

Методология и технологии реконфигурации катастрофоустойчивых информационных систем

*Б.В. Соколов,
зам. дир. по научн. работе, д.т.н., проф., sokol@iias.spb.su,
А.Н. Павлов,
в.н.с., д.т.н., проф.,
Ф.М. Кулаков,
в.н.с., д.т.н., проф.,
СПИИРАН, г. Санкт-Петербурге,
В.Г. Парфенов,
зав. каф. ИТМО, д.т.н., проф.,
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербурге*

В докладе предлагаются разработанные авторами методология и технологии исследования задач реконфигурации катастрофоустойчивых информационных систем (КАИС), которые формально описываются и решаются в рамках более общей проблемы оперативного многокритериального структурно-функционального синтеза облика указанных систем. Приводится обобщенная процедура решения проблемы реконфигурации КАИС.

The report proposes methods and technologies developed by the authors to study the problems of reconfiguration of disaster tolerant information systems (DTIS) that are formally described and solved within the framework of a more general problem of operational multi-criteria structural-functional synthesis of the appearance of these systems. A generalized procedure for solving the problem of reconfiguration of CAIS is given.

Введение

В современных условиях обеспечение непрерывности бизнес-процессов (БП) и повышение катастрофоустойчивости соответствующих бизнес-систем (БС) и информационных систем (ИС) (которые в дальнейшем назовем катастрофоустойчивыми ИС (КАИС)) является одним из важнейших стратегических направлений развития любой компании [1-5]. Это обусловлено необходимостью сохранять устойчивость и стабильность функционирования компании и ее ИС в различных условиях неблагоприятного воздействия внешних и внутренних факторов техногенного и/или природного характера. В этих условиях исследовать и решать задачи анализа и синтеза КАИС целесообразно в рамках междисциплинарного подхода, интерпретируя их как задачи проактивного управления структурной динамикой (УСД) указанных систем.

Применительно к КАИС широкое распространение на практике получил такой вариант управления их структурами как реконфигурация, под которой, в общем случае, понимается процесс изменения параметров, структур, технологий функционирования КАИС в целях сохранения, восстановления (повышения) до требуемого уровня значений показателей работоспособности и эффективности как КАИС, так и БС в целом, либо обеспечения минимального снижения уровней значений указанных показателей при деградации функций рассматриваемых систем.

В докладе приводятся методологические основы и технологии реконфигурации КАИС, которые позволяют перейти от узкой технологии “слепой” реконфигурации, не учитывающей особенности динамически изменяющейся обстановки, к их широкой системной интерпретации, базирующейся на фундаментальных научных результатах, полученных к настоящему времени в современной теории управления сложными объектами.

Методологические и технологические основы формального описания и исследования проблем реконфигурации КАИС

Предварительный анализ проблем и задач, которые необходимо решать на различных этапах жизненного цикла КАИС и существующих теоретических методов и подходов их решения показывает, что в рамках ранее разработанных теорий и методологий управления сложными системами эти вопросы, как отдельный предмет исследований, с единой общесистемной точки зрения практически не рассматривались. При этом покрываемая их предметная область имеет целый ряд существенных особенностей, кардинально отличающей её от предмета исследования существующих теорий управления сложными системами. Среди них можно указать, в частности следующие особенности [1-3]:

- чрезвычайные и катастрофические ситуации, как правило, трудно предсказуемы и возникают внезапно (временная неопределенность в обеспечении готовности к управлению);
- масштабы связанных с ними негативных последствий также трудно предсказуемы;
- они могут быстро увеличиваться со временем и иметь различные отдаленные негативные последствия для разнородных, в том числе территориально распределенных объектов (неопределенность границ и содержания предметной области);
- информация о таких ситуациях, как правило, имеет противоречивый и плохо предсказуемый по своему составу и объему характер и поступает в систему управления с различными временными задержками (неопределенность в идентификации текущих состояний и ситуаций);
- принятие решений в таких ситуациях осуществляется в условиях жёсткого лимита времени, рисков и различных ограничений в возможностях выбора и реализации управляющих воздействий и т.п. этих и целого ряда других специфических особенностей процессов управления сложными системами в чрезвычайных и катастрофических ситуациях требует разработки принципиально новых, специальных принципов и методов мониторинга, анализа и прогнозирования ситуаций, разработки вариантов управляющих решений, процедур их выбора и реализации.

Так, например, анализ показывает, что принципы и методы традиционных диагностических систем концептуально являются констатирующими отказы, неисправности, дефекты и ориентированы на диагностику штатного режима. При этом не учитывается ряд важнейших свойств динамики функционирования сложных объектов в условиях нештатных и критических ситуаций.

В частности, не учитывается специфика их вероятностных свойств, возможность внезапного появления динамического хаоса в виде неупорядоченных процессов в детерминированных системах, «тонкая» структура динамики механизмов старения и разрушения материалов и конструкций, а также ряд других практически важных свойств динамики нештатных и критических ситуаций.

Остается открытым множество концептуальных проблем, связанных с управлением структурной динамикой сложных систем при их различных деградациях, оценки и прогнозирования рисков возникновения нештатных и критических ситуаций, а также рисков выбора и реализации соответствующих управленческих решений и т.п. [3].

Потребности в решении перечисленных проблем чрезвычайно велики, т.к. от этого сегодня во многом зависит способность в предотвращении и локализации различных критических ситуаций. Общесистемный анализ существующих подходов к решению этих и других задач, составляющих рассматриваемую проблему, показывает, что в настоящее время уже сформировались необходимые условия для разработки нового междисциплинарного научного направления – теории управления сложными организационными и организационно-техническими системами (в том числе, и КАИС) в кризисных ситуациях, предметом исследований которой являются объекты и процессы, характеризуемые перечисленными выше особенностями [1-7].

Таким образом, в настоящее время весьма актуальной становится разработка методологических и методических основ комплексной автоматизации процессов адаптивного планирования и управления модернизацией и функционированием КАИС на основе разработки концепций, принципов, моделей, методов и алгоритмов анализа и управления структурной динамикой ИС в реальных условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости информации о складывающейся обстановке и при наличии неустранимого порогового ограничения времени на цикл формирования и реализации решений по предотвращению возможных критических, чрезвычайных и аварийных ситуаций.

Проведенный анализ показал, что наиболее перспективным путем решения всех перечисленных задач создания, применения и развития КАИС является путь, базирующийся на разработке модельно-алгоритмических основ теории проактивного управления структурной динамикой сложных организационно-технических объектов (СОТО).

Для формального описания и интерпретации проблемы реконфигурации КАИС как проблемы оперативного многокритериального структурно-функционального синтеза указанной системы введем в рассмотрение следующий системный динамический альтернативный мультиграф (ДАМГ) следующего вида [8-9]:

$$G_{\chi}^t = \langle X_{\chi}^t, F_{\chi}^t, Z_{\chi}^t \rangle, \quad (1)$$

где χ - индекс, характеризующий тип структуры КАИС, $\chi \in NS = \{1,2,3,4,5,6\}$ – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной, технической структурам, структурам ПМО, ИО, организационной структуре, $t \in T$ – множество моментов времени; $X_{\chi}^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_{\chi}\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры G_{χ}^t (множество вершин ДАМГ) в момент времени t ; $F_{\chi}^t = \{f_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ – множество дуг ДАМГ типа G_{χ}^t , отражающих взаимосвязи между его элементами в момент времени t ; $Z_{\chi}^t = \{z_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих элементов ДАМГ.

Кроме того, зададим множество допустимых (исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи управления структурной динамикой КАИС) операций отображения указанных выше ДАМГ друг на друга:

$$M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t : F_{\langle \chi \rangle}^t \rightarrow F_{\langle \chi' \rangle}^t, \quad (2)$$

а также операции композиции указанных отображений в момент времени t

$$M_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t = M_{\langle \chi, \chi_1 \rangle}^t \circ M_{\langle \chi_1, \chi_2 \rangle}^t \circ \dots \circ M_{\langle \chi_{n-1}, \chi' \rangle}^t. \quad (3)$$

С учётом вышеизложенного, многоструктурное состояние можно определить как подмножество декартова произведения множеств элементов, на которых строятся соответствующие структуры КАИС ВП:

$$S_{\delta} \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t \times X_4^t \times X_5^t \times X_6^t, \quad \delta = 1, \dots, K_{\Delta} \quad (4)$$

Множество многоструктурных состояний КАИС ВП запишется следующим образом:

$$S = \{S_{\delta}\} = \{S_1, \dots, S_{K_{\Delta}}\}. \quad (5)$$

Введём ещё множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний сети КАИС друг на друга:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t : S_{\delta} \rightarrow S_{\delta'}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что каждое многоструктурное состояние сети КАИС в момент времени $t \in T$ задаётся в результате операции композиции соответствующих ДАМГ, описывающих каждый тип структуры (см. формулу 3).

Графическая интерпретация рассматриваемых задач управления структурной динамикой КАИС в этом случае сводится к поиску такого многоструктурного состояния $S_{\delta}^* \in \{S_1, S_2, \dots, S_{K_{\Delta}}\}$ и такой последовательности

(композиции) выполнения операций отображения вида (6) во времени $\Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \Pi_{\langle \delta', \delta' \rangle}^{t_3}$ при которых обеспечивается выбор и реализация оптимальной (с точки зрения обобщённого показателя эффективности) программы управления структурной динамикой ЛЦ в КАИС ВП, обеспечивающей переход динамической системы (1) из заданного в требуемое многоструктурное состояние. Наряду с графической интерпретацией исследуемой проблемы может быть также предложено следующее ее *теоретико-множественное описание*: необходимо

разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, позволяющие находить такие $\langle U^t, S_{\delta}^{*t} \rangle$, при которых выполняются следующие условия:

$$J_{\theta} \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{\langle U^t, S_{\delta}^{*t} \rangle \in \Delta_g}{extr}, \quad (7)$$

$$\Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_{\delta}^{*t} \rangle \mid R_{\beta} \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t \right) \leq \tilde{R}_g; U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t; \beta \in \mathbf{B} \right\}, \quad (8)$$

где U^t — управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как структуру КАИС, так и процессы ее функционирования (включая, в том числе, и процессы реконфигурации структур, направленные на восстановление ее работоспособности, либо повышение тех или иных показателей качества применения КАИС по целевому назначению); J_{θ} — стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество функционирования КАИС, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ — множество номеров показателей; Δ_g — множество динамических альтернатив (множество структур и параметров КАИС, множество программ их функционирования); \mathbf{B} — множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих процессы реализации КАИС; \tilde{R}_g — заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ — интервал времени, на котором синтезируются облик соответствующей КАИС в динамически изменяющейся обстановке.

Анализ структуры и содержания формально описанной проблемы реконфигурации КАИС в динамически изменяющейся обстановке показал, что методологические основы решения данной проблемы должны базироваться на результатах, полученных к настоящему времени в обобщенном системном анализе и современной теории проактивного управления СТО с перестраиваемыми структурами, которые нашли свое конкретное отражение в соответствующих принципах.

К ним относятся: принцип программно-целевого управления, принцип внешнего дополнения, принцип необходимого разнообразия, принципы полимодельности и многокритериальности, принцип новых задач.

Говоря собственно о конструктивном решении проблемы (7) - (8), то следует указать, что в ходе проведенных исследований была предложена следующая обобщенная процедура, включающая две основные фазы.

В этом случае **на первой фазе** должно осуществляться формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний КАИС или, говоря другими словами, должен проводиться структурно-функциональный синтез нового облика КАИС, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке. В указанной ситуации задачи, решаемые на первой фазе, сводятся к задачам структурно-функционального синтеза КАИС. Обобщенный алгоритм структурно-функционального синтеза облика (в том числе реконфигурации) КАИС должен включать в себя следующие основные этапы (шаги).

Шаг 1.1. Формирование, анализ и интерпретация исходных данных, используемых при генерировании (синтезе) многоструктурных макросостояний КАИС, построение или коррекция описания моделей, используемых при структурно-функциональном синтезе облика КАИС.

Шаг 1.2. Планирование процесса решения задачи генерирования (синтеза) многоструктурных макросостояний КАИС. Определение затрат времени и других ресурсов, необходимых для решения рассматриваемой задачи.

Шаг 1.3. Построение и аппроксимация множества достижимости (МД) динамической системы вида (8), с помощью которого неявно задаются варианты облика КАИС (варианты многоструктурных макросостояний КАИС).

Шаг 1.4. Ортогональное проектирование на МД множества, с помощью которого задаются требования, предъявляемые к новому облику КАИС,

Шаг 1.5. Формирование и интерпретация выходных результатов, представление их в удобном для последующего использования виде (например, для разработки адаптивных планов развития КАИС и соответствующих регулирующих воздействий, обеспечивающих реализацию данных планов с требуемой степенью устойчивости).

На второй фазе проводится выбор конкретного варианта многоструктурного макросостояния КАИС с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) управления переходом (реконфигурации) КАИС из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие КАИС, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновременно и реализация программ устойчивого управления КАИС в промежуточных макросостояниях.

На второй фазе исследования задачи выбора оптимальных программ УСД КАИС (реконфигурации) приходится решать целую совокупность частных задач многоуровневой и многоэтапной оптимизации. Обобщенный алгоритм решения данных задач должен включать следующие этапы (шаги).

Шаг 2.1. В интерактивном режиме осуществляется автоматизированная подготовка, контроль, анализ и ввод всей исходной информации, необходимой для решения задачи проактивного управления структурной динамикой КАИС. При этом одновременно проводится адаптация параметров и структур ранее построенных моделей, алгоритмов и соответствующих вычислительных модулей специального программно-математического и информационного обеспечения (СПМО и ИО) имитационной системы (ИмС) к прошлому и текущему состоянию внешней среды, объектов управления и управляющих подсистем, входящих в состав функционирующей и синтезируемой КАИС. При отсутствии требуемых исходных данных происходит либо их генерация с использованием соответствующих имитационных моделей, входящих в состав ИмС, либо на основе экспертного опроса.

Шаг 2.2. Планирование проведения комплексного моделирования процессов адаптивного управления функционированием и развитием КАИС в текущей и прогнозируемой обстановке, планирование проведения вычислительных экспериментов в ИмС, определение состава и структуры моделей, методов и алгоритмов решения частных задач моделирования, расчёт времени, необходимого для решения указанных задач.

Шаг 2.3. Генерирование, на основе проведения комплексного моделирования, допустимых вариантов функционирования КАИС в исходном, промежуточных и требуемых многоструктурных макросостояниях, вывод результатов моделирования ЛПР, предварительный интерактивный структурно-функциональный анализ указанных результатов моделирования; формирование классов эквивалентных многоструктурных макросостояний КАИС,

Шаг 2.4. Автоматизированный ввод допустимых вариантов функционирования КАИС, проверка корректности заданной системы ограничений, окончательный выбор необходимого уровня агрегирования при описании моделей УСД КАИС, вычислительной схемы и плана вычислительных экспериментов по поиску оптимальных программ УСД КАИС.

Шаг 2.5. Поиск оптимальных программ управления структурной динамикой КАИС, при которых обеспечивался переход из заданного в синтезируемое многоструктурное макросостояние КАИС, устойчивое управление функционированием КАИС в промежуточных многоструктурных макросостояниях.

Шаг 2.6. Имитация условий реализации оптимального плана управления переходом КАИС из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние при наличии возмущающих воздействий и с учётом различных вариантов их компенсации на основе методов и алгоритмов оперативного управления.

Шаг 2.7. Структурная и параметрическая адаптация плана, СПМО и ИО ИмС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям объектов управления и управляющей подсистемы (ОУ, УП), внешней среды. В ходе указанной адаптации, кроме того, вводится необходимый уровень структурной избыточности КАИС, обеспечивающий на этапе реализации плана компенсацию не предусмотренных в плане возмущающих воздействий.

После проведения требуемого числа вычислительных экспериментов осуществляется оценивание устойчивости сформированного адаптивного плана УСД КАИС.

Шаг 2.8. Вывод полученных результатов комплексного адаптивного планирования применения КАИС, их интерпретация и коррекция ЛПР,

Одно из главных достоинств предлагаемой обобщенной процедуры поиска оптимальных программ УСД КАИС состоит в том, что в ходе формирования вектора программных управлений в финальный момент времени мы, наряду с оптимальным планом, одновременно получаем и то искомое многоструктурное макросостояние, находясь в котором КАИС сможет выполнять поставленные перед ней задачи в складывающейся (прогнозируемой) обстановке с требуемой степенью устойчивости.

Заключение

Главное отличие и новизна предлагаемого подхода к решению задач реконфигурации КАИС состоит в том, что предлагаемая авторами управленческая интерпретация указанных задач как задач оперативного многокритериального структурно-функционального синтеза облика КАИС позволяет с единых позиций подойти к решению всего спектра проблем проактивного управления структурной динамикой (ПУСД) данных систем, используя при этом, фундаментальные научные результаты, полученные к настоящему времени в системно-кибернетической отрасли научных знаний, включающей в себя, в первую очередь, такие дисциплины как системология, кибернетика, информатика.

Достоинство разработанного к настоящему моменту времени комплекса динамических макро- и микромоделей от ранее созданных и описывающих рассматриваемую предметную область также состоит в том, что с их помощью можно решать не только задачи анализа и синтеза программ проактивного управления жизненным циклом КАИС, но и одновременно решать задачи адаптивного многокритериального выбора как облика соответствующих информационных технологий и систем, так и программ их модернизации и функционирования в различных условиях обстановки.

При этом предлагаемая авторами динамическая интерпретация происходящих процессов позволила непосредственно (в аналитическом виде) связать потоковые динамические модели (модели системной динамики) с динамическими моделями распределения не складываемых (складируемых) ресурсов на сетях с перестраиваемой структурой.

При данном подходе к организации и проведению комплексного моделирования удаётся провести формализацию и исследование нового класса прикладных задач, а именно, задач проактивного УСД социотехнических объектов, возникающих в различных предметных областях (экономике, бизнесе, информатике и т.д.).

Применение предлагаемых динамических моделей, как показывает предварительный анализ, позволит:

- широко использовать в ходе моделирования КАИС фундаментальные научные результаты, полученные к настоящему времени в современной теории управления сложными динамическими системами с перестраиваемой структурой;
- существенно сократить размерность задач управления структурной динамикой проактивного УСД КАИС, решаемых в каждый момент времени (за счёт рекуррентного описания моделей);
- достаточно конструктивно проводить согласование и взаимную интерпретацию результатов, полученных на аналитических и имитационных моделях проактивного УСД КАИС как на концептуальном, так и на алгоритмическом, информационном, программном уровнях описания;
- обоснованно подходить к выбору временных интервалов работы элементов и подсистем, входящих в состав КАИС;
- существенно сократить затраты оперативной памяти ЭВМ, повысить оперативность решения задач проактивного УСД КАИС при использовании перспективных гибридных вычислительных систем, позволяющих проводить декомпозицию и распараллеливание вычислительного процесса.

Кроме того, полученные с помощью разработанных комбинированных методов и алгоритмов оптимальные программы управления структурной динамикой КАИС используются в качестве эталонных решений, относительно которых на практике уже выбираются эвристические решения.

Достоинство данного подхода к формированию управляющих воздействий состоит в том, что при использовании эвристических подходов удается оценить их погрешность.

К настоящему времени разработаны и реализованы в ряде критических прикладных областей инструментальные средства и соответствующие интеллектуальные информационные технологии мониторинга и управления структурной динамикой СТО.

В докладе приводятся сведения об указанных реализациях, примеры решения ряда важных частных прикладных задач [8-10].

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214, 17-29-07073-офи-м), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, результаты, представленные во втором разделе доклада, получены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00199).

Литература

1. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2003.
2. Будзко В.И., Беленков В.Г., Кейер П.А. К выбору варианта построения катастрофоустойчивых информационно-телекоммуникационных систем // Системы и средства информатики, 2003. вып 13. М.: Наука, с. 16-40.
3. Будзко В.И., Беленков В.Г., Кейер П.А. Проблемы создания катастрофоустойчивых автоматизированных систем банковских расчетов // Системы и средства информатики, 2002. вып 12. М.: Наука, с. 48-57.
4. Будзко В.И., Беленков В.Г., Кейер П.А. К выбору варианта построения катастрофоустойчивых информационно-телекоммуникационных систем // Системы и средства информатики, 2003. вып 13. М.: Наука, с. 16-40.
5. Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. М.:Фазис, 2000.
6. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001.
7. Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. М.:Машиностроение, 1989.
8. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
9. Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В. Теоретические основы проактивного управления сложными объектами // Известия ВУЗОВ. Приборостроение. 2014. Т. 57. №11. С. 7–15.
10. Автомонов П.Н., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Актуальные научно-технические проблемы разработки и внедрения взаимосвязанного комплекса унифицированных интегрированных систем поддержки принятия решений (СППР) в АСУ объектами военно-государственного управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №3(152). Таганрог: Технологический институт Южного федерального университета, 2014. С.14–26.