

А. Н. ПАВЛОВ

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации объектов в рамках теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем.

Ключевые слова: сложный объект, структурно-функциональная реконфигурация, методологические основы.

Введение. Исследование современных сложных объектов непосредственно связано со структурной динамикой различной природы, вызванной изменением параметров и состояния объектов на различных этапах их жизненного цикла под действием объективных и субъективных факторов [1, 2]. Особую опасность для функционирования сложных объектов представляют природно-экологические и антропогенно-социальные явления или технико-производственные действия, которые приводят к возникновению кризисных ситуаций, аварий и катастроф. В этих условиях обеспечение непрерывности технологических процессов, а также повышение катастрофоустойчивости и устойчивости к отказам соответствующих объектов является одним из важнейших стратегических направлений развития современных социально-экономических и технических комплексов [2—5].

Для успешного функционирования сложных объектов необходимо, чтобы данные системы были управляемы, т.е. способны изменять свою структуру (структуры), состояния, параметры и способы работы в различных условиях. Широкое распространение на практике при решении задач обеспечения отказоустойчивости и катастрофоустойчивости сложных объектов в рамках теории управления структурной динамикой [4] получил такой вариант управления структурами объектов как реконфигурация.

Под *реконфигурацией* сложного объекта понимается процесс изменения его структуры (структур) в целях сохранения и последующего восстановления (повышения) уровня работоспособности объекта либо в целях обеспечения минимального снижения уровня эффективности системы при деградации ее функций [3, 4].

Основными функциями управления реконфигурацией сложных объектов являются: целеполагание, планирование (стратегическое, долгосрочное, оперативное, календарное и т.п.), регулирование (оперативное управление), контроль и учет, мониторинг и координация. Среди них важнейшей функцией является планирование реконфигурации сложного объекта, исследованию которой и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи. Предметная область управления реконфигурацией сложных объектов (далее — объекты) характеризуется рядом существенных особенностей, кардинально

отличающих ее от проблематики исследований, рассматриваемой в существующей теории управления сложными системами. К таким особенностям можно отнести, в частности, следующие [1—4]:

— объекты, имеющие повышенную сложность и размерность, обладают свойствами избыточности, многофункциональности, распределенности, унификации, однородности основных функциональных элементов (ФЭ), подсистем и связей;

— объекты характеризуются наличием контуров как отрицательной, так и положительной обратной связи, что приводит к режимам самовозбуждения;

— структурная динамика, нелинейность и непредсказуемость поведения объектов вызвана тем, что чрезвычайные и катастрофические ситуации, как правило, трудно предсказуемы и возникают внезапно (временная неопределенность в обеспечении готовности к управлению);

— правила и технологии функционирования постоянно изменяются;

— принятие решений осуществляется в условиях жесткого лимита времени, рисков и различных ограничений в возможностях выбора и реализации управляющих воздействий и т.п.

Необходимость учета перечисленных и целого ряда других особенностей процессов управления сложными объектами в чрезвычайных и катастрофических ситуациях требует разработки новых, специальных принципов и методов мониторинга, анализа и прогнозирования ситуаций, разработки вариантов управляющих решений, процедур их выбора и реализации.

В рамках стандартной (классической) технологии реконфигурации сложных объектов (в ряде случаев называемой „слепой“ реконфигурацией [4]) при отказах и нарушениях функционирования сложного технического объекта в целях сохранения его наиболее приоритетных функций „жертвуют“ другими функциями или частью работоспособных элементов. Следует отметить, что в ходе „слепой“ реконфигурации, как правило, не реализуются такие операции, как учет и анализ текущего состояния объекта и выполняемых им функций; оперативный расчет, оценивание и анализ целевых и информационных возможностей объекта для обоснованного перераспределения его функций между работоспособными элементами и подсистемами.

Таким образом, применительно к современным сложным техническим объектам реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления их структурами для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение эффективности функционирования объекта. Далее такую реконфигурацию, в отличие от „слепой“, будем называть „структурно-функциональной реконфигурацией“.

Структурно-функциональная реконфигурация сложного объекта, с одной стороны, направлена на изменение топологии системы и характеристик работоспособности ее технической подсистемы для ликвидации последствий различных деструктивных воздействий, а с другой — предполагает гибкое перераспределение выполняемых системой целей, задач и функций между неотказавшими компонентами с учетом допустимости функционирования объекта с ухудшенными в заданных пределах показателями качества. При этом в процессе реконфигурации объект может находиться в одном из состояний $S = \{S_v, v = 1, 2, \dots, l\}$. Смена состояний может быть вызвана не только отказами и сбоями отдельных ФЭ, но и аварийными или катастрофическими ситуациями, приводящими к разрушению объекта в целом. Для описания данных ситуаций примем ряд предположений.

Предположение 1. Анализ структурной динамики объекта показывает, что, как правило, его структуры не изменяются непрерывно под действием тех или иных причин, а сохраняют постоянство своей топологии на некоторых временных интервалах.

Предположение 2. Особенность постановки задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации сложного объекта в первую очередь связана с тем, что совокупность частных показателей $\mathbf{F}(S_v) = (F_1(S_v), F_2(S_v), \dots, F_h(S_v), \dots, F_H(S_v))$, $h \in \hat{H} = \{1, 2, \dots, H\}$, качества функционирования объекта в состоянии S_v может быть *декомпозирована на две группы показателей*. Первая группа показателей отражает *структурно-топологические* (статические) характеристики системы (структурную надежность, структурную устойчивость, структурно-топологические свойства и т.д.) — $F_h(S_v)$, $h \in \hat{H}_{\text{str}} \subseteq \hat{H}$; вторая группа отражает *структурно-функциональные* (динамические) характеристики (функциональную устойчивость, производительность, расходуемые ресурсы, эффективность и др.) — $F_h(S_v)$, $h \in \hat{H}_{\text{fun}} \subseteq \hat{H}$, причем $\hat{H}_{\text{str}} \cup \hat{H}_{\text{fun}} = \hat{H}$.

Предположение 3. Создание планов структурно-функциональной реконфигурации объекта ведется при допущении, что катастрофа, в отличие от отказа (события возможного, прогнозируемого, вероятного), — это событие возможное, но не вероятное, либо его вероятность мала и не может быть обоснованно оценена в процессе проектирования. Иными словами, третье предположение, в рамках рассматриваемой задачи, состоит в том, что причины возникновения кризисных, аварийных и катастрофических ситуаций (в отличие от сбоев и отказов), как правило, не подчиняются вероятностно-статистическим закономерностям и имеют многоаспектную и многофакторную природу, для изучения которой необходимо привлечение технологий системного моделирования.

Предположение 4. Функционирование объекта в каждом из состояний S_v определяется набором отказавших и неотказавших функциональных элементов. *Отказавшим (неработоспособным)* будем считать ФЭ, который не способен выполнить операции сохранения, приема, передачи, обработки и защиты информационных и/или материальных ресурсов; ФЭ будет считаться *частично работоспособным* при возможности выполнения им хотя бы одной из перечисленных операций.

Очевидно, что значения частных показателей $F_h(S_v)$, $h = 1, 2, \dots, H$, качества функционирования объекта в каждом из состояний S_v зависят от множества отказавших, работоспособных и частично работоспособных ФЭ; распределения операций обработки, сохранения, приема—передачи информационных и/или материальных ресурсов; перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

Направления исследований. Одной из целей управления структурной динамикой сложных объектов является обеспечение в каждый момент времени максимально возможного уровня работоспособности системы и ее элементов. Эта цель достигается с помощью двух дополняющих друг друга процессов: во-первых, целенаправленного воздействия (управления) на процесс деградации объекта таким образом, чтобы исключить или уменьшить возможность (вероятность) переходов объекта в нежелательные состояния, и, во-вторых, управления процессами восстановления работоспособного состояния объекта и компенсации ситуационно появляющихся возмущений [2, 4].

Помимо вышеуказанных особенностей, важным и неотъемлемым условием исследования возможностей объекта является анализ и оценивание его структуры. Одним из возможных подходов к изучению структурных построений сложных объектов является таксономия структур, базирующаяся на таких понятиях, как „однородность—неоднородность“, „равноценность—неравноценность“, „монотонность—немонотонность“. При данном подходе предполагается, что структура объекта однородна, если все включенные в нее функциональные элементы идентичны, и неоднородна, если хотя бы один из ее ФЭ отличается от всех остальных. При оценивании равноценности и неравноценности структурного построения объекта считается, что его

структура равноценна, если потеря одного из ФЭ равнозначна потере любого другого, и наоборот, структура объекта неравноценна, если отдельные ФЭ имеют большую ценность по сравнению с другими. Для изучения этого свойства требуется исследовать критичность входящих в состав объекта функциональных элементов. Выявление критичных элементов способствует оптимизации структур других элементов, играющих в обеспечении надежности, безопасности и живучести объекта наиболее важную (ключевую) роль. Критичность отказов ФЭ рассматривается в широком смысле как комплексное свойство, для оценивания которого целесообразно использовать следующие частные показатели качества: вероятность отказа; степень тяжести последствий отказа; устойчивость элемента к воздействию внешних неблагоприятных факторов; возможность резервирования; возможность контроля состояния элемента; продолжительность существования риска отказа; возможность локализации отказа.

Проведенный анализ показал, что модели функционирования большинства сложных объектов корректно могут быть представлены структурными схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, многотерминальными сетями и т.п. Однако такие структурные модели могут описывать функционирование только монотонных систем. В монотонных моделях невозможно учитывать логически сложные и противоречивые связи и отношения между функциональными элементами: например, в одних структурных построениях такие связи увеличивают показатель эффективности функционирования системы, а в других — уменьшают. Также монотонными моделями не могут быть представлены системы, где одновременно функционируют элементы, часть из которых обеспечивает увеличение, например, надежности или безопасности, а другая часть является причиной возникновения отказов или аварий, т.е. оказывает противоположное вредное воздействие на безопасность системы в целом.

На рис. 1 приведены результаты анализа основных аспектов проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов. (На рис. 1, как и на рис. 2, сложный объект обозначен аббревиатурой СО.)

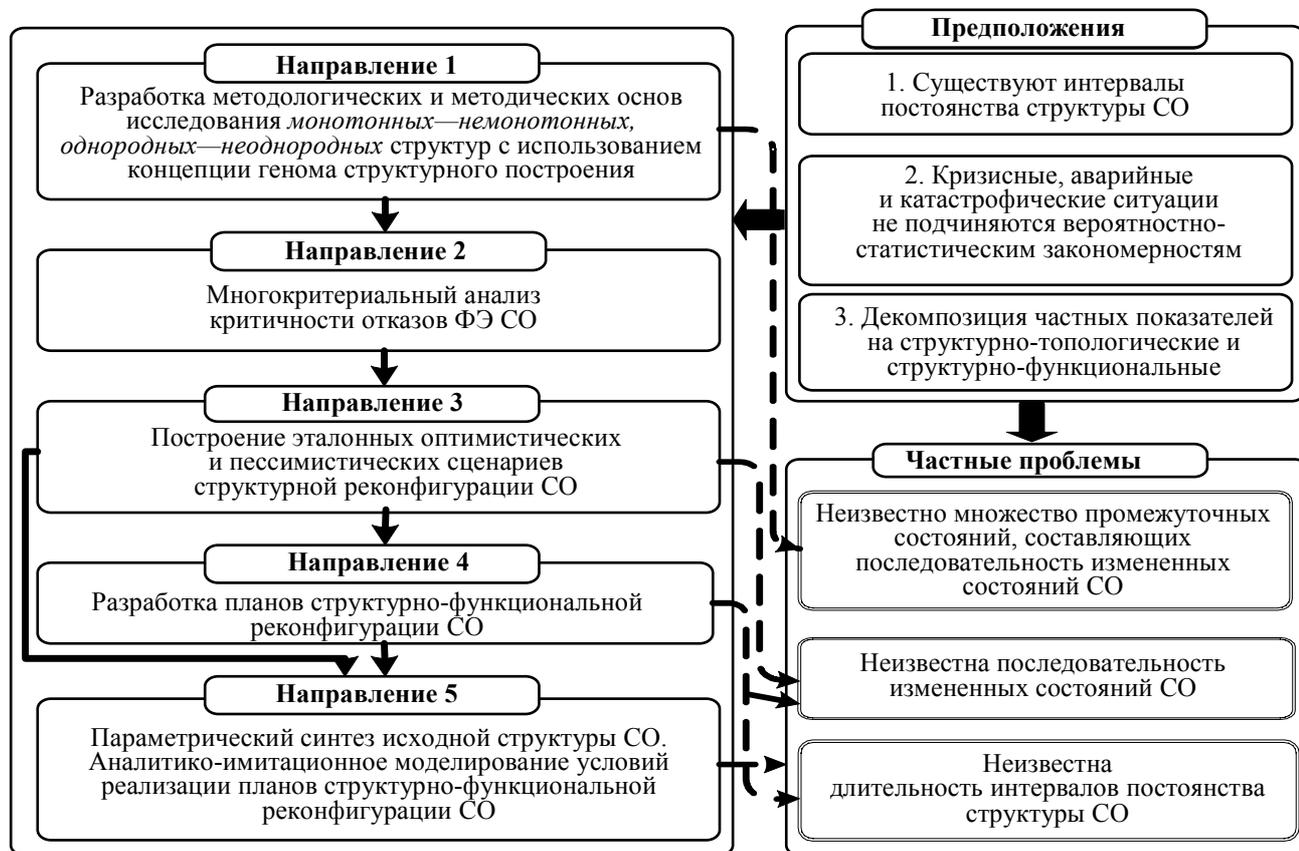


Рис. 1

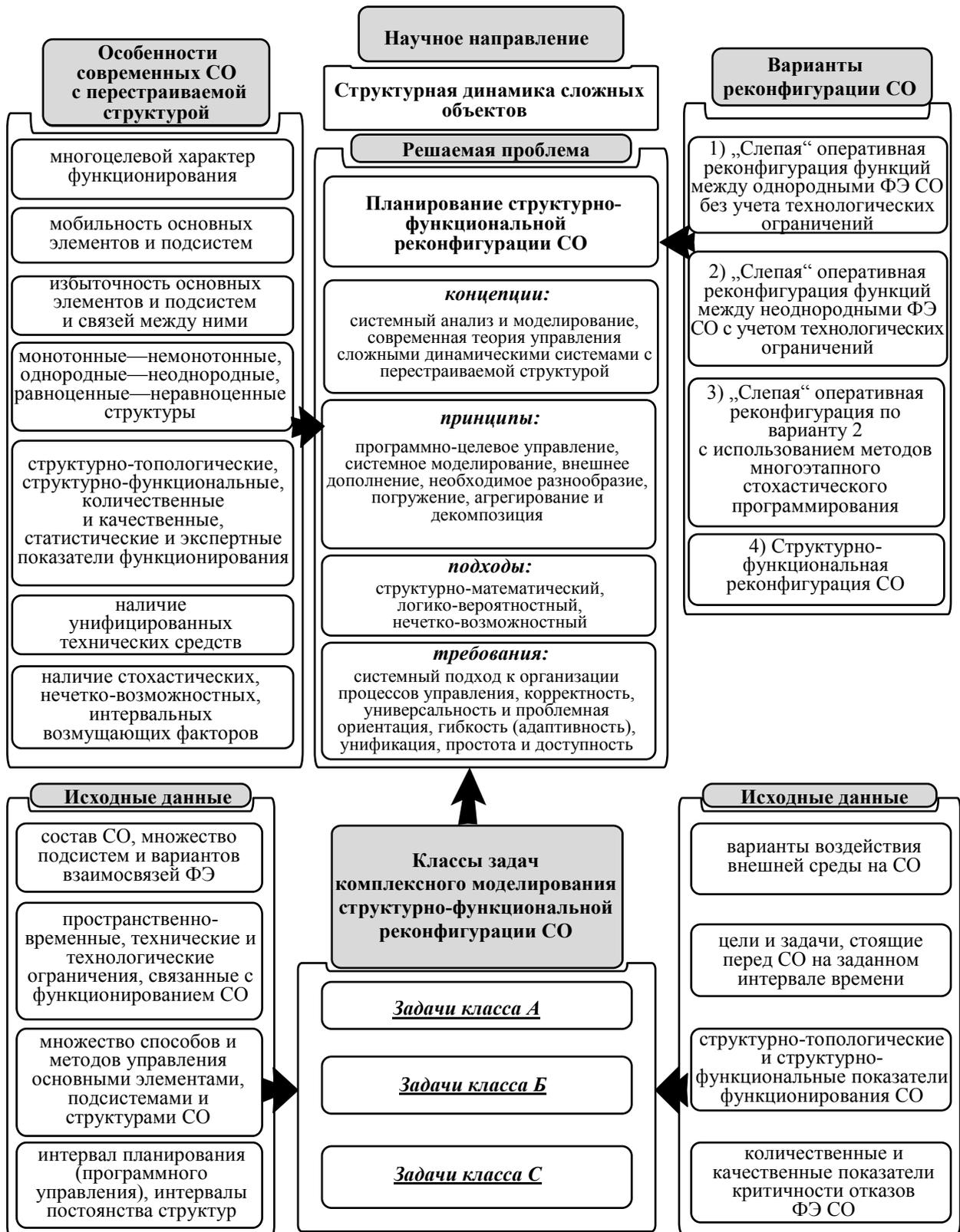


Рис. 2

Резюмируя вышеизложенное и используя результаты проведенного анализа, для решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов можно выделить три основные класса задач (см. рис. 2):

задачи класса А — построение эталонных оптимистических и пессимистических сценариев (траекторий) структурной реконфигурации объекта при деструктивных воздействиях на критичные функциональные элементы;

задачи класса В — построение по указанным эталонным сценариям планов структурно-функциональной реконфигурации объекта, при которых создаются наилучшие условия выполнения целевых задач;

задачи класса С (вспомогательные):

— исследование монотонных—немонотонных, однородных—неоднородных, равноценных—неравноценных структур объектов на основе концепции генома структурного построения;

— оценивание показателей критичности отказов ФЭ (структурно-топологических, структурно-функциональных);

— многокритериальный анализ критичности отказов ФЭ;

— построение классов эквивалентных сценариев структурной реконфигурации объектов, выделение эталонных сценариев;

— параметрический синтез начального структурного построения объекта;

— аналитико-имитационное моделирование условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации объекта.

На рис. 2 также представлены в обобщенном виде методологические основы решения исследуемой проблемы.

Заключение. Анализ современных наиболее перспективных вариантов „слепой“ реконфигурации сложных объектов показал, что процесс формирования их промежуточных состояний с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривался. Существующие постановки задачи „слепой“ реконфигурации характеризуются большой размерностью и не учитывают существенные операции. В целях учета особенностей управления сложными объектами сформулированы и обоснованы общие и частные требования, предъявляемые к разработке новых принципов, моделей, методов и методик многокритериального оценивания, анализа и выбора структурно-функциональной реконфигурации объектов. Анализ данных требований позволил сформулировать основные направления агрегативно-декомпозиционного подхода к решению проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов.

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 11-08-01016, 11-08-00767, 12-06-00276, 12-07-00302), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.11), а также программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленков В. Г., Будзко В. И., Сеницын И. Н. Катастрофоустойчивость корпоративных информационных систем. М.: ИПИ РАН, 2002. Ч. 1.
2. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: Учеб. пособие. М.: Изд. центр „Академия“, 2003.
3. Додонов А. Г., Кузнецова М. Г., Горбачик Е. С. Введение в теорию живучести вычислительных систем. Киев: Наукова думка, 1990.
4. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.

5. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 5—16.

Сведения об авторе

Александр Николаевич Павлов

— канд. техн. наук, доцент; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании;
E-mail: pavlov62@list.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
10.06.12 г.