УДК 681.3.06+519(076.1)

Г.Н. Черкесов[1], А.О.Недосекин[2]. **ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ СТРУКТУР ПРИ МНОГОРАЗОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ. ЧАСТЬ 2. МНОГОВАРИАНТНЫЕ РАСЧЁТЫ**

G.N. Cherkesov, A.O.Nedosekin. **Assessment of the survivability of complex structures at repeated exposure to high accuracy. Part 2. Multi-variant estimation.**

Статья является замыкающей к [1] и воспроизводит многовариантные расчёты по методике, изложенной в цитируемом материале. Обсуждается аспект вычислительной трудности задачи оценки живучести и пути преодоления этой трудности. Исследуется переход от задач структурной живучести к задачам функциональной живучести. Устанавливается смысловой стык между технической живучестью и мобилизационной устойчивостью в экономике.

Ключевые слова*: *живучесть, витальность, устойчивость, риск, неблагоприятное воздействие, запас живучести, закон уязвимости, функция живучести.

The article has a status of conclusion to [1] and deals with multi-variance survivability estimations, according to framework from previous part of the article. A computational difficulty aspect for survivability applications is discussed, also ways to overcome the difficulty. A mental link between survivability and mobilization economical resilience is established.

Keywords: survivability, vitality, resilience, risk, adverse effect, supply of survivability, the law of survivability, survivability function.

1. *Предисловие.*

В **[1]** мы дали общее определение технической живучести, классифицировали основные подходы к анализу живучести, предложили простейшие модели и методы анализа живучести, основанные на математике теории аксиологических вероятностей, случайных размещений и логических функций работоспособности. В данной второй части работы мы обсуждаем четыре основных вопроса:

- вычислительная трудность задач живучести;
- многовариантные расчёты живучести структурно-сложных систем;
- понятие функциональной живучести и её связь со структурной живучестью;
- связь между технической живучестью и мобилизационной экономической устойчивостью.

2. *Вычислительная трудность задач живучести и пути её преодоления.*

Задача живучести ставится и решается на декартовом произведении двух логико-вероятностных пространств: пространства НВ и пространства состояний технической системы. В простейшем случае, оба эти пространства являются дискретными. В соответствии с терминологией классического труда **[2]**, задача о размещениях неблагоприятных воздействий

[1] Д.т.н., профессор Санкт-Петербургского политехнического университета
[2] Д.э.н., профессор Санкт-Петербургского горного университета, генеральный директор ООО «СИ-ХОЛДИНГ»

(НВ) по элементам системы является Р-полной или Р-трудной, т.е. количество вычислений и время вычислений пропорциональны числу N^n, где n – число воздействий, а N – число элементов системы. Уже давно известно, что для современных вычислительных машин Р-полнота не составляет никакой трудности, пусть даже n оценивается сотнями или тысячами, что в реальности невозможно. Другое дело – задача выделения полной группы возможно работоспособных состояний, когда из системы в N элементов последовательно изымается от 1 до N-1 элементов. Поскольку в задачах структурной живучести элемент может пребывать в одном из состояний – работоспособности или отказа (бинарная логика), то полное число состояний системы, подлежащее перебору, составляет 2^N, и этому же числу соответствует сложность вычислений. Таким образом, задача живучести становится NP-трудной и имеет свои фиксированные пределы размерности.

Когда логико-вероятностные методы анализа ещё только пробивали себе дорогу в науке (80-е годы прошлого века), а наиболее ходовыми вычислительными машинами в СССР были ЕС ЭВМ различных модификаций, было экспериментально установлено предельное число элементов системы, превышение которого не позволяло получать решение задачи анализа живучести за обозримое время. Этим числом было N = 27. Все попытки увеличить эту размерность не увенчивались успехом, пока не было найдено несколько подходов к тому, чтобы перейти от прямого перебора состояний к перебору **направленному**. В результате, работа школы проф. А.С. Можаева и его последователей **[3 - 5]** привела к тому, что оказалось возможным декомпозировать граф сложной системы на основной граф и его подграфы (узловые раскрытия), а также разработать логические схемы направленного перебора в пространстве состояний. В результате сегодня предельное число элементов в основном графе составляет 400, а в подграфе – 100 (данные по программному комплексу «АРБИТР»).

Таким образом, преодоление «проклятия размерности» применительно к задачам структурной живучести состоялось. Но выиграна всего лишь первая позиционная война. Потому что при переходе от структурной живучести к функциональной пространство состояний технической системы перестаёт быть счётным, и «проклятие размерности» возвращается, но уже в пугающей форме. Подробнее об этой особенности см. раздел 5_ настоящей работы. Аналогичным образом, решение задачи структурной живучести резко осложняется, если кратность воздействия составляет r, а стойкость элемента – L (или дискретная стойкость в модели замещается вероятностной функцией стойкости).

Перейдём теперь к изложению простейших примеров анализа живучести (эти решения впервые продемонстрированы в **[6],** включая все рисунки и таблицы раздела 3). Все представленные примеры хорошо просчитываются вручную и могут выступать в качестве тестов для новых алгоритмов анализа, как вырожденные случаи.

3. Расчет структурной живучести по состоянию системы для простейших структур.

3.1. Система со структурой типа «мостик» с пятью элементами.

Система с мостиковой структурой (**рис. 1**) подвергается многократным точечным неблагоприятным воздействиям. Необходимо дать оценку живучести по состоянию системы, полагая, что поражение элементов при однократном НВ равновероятно, а стойкость элементов по отношению к интенсивности НВ высокой точности ничтожно мала.

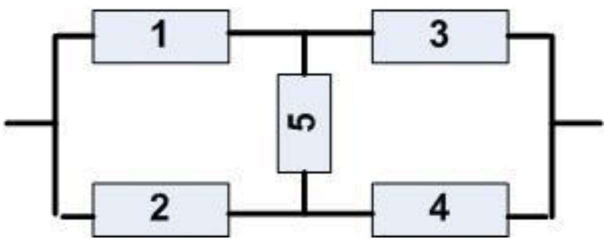

Рис. 1. Система с мостиковой структурой

Логическая функция работоспособности в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме имеет вид (однф) **[7, глава 4]:**

$$F = x_1 x_3 \vee x_1' x_2 x_4 \vee x_1 x_2 x_3' x_4 \vee x_2' x_3' x_1 x_4 x_5 \vee x_1' x_4' x_2 x_3 x_5 \,. \qquad (1)$$

Воспользуемся формулами (31) и (32) из **[1]**, полагая в них m=5, s_1= 2, N=5, s_2= 3, s_3= 4, $s_4 = s_5$ = 5, и получим

$$R(n) = (1 - s_1 / N)^n + \sum_{k=2}^{3} \sum_{i=1}^{n} C_n^j N^{-i} (1 - s_k / N)^{n-i} + 2N^{-n} \sum_{i=1}^{n-1} C_n^i =$$
$$= 2(0,6)^n + 2(0,4)^n - 5(0,2)^n \,. \qquad (2)$$

Значения $R(n)$ при $n \le 5$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Функция R(n)

n	1	2	3	4	5	6	7
***R*(*n*)**	1	0.84	0.52	0.3024	0.1744	0.1012	0.0592

Воспользуемся теперь формулами (33) – (37) из **[1]** для определения R(n). Для этого по формуле (37) составим таблицу коэффициентов L_{nk} **(табл. 2)** и заметим, что она не зависит от характеристик системы (структуры и числа элементов). Поэтому ее можно использовать как общую таблицу, пригодную для расчета живучести любых систем. В **табл. 3** приведены значения коэффициентов B_{ki} для девяти работоспособных структур, получаемых из базовой структуры удалением одного, двух или трех элементов (**рис. 2**).

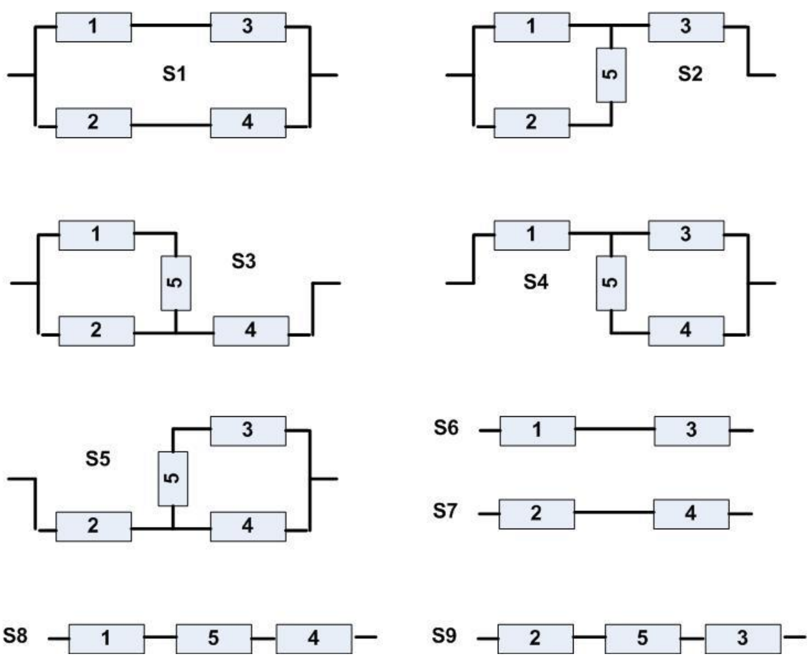

Рис. 2. Работоспособные структуры, получаемые из базовой мостиковой структуры

Таблица 2. Числа L_{nk}

n	***L_{nk}***						
	k= 1	*k*= 2	*k*= 3	*k*= 4	*k*= 5	*k*= 6	*k*=7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	2	0	0	0	0	0
3	1	6	6	0	0	0	0
4	1	14	36	24	0	0	0
5	1	30	150	240	120	0	0
6	1	62	540	1560	1800	720	0
7	1	126	1806	8400	16800	15120	5040

Таблица 3. Числа B_{ki}

k	B_{ki}								
	i=1	*i*=2	*i*=3	*i*=4	*i*=5	*i*=6	*i*=7	*i*=8	*i*=9
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	3	3	1	1
3	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Умножая строки матрицы $||L_{nk}||$ на столбцы матрицы $|B_{ki}||$, получим матрицу коэффициентов r_{ni}, выражающих число способов, которыми при n-кратном НВ можно перейти от базовой структуры S_0 к структуре S_i **(табл. 4)**. Складывая элементы одной строки, найдем число различных несовместных событий, приводящих при n-кратном НВ к работоспособной структуре. Нетрудно убедиться, что значения $R(n) = r_n / N^n$ совпадают с приведенными в **табл. 4.**

Используя формулы (5) из **[1]** и (2), найдем среднее число НВ, приводящее к потере работоспособности:

$$\overline{\omega} = \sum_{n=0}^{\infty} R(n) = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \{2(0.6)^n + 2(0.4)^n - (0.2)^{n-1}\} = 4.083 \qquad (3)$$

Таблица 4. Числа r_{ni}

n	r_{ni}					r_n	N^n
	i=1..5	*i*=6	*i*=7	*i*=8	*i*=9		
1	1	0	0	0	0	5	5
2	1	6	6	2	2	21	25
3	1	24	24	6	6	65	125
4	1	78	78	14	14	189	625
5	1	240	240	30	30	545	3125
6	1	726	726	62	62	1581	15625
7	1	2184	2184	126	126	4625	78125

Средний запас живучести $\overline{d}$ = 3.083. Следует обратить внимание на то, что для данной структуры d =2, а m = 3. Следовательно, средний запас живучести больше максимального числа элементов, которое может быть удалено без потери работоспособности, больше m-живучести. Этот эффект объясняется тем, что некоторые элементы попадают в область действия НВ несколько раз.

Система расчёта настоящего параграфа, основанная на числах Стирлинга 2го рода, была полностью описана в **[6]** и в **[10]**.

3.2. Электроэнергетическая система со структурой типа «мостик» с восемью элементами.

Электроэнергетическая система состоит из генераторов 1 и 2, главных распределительных щитов 3 и 4, перемычки 8, кабелей 5 и 6, распределительного щита 7 **(рис. 3)**. Необходимо дать оценку живучести по состоянию системы после многократного НВ,- полагая, что при каждом НВ становится неработоспособным ровно один элемент системы, а поражение элементов при однократном НВ равновероятно.

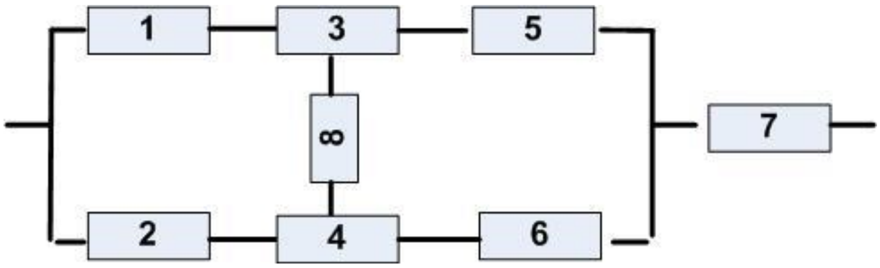

Рис. 3. Структура электроэнергетической системы

Логическая функция работоспособности системы имеет вид:

$$F = x_7(x_1x_3(x_5 \vee x_4x_6x_8) \vee x_2x_4(x_6 \vee x_3x_5x_8)) \qquad (4)$$

Ортогональная дизъюнктивная нормальная форма:

$$F = x_1x_3x_5x_7 \vee x_1'x_2x_4x_6x_7 \vee x_1x_2x_3'x_4x_6x_7 \vee x_1x_2x_3x_4x_5'x_6x_7 \vee$$

$$\vee x_1x_2'x_3x_4x_5'x_6x_7x_8 \vee x_1'x_2x_3x_4x_5x_6'x_7x_8. \qquad (5)$$

Таким образом, ЛФРС содержит всего 6 импликант, в том числе одну без отрицаний, три с одним отрицанием и две с двумя отрицаниями. Вероятности

$P\ (Q_1 = 1\ /\ A_n) = 2^{-n};$

$P\ (Q_l = 1\ /\ A_n) = \sum_{j=1}^{n} C_n^j\ N^{-j}(1 - s_l\ /\ N)^{n-j}$, $l = 2,3,4$; $s_2 = 5$, $s_3 = 6$, $s_4 = 7$

$$P(Q_l = 1 | A_n) = \sum_{j=1}^{n-1} C_n^j N^{-n}, \quad N = 8,\ s_5 = s_6 = 8. \qquad (6)$$

Согласно (1) имеем:

$$\sum_{l=1}^{6} P(Q_l = 1 | A_n) = 2^{-n} + 8^{-n}(4^n + 2^{n+1} - 5) = 2^{-n+1} + 2^{-2n+1} - 5 \times 2^{-3n}. \qquad (7)$$

Результаты расчетов по формуле (7) приведены в **табл. 5.**

Таблица 5. Функция живучести R(n)

n	1	2	3	4	5	6
R(n)	7/8	35/64	139/512	539/4096	2107/32768	8315/262144
R^*(n)	7/8	1/2	8/56	1/35	0	0

В последней строке указаны данные расчетов при стратегии 2, когда пораженные элементы исключаются из повторного поражения.
Среднее число НВ

$$\overline{\omega} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \{2(0.5)^n + 2(0.25)^n - 5(0.125)^n\} = 2.9524$$

Средний запас живучести $\overline{d}$ =1.9524. Это существенно меньше, чем m-живучесть (здесь m = 4). Выживаемость системы находят с помощью формул (33)-(37) из **[1]**. Учитываем, что кроме базовой структуры систем может иметь еще девять различных работоспособных деградированных структур (i=1…9). Для этого определим сначала коэффициенты B_{ki} (**табл.6**).

Таблица 6. Числа B_{ki}

k	B_{ki}				
	i=1…5	i=6	i=7	i=8	i=9
1	1	1	1	0	0
2	0	6	6	1	1
3	0	4	4	0	0
4	0	1	1	0	0

Структуры $S_1…S_5$ возникают при потере только одного элемента (k=1), а именно: 1, 2, 5, 6, 8. Структура S_6 (1357) может возникнуть при потере одного (4), двух (24, 26, 46, 82, 84, 86), трех (246, 248, 268, 468) или четырех (2, 4, 6, 8) элементов. Аналогично структура S_7 (2467) возникает при потере 1, 2, 3 или 4 элементов. Их количество такое же как для структуры S_6. Структура S_8 (работоспособны элементы 138467) возникает при потере двух элементов (25), а S_9 (248357) при потере двух элементов: 1 и 6.

Используя данные таблиц 2 и 6, вычислим r_{ni}.. Результаты приведены в **табл. 7**.

Таблица 7. Числа r_{ni}

n	r_{ni}					r_n	N^n	R_n
	i=1…5	i=6	i=7	i=8	i=9			
1	1	1	1	0	0	7	8	0,875
2	1	13	13	2	2	35	64	0,546875
3	1	61	61	6	6	139	512	0,271484
4	1	253	253	14	14	539	4096	0,131592
5	1	1021	1021	30	30	2107	32768	0,064301

Видим, что результаты табл. 5 и 7 совпадают. Анализ данных табл. 7 позволяет установить интересную закономерность. Отношение r_{ni} / r_n выражает условную вероятность сохранения структуры S_i, после n-кратного НВ при условии, что система осталась работоспособной. Как видно из результатов расчета (**табл. 8**), только для одного типа структуры (S_6 и S_7) условная вероятность растет при увеличении числа НВ, и эта структура неизбыточна и обладает наименьшим числом элементов. Уже при n=5 на долю структур S_6 и S_7 приходится 97% всех случаев, когда система сохраняет работоспособность.

Таблица 8. Условные вероятности

n	r_{ni} / r_n		
	i = 1…5	i= 6,7	i= 8,9
1	0.1429	0.1429	0
2	0.0286	0.3714	0.0571
3	0.0072	0.4388	0.0432

4	0.0019	0.4694	0.0260
5	0.0005	0.4846	0.0142

При стратегии 2, когда пораженные элементы исключаются из области действий следующих НВ, и равновероятном поражении оставшихся работоспособных элементов функция выживаемости расчет функции выживаемости проводят по формуле:

$$R^*(n) = \sum_{i=1}^{l} C_{N-s_i}^{n-k_i} / C_N^n, \qquad (8)$$

где l - число импликант в ортогональной днф, s_i - число букв в импликанте, k_i - число отрицаний. Результаты расчетов приведены в таблице 8. Видно, что функция выживаемости убывает значительно быстрее, чем в схеме независимых НВ (при "пассивной стратегии"). Среднее число НВ до поражения $\overline{\omega}$ = 2.547. Это также меньше, чем при стратегии 1.

В целом, можно говорить о существовании вектора чисел работоспособных состояний системы $F_N(u)$, u = 0…N, где u – число единомоментно удаляемых из системы элементов. Соотношение

$$f(u) = F_N(u) / C_N^u \quad – \qquad (9)$$

это условная вероятность того, что при кратном поражении u элементов в системе из N элементов система сохраняет работоспособность. Тогда (8) переписывается в виде

$$R^*(n) = f(n) \qquad (10)$$

Вектор $F_N(u)$ характеризует **структурную избыточность** в системе и её профиль. Причём проявление этой избыточности в интересах живучести сохраняется при любом распределении вероятностей НВ. Эта же избыточность работает в равной степени и на надёжность. Например, вероятность безотказной работы невосстанавливаемой структурно-сложной системы из однородных элементов

$$P(t) = F_N(0)*p(t)^N + F_N(1)*\, p(t)^{N-1}(1- p(t)) + \ldots + F_N(N-1)*\, p(t)(1- p(t))^{N-1}, \qquad (11)$$

где p(t) – вероятность безотказной работы одного элемента системы. Безотказность такой системы тем больше, чем выше $F_N(u)$. Это вполне подробно показано в **[14].**

Можно перейти от оценки живучести по состоянию к оценке живучести по результату выполнения задания. Такая работа с высокой степенью подробности проведена в **[6],** причём за основу в расчётах взяты те же самые структуры: мостик из 5 элементов и электроэнергетическая структура из 8 элементов. Оценка живучести в этой постановке позволяет гибридизировать отдельные свойства живучести и надёжности, получая новые комплексные свойства НВ-безотказности, НВ-безопасности и др. **[11, 12].**

4. Структурная живучесть многополюсных технических систем

Рассмотрим варианты построения технической системы на многополюсной основе, когда система может быть отображена многополюсным графом, в котором узлы (без нарушения общности) являются неподверженными НВ, а воздействию подвергаются только связи в графе. Одним из возможных критериев неработоспособности такой системы является появление в ней изолированных узлов или обособленных подграфов.

Характерный пример – сеть связи, когда узлы связи надёжно защищены от НВ, а воздействию подвергаются каналы связи, путём наведения различного рода помех. Если какой-либо узел (или группа узлов) останется без связи, система лишится критически важного источника информации или функции управления. Фактически, она рассыплется на ряд подсистем, каждая из которых начнёт функционировать автономно; и это событие признаётся нами фактом потери живучести.

Также без нарушения общности, предположим, что дуги из графа многополюсной системы выбиваются по очерёдности, т.е. исключаются из области поражения новых НВ. Тогда наша задача состоит в том, чтобы сформировать вектор избыточности системы $F_N(u)$, а затем применить формулы (9) - (10) для оценки её вероятности выживания при n однократных НВ.

Рассмотрим две многополюсные системы, последовательно на четырёх и пяти узлах (**рис. 4**), в двух конфигурациях – неизбыточной, когда узлы замкнуты в кольцо, и полно-избыточной, когда обеспечивается соединение между узлами по принципу «каждый с каждым».

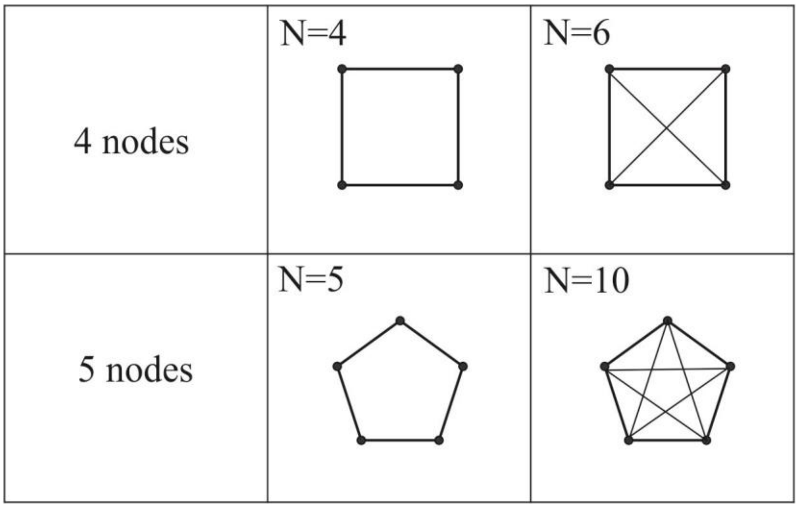

Рис. 4. Различные конфигурации многополюсных систем.

Четырёхполюсник, неизбыточная система (N=4). Легко видеть, что первое НВ при активной стратегии не выводит систему из строя (это же справедливо и для структур с б**о**льшим количеством полюсов). Зато любое второе НВ автоматически переводит систему в неработоспособное состояние. Соответственно, справедливо:

$$R(n) = 1 \text{ при } n \le 1 \text{ и } R(n) = 0 \text{ при } n \ge 2.$$

Соответственно, функция живучести приобретает пороговый вид, и это говорит об отсутствии живучести в принципе, что обусловлено её неизбыточностью.

Четырёхполюсник, полно-избыточная система (N=6). Здесь видно, что система из N=6 связей сохраняет свою работоспособность при двухразовом НВ любой направленности (во всех случаях система сохраняет связность). И даже существует 4 сценария выживания системы при 3-разовом воздействии (из 20 возможных сценариев). Соответственно, результаты оценки функции живучести сведены в табл. 9.

Таблица 9. Функция живучести для полно-избыточной системы на 4 узлах

n	**$F_6(n)$**	**C_6^n**	**$R^*(n) = f(n)$**
0	1	1	1
1	6	6	1
2	15	15	1
3	4	20	0.2
≥ 4	0		0

Здесь уже возникает элемент некоей плавной деградации, но эта плавность, тем не менее, оставляет желать лучшего. Плавность возникнет, когда наряду с основными дугами в графе многополюсной системы, в системе появятся дополнительные резервные дуги (например, каналы, основанные на другом принципе кодирования и приёма-передачи информации). Условно говоря, когда из строя выходит цифровая связь, есть возможность воспользоваться классической радиосвязью.

Пятиполюсник, неизбыточная система (N=5). По аналогии с неизбыточным четырёхполюсником, мы видим, что первое НВ при активной стратегии не выводит систему из строя, а любое второе – выводит. Значит, опять имеем дело с пороговой функцией живучести:

$R(n) = 1$ при $n \leq 1$ и $R(n) = 0$ при $n \geq 2$.

Пятиполюсник, полно-избыточная система (N=10). Система сохраняет свою работоспособность при трёхразовом НВ любой направленности. При n = 4 появляются первые сценарии деградации (оказывается возможным изолировать один из 5 узлов). При n = 7 и выше система однозначно погибает. Соответственно, результаты оценки функции живучести сведены в табл. 10.

Таблица 10. Функция живучести для полно-избыточной системы на 5 узлах

n	**$F_{10}(n)$**	**C_{10}^n**	**$R^*(n) = f(n)$**
0	1	1	1.0
1	10	10	1.0
2	45	45	1.0
3	120	120	1.0
4	205	210	0.976
5	222	252	0.881
6	5	210	0.024
≥ 7	0		0

Здесь мы уже имеем действительно плавную деградацию свойства живучести. И, чем больше N, тем плавнее эта деградация реализуется с ростом n.

Аналогичные результаты можно получить, сделав НВ r-кратным и придать дугам в графе уровень стойкости L (аналог системы резервирования каналов). В этом случае, следует использовать соотношение из **[8]**. Но это не изменит базового принципа: чем выше уровень избыточности, измеряемый по вектору F, тем выше и уровень живучести системы в отношении НВ широкого спектра.

5. *Функциональная живучесть и принципы её анализа*

Качественный скачок от структурной живучести к функциональной совершается за счёт того, что бинарная функция работоспособности в задачах структурной живучести замещается уровнем допустимой потери эффективности. Пусть система характеризуется базовым свойством, по которому оценивается её функционирование (например: в электроэнергетической системе – располагаемая мощность, в системе газоснабжения – пропускная способность газотранспортной системы). Тогда можно зафиксировать уровень ε, в процентном отношении от максимума значения системного эффекта, когда мы говорим, что если эффективность системы по результатам НВ становится ниже ε в процентном отношении, то живучесть системой утрачена.

И тогда **функциональная живучесть** – это способность системы сохранять свой эффект на уровне не хуже ε от максимума в условиях НВ – или быстро восстанавливать требуемый уровень после НВ. Например, в теории гражданской обороны существует принцип технологической брони ε=30%, когда обесточиваются неосновные потребители, а вся энергия пускается только на бытовые нужды населения. И есть ещё уровень аварийной брони ε=10%, когда электроэнергию получает уже не всё население, а только отдельные выделенные значимые центры потребления (больницы, родильные отделения и т.п.). И научная задача оценки и обеспечения функциональной живучести состоит в том, чтобы таким образом распределить СОЖ и располагаемую избыточность, таким образом настроить алгоритмы системной реконфигурации, чтобы минимизировать вероятность потери технологической и аварийной брони в случаях НВ широкого спектра. Подробно ε-критерий рассматривается нами в работах **[9, 13, 15-17].**

Когда НВ является точечным, мы находимся в дискретном пространстве состояний НВ. Такого пространства у нас нет, если мы оцениваем варианты площадного поражения, когда в ходу непрерывный спектр НВ. Аналогичным образом, переходя от структурной живучести к функциональной, мы лишаемся дискретного пространства состояний системы, оно становится непрерывным и несчётным. Вместо логической функции работоспособности мы имеем дело с **алгоритмом** обеспечения живучести при НВ, как своеобразным чёрным ящиком, у которого на входе – модель НВ, а на выходе – результирующий эффект. Если вход представляет собой непрерывный спектр воздействия, то на выходе – непрерывный спектр результирующих состояний.

И первое, что приходит в голову в этом случае – попытаться упростить задачу, заменить непрерывное пространство состояний дискретным. Например, в **[17]** мы оговариваем, что разовое НВ состоит в том, что выхватывает из системы определённый квант располагаемой мощности, и задача большой электроэнергетической системы состоит в том, чтобы своими средствами перераспределить нагрузку и покрыть возникший дефицит. По мере нарастания НВ, система начинает деградировать, её запасы по располагаемой мощности исчерпываются, и однажды мы выходим за уровень технологической брони; и нужно оценить, какова вероятность такого негативного развития событий.

Приступив к решению задачи, мы обнаружили, что в состоянии заместить непрерывное пространство состояний дискретным, фиксируя конкретный уровень ε в анализе. Фактически, ε-критерий подобен фиксированной частоте, на которой мы сканируем систему, выделяя полное множество её работоспособных состояний. Если сделать перебор пространства состояний направленным (например, с помощью метода ветвей и границ), то можно существенно снизить объём операций; при этом NP-полнота задачи никуда не девается.

И тогда можно переписать выражения (9) и (10) следующим образом:

$$R^*(n, \varepsilon) = f(n) = F_N(n, \varepsilon) / C_N^n , \qquad (12)$$

где $F_N(n, \varepsilon)$ – число работоспособных состояний системы из N элементов, подверженной n-разовому точечному НВ, в предположении, что живучесть такой системы описывается ε-критерием. При этом можно запросто перейти от активной стратегии НВ к пассивной, это кардинально не изменит принцип анализа. Главное – оценить уровень функциональной избыточности, который не зависит от применяемой стратегии НВ, так как формируется в пространстве дискретных состояний системы, выделенных алгоритмическим путём. А затем функцию живучести можно оценивать уже с учётом стратегии, на основе сформированного вектора F.

Красивые формулы, воспроизводимые нами для случая равновероятных НВ, полностью рассыпаются, когда дело доходит до предпочтений одних НВ другим. В этом случае, надо откатываться назад, к популярной в своё время модели Горшкова **[18],** назначая аксиологические вероятности воздействия точечных НВ на отдельные элементы по принципу Фишберна **[19], [20, с. 83-84],** строя системы предпочтений одних НВ другим. Применяя формулу Горшкова, мы оцениваем функцию живучести в определённой контрольной точке. Варьируя вероятностями НВ в нешироких пределах, мы оцениваем габариты подмножества оптимальности в многомерном поле вероятностных сценариев, когда наши решения по СОЖ являются наилучшими. Тем самым, мы тестируем наши решения, касающиеся обеспечения живучести, на параметрическую устойчивость **[13]**. Разумеется, в качестве одного из параметров в ходе верификации решения на оптимальность, может выступать и ε-критерий.

Переход от структурной живучести к функциональной сразу выводит нас за границы традиционных подходов к анализу – и позволяет производить оценку не только собственно технической живучести, но и системной устойчивости, в широком спектре классов и предназначения этих систем. Так постепенно мы совершаем продвижение в область задач мобилизационной экономической устойчивости.

6. Связь между технической живучестью и мобилизационной экономической устойчивостью

Экономический объект – это сильносвязная система, предназначенная для генерации комплексного экономического эффекта и охваченная контурами положительных и отрицательных обратных связей **[20]**. В качестве НВ, применительно к таким объектам, выступают разнообразные шоки, воздействующие на систему со стороны окружающей объект внешней среды. Под воздействием НВ, экономический объект начинает деградировать, вплоть до уровня, распознаваемого как негативный, - когда речь идёт о срыве достижения стратегических целей, либо по уровню, либо по срокам достижения. Управляющая надсистема генерирует решения, направленные на выживание экономического объекта и на сохранение им устойчивости в условиях негативного внешнего окружения. Такие решения носят явно выраженный мобилизационный оттенок.

Есть несомненное сходство между технической живучестью и экономической устойчивостью, и это сходство прослеживается в рамках общей теории кибернетических систем, разрабатываемой, начиная с Л. фон Берталанфи и его группы **[21].** Глядя на живучесть и устойчивость с общесистемных позиций, мы снова приходим к идее **витальности** как базового прототипного свойства живучести в общем смысле, которое порождает свои проекции в системах различных типов. По мысли Берталанфи, все живые системы (или системы, претендующие на жизнеспособность) обладают свойством **эквифинальности**, когда система с неизбежностью приходит в своё финальное состояние, различными путями, из различных начальных состояний. Фактически, эквифинальность – это динамическая устойчивость, реализующая в ходе достижения системой своих конечных целей, своего базового предначертания – служить, давать ток, защищать, снабжать. Живучесть наследуется от эквифинальности в той же степени, что и от витальности; система витальна, если она эквифинальна, и наоборот.

Полученный изоморфизм свойств технической живучести и экономической устойчивости открывает простор для обоюдной миграции методов, моделей и подходов из одних типов приложений в другие. Например, мобилизационная устойчивость явно заимствует у функциональной живучести принцип НВ и принцип ε-критерия, в условиях непрерывных пространств НВ и состояний системы. В качестве функции работоспособности или функционального алгоритма в экономической системе выступает система сбалансированных показателей. Наоборот, техническая живучесть может сильно продвинуться, если погрузится в экономический контекст, когда анализ эффективности будет подкреплён расширенным анализом экономической и финансовой состоятельности технических решений в области живучести. Когда окажется, что у технической системы есть управляющая надсистема, а у той – экономический контекст и стратегические цели, которые вводятся в управляющую надсистему рассматриваемой технической системы в качестве базовых критериев её функционирования.

Конечное предначертание техники – служить экономическим и социальным системам, как в штатных условиях, так и в условиях НВ. И во всех случаях, это служение должно развёртываться в оговорённых рамках, с понятными ожиданиями, в согласии с собственными целями надсистем.

Заключение по части 2 работы

Развитие теории технической живучести должно совершаться по следующим основным направлениям:

- осмысление технической живучести как общенаучной дисциплины, преодолевающей отраслевые границы. Такой единый взгляд будет выработан, когда на живучесть начнут смотреть с общесистемных кибернетических позиций, как на проекцию витальности;
- анализ накопленного опыта исследований живучести и устойчивости в западной традиции. Осмысление, насколько западные подходы могут быть применены на российской почве, почему «да» и почему «нет»;
- замещение вероятностных моделей живучести нечётко-сценарными моделями, которые не нуждаются в аксиологических гипотезах, а моделируют экспертный опыт в терминах самих воздействий и реакций, с учётом существенной информационной неопределённости. Логика функционирования систем в этих условиях также может быть «мягкой», оцениваться с применением мягких вычислений и измерений в смысле Заде – Дюбуа - Прада **[22, 23]**;
- переход от функции живучести к риск-функции. Оценивать не выживаемость, а риск недостижения цели;
- более подробное внимание к гуманитарным аспектам живучести, к человеческому фактору в управлении живучестью. Исследовать не только собственно техническую систему, но и её СОЖ;
- простройка смысловой горизонтали между технической живучестью (survivability) и экономической мобилизационной устойчивостью (resilience). Внедрение экономико-финансовых измерителей в задачи технической живучести. Рассмотрение задачи обеспечения живучести под углом зрения инвестиционного проектирования.

Литература

1. Черкесов Г.Н., Недосекин А.О. Оценка живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности. Часть 1. Основы подхода // Надёжность. – 2016. – В печати.
2. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М.: Мир, 1982. – Также на сайте: http://cmcstuff.esyr.org/vmkbotva-r15/5%20%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81/9%20%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D1%81%D1%82%D1%80/%D0%A2%D0%B8%D0%B3%D1%80%D1%8B/NP-Complectness.pdf .
3. Можаева И.А., Нозик А.А., Струков А.В. Современные тенденции структурно-логического анализа надёжности и кибербезопасности АСУТП. – На сайте: http://www.szma.com/mabr2_2015.pdf .
4. Можаева И.А. Методики структурно-логического моделирования сложных систем с сетевой структурой // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. 2015. 19с.
5. Можаев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. – СПб: ВИТУ, 2000. – 145 с.
6. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 55 с. – Также на сайте: http://www.gcherkesov.com/articles/article02.pdf .
7. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб: Питер, 2005. – 480 с.
8. Недосекин А.О. Применение теории случайных размещений к анализу живучести технических систем // Кибернетика АН УССР. - 1991. - №6.
9. Недосекин А.О. Анализ живучести систем энергетики комбинаторно-вероятностными методами // Известия РАН. Энергетика. 1992. N3. С.48 - 58.
10. Недосекин А.О. Анализ живучести автоматизированного комплекса на основе точечной модели // Приборы и системы управления. 1989. N11. С.12-14.
11. Недосекин А.О. Связь отказоустойчивости и живучести в функционально-избыточных технических системах // Проблемы комплексной автоматизации судовых технических систем / Тез. докл. Л., НПО "Аврора", 1989. С.208-209
12. Недосекин А.О. Сопоставительный анализ безотказности и живучести технических систем с сетевой структурой // Повышение качества и надежности промышленных изделий / Тез. докл. Л., ЛДНТП, 1989. С.15 -18.
13. Недосекин А.О. Обеспечение функциональной живучести сетей связи: анализ и принятие решений // Пути совершенствования сетей и комплексов технических средств связи / Тез. докл. Л., НПО "Красная заря", 1989. С.10 - 13.
14. Недосекин А.О. Живучесть как функция избыточности в сетях связи // X-ый симпозиум по проблеме избыточности в информационных системах / Тез. докл. Часть 2. Л., ЛИАП, 1989. С.178 -181.
15. Недосекин А.О. Анализ живучести ЭЭС комбинаторно-вероятностными методами // МВИН БСЭ. Вып. 41. Иркутск, 1991.
16. Недосекин А.О. Анализ живучести газотранспортной системы региона Западной Сибири по фактору электроснабжения // МВИН БСЭ. Вып. 43. Иркутск, СЭИ СО РАН, 1992.
17. Недосекин А.О. Структурный анализ живучести ЭЭС на примере тестовой расчетной схемы // МВИН БСЭ. Вып. 43. Иркутск, СЭИ СО РАН, 1992.
18. Горшков В.В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем //АН УкрССР, Кибернетика, 1982, №1. – С.104-107.
19. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределённости. – М.: Наука, 1981.

20. Абдулаева З.И., Недосекин А.О. Стратегический анализ инновационных рисков. – СПб: СПбГПУ, 2013. – 145 с. – Также на сайте: http://an.ifel.ru/docs/InnR_AN.pdf .
21. Bertalanffy L. von. An Outline of General System Theory. // British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1. 1950. P. 134–165.
22. Zadeh L. From computing with numbers to computing with words — from manipulation of measurements to manipulation of perceptions // International Journal of Applied Math and Computer Science, pp. 307–324, vol. 12, no. 3, 2002.
23. DuBois D., Prade H. Fuzzy sets and systems. Theory and applications. - Academic Press, Inc. Orlando, FL, USA. – 1997. - ISBN 0122227506.