

Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многократных воздействиях высокой точности

Геннадий Н. Черкесов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gennady.cherkesov@gmail.com

Алексей О. Недосекин, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: apostolfoma@gmail.com



Геннадий Н.
Черкесов



Алексей О.
Недосекин

Резюме. Цель. Рассматриваются основные понятия и определения, показатели живучести, методы оценки живучести в различных внешних и внутренних условиях применения технических систем. В том числе, обозреваются наработки в области структурной живучести, полученные 30 лет назад, в рамках советской научной школы. Делается попытка преодолеть различное понимание технической живучести, которое к сегодняшнему моменту сложилось по ряду отраслевых направлений – в судостроении, авиации, сетях связи, в системах энергетики, в оборонном ведомстве. Также рассматривается вопрос об установлении отношений преимущества между свойством технической живучести и свойством глобальной системной устойчивости. Техническая живучесть понимается в двух базовых значениях: а) как свойство системы сопротивляться негативным внешним воздействиям (НВ); б) как свойство системы восстанавливать свою работоспособность после отказа или аварии, вызванных внешними причинами. В работе рассматривается связь между структурной живучестью, когда логика работоспособности системы бинарна и описывается логической функцией работоспособности, и функциональной живучестью, когда работа системы описывается критерием функциональной эффективности. Тогда отказ системы – это падение уровня её эффективности ниже заранее предустановленного значения. **Методы.** Техническая система рассматривается как управляемая кибернетическая система, которой приданы специализированные средства обеспечения живучести (СОЖ). В анализе использованы логико-вероятностные методы и результаты комбинаторной теории случайных размещений. Предполагается: а) НВ являются точечными и однократными (за одно воздействие поражается ровно один элемент); б) каждый элемент системы обладает бинарной логикой (работоспособность – отказ) и нулевой стойкостью, то есть гарантировано поражается за одно воздействие. В последующем, данное допущение обобщается на случай g -кратного НВ и L -стойких элементов. Также в работе рассматриваются варианты неточечных моделей, когда часть системы или система в целом подвергаются групповому поражению специализированного типа. Рассмотрены варианты сочетания свойств надёжности и живучести, когда анализу подвергаются одновременно отказы по внутренним и по внешним причинам. **Результаты.** Воспроизведены различные варианты законов поражения и функций живучести технических систем. Выявлено, что в основе этих распределений лежат простые и обобщённые числа Моргана, а также числа Стирлинга второго рода, которые могут быть восстановлены на основе простейших рекуррентных соотношений. Если допущения математической модели обобщаются на случай n g -кратных НВ и L -стойких элементов, то обобщённые числа Моргана, участвующие в оценке закона поражения, определяются на основе теории случайных размещений, в ходе n -кратного дифференцирования производящего полинома. В этом случае установить рекуррентное соотношение между обобщёнными числами Моргана не представляется возможным. Показано, что при однородных допущениях к модели живучести (равностойкие элементы системы, равновероятные НВ) в ядре соотношений для функции живучести системы, вне зависимости от закона поражения, находится вектор структурной избыточности $F(u)$, где u – число поражённых элементов, $F(u)$ – число работоспособных состояний технической системы при u отказах. **Выводы:** точечные модели живучести являются превосходным инструментом для экспресс-анализа структурно-сложных систем и для получения приближённых оценок функций живучести. Простейшие допущения структурной живучести могут быть обобщены на случай, когда логика работоспособности системы не является бинарной, но обуславливается уровнем эффективности функционирования системы. В этом случае надо говорить о функциональной живучести. Вычислительная трудность PNP задачи оценки живучести не позволяет решать её путём простейшего перебора состояний технической системы и вариантов НВ, необходимо искать пути отхода от полного перебора, в том числе за счёт преобразования функции работоспособности системы и её декомпозиции. Проектирование и внедрение свойства живучести в техническую систему должно проходить с оглядкой на то, как такое свойство обеспечено в биологических и социальных системах.

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

Формат цитирования: Черкесов Г.Н., Недосекин А.О. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многообразных воздействиях высокой точности // Надежность. 2016. №2. С. 3-15. DOI:10.21683/1729-2640-2016-16-2-3-15

1. Введение

Понятие «живучесть» применительно к техническим системам, в частности к кораблю, впервые ввел в рассмотрение русский адмирал и ученый Степан Осипович Макаров. Началом разработки учения о живучести корабля следует считать его статью «Броненосная лодка «Русалка», опубликованную в 1870 г. в «Морском сборнике» (№№ 3, 5, 6), в которой рассматривался ряд мероприятий по обеспечению непотопляемости корабля [1]. В 1875 г. он же в статье «Непотопляемость судов» («Морской сборник», № 6, 1875 г.) сформулировал основной принцип проектирования корабля, обеспечивающий предотвращение сформулированное понятие «непотопляемость» как «способность оставаться на воде, имея подводные пробоины, есть одно из главных боевых качеств каждого судна». В 1876 г. С.О. Макаров публикует статьи «Средства против потопления судов» («Морской сборник» № 1, 1876) и «О содержании в исправности непроницаемых переборок и водоотливных приспособлений» («Морской сборник» № 7, 1876). В 1894 г. С.О. Макаров опубликовал в «Морском сборнике» № 6 работу «Разбор элементов, составляющих боевую силу судов», в которой он уточнил понятие о непотопляемости, определив ее как «способность судна оставаться плавать на воде и не терять своих боевых качеств от подводных пробоин».

В 1897 г. С.О. Макаров публикует свои работы «Рассуждения по вопросам морской тактики» («Морской сборник», №№ 1, 2, 3, 4, 7), в которых он формулирует,

наконец, понятие «живучести» как «способности судна продолжать бой, имея повреждения в различных боевых частях». При этом оговаривая, что недостаток в стойкости к внешним разрушающим воздействиям компенсируется приданием кораблю свойства живучести [14].

Академик А.Н. Крылов дал самое краткое и весьма меткое определение общего смысла термина «живучесть», определив его как «выносливость к повреждениям». Во всех определениях положительным является то, что живучесть рассматривается как свойство корабля в целом, которое достигается структурной организацией и целенаправленным поведением его функциональных комплексов технических средств.

В настоящее время понятие живучести широко используется в ряде отраслей техники, в том числе в транспортных системах (авиации, железнодорожном, автомобильном транспорте), судостроении, энергетике, строительстве, в вычислительных системах и в сетях связи, в отраслях промышленности оборонного назначения [9, 13, 14]. Возобновление системно-научного интереса к технической живучести в 80-х годах прошлого века в СССР было обусловлено развёртыванием широкого фронта работ по закрытой тематике, связанной с обеспечением обороноспособности страны. В «перестроечные времена» все эти работы были свёрнуты, и сейчас мы наблюдаем некий ренессанс в связи с резким обострением международной обстановки. При этом оказывается важным не только поднять работы по технической живучести на прежнюю высоту, но и по-новому взглянуть на «живучесть» как на комплексное

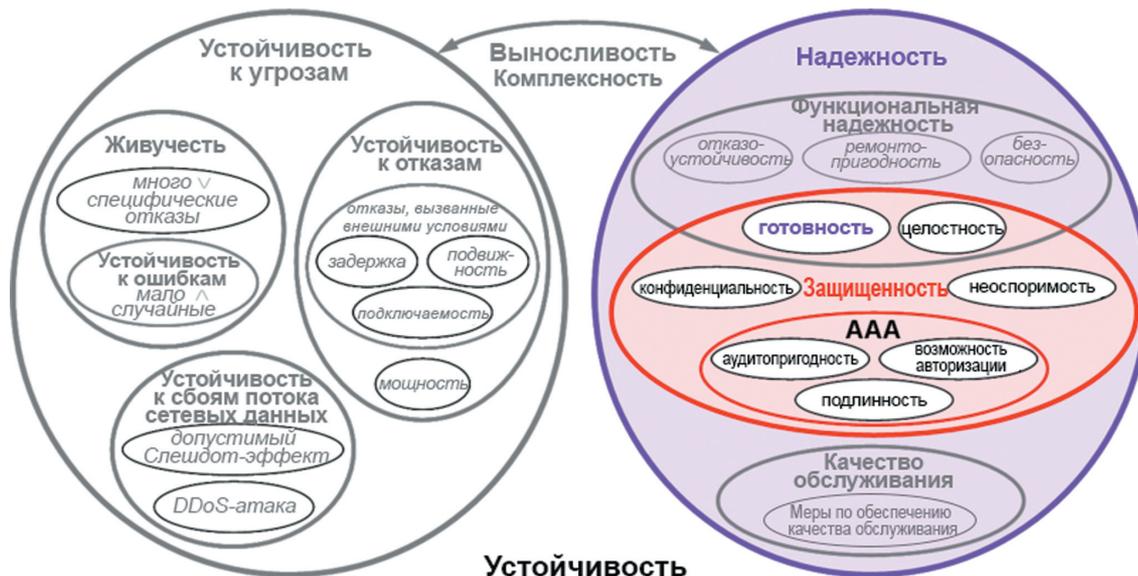


Рис. 1. Классификация устойчивости применительно к компьютерным сетям. Источник: [18]

свойство системы, уяснить для себя, что система в плане живучести наследует от существ, традиционно считающихся живыми. Попытка провести такое сопоставление делается в работе [15], где живучесть в широком смысле названа витальностью, а проекция витальности на социальные, экономические и технические системы названа цивилизационной готовностью, мобилизационной устойчивостью и живучестью соответственно.

Вопросы живучести рассматриваются и в зарубежной литературе. Примерно до 1997 года в обзорах чаще присутствует категория «survivability». Но затем центр внимания смещается в область исследования более общих свойств, нежели живучесть, и речь заходит об устойчивости (**resilience**). Сначала появился доклад президентской комиссии 1997 года по защите наиболее ответственных инфраструктурных систем [16]. А затем сформировался особый спрос государства США на устойчивость в связи с огромным ущербом, нанесённым событием 9/11 и ураганом «Катрина». Стало ясно, что в устойчивость надо вкладывать деньги и весьма существенные. Потому что альтернатива – не инвестировать в устойчивость – обходится кратно дороже. И получается, что инвестиции в устойчивость – это бизнес, обладающей невероятной доходностью (сотни процентов годовых).

Поэтому, например, в [17] говорится так: *«Понятие устойчивости привлекает внимание как знаменатель выйти за рамки живучести и даже преуспевания в вызывающих условиях ... Устойчивость является эмерджентным свойством, связанным со способностью организации продолжать свою миссию, несмотря на разрушения, через бдительность, обеспеченную ресурсами ловкость, эластичные инфраструктуры и восстанавливаемость... Поэтому устойчивость представляет собой сочетание технических конструктивных особенностей, таких, как отказоустойчивость и надёжность, с организационными особенностями, такими, как бдительность, тренинг и децентрализованное принятие решений».*

А в [18] приводится вот такая отраслевая классификация свойства resilience (рисунок 1).

Из приведенной классификации видно, что устойчивость воспринимается как глобальное свойство, которое поглощает свойства надёжности (во всех смыслах), живучести, безопасности, операционного совершенства. Такой взгляд ещё надлежащим образом не осмыслен российской отраслевой наукой, и вряд ли он будет усвоен без критического разбора и естественного сопротивления. Мы не собираемся пока включаться в полемику по этому поводу, но обращаем внимание читателя на следующий парадокс. Очень многие компании и отдельные эксперты исследуют техническую живучесть и учитывают её в проектах. Однако практически отсутствует единая система понятий, показателей живучести, условий функционирования, при которых должна проявляться живучесть и требования к живучести, то есть как раз то, что составляет ядро соответствующей теории. Нет и

единства в осмыслении наиболее эффективных средств обеспечения живучести для различных классов систем и определенных сценариях внешнего воздействия на структуру и алгоритмы функционирования. Для полноты картины состояния разработок в области живучести следует упомянуть о полном отсутствии государственных стандартов, отражающих вопросы терминологии, показателей живучести, классификации, методов обеспечения и рекомендации по порядку проектирования систем по критериям живучести.

Нам следует также держать в уме, что вопросы технической живучести нужно рассматривать не локально, а в контексте более общего спроса на мобилизационную устойчивость государства и страны в целом [15, 19, 21, 22]. В условиях сжатия инвестиционных возможностей государства оборонные бюджеты будут подвергаться секвестированию, и в проекты будут закладываться только те специфические свойства, которые будут обладать свойством экономической эффективности в широком смысле. В плане технической живучести (равно как и надёжности) – право на жизнь будут иметь только те проектные реализации, которые доказали оптимальную пропорцию между силой обеспечиваемого свойства и затратами на реализацию этого свойства, причём найден оптимум по критерию отдачи на инвестированный капитал. Т.е. нужно со временем научиться не только оценивать свойство живучести, но и подключать к этой оценке экономические и финансовые измерители. Тридцать лет назад об этом можно было не задумываться (оборонных денег не считали); но сейчас совсем другая эпоха.

В данной статье излагаются актуальные вопросы проектирования систем по критериям технической живучести, которые могут рассматриваться как возможные направления развития теории живучести как общетехнической дисциплины. Основная наработка в этой части была сделана ещё 30 лет назад, и здесь она воспроизводится. Однако есть и ряд новых обстоятельств, которые могут повлиять на новое раскрытие темы живучести, повлиять на характер развития соответствующей научной дисциплины, и об этом мы тоже говорим в настоящей работе.

2. Основные понятия и их определения

Существует несколько отраслевых определений и общетехническое определение понятия живучесть. В ГОСТ 19176–80 [1] живучесть системы управления техническими средствами корабля определена как составляющая комплексного свойства качества функционирования системы управления, которая проявляется при частичных повреждениях аппаратуры и линий связи. Живучесть **заключается** в сохранении работоспособности корабельного оборудования, непосредственно не подвергнувшегося аварийным воздействиям внешней среды, в безаварийности комплекса технических

средств при нарушениях в работе системы управления. В [3, с.194] живучесть судна определена как способность противостоять стихийным силам ветра и волн, пожаров, оружию противника, а при повреждениях сохранять и восстанавливать полностью или частично мореходность и боевые качества. Живучесть судна обеспечивается рациональностью конструкции и оборудования судна, в том числе расположением непроницаемых перегородок, люков, горловин, дверей, иллюминаторов, системами сигнализации, автоматическими защитными устройствами. Отметим, что в данном определении указаны **условия**, когда проявляется живучесть (стихийные силы ветра и волн, пожары, оружие), **стадии** развития процесса и **степень тяжести** неблагоприятных воздействий (противостоять возникновению повреждений, при повреждениях сохранять мореходность и боевые качества, а при их потере восстанавливать их полностью или частично). Указаны и способы обеспечения живучести (ограничение неблагоприятных последствий, рациональная конструкция, непроницаемые перегородки, оповещение и управление: системы сигнализации, защитные устройства). Такая развитая структура определения может быть повторена и для других отраслей техники.

В электроэнергетике [4] под живучестью понимается свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей. Здесь следует обратить внимание на требование к системе, заключающееся в том, что она должна противостоять переводу ее частей в нерабочее состояние вследствие технологически связанных отказов, вызванных нарушением внешних условий функционирования. В [6] приводится такой пример нарушения условий функционирования при отказе элементов системы. При выведении в ремонт одной из двух линий электропередач 220 кВ произошло отключение энергоблока конденсационной электростанции из-за повреждения котла. Другая линия электропередачи перегрузилась, в результате перегорел провод в некачественно выполненном контактном соединении. После отключения и этой линии электропередачи под действием релейной защиты, сработала автоматика ликвидации асинхронного режима и отключила линии электропередачи 110 кВ. Затем из-за снижения частоты сработали автоматы частотной разгрузки и устройства отделения агрегатов ТЭЦ и т.д. В результате был нарушен нормальный режим питания целого района в течение 15 ч. Эффект «домино» в системе вызван последовательным нарушением условий функционирования, приводящим к отключению питания потребителей.

В вычислительных системах [2] с живучестью связывается отсутствие потерь любой задачи (функции) при потере определенного ресурса под влиянием внешних неблагоприятных воздействий.

Попытка дать общетехническое определение живучести сделана в работе [9]. В ней живучесть определяется как свойство системы сохранять и восстанавливать спо-

собность к выполнению основных функций в заданном объеме в течение заданной наработки при изменении структуры системы и (или) алгоритмов и условий ее функционирования вследствие непредусмотренных регламентом нормальной работы внешних неблагоприятных воздействий (НВ). Основные функции и заданная наработка могут определяться как для одного, так и для нескольких, различных по тяжести НВ. Данное определение допускает **учет различных последствий НВ**, влияющих на выполнение задания, в том числе:

- потерю работоспособности элементов и связей между ними вследствие их физического разрушения или нарушения целостности;
- изменение (ухудшение) их технических характеристик (скорости, производительности, пропускной способности и пр.);
- искажение алгоритмов функционирования;
- уменьшение структурной избыточности, уровня запасов продукции;
- ухудшение безотказности элементов, управляемости системы;
- изменение внешних условий функционирования (резкое уменьшение или увеличение нагрузки, перераспределения нагрузки, изменение динамических характеристик нагрузки).

Возможны и более тяжелые последствия НВ: неустраиваемая потеря работоспособности, авария с возможным частичным или полным разрушением системы

3. Эволюция состояний системы после неблагоприятных воздействий

В результате НВ возникают первичные последствия, выражающиеся в нарушении работоспособности элементов или функциональных связей, в искажении алгоритмов функционирования [9].

Система, обладающая свойством живучести, проявляет его в свойстве постепенной **деградации**, возникающей благодаря введению как пассивных, так и активных средств обеспечения живучести (СОЖ). Информация о первичных последствиях поступает к СОЖ, включающим в себя средства контроля работоспособности, средства аварийной защиты, средства реконфигурации и управления. Действие СОЖ оказывает влияние на развитие первичных последствий. В зависимости от интенсивности процессов, конкретных внешних условий, эффективности СОЖ. Система, в конечном счете, переходит в одно из возможных устойчивых состояний. По своей природе этот переходный процесс является стохастическим.

В приведенном в разделе 2 примере после прохождения нескольких промежуточных состояний система перешла в устойчивое состояние, в котором оказались отключенными энергоблоки конденсационной электростанции и были отделены агрегаты ТЭЦ. После перехода в новое состояние выполняется оценка первичных последствий, в результате которой состояние системы

относят к одному из трех классов: работоспособное, неработоспособное (или неаварийное), аварийное. По результатам этой классификации проводится оценка живучести по состоянию системы. При работоспособном состоянии система возвращается к выполнению задания немедленно. Если состояние неработоспособное, то система может вернуться к выполнению задания после некоторых процедур восстановления. Перевод системы в новое устойчивое состояние не завершает борьбы за живучесть, так как при дальнейшем функционировании до выполнения задания могут проявляться вторичные последствия НВ.

Вторичные последствия – более отдаленные, но не менее опасные, чем первичные. Они связаны с управляемыми или плохо управляемыми тепловыми, электрическими и другими процессами (развитие пожара, охлаждение помещений в системе теплоснабжения и пр.). Скорость развития вторичных последствий и конечный результат также существенно зависят от работы СОЖ в борьбе за живучесть. По истечении некоторого установленного времени проводится оценка результатов выполнения задания с четырьмя возможными исходами. Таким образом, в процессе борьбы за живучесть можно выделить три этапа. На первом этапе идет борьба за предотвращение аварии, на втором – борьба за сохранение работоспособности системы, на третьем этапе – борьба за успешное выполнение задания, несмотря на первичные и вторичные последствия НВ. Соответственно этому выделяют и две задачи оценки и обеспечения живучести.

В общую схему (рисунок 2) укладываются траектории эволюции состояний системы при различных по интенсивности и тяжести последствий неблагоприятных воздействиях, однако, лишь в тех случаях, когда воздействие однократное. Схема существенно усложняется, когда воздействия – многократные, а процессы развития последствий различных НВ накладываются друг на друга. Вместе с тем, во всех возможных схемах

существенную роль играет «эффект гонок»: процессы развития последствий НВ и процессы борьбы за живучесть протекают во времени. И поэтому тяжесть последствий НВ, состояния системы и, в конечном счете, ее судьба во многом определяются возможностями СОЖ, их оперативностью и эффективностью. Наличие у СОЖ некоторого запаса по производительности создает благоприятные условия для своевременного принятия решения, позволяющего ограничить вторичные последствия НВ и сохранить работоспособность системы хотя бы с несколько худшими техническими характеристиками. В связи с этим важно подчеркнуть следующее: борьба за живучесть происходит часто в условиях острого дефицита времени. И поэтому модели живучести должны быть динамическими. Эффект гонок можно не учитывать и использовать статические модели в двух крайних случаях, когда скорости протекания составляющих процессов существенно различны.

В первом случае СОЖ успевает отработать свои алгоритмы и сделать необходимые отключения, включения и переключения еще до того, как начнут возникать технологически связанные отказы. **Во втором случае** СОЖ не успевает вмешаться в быстропротекающие процессы развития первичных последствий НВ, и переход в новое устойчивое состояние происходит без участия СОЖ. И лишь позже средства борьбы за живучесть окажут влияние на вторичные последствия НВ и процессы восстановления. В обоих случаях уменьшается и роль стохастических факторов, так как конечное состояние системы можно уверенно установить по характеристикам системы и НВ.

4. Факторы и сценарии, учитываемые в моделях живучести

Все факторы, определяющие живучесть систем, можно разбить на три группы по функциональному признаку: 1) факторы, характеризующие неблагоприятные

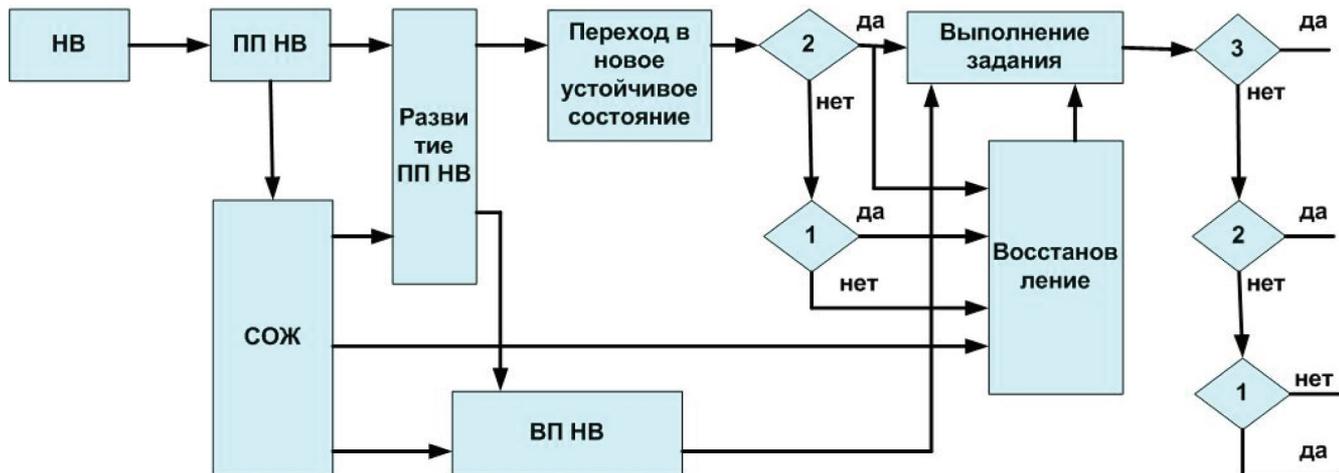


Рис. 2. Эволюция состояний системы после НВ
(ПП – первичные последствия, ВП – вторичные последствия, СОЖ – средства обеспечения живучести, 1 – авария; 2 – работоспособно; 3 – выполнение задания)

воздействия; 2) **факторы**, характеризующие систему и отдельные ее элементы с точки зрения живучести; 3) факторы, характеризующие **внешние средства** обеспечения живучести.

В первую группу входят область действия НВ (точка, замкнутая фигура на плоскости, в пространстве), количество **поражающих** факторов и их характеристики, продолжительность действия НВ (**импульсные** и **конечной** продолжительностью), интенсивность НВ, стратегия применения многократных НВ, внутренние и внешние источники НВ, которые требуют создания средств борьбы за живучесть.

Вторую группу образуют:

1) факторы, характеризующие систему и отдельные ее элементы с точки зрения живучести (стойкость элементов, топология системы и ее элементов, устойчивость к развитию последствий НВ определенного типа, скорость протекания процессов, вызванных НВ; безотказность элементов);

2) факторы, характеризующие **внутренние СОЖ** (своевременное оповещение об опасности появления НВ; противоаварийная защита; резервирование; факторы локализации и устранения вторичных последствий НВ; факторы восстановления технических характеристик, определяющих живучесть: огнестойкость, прочность и пр.);

В третью группу входят факторы, характеризующие **внешние средства** обеспечения живучести и выполняющие функции спасательных служб и мобильного централизованного резервирования, используемого на время выполнения восстановительных работ.

Из комбинации допущений о действующих факторах возникают сценарии воздействия на систему и борьбы за живучесть. Например, может рассматриваться сценарий многократного неблагоприятного воздействия импульсного типа с одним поражающим фактором высокой интенсивности (с гарантией поражения) и высокой точности при наличии в системе структуры определенного класса при отсутствии СОЖ. В альтернативных сценариях могут рассматриваться ненулевые стойкости элементов; неординарные потоки НВ, допускающие поражение сразу нескольких элементов; развитие воздействия во времени, позволяющее использовать противодействие и анализировать эффект гонок; наличие резерва времени, достаточного для вероятного восстановления работоспособности с помощью внешних СОЖ и последующего выполнения заданных работ и др.

Сценарии существенно усложняются, если рассматривать многосерийные НВ со стратегией не только защиты системы от НВ, но и влияния на количество и интенсивность воздействий в режиме антагонистической, деловой игры и эффективного противодействия партнеру по игре.

Понятие модели живучести – более узкое и конкретное, чем понятие сценария борьбы за живучесть. И каждому сценарию можно сопоставить, вообще говоря, множество моделей. Модель живучести не только пред-

полагает количественную оценку, но и имеет расчет и последующее сравнение с требованиями в качестве одной из главных целей разработки как при проектировании, так и при эксплуатации ответственных систем. Для расчета, сравнения и анализа необходимы показатели живучести.

5. Показатели живучести

Предложения по показателям живучести в технической литературе впервые появились в 70-80-х годах прошлого столетия [2-7] и в наиболее развернутой форме в работе [9]. С целью систематизации их полезно классифицировать по двум признакам. **По первому признаку** показатели разделяются на две группы: показатели, используемые для оценки живучести по состоянию системы и по результатам выполнения задания. Показатели первой группы оценивают свойство системы сохранять работоспособность после НВ. Показатели второй группы оценивают способность не только противостоять НВ, но и в дальнейшем, несмотря на НВ, успешно выполнить установленное задание. **По второму признаку** показатели подразделяются на аддитивные и минимаксные. Они отличаются друг от друга по способу сведения векторного показателя к скалярному. К числу аддитивных относят и вероятностные показатели, основанные на формуле полной вероятности.

5.1. Показатели живучести по состоянию системы

Обозначим через A_n событие, состоящее в n -разовом появлении НВ, а через F – логическую функцию работоспособности системы, принимающую значение 1, если система работоспособна, и 0, если неработоспособна. Тогда условный закон уязвимости

$$Q(n) = P\{F = 0 \mid A_n\} \quad (1)$$

есть вероятность потери работоспособности системы при условии n -разовом НВ.

Выживаемость системы при n -разовом НВ

$$R(n) = P\{F = 1 \mid A_n\}. \quad (2)$$

Запас живучести (d -живучесть)

$$d = C - 1 \quad (3)$$

есть критическое число дефектов C , уменьшенное на единицу. Дефект – это единица измерения ущерба, нанесенного системе неблагоприятным воздействием. Это может быть один элемент, удаленный из системы в результате НВ, определенная номинальная мощность в системе энергетики, потерянная для потребителей в результате НВ и т.д. Критическим называют минимальное число дефектов, появление которых приводит к потере работоспособности.

Максимальный запас живучести (m -живучесть)

$$m = \max_{(i)} (m_i) \quad (4)$$

есть максимальное число дефектов, которое еще может выдержать система без потери работоспособности.

Среднее число неблагоприятных воздействий, приводящих к потере работоспособности

$$\bar{\omega} = \sum_{n=0}^{\infty} R(n) \quad (5)$$

есть математическое ожидание числа НВ, задаваемого распределением (1).

Средний запас живучести

$$\bar{d} = \bar{\omega} - 1. \quad (6)$$

Эта величина не отрицательна, так как $\bar{\omega} \geq 1$. Это следует из (5), поскольку $R(0) = 1$. Показатели (1), (2), (5) и (6) являются вероятностными, (3) и (4) – детерминированными.

К детерминированным показателям относится и показатель K_S^A – минимальное количество пораженных элементов с суммарным ущербом для системы не менее A , предложенный в [6]. Пусть некоторая система состоит из n_s объектов, S – номер варианта системы. При однократном неблагоприятном воздействии на i -й элемент возникает ущерб величины C_i^S . Элементы располагаются в порядке убывания ущерба $C_1^S > C_2^S > \dots > C_{n_s}^S$. Установим пороговое допустимое значение ущерба A и предположим, что при многократном НВ воздействию подвергаются различные элементы, и в первую очередь элементы с наибольшим ущербом. Причем ущерб для системы в целом получается сложением ущербов отдельных элементов. Тогда K_S^A определяется по формуле

$$K_S^A = \min_{(C_S > A)} K_S, C_S = \sum_{i=0}^{K_S} C_i^S. \quad (7)$$

Здесь K_S – количество дефектных или потерянных элементов в результате НВ в структуре S .

Также можно существенно усилить модельное представление о живучести, вводя в модель НВ и его последствий следующие дополнительные характеристики:

r – **кратность** НВ – количество одновременно поражаемых элементов или узлов за одно НВ. В этом случае по результату одного НВ в системе наблюдается одновременно r дефектов. Такой подход характерен для территориально-распределённых систем, в которых разовое НВ вызывает множественные последствия (например, стихийное бедствие или военный удар);

L – **стойкость** элемента структуры к поражающему воздействию. Это целое число НВ, которое выдерживает элемент без потери работоспособности. В более общем случае, следует замещать детерминированный L -критерий стойкости функцией стойкости, которая может иметь вероятностную или нечётко-множественную

природу. Мы говорим о стойкости, когда живучесть элемента системы обеспечивается внешними СОЖ, например за счёт мероприятий оборонного характера (ПВО, подземные фортификационные сооружения и т.д.). Для рассматриваемых здесь моделей $L = 0$.

5.2. Показатели живучести по результатам выполнения задания

Пусть теперь система, имеющая базовую структуру S_0 , выполняет некоторое задание в течение времени t . В результате НВ в системе может возникнуть новая структура S_p , одна из множества работоспособных структур $S^p = \{S_p, i=1, \dots, N_p\}$ или неработоспособных структур $S^{np} = \{S_i, i = N_p+1, \dots, N\}$. После n -разового НВ система с новой структурой должна приступить к выполнению установленного задания и выполнить его за время t . Оценка живучести по результатам выполнения задания проводится с помощью следующих показателей.

Условная функция живучести

$$G_i(t) = G(t | S_i) = P(t | S_i) / P(t | S_0) \quad (8)$$

есть отношение вероятностей выполнения задания системой для двух случаев: для базовой S_0 и новой S_i структур. При этом не исключается, что для новой структуры S_i задание будет сформулировано иначе, чем для S_0 . Однако при этом должно выполняться условие $G_i(t) < 1$. При наличии восстановления могут рассматриваться и неработоспособные структуры ($i > N_p$), так как и для них может быть $P(t/S_i) > 0$. В отсутствие восстановления $P(t/S_i) = 0$ при $i > N_p$.

Функция выживаемости системы при n -разовом воздействии (событие A_n):

$$G(t, n) = G(t | A_n) = \sum_{k=1}^N P_n(k) G_k(t) \quad (9)$$

есть усредненная по всем возможным структурам функция живучести; $P_n(k)$ – вероятность возникновения структуры S_k после n -разового НВ.

Безусловная функция живучести

$$G(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) G(t | A_n) = \sum_{k=1}^N P(S_k) G_k(t) \quad (10)$$

есть усредненная по всем возможным событиям A_n функция выживаемости системы. Вероятность $P(S_k)$ определяется по формуле

$$P(S_k) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) P_n(k). \quad (11)$$

Показатели (9) и (10) относятся к классу аддитивных и обеспечивают свертку векторного показателя $\{G_k(t), k = 1, \dots, N\}$ в скалярный. При отсутствии уверенной информации о вероятностях $P_n(k)$ и $P(S_k)$ они могут заменяться на весовые коэффициенты α_k и β_k , назначаемые экспертно. Если же и это сделать затруд-

нительно, то необходимо переходить к минимаксным показателям.

Последовательность $G(t, n)$ является убывающей функцией n и изменяется от 1 при $n = 0$ до 0 при $n \rightarrow \infty$. Поэтому среднее число НВ, приводящее к невыполнению задания, определяется по формуле

$$\bar{\omega}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n(G_i(t, n-1) - G(t, n)) = \sum_{n=0}^{\infty} G(t, n). \quad (12)$$

При $t = 0$ или $\lambda_i = 0$ (элементы идеально надежны) формулы (9) и (12) переходят соответственно в (2) и (5). В самом деле, при $t = 0$ функция $G_k(0) = 1$ для $k \leq N_p$ и $G_k(0) = 0$ для $k > N_p$. Из (9) имеем функцию выживаемости при нулевой длительности задания:

$$G(0 | A_n) = \sum_{k=1}^{N_n} P_n(k) = R(n), \quad (13)$$

а из (10) получим безусловную функцию живучести при нулевой длительности задания

$$G(0) = R = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)R(n).$$

Показатели (8) – (13) можно обобщить и на случай ветвящихся и многополюсных структур. Для этого в (8) вероятность выполнения задания надо заменить на некоторый показатель качества $E(S)$. Так, для системы с ветвящейся структурой функционирования в интервале времени t может быть выражено функционалом

$$E(t, S) = \varphi(P(t/S)), \quad (14)$$

где $P(t/S) = \{P_m(t/S), m=0, \dots, M\}$ – распределение числа неработоспособных ветвей в момент времени t при условии, что в начальный момент система имела структуру S . Тогда условная функция живучести определяется формулой

$$G_i(t) = G(t/S_i) = E(t, S_i) / E(t, S_0). \quad (15)$$

При $M = 1$ получим $E(t/S) = P(t/S)$, и формула (15) переходит в (8). Другие показатели находим по формулам (9) – (12).

6. Модели живучести

Модель живучести сложной системы представляет собой на самом деле совокупность весьма большого числа частных моделей различного назначения, использующих для описания процессов как детерминированные, так и вероятностные методы (рисунок 3).

Модель НВ. По области действия можно различать точечные и пространственные модели. В точечных моделях предполагается, что НВ точно поражает один или несколько элементов. В последнем случае область действия НВ – группа точек, в которых расположены элементы системы. Поэтому число элементов в системе всегда больше, чем число точек в области действия НВ. Для каждого элемента или группы элементов

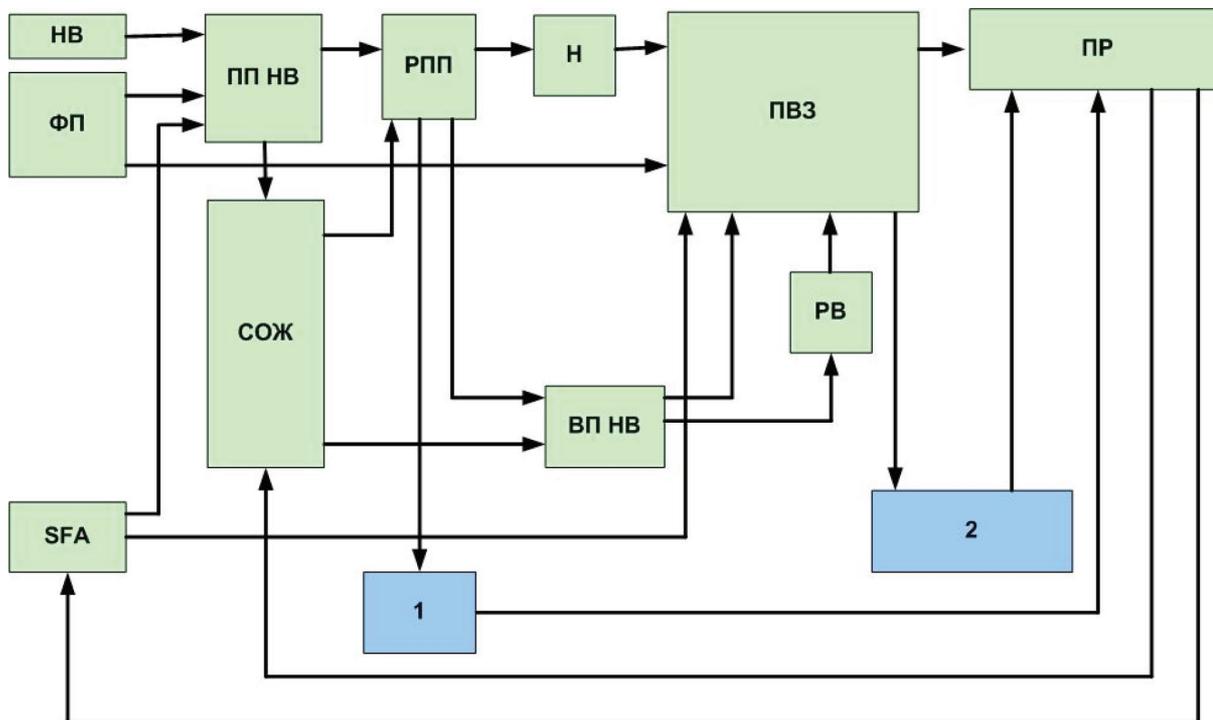


Рис. 3. Структурная схема модели живучести

(1 – оценка живучести по состоянию системы, 2 – оценка живучести по результатам выполнения задания); ФП – физические процессы, РПП – развитие первичных последствий, Н – надежность, ПВЗ – процесс выполнения задания, ПР – принятие решения, ВПНВ – вторичные последствия НВ, ПВ – развитие вторичных последствий, СФА – структура, функция, алгоритм)

задается вероятность попадания в область действия НВ. При одноточечной области задают распределение $\{\alpha_i, i = 1, \dots, N\}$, где N – число элементов системы, α_i – вероятность того, что i -й элемент попадет в область действия НВ. Одним из возможных распределений является равномерное распределение $\alpha_i = 1/N$. Для многоточечной области задается распределение $\{\beta_i = P(X = i), i = 1, \dots, N\}$, где β_i – вероятность того, что в область действия попадает ровно i элементов. В моделях можно использовать, например, усеченное биномиальное распределение

$$\beta_i = C_N^i p^i (1-p)^{N-i} / (1-p^N), i = 1 \dots N \quad (16)$$

или усеченное пуассоновское распределение

$$\beta_i = \frac{a^i}{i!} / \sum_{k=1}^N \frac{a^k}{k!}, i = 1 \dots N; a = -\ln(Np).$$

В пространственных моделях задается двухмерное распределение декартовых координат эпицентра НВ $p_2(x_0, y_0)$ и распределение радиуса круга $p_0(r_0)$, в котором действует НВ.

По типу закону распределения интенсивности НВ можно различать НВ с бесконечной интенсивностью, с постоянной интенсивностью I по всей площади области действия и с убывающей от эпицентра по определенному закону $I(r, \varphi)$ интенсивностью, в частности, по закону Релея:

$$I(r, \varphi) = I_0 \exp(-r^2 / ar_0^2), \quad (17)$$

где I_0 – максимальная интенсивность в эпицентре, r_0 – радиус круга – области действия НВ, a – постоянный параметр, r и φ – полярные координаты точки при расположении начала координат в эпицентре.

По продолжительности действия можно различать импульсные НВ (нулевая длительность), с постоянной τ и случайной длительностью T , задаваемой распределением $F_T(t) = P(T < t)$. При постоянной длительности амплитуда возмущений I_0 может задаваться как функция времени, например, с помощью формул:

$$I_0(t) = I_0^0(1 - t/\tau); I_0(t) = I_0^0 \exp(-t^2 / b\tau^2). \quad (18)$$

где $b = 0,3 \div 0,5$ – параметр. Аналогичные зависимости задаются и при случайной длительности, только тогда в (18) τ заменяется на случайную величину T .

При многократном НВ наиболее простыми стратегиями выбора характеристик очередного НВ являются стратегия независимых НВ (стратегия 1) и стратегия с исключением пораженных элементов из области действия очередного НВ (стратегия 2). По совокупности отмеченных характеристик можно создать различные модели. Некоторые из них приведены в таблице 2.

Модель системы. SFA-модель [10] дает описание технической и функционально-алгоритмической структуры системы, в том числе моделей функционирования и характеристик элементов, топологии системы, маршрутов информационных, материальных и энергетических потоков, функциональной и структурной иерархии, дерева целей функционирования.

Рассмотрим более подробно четыре характеристики модели: размеры элементов, их надежность, стойкость и топологию системы. По своим размерам элементы могут быть точечными, линейными, плоскими с границей в виде произвольного контура, объемные с границей в виде односвязной поверхности. По уровню надежности элементов целесообразно различать модели с идеально надежными элементами и модели с ограниченной надежностью элементов. Первый случай является идеализацией, используемой при оценке живучести по состоянию системы. По уровню стойкости можно различать элементы с нулевой и ненулевой стойкостью. Первый случай является идеализацией, предназначенной для того, чтобы в модели живучести считать неработоспособными все элементы, попавшие в область действия НВ. Во втором случае вероятность нарушения работоспособности зависит от интенсивности НВ и размера той Части площади (или объема) элемента, которая попала в область действия НВ.

По топологии системы будем различать модели с произвольной и заданной топологией. Модель первого типа можно использовать при точечных элементах и точечных

Таблица 2

Факторы	Модель Н В						
	1	2	3	4	5	6	7
Область действия	точка	точка	группа точек	группа точек	площадь	площадь	площадь
Интенсивность	∞	∞	∞	∞	∞	I_0	I_0
Продолжительность действия	0	0	0	0	0	τ	τ
Стратегия	1	2	1	2	1	1	2

Таблица 3

Факторы	Модель системы				
	1	2	3	4	5
Тип элемента	Точка	Точка	Точка	Точка	Площадь
Стойкость	0	0	0	0	0
Топология системы i	произвол.	произвол.	задан.	задан.	задан.

НВ. При пространственных НВ и плоских или объемных элементах используется модель второго типа.

Варианты сочетаний трех характеристик приводят к моделям системы, представленным в таблице 3.

Модель физических процессов (ФП). Эта модель используется для анализа переходных процессов в системе после НВ. Она дает описание траектории процесса функционирования, получаемой вследствие собственного движения.

Модель первичных последствий (ПП). НВ получается путем взаимодействия модели ФП с моделью НВ. В модель ФП вводят возмущения, связанные с НВ, и рассматриваются детерминированные переходные процессы, возникшие под влиянием собственных движений и вынужденных движений, вызванных возмущениями, но без учета управляющих воздействий со стороны СОЖ.

Модель СОЖ отражает характеристики средств контроля, аварийной защиты, реконфигурации и управления. Алгоритмы принятия решений о борьбе за живучесть, входящие в эту модель, формируют управляющие воздействия, направленные на изменение структуры и параметров системы и на использование внутренних резервов, созданных для работы в экстремальных ситуациях. В данной модели должны быть учтены характеристики и внешних СОЖ.

Модель развития первичных последствий (РПП) НВ получается в результате сочетания модели ПП и модели СОЖ и позволяет найти траекторию управляемого переходного процесса с учетом действий СОЖ. Конечной целью анализа модели РПП является определение нового устойчивого состояния системы. Поскольку некоторые характеристики СОЖ являются вероятностными, результаты анализа модели РПП также могут быть представлены в вероятностной форме.

Модель надежности (Н) содержит информацию о безотказности и ремонтпригодности элементов, системе технического обслуживания, о реакции системы на отдельные отказы элементов, о влиянии различных поражающих факторов НВ на безотказность элементов. Эта модель применяется при оценке живучести по результатам выполнения задания.

Модель вторичных последствий (ВП) НВ отражает те отдаленные последствия НВ, которые могут возникать в системе вследствие сокращения объема выполняемых функций и ухудшения технических характеристик. К числу вторичных последствий можно отнести увеличение времени выполнения функций, скорости старения и износа элементов, дополнительное размножение ошибок в информационных системах, повышенный расход энергии и материалов для выполнения тех же функций и другие последствия, приводящие к сокращению оставшихся после НВ резервов в системе и дальнейшему ухудшению технических характеристик.

Модель восстановления (В) содержит описание аварийных ресурсов, правил и способов их использования в экстремальных ситуациях с целью восстановления технической и функционально-алгоритмической струк-

туры той части системы, которая занята в выполнении установленного задания. Ее можно трактовать как модель развития системы после окончания НВ.

Модель процессов выполнения задания (ПВЗ) получается в результате объединения пяти моделей (*SFA*, ФП, Н, В, ВП). Анализ этой модели позволяет оценить живучесть по результатам выполнения задания.

При разработке системы в помощь проектировщику полезно дать также модель принятия решения (ПР) о способах повышения живучести, если оценки показывают ее неудовлетворительный уровень. Модель позволяет выработать советы проектировщикам по изменению структуры и параметров системы, а также по дополнительному развитию СОЖ.

7. Методики расчета и анализа живучести

При описании элементов полагаем, что каждый элемент может находиться в одном из трех состояний: e_0 – элемент работоспособен и включен в работу; e_1 – элемент работоспособен и отключен от системы по различным причинам; e_2 – элемент неработоспособен. Переходы из состояния в состояние определяются четырьмя группами факторов: естественными отказами элементов, восстановлением работоспособности, переключениями при срабатывании средств аварийной защиты и реконфигурации, действиями внешних возмущений. Связи между элементами определены и стационарны во времени, так что в любой момент времени состояние элемента можно установить по состоянию работоспособности этого элемента и состоянию других элементов. Признаки работоспособности системы неизменны во времени и позволяют однозначно определить состояние системы по совокупности состояний ее элементов.

Для расчета показателей живучести можно применять одну из следующих методик: методику 1 на основе логико-вероятностного метода или методику 2 на основе результатов теории случайных размещений, в том числе с использованием чисел **Моргана и Стирлинга**.

7.1. Методика расчета на основе логико-вероятностного метода

Рассмотрим основные этапы **методики анализа живучести системы на основе логико-вероятностной модели**.

Этап I. Описание состояний элементов. Для каждого элемента вводятся две логические переменные: x_i – индикатор работоспособности i -го элемента ($x_i = 1$, если он работоспособен, и $x_i = 0$ в противоположном случае), y_i – индикатор состояния работоспособного элемента ($y_i = 1$, если элемент работает, $y_i = 0$ в противоположном случае). Для отражения воздействия возмущений на элементы вводятся также индикаторы z_{ij} ($z_{ij} = 1$, если возмущение j -го типа действует на i -й элемент, $z_{ij} = 0$ в противоположном случае) и z_i – логическая сумма по

всем типам возмущений. Затем вводятся индикаторы трех состояний элемента:

$$\begin{aligned} u_{i0} = 1[e_0] = x_i y_i z_i; \quad u_{i1} = 1[e_1] = \overline{x_i y_i z_i}; \\ u_{i2} = 1[e_2] = \overline{x_i} \vee x_i z_i. \end{aligned} \quad (19)$$

Этап 2. Составление логических зависимостей. На основе предварительного анализа динамических моделей физических процессов с учетом действий средств аварийной защиты, реконфигураций и управления составляются логические уравнения относительно неизвестных состояний работоспособных элементов:

$$y_i = f_{yi}(x_k, y_j, z_k, k = 1, \dots, N; j \in M_i), i = 1, \dots, N, \quad (20)$$

где N – число элементов в системе, M_i – множество элементов, смежных с i -м элементом. Совокупность выражений типа (20) образует замкнутую систему логических уравнений, представляемую в векторной форме в виде

$$Y = f_Y(X, Y, Z) \quad (21)$$

Достоинством этой записи является то, что при описании состояния работоспособного элемента используется лишь непосредственное его окружение, и нет необходимости рассматривать всю систему. В дальнейшем из этих частных и достаточно простых зависимостей удастся найти с помощью математических методов явную зависимость состояния работоспособного элемента от работоспособности остальных элементов и характеристик НВ.

Работоспособность системы определяется работоспособностью ее элементов и зависимостями (21). Для многих систем основным является состояние сравнительно небольшой группы выходных элементов. Однако из-за наличия опосредованных связей, отраженных в (21), работоспособность системы определяется состоянием и всех других элементов. Для однофункциональной системы логическая функция работоспособности (ЛФРС) записывается в виде

$$F = f(X, Y, Z) \quad (22)$$

В многофункциональной системе зависимость вида (22) составляется для каждой функции отдельно. Если требуется одновременное выполнение всех функций, то

$$F = \&_{(i)} f_i(x, y, z). \quad (23)$$

где f_i – логическая функция – индикатор выполнения i -й функции системы. Излагаемый здесь метод описания состояний системы не требует комбинаторного перебора всех состояний элементов, а функции f_i находятся формально из систем логических уравнений.

Этап 3. Решение систем логических уравнений. Система уравнений (21) является линейной и может быть приведена к виду:

$$y_i = a_i \vee a_{i1} y_1 \vee a_{i2} y_2 \vee \dots \vee a_{iN} y_N; a_{ii} = 0, \quad (24)$$

где a_i и a_{ij} – коэффициенты, выражаемые явно через x_i и z_j . Существуют различные способы решения систем логических уравнений, в том числе метод определителей, метод подстановки, матричный метод и др. С методом определителей и его применением к задачам надежности можно ознакомиться по работе [11]. Решение (24) вида $Y = g_Y(X, Z)$ следует подставить в (22) или (23) и получить явное выражение

$$F = f(X, g_Y(X, Z), Z) = g(X, Z). \quad (25)$$

Решение системы логических уравнений надо проводить многократно: один раз для базовой структуры S_0 , когда все $z_{ij} = 0$, и еще столько раз, сколько различных видов возмущений. Перебирая все варианты при однократном и многократных воздействиях, удастся получить полный набор работоспособных структур в системе. Функция (25) допускает, таким образом, анализ d - и m -живучести путем перебора вектора состояний элементов.

Этап 4. Вероятностное описание элементов и внешних возмущений. Каждый элемент представлен в вероятностной модели вероятностью $p_i = P(x_i = 1)$ того, что в данный или в произвольный момент времени элемент работоспособен. При появлении возмущения $z_{ij} = 1$ стойкость i -го элемента к j -му возмущению может быть учтена с помощью вероятностей α_{ij} того, что элемент сохранит работоспособность при появлении возмущения. Кроме того, задаются вероятности попадания элемента в область действия j -го фактора НВ.

Этап 5. Преобразование ЛФРС к форме перехода к замещению. Согласно [8] можно различать формы перехода к полному и частичному замещению. Формами перехода к полному замещению являются совершенная дизъюнктивная нормальная форма, неповторная форма в базисе «конъюнкция-отрицание», дизъюнкция ортогональных неповторных форм. После приведения к одной из этих форм проводится одношаговое замещение логических переменных и логических операций на вероятности и арифметические операции. Если такие преобразования трудно выполнить из-за их большой сложности, можно воспользоваться формой перехода к частичному замещению. Существующие разновидности этих форм и правила преобразования к ним приведены в [8].

Этап 6. Запись смешанной формы. Замещение неповторных переменных в преобразованной ЛФРС является частичным замещением, в результате которого некоторые логические переменные и операции замещаются на вероятности и арифметические операции, а другие, остальные переменные и операции переходят в показатели степени арифметических выражений. Полученная таким образом форма называется смешанной

формой, так как содержит одновременно логические переменные и вероятности и две группы операций: логические и арифметические. Способы и алгоритмы перехода к смешанной форме даны в [11].

Этап 7. Определение показателей живучести. С помощью многошаговой процедуры замещения логических переменных в смешанных формах, составленных для базовой структуры S_0 и других работоспособных структур S_i , находят вероятности $P(t/S_0)$ и $P(t/S_i)$, а затем по формуле (8) – условную функцию живучести $G_i(t)$. Далее по формулам (9) – (12) – функцию выживаемости, безусловную функцию живучести, среднее число НВ.

Для систем с ветвящейся структурой после этапа 6 требуется выполнить еще три этапа (этапы 8, 9 и 10) и только затем вернуться к этапу 7.

Этап 8. Составление производящего полинома распределения вероятностей состояния одной i -ой ветви [11]:

$$\Phi_i(z, X) = 1 + (z - 1)Q(X), \quad (26)$$

где $Q(X) = P\{F(X) = 0\}$ – смешанная форма, X – вектор незамещенных логических переменных.

Этап 9. Составление производящего полинома для системы. При изотропной структуре полином (26) возводится в степень, равную коэффициенту разветвления на нижнем ярусе ветвящейся структуры, затем проводится замещение логически переменных, относящихся к следующему ярусу, далее снова возведение в степень, замещение и т.д. В результате многошаговой процедуры получается полином, коэффициенты которого выражают вероятности того, что неработоспособно определенное количество ветвей. Если структура неизотропна, то возведение в степень заменяется перемножением полиномов.

Этап 10. Определение показателей живучести. На этапе 9 находятся распределения $P(t/S_0)$ и $P(t/S_i)$, затем вычисляются скалярные показатели $\varphi(P(t/S_0))$ и $\varphi(P(t/S_i))$, затем по формулам (9) – (15) находят $G_i(t)$, $G(t, n)$, $G(t)$ и другие показатели живучести.

7.2. Оценка живучести по состоянию системы на основе теории случайных размещений

Пусть двухполюсная система содержит k подсистем и всего N точечных элементов с произвольными соединениями между ними и имеет ЛФРС

$$F = f(X), X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

Система подвергается воздействию потока n независимых точечных НВ с равновероятным поражением каждого элемента при появлении НВ. Считаем, что стойкость элементов равна 0, а интенсивность НВ достаточна, чтобы гарантировать переход в неработоспособное состояние элемента, попавшего в область действия НВ. Оценку живучести проведем по показателям (2) – (6).

Выживаемость системы при n -кратном НВ можно представить в виде

$$R(n) = \sum_{X \in X_1} P(X | A_n) = P\{F = 1 | A_n\}, \quad (27)$$

где X_1 – подмножество векторов X , соответствующих работоспособным состояниям системы. Вероятность $P(X | A_n)$ находят по формуле:

$$P(X | A_n) = \sum_{\bar{n} \in M_n} P(\bar{n})P(X | \bar{n}), \quad (28)$$

где $\bar{n} = (n_1, n_2, \dots, n_k)$ – вектор числа НВ, приходящихся на k подсистем, M_n – множество векторов, удовлетворяющих условию $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$. Вероятность

$$P(\bar{n}) = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} \gamma_1^{n_1} \gamma_2^{n_2} \dots \gamma_k^{n_k}, \quad (29)$$

где γ_i – вероятность того, что i -я подсистема входит в область действия НВ. В частности, здесь может быть $k = N$. При равновероятном поражении элементов формулы (27) – (29) можно уточнить.

Представив ЛФРС в виде ортогональной дизъюнктивной нормальной формы

$$F = \bigvee_{i=1}^m Q_i, \quad (30)$$

запишем (27) в виде

$$R(n) = \sum_{i=1}^m P(Q_i = 1 | A_n). \quad (31)$$

Для импликант, содержащих $l_i = 0, 1$ или 2 отрицания, можно записать формулы в (31) в явном виде:

$$P(Q_i = 1 | A_n) = (1 - s_i / N)^n, l_i = 0, n \geq 1, \quad (32)$$

$$P(Q_i = 1 | A_n) = \sum_{j=1}^n C_n^j (1 - s_i / N)^{n-j} / N^j, l_i = 1, n \geq 1,$$

$$P(Q_i = 1 | A_n) = \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} C_k^j (1 - s_i / N)^{n-k} / N^n, l_i = 2, n \geq 2,$$

где s_i – число букв в импликанте Q_i . Эти формулы являются частным случаем (29) при $k = 2$ и различных значениях n_1 и n_2 .

7.3. Оценка живучести по состоянию системы на основе комбинаторного метода

По базовой структуре S_0 определяются все возможные работоспособные структуры $S_i, i = 1, \dots, N_p$. Тогда:

$$R(n) = \sum_{j=1}^{N_p} r_j(n) / N^n = r_n / N^n, \quad (33)$$

где $r_j(n)$ – число случаев, в которых возникает структура S_j при n -кратном НВ. Это число определяется по формуле

$$r_j(n) = \sum_{(k)} L_{nk} B_{kj}, \quad (34)$$

где L_{nk} – число перестановок из n элементов k типов, B_{kj} – число различных векторов X с k нулями, приводящих к структуре S_j . Поскольку параметры d и m из формул (3) и (4) обычно невелики, не представляет особого труда найти B_{kj} простым перебором векторов. Максимальное число испытываемых векторов равно mN , а практически оно значительно меньше.

Числа L_{nk} – это так называемые числа **Моргана**. Они связаны с т.н. числами **Стирлинга второго рода** соотношением

$$L_{nk} = k! S_{nk}, \quad (35)$$

где S_{nk} могут быть найдены с помощью рекуррентного соотношения

$$S_{nk} = S_{n-1,k-1} + k S_{n-1,k}; S_{nk} = 0 \text{ при } n < k; S_{nn} = 1. \quad (36)$$

Но числа L_{nk} могут быть вычислены и непосредственно по формуле:

$$L_{nk} = \sum_{i=1}^k C_k^i i^n (-1)^{k+i}. \quad (37)$$

Результат данного параграфа получен нами ещё в 1987 году. В продолжение исследований были также получены расчётные соотношения для случая r -кратных НВ и систем с L -стойкими элементами [20].

Библиографический список

- ГОСТ 19176-80. Системы управления техническими средствами корабля. Термины и определения.
- Словарь по кибернетике. Под ред. В.М. Глушкова. – Киев: Главная ред. Укр. сов. энциклопедии, 1979.
- Большая советская энциклопедия, том 9. – М.: Советская энциклопедия, 1972. – 570 с.
- Надежность систем энергетики: Терминология. Сборник рекомендуемых терминов. – Вып.95. – М.: Наука, 1980. – 42 с.
- Горшков В.В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем. – АН УССР, Кибернетика, 1982, №1. – С.104-107.
- Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. – М.: Наука, 1986. – 252 с.
- Волик Б.Г., Рябинин И.А. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12.
- Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 238 с.
- 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>.

10. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб: Питер, 2005. – 480 с.

11. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А., Черкесов Г.Н. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник в 4-х томах под общей редакцией Ю.Н. Руденко. Том 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. – М.: Госатомиздат, 1994. – 474 с..

12. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с.

13. Рябинин И.А. Три кита ВМФ: Надежность, живучесть, безопасность. – Новочеркасск: Темп, 2006. – 116 с.

14. Симаков И.П., Мерзляков В.А. Выбор функционально-алгоритмической структуры систем управления движением корабля по критериям отказобезопасности и надежности – Судостроительная промышленность. Серия «Автоматика и телемеханика», вып. 5, 1987, с. 52 – 60.

15. Недосекин А.О. О проявлении свойства «вitalность» в технических, экономических и социальных системах. – На сайте: http://an.ifel.ru/docs/Vitality_110416.pdf.

16. Marsh T. (ed.). Critical Foundations: Protecting America's Infrastructures. Technical report, President's Commission on Critical Infrastructure Protection, October 1997.

17. Muller G., Koslowski T. and Accorsi R. Resilience – a New Research Field in Business Information Systems? – On site: <http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~accorsi/papers/bis13.pdf>.

18. Инициатива ResiliNets (Канзасский университет и университет Ланкастер, США). – На сайте: https://wiki.ittc.ku.edu/resilinet/Main_Page.

19. Недосекин А.О., Рейшахрит Е.И. Мобилизационная экономика по-русски. – СПб: СПбГТУ, 2013. – Также на сайте: http://an.ifel.ru/docs/Mob_AN_ER.pdf.

20. Недосекин А.О. Применение теории случайных размещений к анализу живучести технических систем // Кибернетика АН УССР. 1991. №6.

21. Недосекин А.О., Черкесов Г.Н. Оценка живучести энергосистемы в условиях забастовок // Надёжность и контроль качества, 1992, № 11. – С. 51 – 62.

22. Nedosekin A.O., Abdoulaeva Z.I. Mobilized economy fuzzy model // Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015, 7190479, pp. 267-268.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Геннадий Н. Черкесов – доктор технических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gennady.cherkesov@gmail.com

Алексей О. Недосекин – доктор экономических наук, кандидат технических наук, академик МАНЭБ, профессор Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: apostolfoma@gmail.com