БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Косарев С.Н. и др.* Система управления двигателем ВАЗ-2111 (1,5 л. 8 кл.) с распределенным впрыском топлива (контроллеры М 1.5.4N и Январь – 5.1). – СПб.: Петер Гранд, 2001. – 96 с.
2. *Кутов В.И.* Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». – 5-е изд., перераб. и доп. – Машиностроение, 1989. – 416 с.

Заргарян Юрий Артурович
Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге
E-mail: fin_val_iv@tsure.ru
347928, Таганрог, ГСП 17А, Некрасовский, 44. Тел: 88634-371-689

Zargarjan Urij Arturovich
Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”
E-mail: fin_val_iv@tsure.ru
44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928. Phone: 88634-371-689

УДК 51-7;519.6;519.8

А.А. Кочкаров, А.Р. Салпагарова, Л.Х. Хапаева

СТОЙКОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПО СТРУКТУРЕ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Построена математическая модель распространения внешних негативных воздействий по структуре сложной системы. Введены качественные и количественные характеристики, оценивающие подверженность элементов системы негативным воздействиям в зависимости от положения элементов в структуре системы. Предложен ряд рекомендаций по усилению сопротивляемости сложных систем внешним воздействиям. В ходе исследования модели было выявлено несколько синергетических эффектов

Негативные воздействия; критерии; синергетические эффекты.

A.A. Kochkarov , A.M. Kochkarov, L.U.Salpagarova

DESIGNING OF COMPOUND NETWORK SYSTEM’S DESTRUCTION: THEORETIC-GRAPH APPROACH

Mathematic model of prevalence external negative influences by the compound of system structure. Qualitative and quantitative characteristics were put in that appreciate the subjection of system elements to negative influences depend on the elements position in system’s structure. A series of recommendation on strengthening of resistance of compound system to external influences was proposed. During the model investigating some sinergetic effects were revealed.

Negative impact; criteria; synergistic effects.

Введение. Моделирование сложных систем позволяет исследовать особенности их функционирования в различных условиях, наделять их требуемыми характеристиками и снижать риск возникновения *чрезвычайных ситуаций* (*ЧС*). В математической модели исследуемой системы должны быть представлены основные элементы, по поведению, по качеству, по эффективности функционирования которых можно достоверно судить о всей системе. Такой подход в исследованиях, когда без детального представления сложных систем, процессов и явлений в них протекающих, принято называть *системным синтезом* [1]. О результативности использования этого подхода можно судить по многим работам [1–4]. Наглядно подтверждает это цикл работ научной школы В.В. Кульбы [3] , посвященный исследованиям по управлению рисками.

1. Надежность, живучесть и стойкость. Под *системой* в кибернетике принято понимать объединение любых элементов, рассматриваемых как связное целое. Факт непосредственного (без посредников) взаимодействия между двумя элементами системы и определяет наличие *связи* между ними. Общую картину связей между всеми элементами системы отражает *структура системы*. С точки зрения концепции безопасности [5], всякую сложную техническую систему следует изучать с трех основных позиций: *надежности системы*, *живучести системы*, и ее *безопасности*.

Надежность [6] – свойство системы сохранять в течение определенного промежутка времени значение параметров, характеризующих функционирование системы. Как правило, для оценки возможности возникновения опасного для окружающей среды состояния системы используется дерево событий (отказов) (рис. 1). *Дерево событий* (*отказов*) – это диаграммное представления всех событий (отказов), последовательное и/или совместное появление которых в системе приводит к некоторому главному событию (возможно, потенциально опасному происшествию).

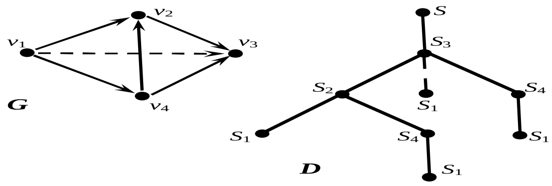

Рис. 1. Двухполюсный граф G и дерево отказов D

Вершины v_1 и v_3 – полюсные вершины. На вершину v_1 подается сигнал, который должен достичь вершины v_3. Главное событие S – недостижение сигнала из вершины v_1 вершины v_3. Промежуточные события S_i, $i = \{1,2,3,4\}$ – недостижение сигналом вершины v_i. Пунктиром изображены резервное соединение (на графе G) и соответствующее ему событие (на дереве D). Считая надежность (вероятность безотказной работы в течение некоторого промежутка времени) для всех вершин графа равными 0,9, получаем, что надежность функционирования коммуникационной сети в виде графа G без резервного соединения равна

Живучесть – свойство системы, характеризующее ее способность функционировать под влиянием внешних воздействий (нагрузок), возбуждаемых в окружающей системе (среде). Изучение живучести систем возможно на основе вероятностных моделей, в рамках математической теории надежности [6], и детерминистическими, в рамках механики катастроф [5].

Живучесть и надежность систем являются теми характеристиками, которые позволяют оценить риск возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации сложных технических систем. Используя эти критерии, возможно обеспечение безопасности системы при чрезвычайных ситуациях или наделение системы необходимыми качественными характеристиками, не допускающими возникновения чрезвычайных ситуаций.

Стойкостью системы назовем ее способность противостоять внешним воздействиями функционировать в штатном режиме на этапе инициирования ЧС, т.е. в докритической области функционирования системы. Поэтому основной характеристикой стойкости системы будет служить время достижения системой предельного состояния. Увеличение этого промежутка времени будет способствовать уменьшению риска развития ЧС в системе.

2. Математическая модель распространения поражающих воздействий по системе. Опыт исследования многих сложных систем показывает, что на начальном этапе анализа их элементы целесообразно представлять в виде вершин графа, наделенных определенными свойствами, а взаимодействие описывать с помощью ребер. Будем считать тождественными следующие понятия: *граф системы и структура системы*, *вершина графа и элемент системы*, *ребро графа и связь между элементами системы*.

Распространения воздействия от одного элемента системы к другому на графе системы будем задавать *ориентированным ребром* – ребром с заданными началом и концом. Ориентированное ребро часто называют *дугой*, а граф с дугами – *орграфом* [8]. Орграф структуры моделируемой системы не будет иметь петель (т.е. дуг, конец и начало которых совпадает).

Надежностью элемента системы будем считать вероятность $P(t<T)$ того, что элемент будет работоспособен в течение времени T с момента начала эксплуатации.

Таким образом, на орграфе $G=(V,E)$ системы для вершины $v_i \in V, i \in \{1,2,...,n\}$ весом $w_i(t)=P_{v_i}(t<T)$ является величина надежности элемента системы, соответствующего вершине v_i. А весом $w(v_i,v_j)=\varepsilon_{ij}$, $j \in \{1,2,..,n\}$, $i \neq j$, дуги $(v_i,v_j) \in E$, причем со знаком “+”, является число $0<\varepsilon_{ij} \le 1$, равное сохранившейся доле передаваемого воздействия, при переходе от вершины v_i к вершине v_j.

Процесс изменения весов вершин графа системы можно отразить следующим правилом, называемым *импульсным воздействием*. Импульсное воздействие определяется *импульсом* $imp_j(t),\ j \in \{1,2,..,n\}$ в дискретном времени $t=0,1,2,3...$, которое задается отношением

$$imp_j(t)=w_j(t)/w_j(t-1),\ \text{при}\ t>0. \qquad (1)$$

Тогда для $t \ge 0$ для i-й вершины графа G определим импульсное воздействие

$$w_i(t+1)=w_i(t)\prod_{k=1}^{\deg v_i}\varepsilon_{ji}\, imp_j(t) \qquad (2)$$

или

$$imp_j(t+1) = \prod_{k=1}^{\deg v_i} \varepsilon_{ji}\, imp_j(t)\,, \qquad (3)$$

полагая при этом, что $\deg v_i$ – число входящих в вершину v_i дуг.

Формулы (1), (2) и (3) задают изменения весов вершин графа $G=(V,E)$, тем самым определяя динамику распространения внешних воздействий по системе.

Автономное импульсное воздействие на взвешенном орграфе G определим по правилу (3) с вектором начальных значений $\mathbf{W}(0)=(w_1(0), w_2(0),..., w_n(0))$ и вектором импульсов

$$\mathbf{Imp}(0)=(imp_1(0), imp_2(0),..., imp_n(0)), \qquad (4)$$

задающим импульс $imp_j(0)$ в каждой вершине v_j в момент времени $t=0$. Автономное импульсное воздействие в паре с вектором начальных значений описывает состояние системы в начальный момент времени, когда под влияние внешних поражающих воздействий попадают все элементы системы.

Автономное импульсное воздействие, в котором вектор $\mathbf{Imp}(0)=(1,1,...,imp_i(0),...,1)$, $imp_j(0)>0$, имеет только i-ю отличную от единицы компоненту, назовем *простым воздействием с начальной вершиной* $v_i \in V$.

В соответствии с описанным импульсным воздействием на орграфе, можно ввести различные критерии (признаки) достижения системой предельного состояния. К примеру, можно считать, что система находится в предельном состоянии, если надежность хотя бы одного из наиболее значимых элементов системы ниже некоторого допустимого уровня. Этот уровень будем называть *критическим уровнем* надежности элемента. Если надежность элемента ниже критического уровня, то элемент не в состоянии выполнять возложенных на него функций, или функционировать требуемое время.

Представление исследуемой системы в виде взвешенного по правилу (2) графа $G=(V,E)$ и формализация внешнего влияния на систему как автономного импульсного воздействия (1)–(3) определяет *модель распространения поражающих воздействий по системе.*

Исследование построенной модели необходимо для решения важной задачи – выяснить, как внешнее воздействие распространяется по структуре системы, и влияет на качественное состояние ее элементов.

Поставленная задача требует введения ряда параметров, отражающих подверженность элемента системы внешним воздействиям в зависимости от “положения” элементов в структуре системы.

Структурной уязвимостью $\mathsf{vl}(u)$ вершины $u \in V$ назовем число путей, концом которых является вершина u.

Структурная уязвимость элемента дает качественную оценку его расположения в структуре системы. Структурная уязвимость позволяет судить о том, насколько безопасно расположение элемента в структуре системы относительно других элементов в период поражающих воздействий.

Предельной надежностью вершины u назовем величину надежности соответствующего ей элемента системы на момент окончания времени воздействия, и обозначим через $\mathrm{br}(u)$.

Можно подсчитать сумму длин всех путей, концом которых является вершина u. Обозначим эту сумму через $\mathrm{ps}(u)$ и назовем *мерой структурной уязвимости* вершины u.

Конденсацией [7] графа $G=(V,E)$ будем называть граф $G^*=(V^*,E^*)$, полученный из G стягиванием в некоторую вершину каждого контура.

Теорема 1. *Предельная надежность* $\mathrm{br}(u)$ *вершины* $u \in V^*$ *графа* $G^*=(V^*,E^*)$ *с равными весами* ε *для всех ребер из* E^* *при автономном импульсном воздействии с начальным импульсом* imp_0*, одинаковым для всех вершин из* V^**, определяется формулой*

$$\mathrm{br}(u)=w_u imp_0^{\mathrm{vl}(u)+1}\varepsilon^{\mathrm{ps}(u)}, \tag{5}$$

где w_u *– надежность вершины* u *в начальный момент автономного импульсного воздействия.*

Доказательство. Предельная надежность вершины $u \in V^*$ графа $G^*=(V^*,E^*)$ определяется импульсными воздействиями отходящими от вершин его множества уязвимости (множество вершин, от которых импульсное воздействие доходит до вершины u). Каждое импульсное воздействие проходя путь от вершины $v \in V^*$ (важно, что таких путей может быть несколько) до вершины u, уменьшается в $\varepsilon^{l(v,u)}$ раз, $l(v,u)$ – длина пути (v,u), и становится равным $imp_0\varepsilon^{l(v,u)}$. По этому же принципу высчитываются значения всех импульсных воздействий подходящих в вершине u. А их количество, как известно, равно $\mathrm{vl}(u)$ – числу путей, концом которых является вершина u. Перемножив, в соответствии с (4), значения всех импульсных воздействий подходящих к вершине u, получаем искомую предельную надежность системы следующему равенству $\mathrm{br}(u)=w_u imp_0 imp_0^{\mathrm{vl}(u)}\varepsilon^{\mathrm{ps}(u)}=w_u imp_0^{\mathrm{vl}(u)+1}\varepsilon^{\mathrm{ps}(u)}$. Показатель $\mathrm{ps}(u)$ множителя $\varepsilon^{\mathrm{ps}(u)}$ появляется в произведении (5) как результат сложения длин всех путей, концом которых является вершина u. Множитель imp_0 появляется в произведении (5) без уменьшающего его сомножителя ε, поскольку одно импульсное воздействие подходит к вершине u непосредственно.

3. Алгоритм повышения стойкости системы. Алгоритм ПС.

1. Рассмотрим систему со структурой в виде ориентированного графа $G=(V,E)$. Предельное состояние системы определяется предельным состоянием некоторого множества его элементов $\tilde{v}_i \in V, i \in \{1,2,...,\tilde{n}\}$. Система попадает под влияния импульсного воздействия $\mathbf{Imp}(0)$. Для предотвращения перехода системы в предельное состояние необходимо с каждым из элементов $\tilde{v}_i$ проделать следующие операции.

2. Подсчитать предельную надежность $\mathrm{br}(\tilde{v}_i)$ (см. теорему 1). В случае если, среди элементов $\tilde{v}_i, i \in \{1,2,\ldots,\tilde{n}\}$ есть элементы контуров обратной связи или элементы смежные с контурами, подсчет $\mathrm{br}(\tilde{v}_i)$ необходимо вести с учетом времени действия этих контуров.

3. Повысить надежность элемента $\tilde{v}_i$ на разницу $w_i(0) - \mathrm{br}(\tilde{v}_i)$. Повысить надежность элемента $\tilde{v}_i$ можно повысить любым из известных методов резервирования [6].

Заключение. Предложенная в настоящей работе математическая модель распространения внешних воздействий по системе позволяет объяснить ряд явлений, наблюдаемых в сложных технических системах при попадании их в условия внешних воздействий (форс-мажорные обстоятельства). Существенной особенностью построенной модели является возможность выхода из строя (перехода в предельное состояние) при распространении импульсных воздействий по системе наиболее надежных элементов.

Этот факт красноречиво подчеркивает *прямую зависимость надежности элемента от его положения в структуре, а также зависимость стойкости всей системы от выбранной при проектировании структуры*.

В работе предложены рекомендации по наделению системы требуемым уровнем стойкости к внешним поражающим воздействиям. С одной стороны, это позволяет уменьшить риск [9] возникновения ЧС (аварий, и катастроф) в системах, функционирование которых предполагается в условиях внезапных внешних воздействий, на необходимый промежуток времени. С другой, определение значения стойкости к заданным внешним воздействиям позволяет предупредит возможность возникновения ЧС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и системный синтез // Новое в синергетике: взгляд в третье тысячелетие. – М.: Наука, 2002.
2. Новое в синергетике: взгляд в третье тысячелетие / Под ред. *Малинецкого Г.Г., Курдюмова С.П.* – М.: Наука, 2002.
3. *Кульба В.В., Кононов Д.А., Косяченко С.А., Шубин А.Н.* Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем. – М.: СИНТЕГ, 2004.
4. *Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А.* Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука, 1992.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций / Под ред. *К.В. Фролова*. – М.: МГФ "Знание", 1998.
6. *Острейковский В.А.* Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2003.
7. *Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И.* Лекции по теории графов. – М.: Наука, 1990.
8. *Малинецкий Г.Г.* Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: Введение в синергетику. / Сер. "Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения". – М.: Наука, 1997.
9. *Владимиров В.А., Кульба В.В., Малинецкий Г.Г, Махутов Н.А. и др.* Управление

риском. – М.: Наука, 2000.

Кочкаров Азрет Ахматович
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша, Российской академий наук
E-mail: Ahmat_Kochkarov@mail.ru
125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Тел: 88782202387

Салпагарова Анжела Руслановна
Карачаево-Черкесская государственная технологическая академия
E-mail: Ahmat_Kochkarov@mail.ru
357100, г.Черкесск, ул.Ставропольская, 36. Тел: 88782202387

Хапаева Леля Халисовна
E-mail: Ahmat_Kochkarov@mail.ru
Тел: 88782202387

Kochkarov Azret Ahmatovich
Applied mathematic's institute by Keldish M.V, State technological academy
E-mail: Ahmat_Kochkarov@mail.ru
4, Miuskaya, Moscow, 125047. Phone: 88782202387

Salpagarova Angela Ruslanovna
Karachai-Cherkess State technological academy
E-mail: Anzhela_Salp@mail.ru
36, Stavrapolskaya, Cherkesk, 357100. Phone: 88782202387

Hapaeva Lelya Halisovna
E-mail: Ahmat_Kochkarov@mail.ru
Phone: 88782202387

УДК 51-7;519.6;519.8

А.А.Кочкаров, А.М.Кочкаров, Л.У.Салпагарова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМ: ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВЫЙ ПОДХОД

Исследованы явления разрушения информационных, электроэнергетических, транспортных и коммуникационных систем, как правило, имеющих сложную структуру. В рамках исследования предложена теоретико-графовая (дискретная) модель структурного разрушения. Предложены различные критерии (критерий полного разрушения, компонентный критерий, критерий связности, диаметральный критерий) выхода системы из строя при структурном разрушении. Рассмотрены различные сценарии структурного разрушения систем при различных эпицентрах.

Энергетика; коммуникации; систем.