

Проектирование систем отказоустойчивого управления сложными техническими объектами

Д. Х. Имаев, С. В. Квашнин, А. В. Черников, М. Ю. Шестопалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Введение. С усложнением технических систем, а также средств контроля и управления, растет вероятность неисправностей исполнительных механизмов, измерительных элементов и других компонентов, которые могут привести к отказам и авариям.

Традиционные методы проектирования не гарантируют создание систем управления (СУ), сохраняющих способность удовлетворительно функционировать при неисправностях. В определенной степени задача решается при проектировании СУ на основе методов структурной теории чувствительности и параметрической инвариантности [1], [2]. Развитие теории и практики управления привело к созданию робастных и интервальных систем, работоспособных при значительных изменениях компонентов [3], [4]. В этих случаях можно говорить о *пассивной* адаптации, обеспечивающей слабую зависимость качества управления от параметрических воздействий среды. В адаптивных системах управления (см., например, [3], [5]) приспособление к нестационарности объектов достигается *активным* способом – подстройкой алгоритмов управления на основе информации, получаемой текущей идентификацией объектов.

Свойство системы полностью или частично восстанавливать работоспособность в автоматическом режиме при неисправности ее элементов называется *отказоустойчивостью*. Толерантные к неисправностям системы управления (англ. *Fault-Tolerant Control System – FTCS*) [6–8] сохраняют временную способность к достижению цели с приемлемым качеством процессов.

Неисправности являются *редкими* случайными событиями, на уменьшение последствий которых не рассчитаны ни основная система, ни средства, обеспечивающие робастность или адаптацию систем. Необходимо развивать новые подходы к проектированию СУ объектами, работающими вблизи критических режимов.

Принципы разработки систем отказоустойчивого управления (СОУ).

1. Неисправности рассматриваются как *возмущения* среды функционирования СУ – информационной, аппаратно-технической, программной и энергетической. Следовательно, активные средства обеспечения отказоустойчивости сами должны строиться на базе известных принципов компенсации и ослабления возмущений.

2. Среда функционирования СУ подвергается *декомпозиции* и моделируется как сигнальные (аддитивные) возмущения нижнего уровня, последствия которых ослабляет

основная СУ, и неисправности – как системные (мультипликативные) возмущения среды верхнего уровня. Это логически приводит к принятию концепции иерархического управления, когда отказоустойчивость обеспечивается созданием системы супервизорного, вышележащего по отношению к основной системе уровня.

3. Ориентация теоретических исследований не на конкретные технические СУ, а на *класс* стационарных линейных конечномерных моделей *ЛТИ*, степень детализации структуры которых позволяет локализовать с требуемой глубиной потенциальные неисправности различных рангов – топологического, структурного и параметрического [2], [8].

4. Принцип *дискретно-событийного* объекта отказоустойчивого управления (ООУ). Поскольку неисправности редкие события, то игнорируются переходные процессы, вызываемые неисправностями и действиями по реконфигурированию основной системы с целью восстановления качества процессов.

5. Фундаментальными свойствами ООУ являются *диагностируемость* и *восстанавливаемость*, которые в определенном смысле можно считать аналогами наблюдаемости и управляемости состояния динамических объектов.

6. Принцип *минимизации сложности* восстановленных систем предполагает, что для одной и той же неисправной системы может существовать несколько вариантов скорректированных систем, что ставит задачу выбора. Имеет смысл достижение результата минимальными изменениями неисправной системы – выбрать в каком-то смысле наиболее близкую скорректированную систему. Поскольку на конечных множествах нет общепринятых метрик, то за основу оценки «расстояния» между системами S_i и S_j целесообразно принять ранги неопределенности моделей R . Расстояние между системами равно модулю разности рангов неопределенности их моделей

$$\rho(S_i, S_j) \stackrel{\text{def}}{=} |R(S_i) - R(S_j)| \rightarrow \min.$$

Критерий означает предпочтительность (при прочих равных условиях) варианта восстановления подстройкой параметров по сравнению с реструктуризацией операторов или варианта реструктуризации по сравнению с реконфигурированием топологии.

7. Принцип *двухэтапной системы* обеспечения отказоустойчивости: после обнаружения факта потери устойчи-

ности немедленно восстанавливается минимально необходимый запас устойчивости системы; восстанавливаются характеристики каналов воспроизведения задания и подавления возмущений.

8. Активная отказоустойчивость СУ достигается комбинированием средств диагностирования неисправностей с супервизорным управлением, позволяющим восстанавливать систему управления путем подстройки параметров, реструктуризации алгоритмов или реконфигурирования связей.

Структура активных СОУ. Активные СОУ реализуют принцип обратной связи (рисунок). Контур вышележащего уровня иерархии образуется основной СУ, подсистемой диагностирования СД, супервизора и механизма реконфигурирования МР. Функцией подсистемы диагностирования является распознавание технического состояния основной системы – обнаружения, локализации и идентификации неисправности. Супервизор – логическое устройство вышележащего дискретно-событийного уровня, реализующее алгоритм принятия решений о мерах восстановления.

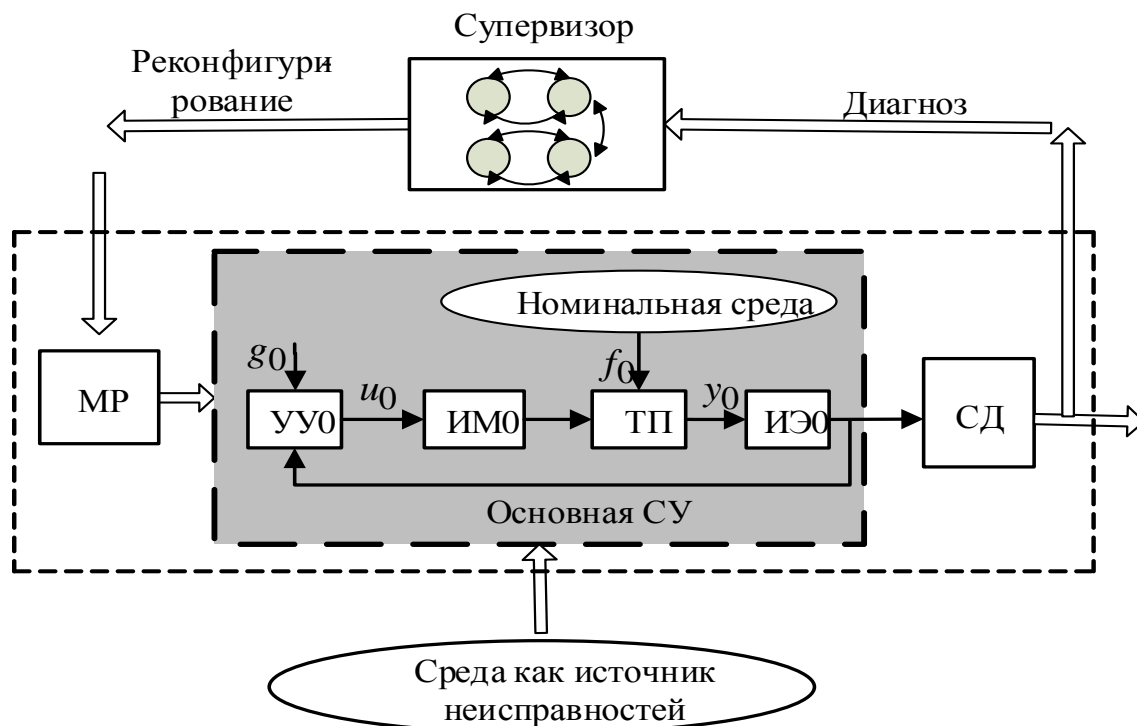


Рис. 1.

Методика проектирования СОУ представляет собой детализированное описание следующих этапов:

- 1 – разработка математической и компьютерной модели основной СУ;
- 2 – моделирование существенных неисправностей и разработка компьютерных моделей неисправных СУ;
- 3 – анализ диагностируемости неисправных систем;
- 4 – разработка подсистемы диагностирования;
- 5 – анализ восстанавливаемости неисправных систем;
- 6 – проведение цикла имитационных исследований неисправных систем и выбор вариантов восстановления;
- 7 – формирование логики принятия решений по восстановлению;
- 8 – разработка модели супервизора в форме конечного автомата и реализация;

9 – имитационные исследования компьютерной модели СОУ;

10 – анализ результатов имитации СОУ и выводы.

При необходимости – возврат к пп. 1–9.

Для выполнения этапов методики необходимы исходные данные.

Этап 1. Математические модели системы управления агрегатом.

Этап 2. Перечень потенциальных неисправностей, к которым следует обеспечить толерантность системы управления.

Этап 3. Перечень измеряемых переменных.

Этап 4. Диагностирование основано на данных измерений, получаемых от штатных средств АСУ ТП. Разработка подсистем диагностирования представляет самостоятельную проблему. Здесь возникает ряд плохо формализуемых задач выбора диагностических признаков, разработки ал-

горитмов выявления симптомов неисправностей и постановки диагноза. Для их решения предлагаются методы, основанные на искусственном интеллекте, т. е. обучения машин [8].

Этап 5. Перечисление множества реализуемых вариантов подстройки параметров, реструктурирования алгоритмов или реконфигурирования неисправных систем.

Заключение. Необходимость создания систем отказоустойчивого управления небезопасными технологиями ставит перед наукой и техникой ряд концептуальных вопросов, теоретических и практических проблем, которые обладают принципиальной новизной и требуют развития инновационных подходов к проектированию. Существуют общие закономерности, которым подчиняются процессы в системах отказоустойчивого управления техническими объектами и технологическими процессами различного назначения. Отсюда следует вывод о целесообразности разработки объектно-независимой теории и методик проектирования систем отказоустойчивого управления. Создание теоретических и прикладных основ отказоустойчивости управления техническими системами оказывается

одним из приоритетных направлений развития современной теории управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981. С. 464.
- [2] Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. С. 232.
- [3] Никифоров В.О., Ушаков А.А. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация и робастность. СПб.: Изд-во СПбГИТМО (ТУ), 2002. С. 232.
- [4] Шашихин В.Н. Синтез робастного управления для интервальных крупномасштабных систем с последствием// Автоматика и телемеханика. 1997. № 12. С. 164–174.
- [5] Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. С. 375.
- [6] Diagnosis and Fault Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki // Control Systems. Springer-Verlag, London. 2006. Vol. 2. P. 227.
- [7] Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Annual Reviews in Control. 2008. Vol. 32. P. 229–252.
- [8] Шестопалов М.Ю. Системы отказоустойчивого управления технологическими процессами. СПб.: Элмор, 2013. С. 308.