

О.А. Машков, д.т.н., профессор, Высшая аттестационная комиссия Украины,  
Киев 1, Хрещатик 34,  
Самчишин О.В., ЖВИ НАУ

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО УСТОЙЧИВЫХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**Введение.** Авторами предлагается на основе анализа публикаций в области функциональной устойчивости краткая характеристика данного научного направления, описание основных результатов и перспектив дальнейшего развития. Проблемная ситуация, приведшая к возникновению данного научного направления, связана с разработкой в конце XX века сложных автономных технических систем, функционирующих в экстремальных условиях (прежде всего авиационно-космических и ракетно-космических систем). Их высокая стоимость и потенциальная опасность потребовали обеспечения соответствующего уровня надежности и безопасности применения. При этом традиционные методы, основанные на многократном резервировании, введении систем встроенного контроля и элементов с повышенным уровнем надежности, ухудшали технико-экономические характеристики проектируемых систем, не приводят к необходимому уменьшению вероятности возникновения опасных ситуаций. Необходимость введения дополнительной аппаратной избыточности для обеспечения надежности системы стало принципиальным ограничением данного подхода.

Было предложено рассматривать нештатные состояния системы, вызванные отказами, как допустимые, и для них формировать адекватное (функционально устойчивое) управление, направленное на парирование последствий отказов и поддержание выполнения функций системы. За счет этого управления обеспечивается перераспределение ресурсов системы для достижения главной цели, даже в условиях отказов. Впервые понятие "функциональная устойчивость", его определение и принципиальные основы обеспечения функциональной устойчивости были приведены в публикациях, посвященных решению конкретных задач управления сложными автономными объектами. Было установлено, что принципиальным условием обеспечения данного свойства является возможность перераспределения имеющихся ресурсов внутри системы.

В традиционных системах автоматического управления автономными объектами, разделенных на отдельные каналы в составе датчиков, вычислителей и исполнительных механизмов, ресурсы (энергетические, вычислительные, информационные), выделяемые на управление, жестко закреплены между соответствующими каналами. При этом невозможность перераспределения ресурсов между каналами ограничивает возможности формирования функционально устойчивого управления. Технологической

основой обеспечения функциональной устойчивости стало создание бортовых информационно-управляющих комплексов, которые позволили комплексировать ресурсы системы и осуществлять их перераспределение. Только комплексирование всех каналов систем автоматического управления в единый информационно-управляющий комплекс, где информационно-измерительная подсистема будет включать все источники информации, устройства перекодирования и сопряжения, вычислительная система – все вычислители, а энергетическая подсистема – все исполнительные механизмы и источники энергии, позволит обеспечить ее функциональную устойчивость. Следует учитывать, что возможность комплексного использования ресурсов и обеспечения функциональной устойчивости систем ограничивается условиями устойчивости динамической системы, ее управляемости и наблюдаемости по Калману. На сегодняшний день достаточно полное исследование условий обеспечения функциональной устойчивости проведено для линейных нестационарных стационарных моделей.

### **Направления развития методов синтеза функционально устойчивых систем управления.**

Данные исследования непосредственно связаны с уточнением понятия "функционально устойчивая система" и "функционально устойчивое управление". Термин "функциональная устойчивость" определяется применительно к решению частных задач, наиболее емкое и четкое определение данного свойства сложной управляемой системы приведено в работах автора. Под функциональной устойчивостью системы понимается ее свойство сохранять на протяжении заданного времени выполнение своих основных функций в пределах, установленных нормативными требованиями, в условиях противодействия, а также влияния потоков отказов, неисправностей и сбоев.

Автором понятие "функционально устойчивое управление" рассматривается для случая информационно-управляющего комплекса линейной стохастической динамической системы в режиме стабилизации, где объект управления и информационно-измерительная подсистема описываются уравнениями в форме Ланжевена

$$\dot{X}(t) = A(t) \cdot X(t) + \delta(t) + f(M) + \gamma(t); \quad (1)$$

$$Y(t) = H(t) \cdot X(t) + f(E) + \gamma(t), \quad (2)$$

где  $X(t)$  –  $n$ -мерный вектор состояния системы;  $U(t)$  –  $m$ -мерный вектор управления;  $Y(t)$  –  $l$ -мерный вектор измерений;  $A(t)$  – динамическая матрица системы размерностью  $n \times n$ ;  $H(t)$  – матрица измерений системы размерностью  $l \times n$ ;  $\gamma(t)$  –  $n$ -мерный случайный вектор, значение которого количественно характеризует действие отказа на систему,  $\gamma_0(t)$  – значение вектора, соответствующего нормальному режиму функционирования,  $\gamma_i(t)$  –

соответствующее  $i$ -ому отказу;  $\xi(t)$ -случайный вектор гауссовских возмущений состояния системы с нулевым вектором средних и корреляционной матрицей

$$\xi(t) \in \Omega_{\xi} : M[\xi(t)] = 0; \quad M[\xi(t) \cdot \xi^T(t')] = Q(t)\delta(t-t'), \quad (3)$$

и  $\eta(t)$  – случайный  $l$ -мерный вектор гауссовских помех измерений с нулевым вектором средних и корреляционной матрицей

$$\eta(t) \in \Omega_{\eta} : M[\eta(t)] = 0; \quad M[\eta(t) \cdot \eta^T(t')] = R(t)\delta(t-t'); \quad (4)$$

вычислительная и энергетическая подсистемы соответственно уравнениями

$$U(t) = u(Y, t); \quad (5)$$

$$\delta(t) = B(t)U(t) + \gamma(t); \quad (6)$$

$B(t)$  –переходная матрица управления размерностью  $n \times m$ ;

Рассматривается случай классического квадратичного критерия качества, без терминальной составляющей:

$$I(X(t), U(t) / \gamma(t)) = M \left( \int_{t_0}^{t_k} X^T(t) \cdot \beta \cdot X(t) dt + \int_{t_0}^{t_k} U^T(t) \cdot C^{-1} \cdot U(t) dt \right). \quad (7)$$

В этих условиях управление  $U^*(t)$ , обеспечивающее минимум математического ожидания квадратичного критерия качества (7) для выбранной модели отказов  $\gamma(t) \in \Omega_{\gamma}$  с учетом ограничений на область допустимых состояний  $X(t) \in \Omega_X$  и управлений  $U(t) \in \Omega_U$ , будет функционально устойчивым при выполнении условий:

$$\left| I(X(t_0), U(t_0) / H_0(t_0)) - I(X(t_0), U(t_0) / H_i(t_0)) \right| < \varepsilon, \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| I(X(t), U(t) / H_0(t)) - I(X(t), U(t) / H_i(t)) \right| < \delta(\varepsilon), \quad (9)$$

Неравенства (8) и (9) формализуют условие функциональной устойчивости управления комплекса (1-6). Если в начальный момент времени  $t_0$  отказ приводит к ухудшению качества стабилизации не больше некоторого положительного значения  $\varepsilon$ , то функционально-устойчивое управление должно обеспечить изменение качества стабилизации не больше некоторого значения  $\delta$ , зависящего от  $\varepsilon$ .

Однако существуют и другие подходы, предложенные автором, к формализации понятия функциональная устойчивость. Прежде всего, авторы старались определить место теории функционально устойчивых систем в

контексте развития современной теории управления. Было установлено, что обеспечение функциональной устойчивости систем выходит за рамки традиционных для классической теории автоматического регулирования задач оптимизации "в малом" (на заданной программной траектории управление определяется из условия оптимизации переходных процессов по тем или иным критериям), так как предполагает неполную априорную информацию об объекте, оперативное формирование программной траектории для текущей обстановки и оптимальное использование всех располагаемых ресурсов.

Поэтому задачи обеспечения функциональной устойчивости можно рассматривать как вид задач адаптивного оптимального управления "в большом", предполагающих оптимальное использование на каждом этапе или режиме функционирования системы всех располагаемых ресурсов (энергетических, информационных, вычислительных), для достижения главной для этого этапа цели при соблюдении множества ограничений.

Авторами показана тесная связь понятия "функциональная устойчивость" с понятиями "надежность", "живучесть" и "отказоустойчивость". Показано принципиальное отличие между ними: методы обеспечения функциональной устойчивости направлены не на уменьшение количества отказов и нарушений (как традиционные методы повышения надежности, живучести и отказоустойчивости технических систем), а на обеспечение выполнения наиболее важных функций, когда эти нарушения уже произошли. Однако эти подходы повышения надежности свойств систем не противоречат друг другу, напротив, они взаимно дополняют друг друга.

В основе методов синтеза функционально устойчивого управления лежит возможность синтеза оптимального управления, которая вытекает из так называемого принципа разделения, который для нелинейных систем дает субоптимальное решение в виде соединения системы субоптимального оценивания и системы оптимального или субоптимального управления, синтезированные для детерминированных условий. Особенность методов синтеза функционально-устойчивых информационно-управляющих комплексов, состоит в том, что в них не рассматриваются процессы, которые привели к отказам. Для формирования специального парирующего управления важен сам факт нарушения работоспособности какого-то элемента комплекса. Сложность проверки даже достаточных условий управляемости и наблюдаемости модернизированной системы по известным ранговым критериям заставила искать другие критерии функциональной устойчивости.

Для информационно-управляющего комплекса, описываемого нелинейными уравнениями, и отказами в виде скачкообразного изменения структуры, предложен графовый критерий функциональной устойчивости.

Рассматривается граф  $\Gamma = \{S, J\}$ , где  $S$  - множество вершин графа  $S = \{x_i, y_j, u_k\}, i = [1, \dots, n], j = [1, \dots, l], k = [1, \dots, m]$ , соответствующих компонентам векторов  $X, Y, U$ ;  $J$  - множество дуг графа, соответствующих наличию функциональной связи между компонентами  $J = \{(X_i, Y_j), (Y_j, U_k), (U_k, X_i)\}$ .

Так как рассматриваемые отказы соответствуют изменению функциональной связи между компонентами векторов  $X, Y, U$ , то динамическая система может быть функционально устойчивой, если при отказе существует путь  $A = (X_i, \dots, U_k)$ , включающий все компоненты векторов  $X$  и  $U$ . Для распределенных информационно-управляющих систем, описываемых в виде неориентированного графа  $G(V, E)$ ,  $v_i \in V, e_{ij} \in E, i, j = 1, \dots, n$ , с смежной матрицей

$$A = \|a_{ij}\|, \quad i, j = 1 \dots n, \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{при } e_{ij} \notin E. \end{cases} \quad (10)$$

где множество вершин  $V$  соответствует множеству узлов коммутации размерности  $n$ , а множество ребер  $E$  – множеству линий связи между узлами коммутации, был предложен другой критерий: функциональная устойчивость будет обеспечиваться, если между какой-нибудь парой узлов коммутации найдется хотя бы один маршрут передачи информации. Преимущество данного критерия состоит в том, что появляется возможность количественно оценить функциональную устойчивость текущей структуры распределенных информационно-управляющих систем на основании простых внешних признаков.

Проведенные исследования позволили построить алгоритмы обнаружения и парирования отказов функционально устойчивого бортового информационно-управляющего комплекса. Один из них заключается в следующем. Вначале априорно формируются образы-эталонные последствия нештатных ситуаций, вызванных отказами функциональных подсистем комплекса, и сохраняются в памяти. Затем после определения образа текущего состояния и его сравнения с хранимыми в памяти образами-эталоном принимается заключение о нормальном функционировании подсистем комплекса или наличии того или иного отказа. Соответственно для каждого случая формируется адекватное управление. Особое значение данного алгоритма заключается в том, что он позволил разделить общую задачу синтеза функционально устойчивых систем на частные задачи: синтеза алгоритма обнаружения отказов и синтеза алгоритма парирования отказов.

Вначале развития теории функциональной устойчивости методы обеспечения функциональной устойчивости применяются для совершенствования технических характеристик сложных технических систем, работающих в экстремальных условиях, прежде всего для авиационно-космических систем. Однако развитие элементной базы вычислительных систем позволяет

расширить область приложения методов обеспечения функциональной устойчивости, например для распределенных систем управления.

Распределенные информационно-управляющие системы представляют собой рассредоточенные на некоторой территории средства автоматизированной обработки информации для решения задач накопления, обработки, сохранения и пересылки информации. Такая система состоит из узлов коммутации и каналов (линий) связи между отдельными элементами системы. Главной функцией данной системы является обеспечение абонентов потенциальной возможностью доступа к общим информационным ресурсам. В современных условиях на распределенные информационно-управляющие системы негативно влияют как внутренние (отказы, сбои, ошибки корпоративных абонентов), так и внешние (активное или пассивное влияние внешней среды) факторы. Поэтому обеспечение функциональной устойчивости распределенных информационно-управляющих систем является актуальной задачей. Исследования критериев, показателей, признаки и методов обеспечения функциональной устойчивости применительно для моделей распределенных информационно-управляющих систем приведены в работах авторов.

Авторами исследовались также вопросы обеспечения функциональной устойчивости для псевдоспутниковых радионавигационных систем, у которых выход из строя хотя бы одного из элементов приводит к потере возможности навигации. Простое введение избыточности (дублирование элементов) приводит к подоразжанию системы, но не гарантирует достаточного качества навигации. Авторами предложена оптимальная структура функционально устойчивой псевдоспутниковой радионавигационной системы посвящены работы.

Другой перспективной областью является обеспечение функциональной устойчивости группового полета беспилотных летательных аппаратов при различных отказах бортового оборудования и каналов связи. Технологическое воплощение полученных решений позволит существенно повысить эффективность применения беспилотной авиации.

Также перспективным направлением исследований является изучение функциональной устойчивости эргатических систем (человеко-машинных систем - систем, в которых необходимым элементом контура управления является человек). Так как автоматические устройства являются лишь частью класса эргатических систем, то разработка методов анализа и синтеза функционально устойчивых эргатических систем является закономерным направлением развития теории. Главная научная проблема обеспечения функциональной стойкости эргатических систем заключается в количественной формализации и описании человека в замкнутом контуре управления. Поэтому наиболее важными направлениями дальнейших исследований следует считать разработку методов оптимизации функционально устойчивых эргатических систем, методов эффективного распределения функций и согласования характеристик между ними и человеком-оператором.

## **Выводы.**

Теория функционально устойчивых систем является результатом системного подхода к решению проблемы повышения надежностных свойств сложных объектов управления (надежность, устойчивость, отказоустойчивость, отказобезопасность). При этом функциональная устойчивость является свойством, принципиально отличным от надежности, устойчивости, отказоустойчивости. Методы обеспечения функциональной устойчивости направлены на более полное использование располагаемых технических ресурсов сложной технической системы. Их особенностью является то, что самой системе отводится не пассивная роль выполнения жесткой программы, а активное перераспределение ресурсов для достижения поставленных целей. Причина невозможности обеспечения необходимого уровня функциональной устойчивости систем дистанционного автоматизированного управления сложными объектами в условиях целевой неопределенности и противодействия состоит в принципиальной ограниченности применяемой схемы «силового» управления, – достижения желаемого фазового состояния объекта исключительно за счет задания внешнего силового воздействия. Системное решение рассматриваемого вида задач управления состоит в изменении принципа управления – в использовании для управления внутренней структуры и энергоинформационных процессов объекта управления в виде различных эффектов самоорганизации (принципа «синергетического» управления). Реализовать принцип синергетического управления при синтезе систем управления можно путем двухэтапной процедуры последовательной оптимизации по гомеостатическому и целевому критериям. В этом случае задача синтеза сводится к последовательному решению задачи распределения функций управления между оператором (операторами) и автоматическими системами и задачи синтеза нелинейного регулятора. Задачу обеспечения функциональной устойчивости можно рассматривать как одну из актуальных научных задач современной теории управления.

1. *Машков О.А.* О функциональной устойчивости бортовых информационно-управляющих комплексов / Вопросы повышения эффективности и качества систем управления полетом и навигации воздушных судов. К.: КИИГА, 1990, с. 79-83.
2. *Артюшин Л.М., Машков О.А.* Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам., Киев: КВВАИУ, 1991, 88 с.
3. *Машков О.А., Машков В.А.* Принципы самодиагностирования сложных систем: сравнительный анализ / Наука и оборона, №2, 1995, с. 102-113.
4. *Гостев В.И., Машков О.А., Машков В.А.* Самодиагностирование модульных систем при случайном выполнении элементарных проверок / Кибернетика и вычислительная техника. Дискретные системы, 1996, вып.105, С. 118-127.
5. *Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A.* Intermodular exchange of diagnostic information in self-diagnostic of complex system / Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, 1995, pp. 95-103.

6. *Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A.* Self-diagnostic of modular systems in random performance of elementary tests / Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, 1995, №105, pp. 104-112.
7. *Машков О.А., Гостев В.И., Машков В.А.* Межмодульный обмен диагностической информацией при самодиагностировании сложных систем / Кибернетика и вычислительная техника, 1996, вып. 105, с. 108-118.
8. *Машков О.А., Гостев В.И., Машков В.А.* Способы обеспечения отказоустойчивости бортовых вычислительных систем на основе их самоконтроля / Кибернетика и вычислительная техника, 1997, вып 109, С. 38-51.
9. *Машков О.А., Машков В.А.* Обеспечение отказоустойчивости вычислительных систем на основе их самодиагностирования по принципу блуждающего ядра / Кибернетика и вычислительная техника, 1997, вып. 112, с. 103-111.
10. *Машков О.А., Машков В.А.* Обеспечение отказоустойчивости сложных систем на основе их самодиагностирования по принципу блуждающего ядра / Кибернетика и вычислительная техника, 1998, вып 116, С. 103-111.
11. *Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A.* Methods for providing fault tolerance of airborne computer system through their self-control / Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, Allerton press, inc, 150 Fifth Avenue, New York, NY10011, №109, 1999, p. 33-44.
12. *Машков О.А., Машков В.А.* Обеспечение отказоустойчивости вычислительных систем на основе их самодиагностирования по принципу блуждающего ядра / Кибернетика и вычислительная техника, 1998, вып 116, с. 103-111.
13. *Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A.* Self-diagnosis of modular system in random performance of elementary tests / Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, Allerton press, inc, 150 Fifth Avenue, New York, NY10011, №105, 1999, pp. 104-112.
14. *Gostev V.I., Mashkov O.A., Mashkov V.A.* Intermodular exchange of diagnosis information in Self-diagnosis of complex systems / Cybernetics and computing Tehnology, Discrete Control Systems, 1999, №105, pp 95-103.
15. *Mashkov O., Mashkov V.* Fault-Tolerant of Computing Systems based on the Self-diagnosis by the traveling kerling Principle / ALLERTON PRESS INC., Cybernetics and Computing Technology (Argatic control system), 1999, pp. 89-94.
16. *Машков О.А., Барабаш О.В.* Проблеми моделювання функціонально-стійких складних інформаційних систем / Наук. Збірник: Інформаційне моделювання складних систем / Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, 2002, с. 137-142.
17. *Машков О.А., Чумакевич В.О., Шуренок В.А.* Шляхи створення та дослідження функціонально-стійкої моделі вимірювально-обчислювального комплексу / Збірник наукових праць НАН України, ПМЕ – „Моделювання та інформаційні технології”, 2003, Вип. 24, с. 40- 47.
18. *Машков О.А. Барабаш О.В.* Топологічні критерії та показники функціональної стійкості складних ієрархічних систем /Збірник наукових праць НАН України, ПМЕ : Моделювання та інформаційні технології, 2003, Вип. 25, с. 29-35.
19. *Машков О.А., Барабаш О.В.* Оцінка функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем / Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, НАН України, Вип1, 2005,с. 159-165.
20. *Азарсков В.М., Машков О.А., Кондратенко С.П.* Особенности построения функционально устойчивых цифровых автоматических систем / Электроника та



- системи управління / Київ, Національний авіаційний університет, № 1 (11), 2007 р., с. 96-105.
21. *Машков О.А., Кононов О.А.* Возможности обеспечения функциональной устойчивости эргатических систем управления в рамках существующего методического аппарата / Збірник наукових праць: Інститут проблем моделювання в енергетиці, Вип. 32, Київ, 2006, с.151-157.
  22. *Машков О., Самборський І, Кірсанов В.* Проблемы построения функционально – устойчивого комплекса управления дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами с применением псевдоспутниковых технологий // Арсенал-XXI, №2, 2007, с. 27-34.
  23. *Машков О.А., Кононов О.А.* Применение теории функционально устойчивых систем для решения задач навигации и управления объектами вида «макросистема» // Системи управління , навігації та зв'язку”, вип.. 3, К., 2007 р., с. 15-19.
  24. *Машков О.А., Кондратенко С.П.* Методы построения функционально устойчивых информационно-управляющих комплексов подвижных объектов /Dynamical system modeling and stability investigation: Modelling and stability / International Conference / Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, К., 2007, с.380.
  25. *Азарсков В.М., Дурняк Б.В., Кондратенко С.П., Машков О.А.* Анализ возможных вариантов построения функционально устойчивого комплекса управления дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами с применением псевдоспутниковых технологий / Збірник наукових праць: Інститут проблем моделювання в енергетиці, НАН України, вип. 42, 2007, с. 28-40.
  26. *Азарсков В.М., Дурняк Б.В., Кондратенко С.П., Машков О.А.* Проблемы построения моделей функционально устойчивого комплекса управления дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами с применением псевдоспутниковых технологий / Моделювання та інформаційні технології / Інститут проблем моделювання в енергетиці, НАН України, вип. 43, 2007, с. 118-127.
  27. *Машков О.А., Усаченко Л.М.* Новые подходы к построению функционально устойчивых сложных динамических систем / „Системи управління , навігації та зв'язку”, вип.. 4(8), К., 2008 р., с. 68-72.
  28. *Машков О.А., Усаченко Л.М.* Теоретические основы построения функционально-устойчивой автоматизированной системы обслуживания воздушного движения (терминология и модели) / Моделювання та інформаційні технології / Інститут проблем моделювання в енергетиці, НАН України, вип. 47, 2008, с. 3-17.
  29. *Дурняк Б.В., Машков О.А., Усаченко Л.М., Сабат В.І.* Методологія забезпечення функціональної стійкості ієрархічних організаційних систем управління / Збірник наукових праць: Інститут проблем моделювання в енергетиці, НАН України, вип. 48, 2008, с. 3-21.