

# Системы, толерантные к неисправностям, — инновационное направление в управлении сложными процессами



**Д. Х. Имаев,**

*д. т. н., профессор, кафедра автоматики и процессов управления, факультет компьютерных технологий и информатики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*  
e-mail: damir.imaev@mail.ru

*Обсуждаются принципы действия систем, толерантных к неисправностям, и подходы к их созданию. В толерантных системах устройство диагностики доставляет информацию о техническом состоянии объекта диагностирования высшему, супервизорному уровню управления, подстраивающему параметры или реконфигурирующему*

**Ключевые слова:** диагностика процессов, неисправность, система управления, толерантность.

## **Введение**

Техническая диагностика в последние десятилетия не ограничивается пассивной ролью обнаружения и локализации неисправностей [1]. Она расширяет область исследований, включая в нее активную функцию создания так называемых *толерантных* систем управления FTCS (англ. Fault-Tolerant Control Systems), сохраняющих работоспособность в случае возникновения неисправностей [2–5]. Целью толерантных систем является временное сохранение работоспособности системы в случае неисправностей, не допуская развитие ситуации до отказов и аварии. Обзор состояния проблем построения реконфигурируемых толерантных систем приведен в [6]. Вместе с тем, это инновационное направление в нашей стране развито недостаточно, на научные публикации отечественных ученых мало ссылок в мировой технической литературе, например, в обзоре [6] приводится единственная ссылка на работу российских исследователей [7]. Научные исследования и прикладные разработки по созданию систем управления, толерантных к неисправностям, несомненно, являются актуальными.

Известно, что системы управления, реализующие принцип отрицательной обратной связи, способны



**М. Ю. Шестопалов,**

*к. т. н., доцент, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*  
e-mail: shestopalov\_08@mail.ru

*структуру объекта. Целесообразно выделить два подхода к обеспечению толерантности — «внешний» по отношению к объекту диагностирования, оказывающий сигнальные воздействия, и «внутренний», оказывающий системные воздействия параметрического, структурного и топологического рангов.*

уменьшать чувствительность характеристик систем к малым вариациям компонентов. Дальнейшее развитие теории и практики управления привело к созданию *робастных* и интервальных систем, работоспособных при значительных изменениях элементов. В этих случаях говорят о *пассивной адаптации*, обеспечивающей слабую зависимость, иначе, инвариантность к параметрическим воздействиям среды. В самонастраивающихся системах адаптация к значительным изменениям свойств объектов достигается *активным* способом — подстройкой параметров регуляторов. В перечисленных случаях говорилось об ослаблении эффекта достаточно медленных изменений характеристик управляемых объектов. Наконец, эволюция идей адаптации и технической диагностики привели к системам, толерантным к внезапно возникающим *неисправностям*.

## **1. Области применения толерантных систем управления**

Современные технологические системы оснащаются сложными средствами управления, позволяющими повысить эффективность процессов и соблюсти требования безопасности и экологичности.

Традиционные методы проектирования таких систем традиционными методами не гарантируют создание систем, удовлетворительно функционирующих и не теряющих устойчивость эксплуатационных режимов при неисправностях исполнительных механизмов, измерительных элементов или других компонентов. Необходимо развивать инновационные подходы к проектированию систем, применяемых для управления небезопасными технологиями, где малейшие неисправности могут привести к катастрофическим последствиям [2–7]. В особенности это относится к авиационной и космической технике [7], ядерной энергетике, нефтехимической промышленности, процессам электронно-ионной [8, 9], карбонильной технологии рафинирования никеля [10] и др.

## 2. Принципы действия толерантных систем управления

Толерантность систем обеспечивается созданием верхнего уровня управления. Верхний (супервизорный) уровень управления является «обычной» системой управления и, естественно, подчиняется закономерностям теории систем и систем автоматического управления. При их проектировании используются известные принципы управления. Реализация *принципа компенсации* (разомкнутого управления) требует наличия текущей информации о причинах неисправностей, что в большинстве практических случаев недостижимо. Поэтому толерантные системы, как и подавляющее большинство систем автоматического управления и регулирования, реализуют *принцип отрицательной обратной связи*.

Системы диагностики в толерантных системах играют роль сенсоров, доставляющих текущую информацию о техническом состоянии объекта диагностирования (ОД) и неисправностях, т. е. о *следствиях* неизвестных причин. В силу этого толерантные системы не способны обеспечивать *абсолютную инвариантность* к неисправностям. Уместно говорить о толерантных системах, *инвариантных до  $\epsilon$* . Вместе с тем, достоинство обратной связи заключается в ее универсальности, что позволяет создавать системы, ослабляющие влияние возмущений, о которых нет априорной или текущей информации.

Подчеркивается, что толерантные системы обеспечивают работоспособность ОД, хотя, как правило, с ухудшенными показателями функционирования. Применительно к процессам управления это, прежде всего, означает сохранение *устойчивости движений* (положений равновесия), быть может, с некоторым ущербом для качества передач по каналам подавления возмущений или воспроизведения сигналов задания.

## 3. Подходы к построению толерантных систем управления

Следует выделить два принципиально различных подхода к построению толерантных систем: 1 — с идентификацией «в целом» номинальной и неисправных моделей ОД; 2 — с локализацией и количественной оценкой неисправностей систем с раскрытой структурой.

**Первый** подход основан на концепции, в соответствии с которой неисправная система интерпретирует как «новый» объект, потерявший качественные показатели процессов, например, часть запаса устойчивости. Задача обеспечения толерантности решается *внешними* по отношению к ОД средствами — путем его охвата обратной связью. Этот подход традиционен и отражает информационно-алгоритмический способ формирования новой динамики, принятый в практике автоматического регулирования в технических системах и в управлении технологическими процессами. Существенно, что при этом на ОД оказываются «сигнальные» воздействия. Реализация подхода связана с решением ряда задач, связанных с формированием структур информационных связей и алгоритмов обработки текущей информации в реальном времени. К ним относятся: 1 — выбор переменных выходов ОД, обеспечивающих наблюдаемость переменных состояния, т. е. точек измерения; 2 — выбор входов, обеспечивающих управляемость, т. е. точек ввода «сигнальных» воздействий; 3 — синтез алгоритмов стабилизации.

Для решения первой и третьей групп задач применяются методы анализа управляемости и наблюдаемости динамических объектов, разработанные современной теорией управления. Выбор эффективных мест включения стабилизирующей обратной связи можно обосновать с помощью методов структурной теории чувствительности [11, 12] позволяющих количественно оценивать роль подсистем и структур диагностируемой системы на различных диапазонах частот, а также матричных и топологических методов локализации неисправностей [13, 14]. Вторая из перечисленных задач традиционна и может решаться известными методами как классической, так и современной теории управления.

Для каждого из неисправных ОД может понадобиться своя система коррекции, проектируемая в онлайн-режиме или заготовленная впрок. Современные системы вычислительной техники способны с достаточной скоростью и степенью адекватности идентифицировать ОД, синтезировать алгоритмы коррекции в реальном времени и программно их реализовать.

**Второй** подход обеспечивает толерантность к обнаруженным и локализованным неисправностям *внутренними* средствами — путем подстройки существующих компонентов и реконфигурации связей. На неисправный ОД оказываются системные воздействия различных рангов: параметрические, операторные или топологические. Если толерантность может быть достигнута подстройкой параметров, то такие системы относятся к адаптивным системам. В том случае, когда корректировка ОД требует мер, адекватное моделирование которых связано с изменением структур операторов компонентов (желательно, алгоритмов, реализуемых программно), говорят о толерантных системах. Здесь можно говорить о дальнейшем развитии идей адаптации. Наконец, сохранение работоспособности ОД за счет реконфигурации системы дает примеры самоорганизующихся систем, толерантных к неисправностям.

Реализация второго подхода, кроме проблем диагностики, связана и задачами формирования структур

информационных связей и алгоритмов принятия решений [13, 14]. К ним относятся: 1 — упорядочение неисправностей по степени их влияния на динамику систем; 2 — ранжирование компонентов и связей по степени влияния на динамику; 3 — синтез алгоритмов подстройки параметров, изменения структур операторов компонентов неисправной системы или реконфигурации топологии.

#### 4. Типы математических моделей, используемых для построения толерантных систем

Принципы функционирования и проектирования толерантных систем те же, что и обычных систем управления. Их проектирование начинается с обоснования необходимости обеспечения толерантности, системного анализа проблемы, формулировки цели, формализации требований к качеству функционирования, построения математической модели ОД и, наконец, синтеза алгоритма принятия решения.

В зависимости от подхода к обеспечению толерантности строятся два типа математических моделей ОД, рассматриваемых как объекты управления второго, супервизорного уровня. Тип, класс, степень структурированности, область адекватности и порядок модели определяют методы проектирования.

Первый тип моделей — традиционный — ее входы и выходы сигналы, естественные для модели ОД, представленной в виде причинно-следственной взаимосвязи элементов направленного действия. Решаются задачи выбора выходов, обеспеченных датчиками и удовлетворяющих условию наблюдаемости «плохой» части динамики и входов, удовлетворяющих условию ее управляемости. Далее синтезируется алгоритм, корректирующий динамику — восстанавливающий минимально необходимый запас качества (устойчивости).

Второй тип моделей — совершенно иной; их необходимо строить заново. Переменными выхода ОД являются результаты диагностирования. Так как система диагностики играет роль датчика информации о техническом состоянии ОД, носителями информации оказываются существенно различные типы данных: 1 — булевы переменные, свидетельствующие об обнаружении неисправности или исправности ОД; 2 — символы — элементы конечных множеств, указывающих на вид и локализацию неисправности; 3 — действительные числа, если указаны количественные оценки неисправностей.

Входы ОД также отражают различные ранги коррекции: 1 — изменение топологии, если предполагается реконфигурация ОД (конечные множества); 2 — структуры операторов, если изменяются алгоритмы (счетные множества); 3 — параметры, если толерантность достигается их подстройкой (множества мощности континуум).

Типы математических моделей ОД и устройства супервизорного управления зависят от типов переменных: 1 — если входы и выходы непрерывны (аналоговые сигналы кодируют информацию), то модели представляют собой дифференциальные уравнения; 2 — если входы и выходы дискретны во времени (вре-

менные последовательности кодируют информацию), то модели представляют собой разностные уравнения; 3 — если информация в виде последовательности символов, то модели устройства принятия решений и ОД являются асинхронными или синхронными конечными автоматами в зависимости от того, время непрерывно или дискретно; 4 — в случае лингвистических переменных, задающих степени принадлежности событий нечетким множествам, модели ОД и управляющего/корректирующего устройства являются механизмами вывода (инференции) [15].

Если модели подсистем относятся к различным типам, то они взаимодействуют посредством интерфейсов, конвертирующих сигналы. В результате модели толерантных систем оказываются *гибридными* [16].

#### Заключение

Системы, способные удовлетворительно функционировать в случае неисправностей путем автоматической реконфигурации существующих компонентов и связей, в современной технической литературе принято называть толерантными [2–6]. Подчеркивается важность новой, инновационной проблематики толерантности к неисправностям сложных процессов управления небезопасными технологиями. Прослеживается эволюция систем с обратной связью, приведшая к системам управления, автоматически подстраивающимся с целью поддержания работоспособности и недопущения аварий при возникновении неисправностей компонентов. Выделены два подхода к обеспечению толерантности — «внешний» по отношению к объекту диагностирования, оказывающий сигнальные воздействия, и «внутренний», — оказывающий системные воздействия параметрического, структурного или топологического рангов. В толерантных системах устройство диагностики доставляет информацию о техническом состоянии объекта диагностирования высшему, супервизорному уровню управления, подстраивающему параметры или реконфигурирующему структуру объекта.

Результаты исследований и разработок будут способствовать созданию методологии, методов, алгоритмов и программных средств для автоматизации проектирования систем управления сложными технологическими процессами, толерантных к неисправностям.

Из изложенного следует также вывод о необходимости инноваций в процессе подготовке специалистов соответствующих инженерных направлений, на что обращается внимание в работах [17, 18].

#### Список использованных источников

1. А. А. Алексеев, Ю. А. Корблев, М. Ю. Шестопалов. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009.
2. P. Frank, T. Marcu. Diagnosis Strategies and System: Principle, Fuzzy and Neural Approaches. Intelligent Systems and Interfaces. Boston, MA: Kluwer, 2000.
3. M. Blanke, M. Kinnaert, M. Staroswiecki, J. Schröder. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. NY, NJ: Springer-Verlag, 2004.

4. *R. Isermann*. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY: Springer-Verlag, 2006.
5. *R. Isermann*. Fault Diagnosis Applications – Model-Based Condition Monitoring; Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant Systems. NY: Springer, 2011.
6. *Y. Zhang, J. Jiang*. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems//Annual Reviews in Control 32, 2008.
7. *С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский, А. В. Силаев*. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах//Автоматика и телемеханика, № 1, 1996.
8. *Ю. А. Кораблев, О. В. Назаров, А. С. Скоробогатый, М. Ю. Шестопалов*. Анализ и синтез системы управления ТП напыления тонких пленок//Управление в технических системах: Изв. ЛЭТИ. Вып. 399, 1988.
9. *Ю. А. Кораблев, А. С. Скоробогатый, М. Ю. Шестопалов*. Оптимизация управления процессами электронно-ионной технологии//Системы обработки информации и управления: Изв. ЛЭТИ. Вып. 411, 1989.
10. *Д. Х. Имаев, И. В. Шевцов, М. Ю. Шестопалов*. Разработка и исследование моделей ТП генерации паров ТНК как объектов управления//Сб. докладов 12-й международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, СПб.: SCM'2009 25–27 июня 2009.
11. *А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев*. Эволюционный синтез систем управления: учеб. пособие. Л.: ЛЭТИ, 1983.
12. *Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов*. Методы теории чувствительности в технической диагностике процессов управления//Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», № 5, 2012.
13. *Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов, И. В. Шевцов, М. Ю. Шестопалов*. Структурный анализ в задачах диагностики сложных систем//Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», № 9, 2011.
14. *Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов*. Топологические и матричные условия локализации неисправностей систем управления//Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», № 5, 2012.
15. *Ю. А. Кораблев, М. Ю. Шестопалов*. Идентификация технологических процессов и управление ими на основе fuzzy и нейро-fuzzy-технологий: учеб. пособие. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.
16. *V. S. Branicky, V. S. Borkar, S. K. Mitter*. A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory//IEEE Trans. AC-43, № 1, 1998.
17. *В. М. Кутузов, М. Ю. Шестопалов, И. С. Терентьева, Н. Н. Семенов, Н. Г. Рыжов, А. В. Муравьев*. Организация системы управления результатами научно-инновационной деятельности вуза: научно-методические рекомендации. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.
18. *Ю. Г. Лега, М. А. Хвесик, М. Ю. Шестопалов, В. М. Кутузов и др.* Модели развития инфраструктуры инновационной деятельности современного университета: монография/Под. общ. ред. проф. Т. Н. Качала. Черкассы: Издатель Ю. А. Чабаненко, ЧГТУ, 2008.

## Fault-Tolerant Systems — an Innovative Approach to the Control of Complex Processes

**D. H. Imaev**, Dr. Sci, professor, ETU.

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

We discuss characteristics of fault-tolerant systems and various approaches to their design. In such systems, a special component monitors the object's conditions and delivers diagnostic data to the higher level supervisor, which tunes the system parameters or reconfigures the structure. The article outlines two approaches to fault-tolerant system design: the «external» (exogenous), control signal-based method, and the «internal» (endogenous) method, based on making parametric, structural and topological system adjustments.

**Keywords:** Fault-tolerant systems, fault detection and diagnosis, control systems, robust control.