КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЧС: ФОРМАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Волков Андрей Анатольевич
Проректор МГСУ по информации и информационным технологиям, заведующий кафедрой информационных систем и технологий управления строительством, доктор технических наук, профессор

Комплексная безопасность зданий и сооружений в чрезвычайной ситуации – одна из самых актуальных теоретических и практических задач современной строительной науки. В целом – это одно из двух основных направлений развития концепции *гомеостата строительных объектов* [1–5].

Рассмотрим общие математические основания ситуационного моделирования в рамках *гомеостатического управления* [5] зданиями и сооружениями (комплексного, в том числе – оперативного, адаптивного управления объектами, процессами, системами и их элементами, функционально ориентированного на ограничение и подавление влияния возмущений любого характера и интенсивности на устойчивое состояние объекта управления с целью его сохранения) – процесс, активность которого характеризует “жизнь” строительного объекта. Исполнение функций гомеостатического управления предполагает “осмысленные” реакции системы управления на внешние и внутренние возмущения на основе ситуационного моделирования процессов, определяющих динамику возмущения. При этом строительный объект понимается как *управляемая гиперсистема*. Оговоримся, что под *управлением строительным объектом* будем понимать управление процессами изменения выделенного набора его действительных функциональных и/или технических характеристик [5].

Формально, задача управления гиперсистемой в целом может быть сведена к построению в некотором смысле целесообразных последовательностей глобальных возмущений и сопряженных с ними глобальных управлений. Очевидно, не каждое управление применимо в произвольной ситуации: нельзя выбрать такую последовательность управлений, которую можно было бы использовать независимо от последовательности возмущений. Таким образом, следует искать не *последовательность*, а *стратегию* управлений, то есть однозначно определять, какое из управлений следует использовать в каждой из ситуаций всякий раз, когда ситуация возникает.

Определение *стратегии* как общего плана управляющих воздействий предполагает очевидную неоднозначность развития и динамики ситуаций, инициирующих процесс управления. Таким образом, выбран-

ная стратегия предполагает построение некоторого набора *сценариев* гомеостатического управления.

Сценарий гомеостатического управления – направленная последовательность действий, реализующих функции гомеостатического управления в рамках оперируемой *стратегии*, изменение действительных функциональных и/или технических характеристик объекта управления как реакция на такие действия.

Основные возможные сценарии гомеостатического управления строительным объектом формируются на стадии *гомеостатического проектирования* [5]. Такое решение позволяет рассматривать гомеостатическое управление зданиями и сооружениями в аспекте ситуационного моделирования процессов, определяющих динамику возмущения в описанном выше смысле.

При формировании возможных сценариев гомеостатического управления широко используется опыт оперативного управления (в том числе – автоматизированного и автоматического) в подобных ситуациях, формализованный до уровня конкретных решений и/или стратегий управления. Подобная информация, носящая, по сути, характер экспертных знаний, представляет огромную практическую ценность, а в ряде случаев является единственным основанием для принятия решений в условиях неопределенности исходных данных для моделирования разного уровня.

Рассмотрим математические основания (по проф. В.Ф. Яковлеву) ситуационного моделирования процессов, определяющих динамику возмущения, в проекции на принципы управления в пространстве ситуаций (стратегии управлений и возмущений), отражающие специфику расчетных и нештатных ситуаций [5].

Конструкция и структура пространства ситуаций

Пусть $v(i,x)$ – бинарный предикат “x есть имя возможного выходного сигнала (активного) объекта по имени i”. Следующие высказывания считаются истинными:

$$(\exists i)(\exists x)v(i,x),$$
$$(\exists I)(\forall i)(i \in I \Leftrightarrow (\exists x)v(i,x)),$$
$$(\exists X)(\forall x)(x \in X \Leftrightarrow (\exists i)v(i,x)).$$

Единственные непустые множества $I = \{i \mid (\exists x)v(i,x)\}$, $X = \{x \mid (\exists i)v(i,x)\}$ и $V = \{x_i \mid v(i,x)\}$ названы соответственно множеством *имен элементов гиперсистемы*, множеством *имен их возможных выходных сигналов* и множеством (всех) *возможных выходных сигналов элементов гиперсистемы*.

Как видно,

$$V \subseteq I \times X,\ V = \bigcup_{i \in I} (V \circ \Delta_{\{i\}}) = \bigcup_{i \in I} X_i,$$

uде $X_i = V \circ \Delta_{\{i\}}$ – множество (локальных) выходных сигналов объекта $i \in I$;

очевидно, $(X_i)_{i \in I}$ – разбиение множества *V*.

Каждому (дискретному) моменту времени соответствует единственное инъективное отображение $f : I \to V$ такое, что $(\forall i)(i \in I \Rightarrow f(i) \in X_i)$, называемое *конфигурацией выходных сигналов гиперсистемы* в данный момент.

$F = \prod_{i \in I} X_i$ – множество всех возможных конфигураций.

Предполагается, что элементы гиперсистемы *I* обмениваются между собой сигналами из множества *V*: выходные сигналы одних элементов участвуют в формировании входных сигналов других элементов. Предполагается также, что каждый элемент $i \in I$ в каждый момент времени связан в своих действиях некоторой “установкой” $q_i \subseteq V$ – совокупностью тех сигналов из *V*, которые он в состоянии воспринять в качестве входных воздействий в случае их появления в данный момент времени. При этом считается, что всегда $X_i \subseteq q_i$ – обычное для теории управления предположение, не ограничивающее общности результатов. Множество $q = \bigcup_{i \in I} (\{i\} \times q_i) \subseteq I \times V$ названо [*глобальным*] *возмущением*, действующим на гиперсистему в целом в данный момент времени; $Q = \{q \mid q \subseteq I \times V, \lambda^{-1} \subseteq q\}$, где $\lambda = \bigcup_{i \in I} (X_i \times \{i\})$, – множество всех возможных глобальных возмущений. Это множество замкнуто относительно операции взятия дизъюнктного $q^c = ((I \times V) - q) \cup \lambda^{-1}$ для каждого $q \in Q$, конечных (счетно бесконечных) объединений и пересечений, частично упорядочено отношением включения, содержит наименьший (λ^{-1}) и наибольший $(I \times V)$ элементы. Если в данный момент $f(j) \in q_i$ для некоторых $i, j \in I$, $f \in F$, $q \in Q$, то считается, что в этот момент сигнал $f(j) \in X_j$ подается на вход объекта $i \in I$; так как $f(j) \in q_i \Leftrightarrow (i, j) \in f^{-1} \circ q$, то $r = f^{-1} \circ q \subseteq I \times I$ – бинарное отношение информационной связанности, информационная структура гиперсистемы *I*, сложившаяся в данный момент времени; множество $R = \{r \mid (\exists f)(\exists q)(f \in F, q \in Q, r = f^{-1} \circ q)\}$ – множество всех возможных ин-

формационных структур. Как видно, R совпадает с множеством всех рефлексивных бинарных отношений на I, а потому является булевой (сигма-) алгеброй замкнуто относительно конечных (счетно бесконечных) объединений и пересечений, операции взятия дизъюнктного $r^c = ((I \times I) - r) \cup \Delta_I$ для каждого $r \in R$, частично упорядочено отношением включения, содержит наименьший (Δ_I) и наибольший $(I \times I)$ элементы. Если $f \in F$ и $r \in R$ произвольны, то

$$f \circ r \subset I \times V, \ (f \circ r \cup \lambda^{-1}) \in Q,$$
$$f^{-1} \circ (f \circ r \cup \lambda^{-1}) = r,$$

откуда следует теорема.

Теорема 1

При любой фиксированной конфигурации выходных сигналов элементов гиперсистемы подходящим выбором глобального возмущения можно реализовать любую информационную структуру.

Пусть в данный момент $J \subset I$, $J \neq \varnothing$, $j \in J$, $q \in Q$, $f \in F$ и $r = f^{-1} \circ q$. Тогда $r(j) \subset I$ – множество (мгновенных) источников информации (входов) для j, $r^{-1}(j) \subset I$ – множество потребителей информации (сигнала $f(j)$, следующего по разветвлениям выхода) в данный момент; если $r(j) \cap (I - J) \neq \varnothing$ или $r^{-1}(j) \cap (I - J) \neq \varnothing$, то j – граничный элемент сети J; если $r(j) \subseteq J$ и $r^{-1}(j) \subseteq J$, то j – внутренний элемент сети J. В качестве формального объекта, способного представить обобщенное состояние вход-выходных процессов гиперсети в целом, в данный момент времени выбирается бинарное отношение вида $f \circ f^{-1} \circ q$ для $f \in F$ и $q \in Q$, называемое *ситуацией,* соответствующей данным f и q. Множество S всех возможных ситуаций определяется равенством

$$S = \{s \mid (\exists f)(\exists q)(f \in F, q \in Q, s = f \circ f^{-1} \circ q)\}.$$

Подобное определение (и использование термина) предполагает следующие основания: текущая конфигурация значений выходных сигналов каждого элемента гиперсети, мгновенная информационная структура и множества источников и потребителей информации для каждого элемента однозначно определяются заданной ситуацией; если для каждого фиксированного $f \in F$ предположить $S_f = \{s \mid (\exists q)(q \in Q, s = f \circ f^{-1} \circ q)\}$, то

$f \in S_f$, S_f наделено алгебраической структурой, индуцированной алгеброй Q семейство $(S_f)_{f \in F}$ есть разбиение пространства ситуаций S; если $q \in Q$, то $S_q = \{s \mid (\exists f)(f \in F, s = f \circ f^{-1} \circ q)\}$ есть покрытие множества q.

Принципы управления в пространстве ситуаций

В силу определений, множество $f(I) \cap q_i$ представляет всю совокупность сигналов, составляющих входную информацию для элемента $i \in I$ в данный момент времени. Следует отметить, что каждый индивид из I способен на самостоятельную интерпретацию воспринимаемой информации. В этой связи предполагается, что “на вход” элемента i в данный момент поступает объект $\{i\} \times (f(I) \cap q_i)$, называемый (*мгновенной*) *входной буквой*. При этом, множество входных сигналов не искажается, но снабжается дополнительной меткой, определяющей адресность входной буквы.

Пусть для некоторых $f \in F$ и $q \in Q$ $s = f \circ f^{-1} \circ q$; тогда $(\{i\} \times (f(I) \cap q_i)) = s \circ \Delta_{\{i\}}$, множество $A_s = \{a \mid (\exists i)(i \in I, a = s \circ \Delta_{\{i\}})\}$ – разбиение ситуации $s \in S$; совокупность всех входных букв, появление которых принципиально возможно на входах элементов гиперсети *I,* определяется равенством $A = \{a \mid (\exists s)(\exists i)(s \in S, i \in I, a = s \circ \Delta_{\{i\}})\}$; семейство множеств вида $A_i = \{a \mid (\exists s)(s \in S, a = s \circ \Delta_{\{i\}})\}$ для каждого $i \in I$, называемых *локальными входными алфавитами*, является разбиением множества *A;* семейство $(A_s)_{s \in S}$ – покрытием множества *A*.

Одношаговая процедура перехода гиперсети *I* из заданной ситуации $s \in S$ в “следующую” на основании функций локальных переходов (функций активации) может быть представлена формально. Пусть $G = \bigcup_{i \in I} (A_i \times \{i\})$, а “на входы” индивидов из *I* поступило входное множество A_s. Как видно, $G \circ \Delta_{A_s} : A_s \to I$ – взаимно однозначное отображение, то есть выполнены равенства $\Delta_{A_s} \circ G^{-1} \circ G \circ \Delta_{A_s} = \Delta_{A_s}$ и $G \circ \Delta_{A_s} \circ G^{-1} = \Delta_I$. Пусть в данный момент для каждого индивида $i \in I$ определена некоторая, всюду определенная на A_i, функция (локального перехода) $\gamma_i : A_i \to X_i$. Так как при i, j из *I* в случае $i \neq j$ всегда $(A_i \times X_i) \cap (A_j \times X_j) = \varnothing$, то $\gamma = \bigcup_{i \in I} \gamma_i$ является некоторым отображением вида $A \to V$, а композиция $\varphi = \gamma \circ \Delta_{A_s} \circ G^{-1}$ на основании определений есть та конфигурация из *F*, ко-

торая возникает в гиперсистеме в “следующий” момент времени в результате локально принятых решений вида $\gamma_i(s \circ \Delta_{\{i\}})$ как реакций на входные буквы $(s \circ \Delta_{\{i\}})_{i \in I}$. Если в этот же момент гиперсистема оказалась под воздействием нового глобального возмущения $q \in Q$, то новой ситуацией из S будет ситуация $\varphi \circ \varphi^{-1} \circ q$; затем процесс повторится.

Легко видеть, что задача управления гиперсистемой по такой схеме достаточно сложна. Одна из причин такова: если из каких-то внемодельных соображений выделяется подмножество $S_0 \subset S$ желаемых (приемлемых, оптимальных) ситуаций (или конфигураций, ибо $F \subset S$), то оно может оказаться недостижимым при конкретном наборе функций локальных переходов $(\gamma_i)_{i \in I}$. Не исключено также, что функции локальных переходов в некоторых задачах управления могут оказаться многозначными – произвольными подмножествами прямоугольников вида $A_i \times X_i$. В этой связи вводится понятие “[мгновенного] глобального управления гиперсистемой в целом”. Так как $A_i \cap A_s = \{s \circ \Delta_{\{i\}}\}$, то при любом $f \in F$ отображение $f \circ G \circ \Delta_{A_s} : A_s \to V$ инъективно и выбирает по одному элементу из каждого множества семейства $(X_i)_{i \in I}$. Каждое такое отображение названо [*мгновенным*] *глобальным управлением*. Множество всех глобальных управлений есть $U = \{u \mid (\exists f)(\exists s)(f \in F, s \in S, u = f \circ G \circ \Delta_{A_s})\}$. Если в данный момент в гиперсистеме I возникла ситуация $s \in S$, то глобальное управление $u \in U$ такое, что $u = u \circ \Delta_{A_s}$, преобразует входную информацию (совокупность A_s входных букв) так, что к следующему моменту времени выходные сигналы всех элементов системы образуют конфигурацию $f = u \circ G^{-1} \in F$; если при этом гиперсистема окажется под воздействием глобального возмущения $q \in Q$, то возникнет новая ситуация $f \circ f^{-1} \circ q$ и процесс повторится. Как видно, теперь множество S может быть переопределено: $S = \{s \mid (\exists u)(\exists q)(u \in U, q \in Q, s = u \circ u^{-1} \circ q)\}$, из чего следует теорема.

Теорема 2

Пространство ситуаций представимо в терминах глобальных управлений и глобальных возмущений.

Семейство $(U_f)_{f \in F}$, где $U_f = \{u \mid (\exists s)(s \in S, u = f \circ G \circ \Delta_{A_s})\}$ для каждого фиксированного $f \in F$, и семейство $(U_s)_{s \in S}$, где для каждого фик-

сированного $s \in S$ $U_s = \{u | (\exists f)(f \in F,\ u = f \circ G \circ \Delta_{A_s})\}$ – суть разбиения множества *U*. При этом U_f – совокупность глобальных управлений, переводящих каждую ситуацию из S в единственную конфигурацию $f \in F$; U_s – совокупность глобальных управлений, переводящих данную ситуацию $s \in S$ в любую конфигурацию из *F*.

Стратегии управлений и возмущений

Изложенное выше определяет, что в процессе функционирования системы должны появиться две последовательности: последовательность *глобальных управлений* и последовательность *глобальных возмущений*. Таким образом, задача управления гиперсистемой в целом может быть сведена к построению в некотором смысле целесообразных последовательностей глобальных возмущений и сопряженных с ними глобальных управлений. Однако не каждое управление можно применить в произвольной ситуации, то есть нельзя выбрать такую последовательность управлений, которую можно было бы использовать независимо от последовательности возмущений. Как известно, эту трудность можно обойти, если искать не последовательность, а стратегию управлений, то есть однозначно определить, какое из управлений следует использовать в каждой из ситуаций всякий раз, когда эта ситуация возникнет. Если дана некоторая ситуация – стратегия диктует выбор соответствующего управления. Новая ситуация, которая при этом возникнет, будет зависеть от глобального возмущения. Затем стратегия порождает новое управление для новой ситуации и процесс повторяется. Очевидно, множество U_s есть совокупность тех и только тех глобальных управлений, которые допустимы для фиксированной ситуации $s \in S$. Стратегией управлений названо любое инъективное отображение вида $\alpha : S \to U$ такое, что $\alpha(s) \in U_s$; множество $P_U = \prod_{s \in S} U_s$ – вся совокупность возможных стратегий управлений. Множество стратегий возмущений определяется в виде $P_Q = Q^S$. Каждая пара стратегий $(\alpha, \beta) \in P_U \times P_Q$ индуцирует отображение $h \circ < \alpha, \beta >$ пространства S в себя, в котором

$h = \{((u,q)s) | u \in U, q \in Q, s = u \circ u^{-1} \circ q\}$,

$< \alpha, \beta > = \{(s,(u,q)) | s \in S, u = \alpha(s), q = \beta(s)\}$.

Справедливо утверждение: семейство функций $(h \circ < \alpha, \beta >)_{(\alpha,\beta) \in P_U \times P_Q}$ совпадает с множеством (всех) отображений про-

странства ситуаций в себя. При фиксированных стратегиях $\alpha \in P_U$ и $\beta \in P_Q$ действие функции $\gamma = h \circ < \alpha, \beta >$ порождает “траекторию” гиперсистемы в пространстве ситуаций – такую последовательность ситуаций $< s_0 >= \{s_0, s_1, ...\}$, что $s_1 = \gamma(s_0)$, $s_2 = \gamma(s_1) = \gamma^2(s_0)$ и т.д. Очевидно, $< s_0 >= (\Delta_S \cup \bar{\gamma})(\{s_0\})$, где $\bar{\gamma} = \gamma \cup \gamma^2 \cup ...$ – транзитивное замыкание отношения γ в $S \times S$. Отношение $g = \Delta_S \cup \bar{\gamma}$ есть отношение предпорядка на множестве *S*. Можно говорить, что при $(s_1, s_2) \in g$ ситуация $s_2 \in S$ достижима из ситуации $s_1 \in S$ при выбранных стратегиях. Отношение $g \cap g^{-1}$ есть отношение эквивалентности на *S*, и $(s_1, s_2) \in g \cap g^{-1}$ тогда и только тогда, когда ситуации S_1 и S_2 взаимно достижимы. Предпорядок *g* совместим с указанной эквивалентностью в том смысле, что $(g \cap g^{-1}) \circ g \circ (g \cap g^{-1}) \subseteq g$, следовательно, фактор-множество $S / g \cap g^{-1}$ есть совокупность классов взаимно достижимых ситуаций при данных стратегиях. Если $k : S \to S / g \cap g^{-1}$ – каноническое отображение, то

$$k \circ g \circ k^{-1} = \{(T, Z) \big| T, Z \in S / g \cap g^{-1}, (\forall s_1)(\forall s_2)((s_1, s_2) \in T \times Z \Rightarrow (s_1, s_2) \in g)\}$$

– отношение порядка на $S / g \cap g^{-1}$, ассоциированное с предпорядком *g*. Можно утверждать, что $(T, Z) \in k \circ g \circ k^{-1}$ тогда и только тогда, когда все ситуации из класса *Z* достижимы из всех ситуаций класса *T* (обратное в общем случае неверно).

В контексте изложенных математических оснований следует еще раз подчеркнуть, что гомеостатическое управление строится на основе выбранной стратегии, предполагающей некоторый набор сценариев.

Выбранная стратегия, однако, не определяет сценарий однозначно. Это обусловлено влиянием множества случайных факторов, характерных для специфики решаемых задач, на динамику развития конкретной ситуации в описанном выше смысле.

Очевидно, реальный сценарий гомеостатического управления определяет исходные параметры выбранной стратегии управления, а динамика развития ситуации может стать основанием изменения любой стратегии.

Библиографический список.

1. Волков А.А. Активная безопасность строительных объектов в условиях чрезвычайной ситуации // Промышленное и гражданское строительство. – 2000. – №6. – С. 34–35.
2. Волков А.А. Системы активной безопасности строительных объектов // Жилищное строительство. – 2000. – №7. – С. 13.

3. Волков А.А. Гомеостатическое управление зданиями // Жилищное строительство. – 2003. – №4. – С. 9–10.
4. Волков А.А. Гомеостат в строительстве: системный подход к методологии управления // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – №6. – С. 68
5. Волков А.А. Гомеостат зданий и сооружений: кибернетика объектов и процессов // В кн. “Информационные модели функциональных систем” / Под ред. К.В. Судакова, А.А. Гусакова. – М.: Фонд ”Новое тысячелетие”, 2004. – С. 133–160.