежегодном проведении в Санкт-Петербурге международного инновационного форума пассажирского транспорта» 27–29 мая 2015 года в ВК «Ленэкспо» пройдет Санкт-Петербургский международный инновационный форум пассажирского транспорта.*

Цель проведения форума — определение стратегии развития городских пассажирских перевозок, а также обсуждение вопросов подготовки транспортной системы к крупным спортивным событиям и вопросов успешного функционирования и развития транспортного потенциала Санкт-Петербурга.

Международный форум, включающий деловую программу (пленарное заседание, круглые столы, встречи), выставку и культурную программу предоставит площадку для профессиональных встреч и обмена опытом для компаний-перевозчиков, производителей подвижного состава и специализированного оборудования, сервисных компаний, органов законодательной и исполнительной власти, банковского сектора, — всех, кто причастен к отрасли пассажирских транспортных перевозок.

На выставке будут продемонстрированы новейшие образцы подвижного состава всех видов пассажирского транспорта — автобусы, троллейбусы, трамваи, речной транспорт, перспективные виды транспорта, в том числе монорельсовый и легкорельсовый транспорт, а также транспортное оборудование, комплектующие, услуги для отраслевых предприятий.

Внимание участников форума также будет направлено на средства и технологии для создания доступной среды на транспорте для маломобильных групп населения, информационно-рекламному оборудованию и технологиям.

Планируется насыщенная культурная программа для участников и гостей форума: пробег ретроавтомобилей по центру города, экскурсии в Музей городского электротранспорта и Музей железнодорожной техники.

Организаторы форума: Комитет по транспорту Санкт-Петербурга; СПб ГУП «Пассажиравтотранс».

Соорганизаторы: ООО «Выставочное объединение РЕСТЭК»; ООО «ЭкспоФорум-Интернэшнл»

Дополнительная информация: Наталья Тарасова, (812) 320-80-15, доб. 7303, e-mail: auto-pr@restec.ru.