

УДК 519.95

К вопросу об иерархии нарушений при функционировании целенаправленных систем и одном способе скаляризации векторного показателя ущерба

А.В.Коршунов

В статье рассматривается ущерб как результат ответного воздействия среды на морфологию, функциональные и информационные свойства целенаправленной системы. Обсуждаются морфологический (количественный), функциональный и информационный ущербы. Показывается их иерархичность. Рассматриваются показатели их оценки и методы скаляризации этих показателей. Предлагается метод опосредованной скаляризации показателей трех видов ущерба.

Ключевые слова:

иерархия, системные описания, целенаправленные системы, нарушения, ущерб, скаляризация

В процессе своего функционирования сложная целенаправленная система взаимодействует со средой, воздействуя на нее и испытывая ответное сопротивление или противодействие среды. Это сопротивление оказывает влияние на систему, внося в нее определенные нарушения.

В интересах получения оценки величины и значимости этих нарушений для функционирования системы необходимо решить вопрос о введении их количественной меры. Для этого, в первую очередь, требуется определение свойств системы, воздействия на которые подлежат измерению. Современная системотехника утверждает, что системное описание должно отражать три основные стороны системы в ее взаимодействии со средой [1, 2]:

морфологию (составные части, связи между ними, устройство);

функциональные свойства (содержание деятельности);

информационные свойства (оценку точности, организации, неопределенности, управляемости).

Сопротивление среды в общем случае оказывает воздействие на каждую из указанных сторон и вносит в каждую из них нарушения. Нарушения, вносимые сопротивлением среды в систему, будем именовать ущербом. Формально в соответствии с системным описанием можно выделить три вида ущерба, подлежащие оценке:

морфологический;
функциональный;
информационный.

Необходимость выделения, в общем случае, трех видов ущерба определяется также тем, что для сложных систем использование только одного или двух видов из трех может оказаться недостаточным в силу того, что в указанных системах взаимоопределяемость морфологии, внутренней информации и функции не являются имманентным свойством.

Для измерения ущерба традиционно используется вектор относительных потерь.

В нашем случае под потерями будет понимать разность вида:

$$W_N - W(t), \quad (1)$$

где W_N , $W(t)$ - некоторое опорное значение показателя (в общем случае векторного) той или иной группы свойств и его текущее, в условиях противодействия среды, значение, соответственно.

В этих условиях формульная зависимость для определения показателя текущего ущерба $u(t)$ имеет вид:

$$u(t) = \frac{W_N - W(t)}{W_N}. \quad (2)$$

Для каждого из видов ущерба показатель (2) конкретизируется.

Однако общим свойством всех показателей вида (2), является то, что при отсутствии в системе восстановления, (2) представляет собой неубывающую функцию своих аргументов, изменяющуюся в диапазоне $0 \leq U \leq 1$.

Введение в рассмотрение трех видов ущерба - морфологического (количественного, состава), функционального и информационного - значительно облегчает оценку последствий сопротивления среды системе.

Можно выделить два аспекта этого "облегчения".

Во-первых, введение трех групп показателей позволяет ответить сразу на три вопроса: как изменится состав системы, как это скажется на возможностях системы по достижению поставленной цели и насколько управляема будет система.

Во-вторых, сближает показатели оценки ущерба для систем различного масштаба.

Первый из указанных аспектов требует некоторых пояснений. Количественные (морфологические) и функциональные потери, а также потери в управляемости не являются жестко взаимосвязанными. При этом влияние количественных (морфологических) потерь на функциональные и наоборот, не одинаково. Так, например, возможен случай, когда количественные потери будут отсутствовать, а функциональные иметь место. Такая картина может наблюдаться при «блокировании» действия целенаправленной системы без нанесения ей морфологического ущерба. В то же время полное отсутствие функциональных потерь при наличии количественных не представляется возможным.

Информационный ущерб, представляющий собой, с одной стороны, степень потери внутренней информации, а с другой - снижение уровня управления рассматриваемой системой, также влияет, в конечном счете, на функциональные возможности системы.

Таким образом, можно утверждать, что в иерархии ущербов функциональный ущерб стоит выше количественного и информационного, и определение функционального ущерба позволяет наиболее полно и многосторонне учитывать влияние сопротивления среды на работоспособность целенаправленной системы.

Следует также подчеркнуть, что степень изученности ущербов различна. Наиболее изученным является морфологический (количественный) ущерб, а наименее изученным - информационный.

В интересах определения показателей ущерба рассмотрим возможные варианты описания системы.

Морфологическое описание целенаправленной системы может быть в общем виде представлено в виде его подсистем:

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3, \quad (3)$$

где S_1 - подсистема управления;

S_2 - подсистема взаимодействия со средой (исполняющая подсистема);

S_3 - подсистема обеспечения.

В зависимости от целей исследования и необходимости получения описания того или иного среза системы конкретные содержания подсистем и схема декомпозиции могут быть различными.

Однако следует подчеркнуть, что в большом классе целенаправленных систем, который, обычно и рассматривается, каждая из названных подсистем функционально состоит из непересекающихся множеств однотипных «элементарных» подсистем (ЭП), предназначенных для выполнения частных задач в процессе достижения общей цели

системы. Названные однотипные ЭП в зависимости от решаемых частных задач могут функционировать по одиночке, коллективно, все одновременно или с нахождением части подсистем в резерве. В ходе воздействия на них сопротивления среды они теряют работоспособность. При этом принимается, что ЭП находится в одном из двух состояний – работоспособна или неработоспособна (исправна или неисправна).

Для оценки морфологического ущерба, который традиционно рассматривается в качестве основного из-за простоты своего определения, обычно применяется наиболее наглядный, но, в принципе, недостаточно информативный показатель - относительные потери в количестве исправных ЭП:

$$u_M(t) = \frac{S^0 - S(t)}{S^0}, \quad (4)$$

где $S^0, S(t)$ - начальное и текущее количество исправных подсистем в составе системы.

Названный показатель является частным случаем вектора морфологического ущерба (относительных потерь состава системы):

$$U_M = \|u_{M_i}(t)\| = \left\| \frac{S_i^0 - S_i(t)}{S_i^0} \right\|, \quad (5)$$

где $S_i^0, S_i(t), i = \overline{1, N}$ - начальное и текущее количество исправных ЭП i -го типа, соответственно.

Особенностью морфологического ущерба описываемых систем является его дискретность, что связано с целочисленным изменением количества работоспособных ЭП.

Функциональное описание целенаправленной системы должно отражать конфликт системы со средой функционирования и показывать способ получения результатов функционирования в конкретной ситуации или группе ситуаций. В силу того, целенаправленная система, среда функционирования и сам конфликт системы и среды представляют собой сложные системы, при их функциональном списании следует учитывать нижеперечисленные замечания.

Во-первых, в силу свойства уникальности сложных систем [2] не представляется возможным полностью переносить результаты исследования одной отдельно взятой системы на остальные. Осуществить это можно только в смысле оценки возможности [3] такого поведения.

Во-вторых, свойство слабопредсказуемости сложных систем [2] не позволяет точно описать (предсказать) поведение системы, т.е. создать четкую модель поведения системы даже в вероятностном (в силу постулата неопределенности) смысле. Все создаваемые модели и описания будут работоспособны только в узком диапазоне изменения параметров.

В-третьих, поскольку негентропийность (целенаправленность) является внутренним свойством системы, а цели поведения сложных систем весьма многогранны и противоречивы, функциональное описание таких систем делается, обычно, на метауровне [4] с помощью наиболее общего интегрального показателя (показателей) без подробного рассмотрения функционирования подсистем.

Для функционального ущерба системы мерой может выступать вектор относительных функциональных потерь:

$$\bar{U}_F = \|u_F(t)\| = \left\| \frac{F_{N_r}(t) - F_r(t)}{F_{N_r}(t)} \right\| \quad (6)$$

где $F_N = \|F_{N_r}(t)\|$, $F = \|F_r(t)\|$, $r = \overline{1, R}$ - векторы нормально протекающего и текущего функционирования системы.

Для определения функционального ущерба системы необходимо определить вектор ее функционирования. Пусть процесс функционирования системы, в результате которого происходит достижение целей системы, может быть разбит на последовательные этапы таким образом, что выполнение последующего этапа невозможно без выполнения предыдущего. Тогда в качестве количественной меры функционирования системы на некотором этапе возьмем время выполнения этого этапа. Пусть длительность выполнения такого этапа в нормальных условиях составляет T_N . Нормальные условия при этом не обязательно предполагают отсутствие сопротивления среды, но в этом случае рассматривается некоторое типовое, базовое сопротивление.

Для системы, получающей противодействие со стороны среды отличное от базового, время выполнения этапа изменяется и составляет T_C . Если сопротивление меньше базового, то время сокращается вплоть до некоторого минимального времени, необходимого для выполнения этапа в условиях отсутствия сопротивления ($T_{\min} \leq T_C < T_N$; $T_{\min} > 0$). В противном случае T_C удлиняется и, в общем случае, принадлежит интервалу $T_C \in (T_N, \infty)$, где $T_C \rightarrow \infty$ соответствует полному невыполнению системой некоторого этапа.

В качестве характеристики функционирования системы на некотором этапе возьмем величину:

$$F = \frac{1}{T}. \quad (7)$$

Тогда функциональный ущерб системы на этом этапе составит:

$$U_F = \frac{F_N - F_C}{F_N} = \frac{T_N^{-1} - T_C^{-1}}{T_N^{-1}} = 1 - \frac{T_N}{T_C}. \quad (8)$$

В отличие от количественного, функциональный ущерб является непрерывной функцией своих аргументов, изменяющейся в интервале $0 \leq U_F < 1$.

Для всего процесса функционирования системы функциональный ущерб составит:

$$\begin{aligned} T_{N\Sigma} &= \sum_j T_{Ni}; \\ T_{C\Sigma} &= \sum_j T_{Ci}; \\ U_F &= \frac{F_N - F_C}{F_N} = \frac{T_{N\Sigma}^{-1} - T_{C\Sigma}^{-1}}{T_{N\Sigma}^{-1}} = 1 - \frac{T_{N\Sigma}}{T_{C\Sigma}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $T_{N\Sigma}$, $T_{C\Sigma}$ - суммарная продолжительность процесса функционирования системы в нормальных условиях и в условиях, отличных от нормальных, соответственно.

Нельзя утверждать, что это единственный и наилучший способ описания функционального ущерба, но его достоинством является относительная простота.

Информационное описание системы в наиболее общем случае представляется в виде информационной энтропии [1], а функционирование - в виде изменения энтропии во времени:

$$H(t) = - \int p(x;t) \cdot \log_2 p(x;t) \cdot dx; \quad (10)$$

$$H(t) = - \sum_v p_v(x;t) \cdot \log_2 p_v(x;t), \quad (11)$$

где $p(x;t)$, $p_v(x;t)$ - непрерывное и дискретное распределение вероятности некоторого параметра, характеризующего систему.

Информационная энтропия, в свою очередь, с точностью до постоянной пропорциональна термодинамической энтропии системы [1, 5], устанавливающей связь с энергией:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta Q}{T}, \quad (12)$$

где ΔQ - прирост тепловой энергии;

T – абсолютная температура термодинамической системы.

Это позволяет связать термодинамические (в основном хаотические процессы) с понятием состояния системы и предсказанием его изменения [5].

Прирост неорганизованной, неуправляемой энергии в системе приводит к увеличению степени ее дезорганизации [6, 7] и, следовательно, к уменьшению нашего знания состояния системы и возможности управления ею (росту H).

Иначе говоря,

$$\Delta H = k \cdot \Delta \epsilon, \quad (13)$$

где k – постоянная, зависящая от системы единиц.

Указанная связь позволяет переходить от информационного к термодинамическому описанию целенаправленных систем и использовать для этого весь имеющийся разработанный аппарат второго начала термодинамики. Особое внимание при этом следует уделять нестатическим процессам, поскольку целенаправленные системы участвуют именно в таковых.

Любое нарушение функционирования целенаправленной системы увеличивает неопределенность в ее состоянии, и, тем самым, приводит к росту ее энтропии (информационной и термодинамической). Другими словами нарушения в системе можно расценивать как подведение некоторой энергии к объекту. С другой стороны, мероприятия, направленные на восстановление внутрисистемных связей, приводят к уменьшению энтропии, что эквивалентно отбору энергии. Т.е. в данных условиях теплота Q выступает в качестве меры воздействия (возмущающего при $\Delta Q > 0$ и антивозмущающего при $\Delta Q < 0$) на объект. Температура T , в свою очередь, выступает как мера интенсивности функциональной деятельности объекта. Количественные меры Q и T для рассматриваемого случая требует отдельного изучения.

Информационный ущерб (степень потери внутренней информации) тесно связан с ростом энтропии, происходящим по мере возрастания степени неопределенности в системе. Будем считать, что для системы известны начальное (нормальное) ее состояние, характеризуемое энтропией H_0 , и состояние полной информационной неопределенности, характеризуемое энтропией H_{\max} . Последнее описывает последнюю стадию дезорганизации системы перед ее дезинтеграцией.

Тогда в качестве показателя информационного ущерба можно принять величину

$$U_1 = \frac{H - H_0}{H_{\max} - H_0}. \quad (14)$$

Таким образом, получены выражения для определения показателей трех видов ущербов, получаемых целенаправленной системой в ходе конфликта со средой. По крайней

мере один из них – морфологический – описывается векторным показателем. Показатель функционального ущерба в рассмотренном случае скалярен, но это связано с выбором времени в качестве количественной меры функционирования. При выборе в качестве таковой другой характеристики показатель функционального ущерба вполне может стать векторным. И лишь информационный ущерб скалярен по определению.

Использование для оценки функционирования системы трех видов ущерба наряду с ранее перечисленными достоинствами обладает и рядом недостатков.

Во-первых, это наличие трех, в общем случае, векторных показателей, работа с которыми затруднительна.

Во-вторых, большое разнообразие целенаправленных систем и стоящих перед ними целей требуют различного определения векторов морфологического и функционального ущерба. При этом меняется размерность этих векторов

Указанные неудобства желательно обойти, выбрав такой показатель, который, обладая достоинствами трех вышеназванных показателей, не имел бы их недостатков и был бы скалярным.

Неудобства использования векторных показателей хорошо известны, и разработаны многочисленные методы и процедуры скаляризации этих показателей. Наиболее широко описанные в литературе методы скаляризации векторного показателя ущерба, изложенные в терминах данной статьи, приведены в таблице 1.

Скалярные показатели, получаемые в соответствии с этими методами, обладают различной распространенностью в использовании, различной информативностью и разнятся друг от друга свойствами.

Так, использование показателя $U_{\Sigma M}$ приводит к схеме, близкой к схеме Парето [8, 9].

Показатели $U_{\Sigma G}$ и $U_{\Sigma NG}$ при схожести формульных зависимостей для их вычисления отражают два различных подхода к определению взвешенного ущерба. Если в первом случае в виде линейной формы представляется ущерб, то во втором – состав системы.

Показатель $U_{\Sigma N}$ является частным случаем $U_{\Sigma NG}$ при $\forall i: C_i \equiv 1$.

Показатель $U_{\Sigma NL}$ является самым неинформативным и имеет наименьшее распространение.

Приведенные методы скаляризации были разработаны для морфологического ущерба. Эти методы можно назвать методами непосредственной скаляризации.

Основные методы скаляризации показателя ущерба

| №№ п/п | Наименование | Формульная зависимость |
|-----------|--|---|
| 1 | Оценивание по показателю ущерба основному виду (основной категории) элементарных подсистем | $U_{\Sigma M} = U_k,$ $U_j, j \neq k$ – не рассматривается; $j = \overline{1, J}$ – типы ЭП; k – основной тип ЭП. |
| 2 | Использование взвешенного ущерба | $U_{\Sigma G} = \frac{\sum C_i \cdot U_i}{\sum C_i}$ где C_i – «вес» ЭП i -го типа; U_i – доля неисправных ЭП i -го типа |
| 3 | Использование доли неисправных ЭП независимо от их вида | $U_{\Sigma N} = \frac{S^0 - S^y}{S^0}$ |
| 4 | Использование взвешенной доли неисправных ЭП | $U_{\Sigma NG} = \frac{\sum C_i \cdot \xi_i}{\sum C_i \cdot N_i}$ где ξ_i, N_i – количество неисправных ЭП i -го типа и общее их количество, соответственно |
| 5 | Использование доли подряд пораженных ЭП, расположенных в порядке их важности | $U_{\Sigma NL} = \frac{N_{\max}}{N_0}$ где N_0 – общее количество номеров ЭП; N_{\max} – номер последней из неисправных ЭП. |

Применимость этих методов для сведения к скалярному показателю показателей трех видов ущерба, имеющих различную физическую сущность, становится проблематичной.

Т.о. встает вопрос об опосредованной скаляризации этих показателей, т.е. выборе такого скалярного показателя, который был бы чувствителен к каждому из трех видов ущерба. Трудно сказать, имеет ли эта задача общее решение. Но в частном случае такое решение достижимо.

Для этого воспользуемся двумя положениями. Во-первых, тем, что как указывалось ранее, в иерархии ущербов функциональный ущерб стоит выше количественного и информационного и позволяет наиболее полно учитывать влияние сопротивления среды на работоспособность целенаправленной системы. А во-вторых, тем, что в иерархических системах в структурах типа «начальник-подчиненный» качество подсистемы нижнего уровня («подчиненный») можно оценить через качество верхнего уровня («начальник»).

С учетом того, что количественный и информационный ущерб приводят к сбоям в функционировании, по-видимому, можно оценить функциональный ущерб с учетом морфологического и информационного.

Для этого в показателях (8) и (9) в качестве величин T_C и T_{Ci} возьмем

$$\begin{aligned} T_C &= \max \{T_C^M, T_C^F, T_C^I\}; \\ T_{Ci} &= \max \{T_{Ci}^M, T_{Ci}^F, T_{Ci}^I\}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $T_{Ci}^M, T_{Ci}^F, T_{Ci}^I$ - продолжительность выполнения целенаправленной системой i -го этапа, увеличившаяся за счет морфологического, функционального и информационного ущербов, соответственно.

Выражение (15) является простейшим и, по-видимому, не самым лучшим вариантом учета влияния морфологического и информационного ущербов на продолжительность выполнения этапа операции, т.к. предполагает влияние только одного из видов ущерба при нулевых или некоторых «базовых» значениях двух других видов ущерба. Кроме того, уменьшение размерности необходимо влечет за собой потерю части информации – из суммарного функционального ущерба не видно, что конкретно оказало влияние на изменение функционирования системы. Тем не менее, предлагаемый метод скаляризации позволяет получить показатель, чувствительный к каждому из трех рассмотренных видов ущерба целенаправленной системы.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрен ущерб как результат сопротивления среды воздействию целенаправленной системы.

В соответствии с принятыми в системотехнике видами описаний систем выявлены морфологический (количественный), функциональный и информационный ущербы.

В качестве меры каждого из ущерба взяты относительные потери объекта в соответствующей области.

3. Показано, что морфологический, функциональный и информационный ущербы не эквивалентны друг другу и находятся на различных уровнях иерархии. Выявлено, что в иерархии ущербов функциональный ущерб стоит выше количественного и информационного, и изучение функционального ущерба позволяет наиболее полно учитывать влияние среды на работоспособность целенаправленной системы.

4. Показано, что показатели морфологического и функционального ущерба в общем случае являются векторными. Рассмотрены существующие методы скаляризации векторного показателя морфологического ущерба.

Предложен метод опосредованной скаляризации показателей трех видов ущерба путем учета влияния морфологического и информационного ущербов на скалярный показатель функционального ущерба.

Библиографический список

1. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Вопросы военной системотехники. - М.: Воениздат, 1976. - 224 с.
2. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника. - М.: Радио и связь, 1985. - 200 с., ил.
3. Дюбуа Д., Прод А. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике. Пер. с фр. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с., ил.
4. Корячков В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 400 с.:ил.
5. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии. - М.: Сов. радио, 1976. - 296 с., ил.
6. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики Механика и молекулярная физика. - М.: "Наука" Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1969. - 400 с.
7. Базаров И.П. Термодинамика. - М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1961. - 292 с.
8. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - М.: Наука, 1982. - 254 с.
9. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1981. - 488 с.

Сведения об авторе

Коршунов Андрей Владимирович, старший научный сотрудник Научного центра МО РФ, д. т. н., тел. 8-499-263-30-28, e-mail: a-kors@yandex.ru

