

В. В. ЗАХАРОВ, А. Ю. БАРАНОВ
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург

ПРОАКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В докладе рассматривается задача разработки проактивных программ управления функционированием киберфизических систем, направленных на мониторинг дорожно-транспортных объектов. Предлагается на этапе синтеза управляющих программ (расписаний наблюдений) опираться на фундаментальные результаты, полученные в современной теории проактивного управления структурной динамикой сложных технических объектов. В докладе на основе динамического подхода проведена формализация задач проактивного планирования измерительно-вычислительных операций.

Введение. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений – это технология информационного обеспечения принятия решений по управлению параметрами состояния мостового сооружения на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ), реализуемая посредством систематического или периодического слежения (наблюдения) за техническим состоянием конструкций или деформациями мостовых сооружений [1].

Корректность результатов наблюдений зависит от количества и качества применяемых аппаратно-программных средств, которые в свою очередь являются элементами дорожно-транспортной киберфизической системы (ДТ КФС). При этом отметим ряд важных особенностей. В общем случае, во-первых, номенклатура территориально-распределенных элементов, а также количество информационных каналов может измеряться сотнями единиц. Во-вторых, наблюдаемые величины имеют неоднородную природу (таблица 1).

Т а б л и ц а 1

Элементы ДТ КФС

№	Название датчика	Измеряемые параметры	Ед. изм.
1	Тензомер (датчик напряжений)	Относительная деформация	Мкм/м
2	Акселерометр (датчик ускорений)	Частота ускорений	Гц
3	Прогибомер (датчик смещений)	Прогиб элементов конструкций сооружения	Мм
4	Датчик перемещений (GPS)	Дифференциальные фазовые измерения с постобработкой	Мм
5	Метеостанция (анеометр)	Климатические воздействия	м/с, °С, мм рт., г.м ³ .
6	Инклинометр (датчик угла наклона)	Угол наклона	Мм
7	Датчик температуры	Температура конструкций	Град
8	Камеры внешнего наблюдения	Визуальные измерения	-

В-третьих, для обработки данных наблюдения применяются различные вычислительные технологии промышленного Интернета (облачные, туманные, граничные и т. д.) [2].

Наряду с указанными особенностями рассматриваемые в докладе системы и их элементы подвержены физическому и моральному старению. При этом возможности обслуживания применяемых аппаратно-программных средств весьма ограничены. Так, например, для установки или замены элемента аппаратно-программного комплекса, установленного на пролетном строении (датчик напряжений), необходимо провести комплекс работ: 1) подготовить техническую документацию на элемент КФС и расчетные характеристики сооружения; 2) получить разрешения на проведения работ; согласовать план и время работ, т. к. нередко приходится перекрывать движение по сооружению; 3) установить датчик и проверить адекватность получаемых значений; 4) установить связь между датчиком и пунктом управления; 5) провести протоколы функционирования различного программного обеспечения.

Следует заметить, что в существующих условиях ключевую роль в обеспечении функционирования ДТ КФС отводится управлению, а именно проактивному планированию измерительно-вычислительных операций (ИВО).

Далее рассмотрим содержательную постановку задачи. Заданы технологии проведения мониторинга технического сооружения на всех уровнях рассматриваемого инфраструктурного объекта. Определен набор характеристик ИВО (длительность, энергопотребление, директивный срок выполнения операций и т. д.), а также множество распределенных информационных сервисов и элементов ДТ КФС (ЭВМ, серверов баз данных, датчиков и т. д.). Необходимо синтезировать проактивное расписание или, другими словами, провести координацию ресурсов так, чтобы обобщенный показатель качества, включающий в себя совокупность частных показателей (целевых и ресурсных), принимал экстремальные значения. Требуется учесть основные технологические и пространственно-временные ограничения. Если синтезируемых планов несколько, то среди них необходимо выбрать обеспечивающий наибольшую устойчивость функционирования ДТ КФС при различных внутренних и внешних воздействиях, а также внештатных ситуациях.

Между тем отметим, что многовариантность формальной постановки данной задачи достаточно велика, а трудности применения традиционных методов дискретной оптимизации хорошо известны. Для преодоления проблемы большой размерности (например, комбинаторного «взрыва» при попытке учесть пространственно-временные ограничения) часто используются подходы, которые не имеют строгого математического обоснования [3]. Вместе с тем до настоящего времени единого подхода к описанию процессов многовариантного управления целеустремленными развивающимися системами (в т. ч. ДТ КФС) до сих пор предложено не было [4].

В докладе рассматриваемую научно-техническую задачу предлагается отнести к классу задач скоординированного динамического многокритериального структурно-функциональный синтез облика ДТ КФС и программ перевода динамического объекта из заданного начального структурного состояния в конечное заданное структурное состояние [2].

Формальная постановка задачи планирования мониторинга. Далее приведем теоретико-множественное описание рассматриваемой задачи. Необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, программное обеспечение, позволяющие синтезировать такие технологии и программы управления ИВО ДТ КФС, позволяющие находить такие $\langle U^t, S_\delta^{st} \rangle$ при которых выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned}
 & J_0^\xi(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t, t \in (t_0, t_f]) \rightarrow \underset{\langle U^t, S_\delta^{st} \rangle \in \Delta_g}{extr} \\
 & \Delta_g \{ \langle U^t, S_\delta^{st} \rangle \mid R_\beta \left(X_\chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi \rangle}^t, \Pi_{(\tilde{\delta}, \tilde{\delta})}^t \right) \leq \tilde{R}_g; \\
 & U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^{t_1} \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^{t_2} \circ \dots \circ \Pi_{\langle \delta_n, \delta \rangle}^{t_n}; \beta \in \mathbf{B} \},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где χ – индекс, характеризующий различные типы структур ДТ КФС, $\chi \in \{\text{Топ, Фун, Тех, ПМО, ИО, Ор}\}$ – множество индексов, соответствующих топологической, функциональной и технической структурам, структурам программно-математического и информационного обеспечения (ПМО, ИО), организационной структуре ДТ КФС; $t \in T$ множество моментов времени; $X_\chi^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_\chi\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры динамического альтернативного системного графа (ДАСГ) G_χ^t или множество вершин ДАСГ, с помощью которого задается управляемая структурная динамика ДТ КФС в момент времени t ; $\Gamma_\chi^t = \{\gamma_{\langle \chi, l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_\chi\}$ – множество дуг ДАСГ 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 ДАСГ. $F_{\langle \chi, \chi \rangle}^t$ – отображения различных структур ДТ КФС друг на друга в момент времени t . $\Pi_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t$ – операция композиции многоструктурных макросостояний с номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент времени t . U^t – управляющие (программные и в реальном масштабе времени) воздействия, позволяющие синтезировать структуры ДТ КФС; J_0^ξ – функционал или, другими словами, результирующий

показатель качества функционирования ДТ КФС, представляющий свертку частных показателей (энергетических, временных и т.д.), которые характеризуют качество управления в различных условиях обстановки; $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ множество номеров показателей; Δ_g – множество динамических альтернатив (множество структур и параметров ДТ КФС, а также множество проактивных планов); \mathbf{B} – множество номеров пространственно-временных, технических и технологических ограничений, определяющих процессы реализации программ проактивного управления ДТ КФС для различных сценариев возмущающих воздействий; \tilde{R}_g – заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени функционирования на заданном этапе ЖЦ ДТ КФС [5].

Синтезируемые программы мониторинга мостовых сооружений должны также обеспечить одновременное выполнение программ устойчивого управления ДТ КФС (в т. ч. развития) в промежуточных макросостояниях. Для этого на модельно-алгоритмическом уровне описания предлагается опираться на принципы комплексного моделирования. Задачу поиска оптимальных программ управления ИВО следует осуществлять комбинированным способом, т. е. сочетанием методов наименьших квадратов и последовательных приближений.

Данный подход позволяет сформировать вектор управляющих воздействий (программ управления), задающий скоординированные технологии проактивного управления ИВО КФС, направленных на мониторинг состояния мостового сооружения на различных уровнях иерархий. Кроме того, в этом случае одновременно находится и соответствующий вектор сопряжённой системы уравнений, компоненты которого являются многокритериальными динамическими приоритетами операций, входящих в состав синтезируемых последовательностей действий на каждой страте динамического объекта.

Заключение. Предложенная в докладе динамическая интерпретация процессов наблюдения позволяет с единых позиций одновременно решить ряд важных задач проактивного планирования ИВО в ДТ КФС. Во-первых, появляется возможность синтезировать облик системы на заданных этапах ЖЦ. Во-вторых, продлить сроки активного существования элементов и подсистем ДТ КФС (путем равномерного использования ресурсов). В-третьих, провести координацию технологии реализации ИВО в различных условиях обстановки на всех стратах системы. В-четвертых, связать программы мониторинга, с целями функционирования ДТ КФС.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№20-08-01046), в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 274.1325800.2016. Мосты. Мониторинг технического состояния (2016) // Свод правил. Москва: Стандартинформ.
2. **Соколов Б.В., Потрясаев С.А., Юсупов Р.М.** Методология и технологии проактивного управления информационными процессами в промышленном интернете // Системный анализ в проектировании и управлении, 2020, 24 (1), С. 95-104.
3. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 488 с
4. **Шередко Ю.Л., Скурихин В.И., Корчинская З.А.** Концептуальные основы управления развитием целеустремленных систем // УСИМ. 2010, №1. С. 3-18.
5. **Захаров В. В.** Результаты комплексного планирования процессов функционирования и модернизации корпоративных информационных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021, 64 (12). 12, С. 965-971.

V.V.Zakharov, A.Yu.Baranov (St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg)

Proactive planning of monitoring the technical state of bridge structures

The report considers the task of developing proactive programs for managing the functioning of cyber-physical systems aimed at monitoring road transport facilities. It is proposed at the stage of synthesis of control programs (observation schedules) to rely on the fundamental results obtained in the modern theory of proactive control of the structural dynamics of complex technical objects. In the report, on the basis of a dynamic approach, the formalization of the tasks of proactive planning of measurement and computing operations was carried out.