

Trushin Stanislav Vladimirovich
MIA of Russian Federation.
E-mail: s-trushin@YANDEX.RU.
12, Zhitnaja Street, Moscow, Russia.
Phone: +74956678090.
First Deputy of the Chief of Department.

Puchkov Gennady Jurievich
GU NPO «STiS» MIA of Russia.
E-mail: PGU7@YANDEX.RU.
2, Prud Kluchiki Street, Moscow, Russia.
Phone: +79857652920.
Chief of Research Laboratory; Cand. of Eng. Sc.

Yakovlev Igor Evgenyevich
FGUP «PNIEI».
E-mail: yakovlev.pniei@gmail.com.
9, Soviet Street, Penza, Russia.
Phone: +78412593389.
Deputy Scientific Director.

УДК 51-74, 519.178

В.В. Кульба, Д.С. Сомов, А.А. Кочкаров

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНДИКАТОРОВ В МОНИТОРИНГЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагается индикаторный подход в мониторинге сложных технических систем, позволяющий снизить информационную нагрузку на оператора системы, не снижая точности и эффективности передаваемой оператору информации. Рассматривается теоретико-графовая модель распространения возмущений по системе. Сформулирована многокритериальная задача оптимального выбора индикаторов. Предложены алгоритмы построения решений задачи. Алгоритмы предлагают решения, оптимальные по одним критериям, и дают приближенные оценки по остальным.

Техническая система; мониторинг; датчики, индикаторы.

V.V. Kulba, D.S. Somov, A.A. Kochkarov

THE USE OF STRUCTURE-INTEGRATED INDICATORS IN COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS MONITORING

The article proposes an indicator approach to the problem of monitoring complex technical systems, which allow to reduce the information load on the system operator, without loss in the accuracy and efficiency of information transmitted to the operator.

The graph-theoretical model of the disturbance distribution in the system is used in the article. The multicriterion problem of optimal choice of indicators is set. In the article we propose algorithms for constructing solutions of the problem. Algorithms offer a solution optimal for one criterion, and give approximate estimates for the remaining criteria.

Technical system; monitoring; sensors; indicators.

Введение. Одними из важнейших задач, решаемых при проектировании сложных технических систем, являются задачи обеспечения безопасности, надежности и устойчивости функционирования системы [1, 2, 3]. Одной из составляющих решения данных задач является использование систем мониторинга, позволяющих получать различные параметры состояния системы, ее функционирова-

ния, состояния окружающей среды и взаимодействия между системой и окружающей средой. В системах мониторинга технических систем одним из основных элементов являются датчики – элементы системы, способные регистрировать различные параметры состояния самой системы, ее окружающей среды, параметры функционирования системы и другие. Информация от датчиков далее передается оператору системы, в роли которого, в зависимости от системы, может выступать либо человек или группа людей, или АСУ. Чаще всего используется совместная работа АСУ и человека-оператора. Как правило, технические системы высокой структурной, размерной и функциональной сложности наделяются огромным количеством датчиков, не позволяющим осуществлять качественный контроль их показаний и своевременное принятие точных управляющих решений в случае отклонения их показаний от нормы. В данной работе предлагается информационная система мониторинга, позволяющая снизить нагрузку на оператора системы, увеличив скорость реакции, и не снижая ее точности.

Одной из главных задач систем мониторинга технических систем – своевременно сигнализировать оператору о возможных опасностях, неполадках и других нарушениях в работе технической системы. Источниками информации о возможных опасностях, неполадках и нарушениях в работе являются датчики. Опасность, неполадку и другое нарушение функционирования, зарегистрированную датчиком, будем называть угрозой. При возникновении некоторой угрозы начинается распространение возмущения, вызванного этой угрозой, по элементам системы, в соответствии со схемой взаимодействия элементов системы.

Описание модели распространения возмущения по системе. Для математического представления процесса распространения возмущения по системе используется теоретико-графовая модель [4]. Элементы модели соответствуют элементам системы мониторинга. Рассмотрим кратко основные понятия, используемые в модели.

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество элементов модели, в каждый момент времени каждый элемент модели может принимать значения 0 или 1. Единица соответствует активированному состоянию (до элемента дошло возмущение), ноль соответствует неактивному состоянию.

Множество датчиков образует подмножество элементов модели $A \supseteq D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_d}\}$. Также в системе выделено подмножество критических элементов $A \supseteq K = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_k}\}$. Если возмущение достигает критического элемента, система считается вышедшей из строя.

Элементы модели связаны в некоторый орграф G , называемый графом взаимосвязи. Граф взаимосвязи отображает пути распространения возмущения от одного элемента модели к другому. Дуги графа G взвешены временами прохождения дуг.

Для записи времени прохождения дуг используется матрица временных взаимосвязей M_t .

Из матрицы временных взаимосвязей при помощи алгоритма Флойда-Уоршелла получаем матрицу временных расстояний.

Доказана лемма, позволяющая получать моменты времени активации элементов модели на основе времен активации датчиков.

Введем ряд определений, позволяющих сформулировать оптимизационную задачу размещения индикаторов в технической системе. Подмножество индикаторов будем обозначать $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_i}\}$.

Назовем множеством предшествования времени t вершины a множество всех элементов модели $Bef_t(a)$ таких, что элемент a достижим из них за время, не превышающее времени t .

Множеством последствия времени t элемента a назовем множество всех элементов модели $Aft_t(a)$, достижимых из элемента a за время, не превышающее времени t .

Под индикаторным покрытием предшествования времени t будем понимать набор множеств предшествования времени t для всех индикаторов: $I_t^{Bef} = \{Bef_t(i_1), Bef_t(i_2), \dots, Bef_t(i_{n_t})\}$. Индикаторным множеством покрытия предшествования времени t будем называть объединение множеств элементов модели, входящих в индикаторное покрытие предшествования времени t , или, что то же самое, объединение множеств предшествования времени t всех индикаторов:

$$\overline{I_t^{Bef}} = \bigcup_{j \leq n_t} Bef_t(i_j).$$

По аналогии, под индикаторным покрытием последствия времени t будем понимать набор множеств последствия времени t для всех индикаторов: $I_t^{Aft} = \{Aft_t(i_1), Aft_t(i_2), \dots, Aft_t(i_{n_t})\}$. Индикаторным множеством покрытия последствия времени t будем называть объединение множеств элементов модели, входящих в индикаторное покрытие последствия времени t , или, что то же самое, объединение множеств последствия времени t всех индикаторов:

$$\overline{I_t^{Aft}} = \bigcup_{j \leq n_t} Aft_t(i_j).$$

Будем называть общим множеством покрытия предшествования набор множеств предшествования для всех индикаторов заданного для каждого индикатора времени: $I_T^{Bef} = \{Bef_{t_1}(i_1), Bef_{t_2}(i_2), \dots, Bef_{t_{n_t}}(i_{n_t})\}$, где $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_t}\}$ – набор времен множеств предшествования. Аналогично вводится понятие общего индикаторного покрытия последствия: $I_T^{Aft} = \{Aft_{t_1}(i_1), Aft_{t_2}(i_2), \dots, Aft_{t_{n_t}}(i_{n_t})\}$. Назовем диаметром общего покрытия по всем временам набора T : $D(I_T^{Bef}) = D(I_T^{Aft}) = \max_{j \leq n_t} (t_j)$.

Аналогично покрытиям времени введем понятие индикаторного множества общего индикаторного покрытия предшествования и последствия:

$$\overline{I_T^{Bef}} = \bigcup_{j \leq n_t} Bef_{t_j}(i_j), \quad \overline{I_T^{Aft}} = \bigcup_{j \leq n_t} Aft_{t_j}(i_j).$$

Декомпозиция. При решении задачи на больших, сложно-структурированных графах необходимо использовать различные методы и алгоритмы декомпозиции для упрощения структуры системы или разбиения ее на более простые.

Рассмотрим различные методы декомпозиции, применимые в рамках рассматриваемой модели.

1. Сжатие линейных участков. Предположим, что в графе взаимосвязи существует простая цепь, состоящая из вершин a_1, a_2, \dots, a_m . Причем полустепени захода и исхода всех вершин, кроме начала и конца цепи, равны единице, полустепень исхода начала цепи равна единице, и полустепень захода конца цепи тоже равна единице. При этом, на этой цепи нет датчиков. Пример такой цепи изображен на рис. 1.

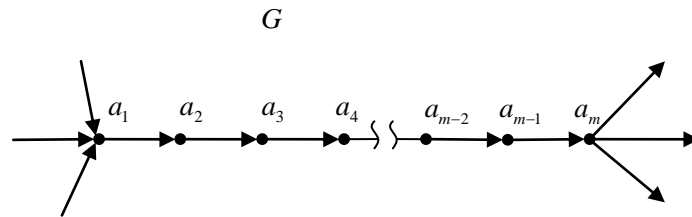


Рис. 1. Линейный участок графа G

Очевидно, что при замене линейного участка на одну дугу, с весом, равным сумме весов дуг между элементами a_1 и a_m зависимость между порядком активации датчиков и остальных элементов не изменится. Поэтому не изменится и зависимость между порядком активации датчиков и порядком активации критических элементов. Таким образом, для любой складывающейся ситуации в системе, время, через которое будут происходить активации критических элементов, а также очередность, в которой будут активироваться критические элементы, не изменится. Сжатие линейного участка представлено на рис. 2

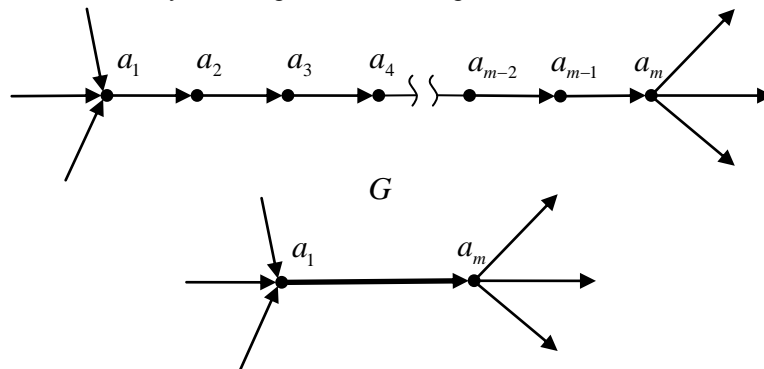


Рис. 2. Сжатие линейного участка графа G

2. Сжатие дублирующих участков. Пусть в графе взаимосвязи существует два элемента a_1 и a_2 , причем из элемента a_1 существует несколько путей в элемент a_2 : $(a_1, a_{1,1}, \dots, a_{1,m_1}, a_2)$, $(a_1, a_{2,1}, \dots, a_{2,m_2}, a_2)$, \dots , $(a_1, a_{l,1}, \dots, a_{l,m_l}, a_2)$. Пусть при этом полустепени захода внутренних элементов этих путей (с двойным индексом) равны единице. То есть, перемещаясь вдоль направления дуг, попасть на эти пути можно только из элемента a_1 . Причем датчиков на этих путях нет. Пример такого участка показан на рис. 3.

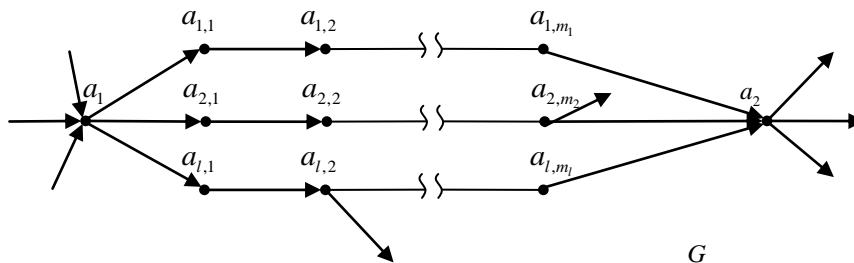


Рис. 3. Дублирующие участки графа G

Рассмотрим алгоритм 1 преобразования дублирующих участков в один линейный участок.

Шаг 1. Среди рассматриваемых путей находим путь с кратчайшей длиной. Очевидно, что если убрать из рассмотрения остальные пути, соединяющие элементы a_1 и a_2 , то возмущение из элемента a_1 достигнет элемента a_2 через время, равное длине кратчайшего пути из рассматриваемых. Предположим без ограничения общности, что кратчайший путь – путь с индексом 1: $(a_1, a_{1,1}, \dots, a_{1,m_1}, a_2)$.

Шаг 2. Для остальных путей проведем процедуру наложения их на первый путь. Переобозначим вершины первого пути следующим образом: (b_1, b_2, \dots, b_p) . При этом $b_1 = a_1$, $b_p = a_2$, $p = m_1 + 2$, $b_i = a_{1,i-1}$, для $1 < i < p$. В дальнейшем будем добавлять вершины в результирующий путь, увеличивая p и сдвигая индексы.

Шаг 2.1. Будем последовательно добавлять вершины второго пути в первый. Сначала рассмотрим вершину $a_{2,1}$. Найдем в результирующем пути две последовательные вершины b_j и b_{j+1} такие, что $dis(b_1, b_j) \leq dis(b_1, a_{2,1}) < dis(b_1, b_{j+1})$. Если при этом $dis(b_1, b_j) = dis(b_1, a_{2,1})$, то вершина $a_{2,1}$ наложится на вершину b_j . При этом необходимо будет соединить вершину b_j исходящими дугами со всеми вершинами, которым была смежна вершина $a_{2,1}$, находящимся вне рассматриваемых путей. Если же выполняется строгое неравенство, то удалим дугу (b_j, b_{j+1}) из результирующего пути. Вместо нее вставим дуги $(b_j, a_{2,1})$ и $(a_{2,1}, b_{j+1})$. Причем длина дуги $(b_j, a_{2,1})$ будет равна $dis(b_1, a_{2,1}) - dis(b_1, b_j)$, а длина дуги $(a_{2,1}, b_{j+1})$ будет равна $dis(b_1, b_{j+1}) - dis(b_1, a_{2,1})$. Далее переобозначим вершины результирующего пути так, чтобы индексы шли последовательно. При этом число p увеличится на единицу. Подобную операцию выполняем до тех пор, пока во втором пути не встретятся элементы, расстояние до которых от первого элемента больше, чем расстояние до конца результирующего пути. Возмущение до них дойдет позже, чем до конца пути.

Шаг 2.2. Соединим элемент b_p с первым таким элементом дугой, остальные элементы оставим. При этом на конце результирующего пути получим цикл, состоящий из элементов второго пути, расстояние до которых вдоль второго пути от вершины a_1 больше, чем расстояние от a_1 до a_2 вдоль результирующего пути.

Процесс сжатия дублирующих участков представлен на рис. 4, а, б, в).

Аналогично линейным участкам данное преобразование не изменяет зависимость между порядком активации датчиков и остальными элементами, поэтому может иметь место в рамках модели.

3. *Простые циклы.* Пусть в графе взаимосвязи есть простой цикл $(a_1, a_2, \dots, a_m, a_1)$. Среди элементов цикла нет датчиков. Причем полустепени захода и исхода у всех элементов равны единице, кроме элемента a_1 и a_l . У элемента a_1 полустепень исхода равна единице, а полустепень захода больше единицы. Элемент a_1 является входом в цикл. У элемента a_l полустепень захода равна единице, а полустепень исхода может быть больше единицы. Элемент a_l является выходом из цикла. Тогда вместо цикла можно рассматривать только цепь (a_1, a_2, \dots, a_l) . При этом сохраняется зависимость между порядком активации датчиков и порядком активации остальных элементов модели. Пример такой операции показан на рис. 5.

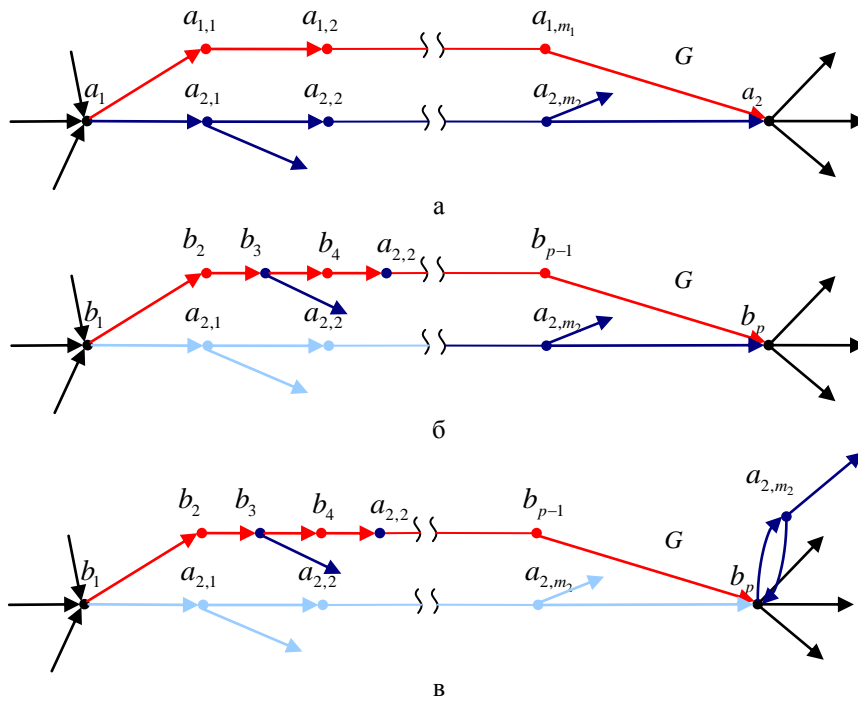


Рис. 4. Дублирующие участки графа G : а – исходная ситуация; б – промежуточный этап; в – конечный вариант

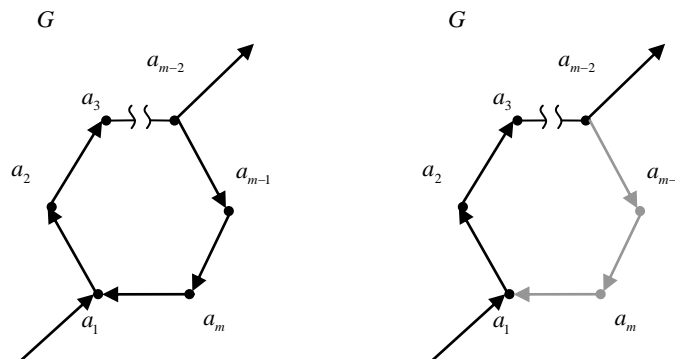


Рис. 5. Простой цикл

Постановка задачи выбора индикаторов. Будем считать, что решением задачи размещения индикаторов является некоторое подмножество элементов модели: $I \subseteq A$.

Введем ограничения на множество решений и получим, таким образом, множество допустимых решений.

1. Количество индикаторов должно быть ограничено. Это ограничение следует из требования снизить информационную нагрузку на оператора. Ограничение на количество индикаторов необходимо выбирать таким образом, чтобы оператор системы имел возможность контролировать показания индикаторов, оперативно реагировать на изменения их показаний.

Оператор должен помнить или иметь возможность максимально быстро определить (например, при помощи надписей или условных буквенных или символьных обозначений) назначение индикатора, область, за которую он отвечает, причины, которые вызывают срабатывание индикатора, набор и последовательность действий, которые необходимо совершить при срабатывании данного индикатора. Математически данное ограничение можно записать следующим образом: $|I| = n_I \leq N_I$, где N_I – некоторая константа, заданная при формулировании конкретной задачи.

- Набор индикаторов должен покрывать все возможные угрозы, известные на этапе проектирования системы. Другими словами, в терминах рассматриваемой модели, не должно быть ситуации, при которой возмущение, вызванное датчиком, достигнет критического элемента раньше, чем оно достигнет индикатора. Математическую интерпретацию данного ограничения можно сформулировать следующим образом. Для каждого датчика, множество последствий которого содержит хотя бы один критический элемент, множество безопасного последствия должно содержать хотя бы один индикатор: $\forall d \in D: Aft(d) \cap K \neq \emptyset \exists i \in I: i \in Aft_s(d)$.

Таким образом область допустимых решений должна удовлетворять следующим требованиям:

$$\begin{aligned} I &\subseteq A, \\ |I| &= n_I \leq N_I, \\ \forall d \in D: Aft(d) \cap K &\neq \emptyset \exists i \in I: i \in Aft_s(d). \end{aligned}$$

Сформулируем оптимизационные критерии для поиска оптимального решения среди допустимых решений.

1. Критерий времени. С точки зрения безопасности функционирования системы и предупреждения выхода ее из строя, необходимо как можно более ранняя сигнализация об угрозе. Сформулируем математическую интерпретацию данного требования в рамках терминов рассматриваемой модели. Предположим, датчик d зарегистрировал угрозу, при этом других угроз и возмущений в системе нет. Тогда разница во времени между активацией некоторого индикатора i , входящего во множество последствий датчика d и некоторого критического элемента k составит $dis^t(d, k) - dis^t(d, i)$. Заметим, что данное выражение имеет место, даже если критический элемент не входит в множество последствий датчика d . В этом случае временное расстояние между датчиком и критическим элементом будет равно бесконечности, а так как индикатор входит в множество последствий датчика, то временное расстояние до него от датчика конечно, следовательно, в таком случае, разница расстояний будет равна бесконечности.

Максимум $\max_{i \in I \cap Aft(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i))$ этой разницы по всем индикаторам из

множества последствий выбранного датчика – время на принятие решения после активации первого индикатора до активации выбранного критического элемента. Заметим, что полученная сумма равна бесконечности в том и только том случае, если критический элемент недостижим из датчика. Датчики, из которых недостижим ни один критический элемент, рассматривать не будем, поскольку они не могут зарегистрировать угрозу, возмущение от которой может достичь критического

элемента. Из ограничений на область решений следует, что в множестве последствий каждого датчика, из которого достигим критический элемент, есть хотя бы один индикатор. Следовательно, это выражение имеет смысл для любой пары датчика и критического элемента.

Минимизируя данное выражение по парам датчиков и критических элементов, получаем наименьшее время, отводимое оператору для принятия решения среди всех возможных (в рамках данной модели) ситуаций.

Первый критерий оптимального решения состоит в максимизации данного времени:

$$\min_{d \in D, k \in K} \left(\max_{i \in I \cap Aft(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \right) \rightarrow \max_I .$$

Критерий точности определения причин и возможных последствий. Для того, чтобы оператор мог принимать эффективные управляющие решения, необходимо, чтобы информация, поступающая к оператору, давала возможность судить о причинах возникновения данной ситуации и о возможных ее последствиях. Для реализации этого требования предлагается размещать индикаторы таким образом, чтобы их множества предшествования и последействия как можно плотнее покрывали все множество элементов модели. Данное требование разбивается на две части, которые в дальнейшем можно рассматривать как 2 разных критерия оптимизации размещения индикаторов.

2. Полнота покрытия. Для каждого набора индикаторов определено покрытие множествами предшествования и последействия. Для того, чтобы иметь возможность судить как можно более полно о возможных причинах и последствиях текущей ситуации в системе, необходимо, чтобы индикаторы были выбраны таким образом, чтобы множество покрытия предшествования и последействия охватывало как можно большую часть элементов модели. Математически это можно записать следующим образом:

$$\left| \overline{I^{Aft}} \right| \rightarrow \max_I ,$$

$$\left| \overline{I^{Bef}} \right| \rightarrow \max_I .$$

3. Точность покрытия. В предыдущем критерии используется покрытие без учета времени. Но для точного определения развивающейся ситуации необходимо, чтобы индикаторы находились «близко» по времени от возмущения, движущегося по системе. Для этого необходимо, чтобы минимальный диаметр покрытия предшествования или последействия, множество которого покрывает все множество покрытия предшествования $\overline{I^{Bef}}$ или последействия $\overline{I^{Aft}}$:

$$\min_{T: I_T^{Aft} = I^{Aft}} (D(I_T^{Aft})) \rightarrow \min_I ,$$

$$\min_{T: I_T^{Bef} = I^{Bef}} (D(I_T^{Bef})) \rightarrow \min_I .$$

Таким образом, получаем многокритериальную постановку задачи оптимизации размещения индикаторов в технической системе:

Пусть дана модель распространения возмущения по технической системе. Множество элементов модели $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, подмножество датчиков $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_D}\}$, подмножество критических элементов $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_K}\}$. Эле-

менты модели связаны в граф взаимосвязей G , времена прохождения дуг заданы матрицей временных взаимосвязей M_t .

Требуется найти такое подмножество элементов модели (множество индикаторов) $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_I}\}$ такое, чтобы выполнялись следующие условия:

$$|I| = n_I \leq N_I, \tag{1}$$

$$\forall d \in D: Aft(d) \cap K \neq \emptyset \quad \exists i \in I: i \in Aft_s(d), \tag{2}$$

$$\min_{d \in D, k \in K} \left(\max_{i \in I \cap Aft(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \right) \rightarrow \max_I, \tag{3}$$

$$|I^{Aft}| \rightarrow \max_I, \tag{4}$$

$$|I^{Bef}| \rightarrow \max_I, \tag{5}$$

$$\min_{T: I_T^{Aft} = I^{Aft}} (D(I_T^{Aft})) \rightarrow \min_I, \tag{6}$$

$$\min_{T: I_T^{Bef} = I^{Bef}} (D(I_T^{Bef})) \rightarrow \min_I. \tag{7}$$

Набор индикаторов, выбранный таким образом, позволит снизить информационную нагрузку на оператора, при этом останется возможность контролировать возмущения, распространяющиеся по системе, анализировать причины и возможные последствия развивающейся ситуации. Все это повысит безопасность функционирования системы и ее устойчивость к различным угрозам.

Критерии размещения индикаторов на примере простых структур.

1. Цепь. Рассмотрим простейший пример структуры, состоящей из n элементов. Пусть граф взаимосвязи представляет собой простую (все дуги и вершины различны) орцепь с началом в вершине a_1 и концом в вершине a_n . Пусть вершина a_1 является датчиком d , а вершина a_n – критическим элементом k . Других датчиков и критических элементов в системе нет. Пусть время прохождения каждой дуги одинаково и равно единице. Пример такой структуры изображен на рис. 6.

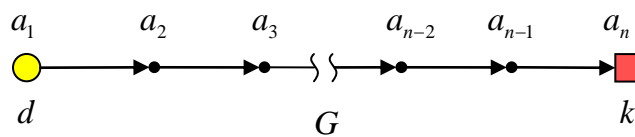


Рис. 6. Цепь

В данной ситуации ограничение 2 о покрытии всех возможных угроз выполняется, когда в системе выбран хотя бы один индикатор, не совпадающий с критическим элементом.

Рассмотрим поведение оптимизационных критериев для данного типа структур.

Критерий времени:

$$\min_{d \in D, k \in K} \left(\max_{i \in I \cap Aft(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \right) \rightarrow \max_I.$$

Поскольку в данной системе есть только один датчик и один критический элемент, данное выражение можно (опустив минимизацию по паре, датчик, критический элемент) записать в виде

$$\max_{i \in I \cap Aft(d)} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \rightarrow \max_I .$$

Поскольку $Aft(d) = A$, то данное выражение упрощается до

$$\max_{i \in I} (dis^t(d, k) - dis^t(d, i)) \rightarrow \max_I .$$

Поскольку структура системы представляет собой орцепь, то разница расстояний от датчика до критического элемента и от датчика до индикатора равна расстоянию от индикатора до критического элемента. Таким образом, можем записать этот критерий следующим образом:

$$\max_{i \in I} (dis^t(i, k)) \rightarrow \max_I .$$

Отсюда можно сделать вывод, что данное выражение максимизируется на множествах индикаторов, среди которых самый дальний от критического элемента индикатор отстоит как можно дальше от критического элемента.

Критерий 4 полного покрытия множеством предшествования. В данной системе множеством предшествования любого элемента является множество элементов с индексом не большим, чем индекс самого элемента. Таким образом, чем ближе будет располагаться индикатор к критическому элементу, тем более полным будет покрытие множествами предшествования.

Критерий 5 полного покрытия множествами последействия дает аналогичные результаты, только приближает индикатор к датчику.

Критерий 6 минимального радиуса покрытия предшествования. Очевидно, что в случае, если датчик один, то этот критерий представляет собой полную противоположность критерия 4 (критерий выполняется тем лучше, чем ближе индикатор расположен к датчику). Предположим, что индикаторов n_I штук. Тогда диаметром покрытия будет максимум из расстояний между датчиком и индикатором и между другими индикаторами, если их расположить последовательно, согласно индексам в множестве A . Пример: пусть множество индикаторов состоит из элементов a_4 , a_{10} и a_{15} . Тогда диаметром максимально полного покрытия будет $\max(dis^t(a_1, a_4), dis^t(a_4, a_{10}), dis^t(a_{10}, a_{15})) = \max(3, 6, 5) = 6$.

Таким образом, в общих словах, критерий выполняется тем лучше, чем равномернее распределены индикаторы.

Аналогичные выкладки можно сделать и для критерия 7 минимального покрытия радиуса последействия, с заменой датчика на критический элемент.

Таким образом, даже на такой простейшей структуре как цепь видно, что критерии разнонаправлены, в некоторых случаях и противоположны. Поэтому при решении каждой конкретной задачи необходимо определять порядок взаимодействия данных критериев.

2. Цикл. Цикл. Рассмотрим модель системы, состоящую из n элементов. Пусть граф системы представляет собой простой (дуги и вершины не повторяются) цикл. Пусть в модели выделено подмножество датчиков $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_d}\}$ и критических элементов $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_k}\}$. Пример такой структуры изображен на рис. 7.

Утверждение 1. Для выполнения ограничения 2 о покрытии всех возможных угроз в системе необходимо и достаточно, чтобы внутри каждой цепи в цикле,

началом которой является датчик, а концом – критический элемент, а других критических элементов и датчиков в цепи нет, располагался индикатор.

Доказательство. Достаточность. Действительно, предположим, что в начальный момент времени активируется датчик d_1 . Тогда возмущение первым достигнет индикатора, а не критического элемента. Так как в противном случае либо сам датчик d_1 , либо один из датчиков, следующих за ним, был бы началом цепи из утверждения, при этом на ней не было бы индикатора, следовательно, такая ситуация противоречила бы условию утверждения. *Необходимость.* Предположим, что в цикле существует цепь с началом в датчике, а концом в критическом элементе без индикаторов на ней. Тогда не выполняется ограничение 2 на размещение индикаторов, поскольку возмущение, вызванное угрозой, зарегистрированной данным датчиком достигло бы критического элемента раньше, чем индикатора. Утверждение доказано.

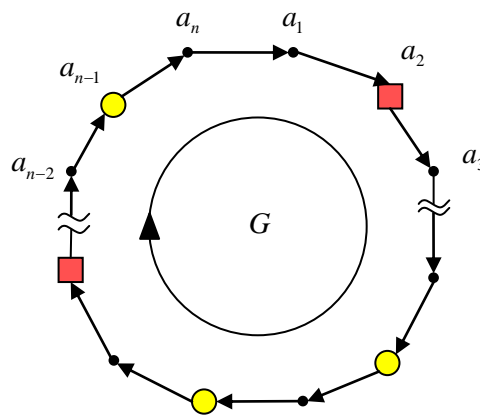


Рис. 7. Цикл

Рассмотрим решение задачи оптимального размещения индикаторов по критерию максимизации времени, отводимого на реакцию оператора. Рассмотрим алгоритм 2 построения решения.

Шаг 1. На первом этапе необходимо построить матрицу временных расстояний N_i для заданной системы. На выполнение этой операции требуется не более $O(n^3)$ операций.

Шаг 2. Определяем датчик, расстояние от которого до ближайшего критического элемента минимально. Для выполнения этого шага для каждого датчика производится поиск ближайшего критического элемента, на что требуется не более $O(n)$ операций. Поиск ближайшего критического элемента производится для всех датчиков, таким образом, верхняя оценка количества операций, необходимых для выполнения этого шага равна $O(n^2)$.

Шаг 3. Индикатор нужно разместить в найденном на предыдущем шаге датчик. Также индикаторы необходимо разместить на остальных участках цикла с началом в датчике и концом в критическом элементе, не содержащих других датчиков или критических элементов, но не ближе к критическому элементу, чем расстояние от датчика, найденного на предыдущем шаге, до ближайшего к нему критического элемента. В зависимости от способа выбора индикаторов на остальных участках цепи для выполнения данного шага требуется от $O(n)$ операций.

Утверждение 2. Подмножество индикаторов, выбранное на предыдущем шаге является оптимальным по критерию максимизации времени, отводимого на реакцию оператора, при этом выполняется требование ограничения 2 о покрытии всех возможных угроз.

Доказательство. Результатом выполнения шага 2 алгоритма является датчик, временное расстояние от которого до ближайшего критического элемента минимально. Очевидно, что время, отводимое на реакцию оператора, не может быть больше расстояния от найденного датчика до критического элемента, поскольку регистрация угрозы данным датчиком реализует наихудший, с точки зрения критерия времени, сценарий. Для того чтобы построить оптимальный набор индикаторов, необходимо разместить один индикатор в найденном датчике, а остальные разместить на расстоянии от критических элементов не меньшем, чем расстояние от найденного датчика до ближайшего критического элемента. На шаге 3 алгоритма производится такое размещение индикаторов с учетом требования ограничения о покрытии всех возможных угроз. Таким образом, утверждение доказано.

3. Дерево. Предположим, что граф взаимосвязи системы представляет собой нисходящее дерево (полустепени исхода всех вершин, кроме корня, равны единице). При этом в системе один критический элемент, расположенный в корне дерева, и n_D датчиков, расположенных в листьях дерева. Пример такой структуры изображен на рис. 8.

Утверждение 3. Для выполнения ограничения 2 о покрытии всех возможных угроз достаточно, чтобы подмножество индикаторов содержало все вершины графа, соединенные дугой с критическим элементом.

Рассмотрим решение задачи оптимального размещения индикаторов по критерию максимизации времени, отводимого на реакцию оператора. Рассмотрим алгоритм 3 построения такого решения.

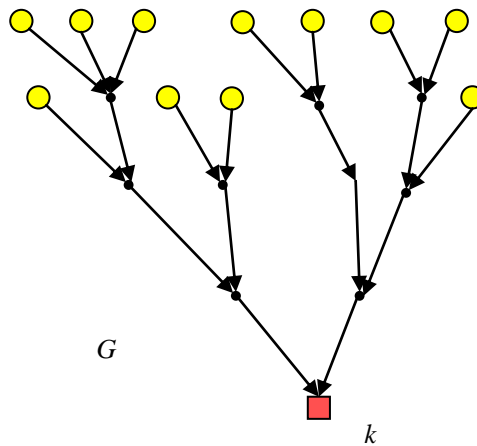


Рис. 8. Дерево

Шаг 1. На первом этапе необходимо построить матрицу временных расстояний N_t для заданной системы. На выполнение этой операции требуется не более $O(n^3)$ операций.

Шаг 2. С помощью матрицы временных расстояний определяем датчик, расстояние от которого до критического элемента минимально. На выполнение этой операции требуется не более $O(n)$ операций, поскольку в системе присутствует только один критический элемент. Пусть временное расстояние от датчика до критического элемента равно t_d .

Шаг 3. Необходимо поместить индикатор в найденном на предыдущем шаге датчике.

Шаг 4. При помощи матрицы временных расстояний строим $Bef_{t_d}(k)$ – множество предшествования критического элемента времени t_d . При помощи матрицы временных расстояний построение такого множества занимает не более $O(n)$ операций.

Шаг 5. Цикл по всем элементам множества $Bef_{t_d}(k)$. Обозначим элемент, обрабатываемый на каждом шаге, как a_i .

Шаг 5.1. При помощи матрицы временных взаимосвязей определяем множество элементов, непосредственно предшествующих рассматриваемому элементу a_i . Если такой элемент принадлежит множеству $Bef_{t_d}(k)$, пропускаем его. Если не принадлежит, помещаем в него индикатор.

Шаг 5.2. Конец цикла.

Шаг 6. Построенное таким образом множество индикаторов является оптимальным по критерию времени, удовлетворяющим ограничению 2 о покрытии всех угроз решением задачи.

Заключение. В данной работе рассматривается индикаторный подход в мониторинге сложных технических систем, позволяющий на основе анализа структуры системы и схемы ее функционирования снижать информационную нагрузку на оператора системы, не снижая информативности, точности и своевременности передаваемой ему информации в потенциально опасных ситуациях, путем размещения в структуре системы индикаторов, информация о состоянии которых будет передаваться оператору. В работе предложена модель распространения возмущения по технической системе, служащая основой для постановки задачи оптимального размещения индикаторов в системе. На основе требований к набору индикаторов, вытекающих из необходимости обеспечить оператора системы своевременной, точной и не избыточной информацией, сформулирована многокритериальная постановка задачи размещения индикаторов. Предложены алгоритмы решения задачи на простых примерах структур.

Полученное при решении задачи множество индикаторов позволяет снизить информационную нагрузку на оператора, при этом своевременно сигнализируя о потенциально опасных ситуациях, позволяя с высокой точностью анализировать причины возникновения потенциально опасной ситуации и ее возможных последствий, следить за развитием ситуации во времени. Все это упрощает работу оператора технической системы в потенциально опасных ситуациях, при наличии внешних или внутренних угроз и возмущений, что, в свою очередь, повышает безопасность, устойчивость и надежность функционирования системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Микрин Е.А., Кочкаров А.А., Сомов Д.С. Мониторинг функционирования сложных технических систем в условиях внешних угроз. Метод структурно-интегрированных индикаторов и иерархия моделей. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – 54 с.
2. Архипова Н.И., Кульба В.В. Управление в чрезвычайных ситуациях. – М.: РГГУ, 1998.
3. Кульба В.В., Микрин Е.А., Павлов Б.В., Платонов В.Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов. – М.: Наука, 2006.
4. Салтагаров М.Б., Кочкаров А.А. Исследование структурного разрушения сложных коммуникационных систем // Материалы Международной научной конференции «Проблемы регионального и муниципального управления». – М.: РГГУ, 2007. – С. 224-229.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.М. Кочкаров.

Кульба Владимир Васильевич

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

E-mail: kulba@ipu.ru.

117997, г. Москва, Профсоюзная, 65.

Тел.: 84953349009.

Лаборатория модульных информационно-управляющих систем; заведующий лабораторией; д.т.н.; профессор.

Сомов Дмитрий Сергеевич

E-mail: somov.dmitry@gmail.com.

Тел.: +79265323158.

Лаборатория модульных информационно-управляющих систем; аспирант.

Кочкар Азрет Ахматович

Концерн «РТИ Системы».

E-mail: akochkar@gmail.com.

127083, г. Москва, ул. 8 Марта, 10, стр. 1.

Тел.: 84956141751.

Руководитель управления инновационного развития; к.ф.-м.н.

Kulba Vladimir Vasil'evich

Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS.

E-mail: kulba@ipu.ru.

65, Profsovnaya Street, Moscow, 117997, Russia.

Phone: +74953349009.

The Laboratory of Modular Information-Operating Systems; Head the Labjratory; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Somov Dmitry Sergeevich

E-mail: somov.dmitry@gmail.com.

Phone: +79265323158.

The Laboratory of Modular Information-Operating Systems; Postgraduate Student.

Kochkarov Azret Aхmatovich

Concern "RTI Systems".

E-mail: akochkar@gmail.com.

10, 8 Marta Street, bild 1, Moscow, 127083, Russia.

Phone: +74956141751.

The Head of Management of Innovative Development; Cand. of Phis.-Math. Sc.

УДК 15: 519.876

Г.В. Горелова, Э.В. Мельник

**О КОГНИТИВНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ
В РЕГИОНЕ В УСЛОВИЯХ БЫСТРЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДЫ
И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ***

Представлены основы когнитивного моделирования процессов взаимодействия разных субъектов и принятия решений по обеспечению устойчивого и безопасного развития региональных систем динамичными иерархичными когнитивными моделями. Модели адаптируются к быстрым изменениям внешней среды и позволяют анализировать возможности взаимодействия (противоборства или/и коалиции) нескольких участников. Работа

* Исследование выполнено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры», грант № 2009-1.1-306-077-004 «Моделирование процессов социального взаимодействия и проблем национальной безопасности Юга России».