

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

grebenuk@lab49.ru, lbknv@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются совокупность свойств, характеризующих технические системы, и факторы, влияющие на работоспособность технических объектов. Показано, что для анализа работоспособности территориально распределенных комплексов необходим учет внешних неблагоприятных воздействий, и требуется наряду с вероятностными моделями использовать ситуационный подход для поиска критических объектов и выявления наиболее опасных воздействий.

Ключевые слова: надежность, безопасность, уязвимость, анализ работоспособности, внешние неблагоприятные воздействия, критичность отказов.

Введение

К территориально распределенным комплексам принято относить крупные предприятия промышленной, топливно энергетической сферы, транспортные системы, информационные системы и системы связи, инженерные инфраструктуры и т.д.

Естественно, все средства реализации производственно – экономической и других видов деятельности этих комплексов размещены на определенной территории. Возникает вопрос, начиная с какого момента, или иначе, с какого «размера» территории необходимо учитывать вид размещения на территории технических средств – основных объектов комплекса (системы) при анализе работоспособности комплекса и оценке показателей его функционирования (надежности / эффективности / безопасности / уязвимости).

Понятно, что объекты в системе взаимодействуют при наличии соответствующих связей. Если связь не абсолютна и подвержена нарушениям, то такая связь при оценке работоспособности системы должна учитываться наряду с основными объектами – элементами системы.

Состав неблагоприятных воздействий на систему целесообразно представить двумя группами:
Внутренние факторы – отказы оборудования, неправильные действия персонала и т.д.;

Внешние факторы – воздействия природного или техногенного характера (часто нельзя исключать и злонамеренные действия), влияющие на работоспособность оборудования.

Последствия отказов, приводящие к потере работоспособности и, возможно, перехода объектов в опасные состояния, также могут зависеть от территориального расположения (например, размещение в сейсмоопасной зоне).

Если значимыми признаются только внутренние факторы, то комплекс в целом можно рассматривать как «сосредоточенный объект» и задача анализа работоспособности сосредоточенного объекта описывается в терминах теории надежности / эффективности / техногенной безопасности [1].

Если же игнорировать внешние факторы недопустимо, то следует рассмотреть два варианта их учета.

- 1) Воздействие фактора имеет «глобальный» характер, приводя однозначно к потере работоспособности системы. В этом случае анализ работоспособности проводится с учетом отказов по *общей причине*.
- 2) Воздействие фактора (факторов) имеет «локальный» характер, приводя к потере работоспособности отдельных элементов (объектов и/или связей) или их ограниченных совокупностей (групповому отказу). Состав локально воздействующих факторов, в общем случае, специфичен для отдельных территориальных областей.

С учетом вышесказанного, к территориально распределенным комплексам в плане анализа их работоспособности будем относить такие системы, в моделях которых необходимо представлены

структура системы (объекты и связи), внутренние и локальные внешние факторы, влияющие на их работоспособность.

Таким образом, более корректным будет обсуждение и исследование моделей работоспособности территориально распределенных систем.

А вопрос соотношения конкретной системы и класса модели выходит за рамки данного исследования. (В конце концов, и обычная микросхема может рассматриваться как распределенный объект, если необходимо выяснить влияние топологии, например, на устойчивость к радиационному воздействию).

1 Характеристика территориально распределенных комплексов

1. Территориально распределенные комплексы (ТРК) представляют собой сложную многоэлементную систему. Элементы ТРК условно можно отнести к двум группам:

- Узловые элементы - функциональные элементы, в которых производится преобразование «рабочего продукта» и которые будем рассматривать как сосредоточенные объекты;
- Линии связи, обеспечивающие целостность системы и неразрывность общего технологического процесса.

Поэтому укрупненно, ТРК представляют в виде сетевой структуры.

2. Нарушение нормального функционирования отдельных элементов ТРК может приводить к недопустимому изменению технологических параметров на входе других элементов, что чревато возникновением более тяжелых последствий, включая каскадные процессы отказов в ТРК.

3. ТРК являются дорогостоящими системами, выходной эффект (как правило, объем выпускаемой продукции) которых может быть значительным. Поэтому для поддержания выходного эффекта на должном уровне принимаются специальные меры – используется структурное резервирование (на уровне узлов и связей), обеспечивается запас по производительности, предусматриваются накопители выходного и промежуточного продукта для создания резервов времени, допускается многорежимность функционирования и т.п.

Эффективным средством сохранения работоспособности ТРК является также техническое обслуживание и ремонты.

2 Факторы влияния на функционирование, работоспособность и свойства систем

Согласно [2] работоспособность определяется как «состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Понятие работоспособности лежит в основе научно-технических дисциплин, изучающих свойства надежности, эффективности, безопасности, живучести/уязвимости (НЭБЖ-У) технических объектов/систем. Различия же этих дисциплин в части анализа работоспособности обусловлены в основном следующими обстоятельствами:

- доминирующими механизмами, порождающими процессы изменения работоспособности и, соответственно, определяющими вид процессов;
- различием принципов выделения характерных состояний (уровней) работоспособности;
- использованием разных систем показателей указанных свойств объектов.

Все это предопределяет и специфику используемого математического аппарата и методов оценки показателей свойств.

В плане обеспечения заданного уровня НЭБЖ-У отличия обусловлены необходимостью использования различных мер для сохранения работоспособности, минимизации неблагоприятных последствий потери (снижения) работоспособности в оговоренных условиях эксплуатации объекта, а также различием механизмов (стратегий) восстановления работоспособности объекта или предотвращения дальнейшей ее деградации.

Очевидно, невозможно четкое разграничение свойств НЭБЖ-У на основе указанных выше признаков – границы между ними в определенном смысле условны, что проиллюстрировано рис.1.

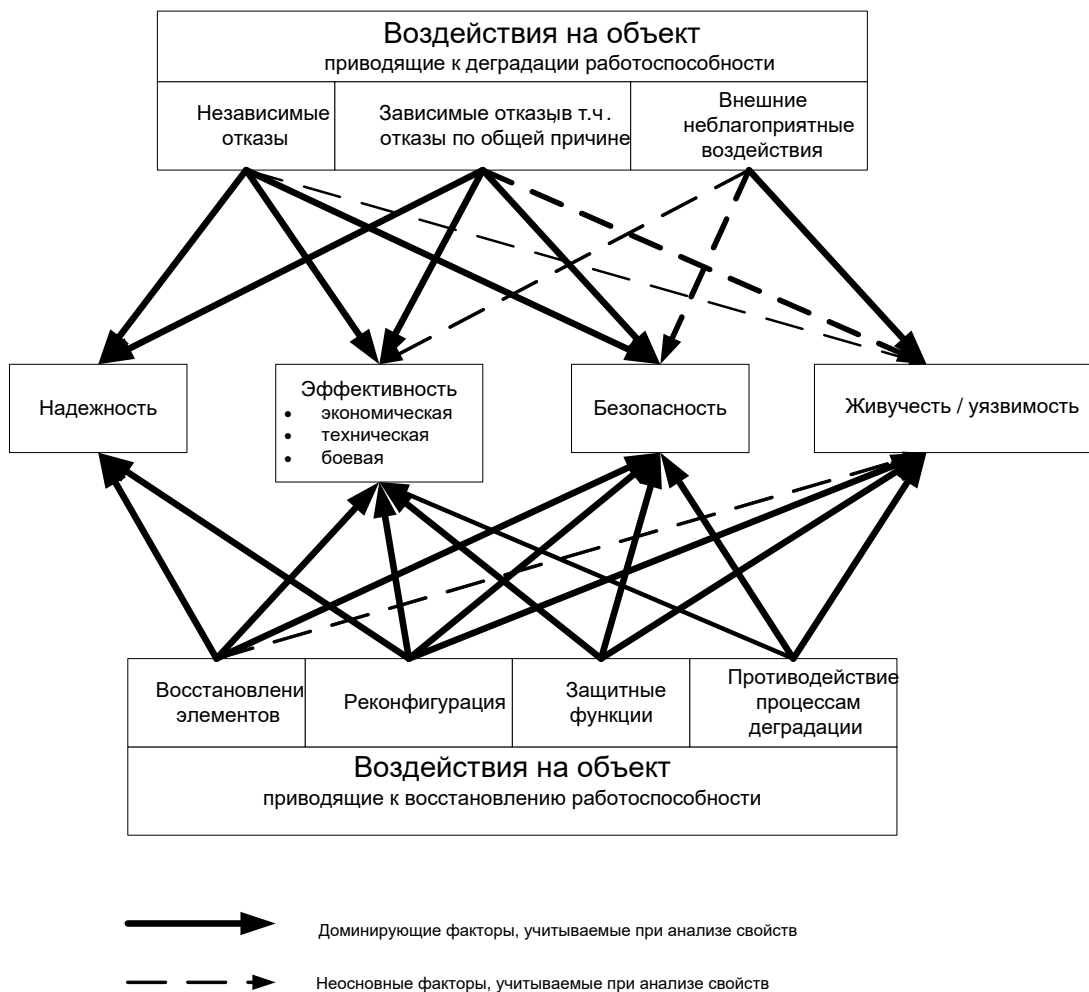


Рис. 1. Воздействия на объект, приводящие к изменению работоспособности

Аналогична ситуация и при сопоставлении указанных свойств на основе анализа возможных последствий от снижения работоспособности. На рис.2 рассмотрена условная шкала гипотетических потерь и области значений, для которых должен быть сделан акцент на определенном свойстве.

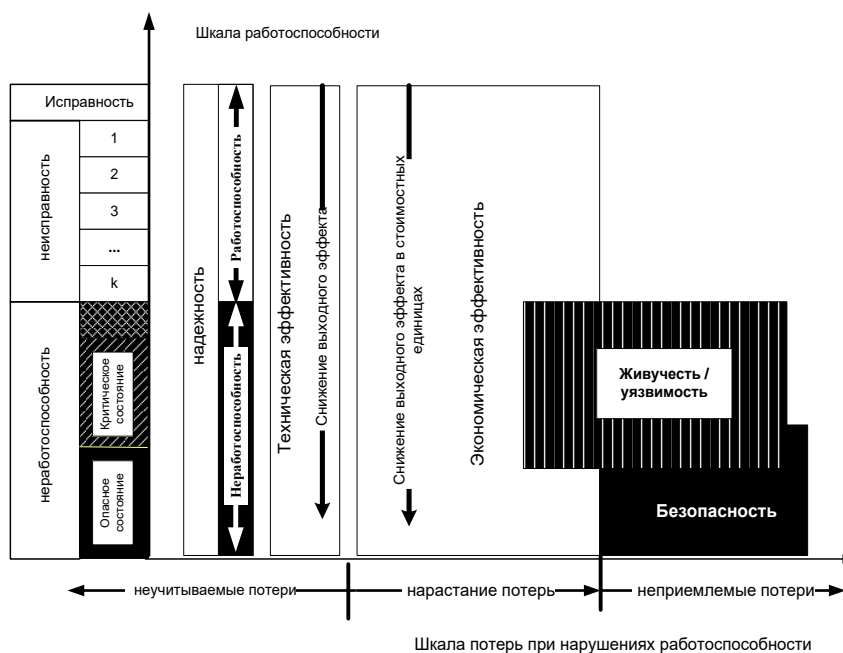


Рис.2. Области работоспособности

Так при оценке надежности потери от отказов, как таковые, не учитываются. Другое дело, они могут учитываться косвенно при определении состояний работоспособности в многоуровневых моделях надежности. Более полно данный аспект учитывается в моделях технической эффективности. Если выходной эффект системы и потери при отказах могут быть оценены по единой шкале, например в стоимостных единицах или натуральных единицах продукта, то появляется возможность получения интегральной оценки эффективности функционирования с учетом потерь производительности от отказов. Рассмотренные свойства - надежность и эффективность – характеризуют функционирование системы в нормальных (определенных в ТУ на систему) условиях эксплуатации.

Свойства безопасности, живучести/уязвимости проявляются в условиях чрезвычайных ситуаций. Возникновение чрезвычайных ситуаций может быть обусловлено как внутрисистемными проблемами (опасные отказы оборудования, неверные действия эксплуатирующего персонала, ошибки проектирования и изготовления, и т.д.), так и внешними по отношению к системе неблагоприятными воздействиями (погодные условия, природные катаклизмы, умышленные вредные воздействия). Из указанных факторов возникновения чрезвычайных ситуаций, пожалуй, только один из них – опасные отказы может быть спрогнозирован достаточно достоверно. Настолько, что, например, в атомной энергетике установлены соответствующие требования по безопасности. Поэтому оценка безопасности (в данном случае это может быть вероятность возникновения опасных отказов) решается в рамках общей методологии оценки надежности/эффективности.

Внешние воздействия, их частота редко могут быть оценены статистически. Поэтому, в первую очередь, необходимо составить перечень ожидаемых (возможных) событий, по отношению к которым необходимо определить проектные мероприятия для предотвращения, устранения или локализации тяжких последствий. Здесь опять можно сослаться на объекты атомной энергетике, где введено понятие проектной аварии, т.е. аварии, для которой должны быть предусмотрены необходимые защитные меры.

Защита от внешних воздействий особенно актуальна для территориально распределенных систем, поскольку рассредоточение элементов системы и связей между ними по большой территории усугубляет ситуацию – возрастает опасность (вероятность) возникновения внешних воздействий притом, что защитные мероприятия оказываются дорогостоящими и не всегда достаточно эффективными.

3 Показатели функционирования систем (выходного эффекта)

Номинальная производительность объекта/системы обеспечивается при стандартных (номинальных) условиях в течение длительной эксплуатации без расстройств режима его работы и при соблюдении заданных технологических параметров. Номинальной производительности соответствует исправное [2] (полностью работоспособное) состояние системы. Соответственно при снижении уровня работоспособности будет падать производительность и совокупный выходной продукт/эффект. Причины снижения работоспособности – естественные, обусловленные внутренней природой отказы техники (внезапные поломки и старение/износ оборудования) и внешние неблагоприятные воздействия. Обратный процесс восстановления работоспособности обеспечивается ремонтами отказавшего оборудования. Профилактическое техническое обслуживание в соответствии с установленным регламентом позволяет поддерживать техническое состояние системы на требуемом уровне, тем самым повышая безотказность функционирования.

Показатели функционирования систем служат мерой для подтверждения их проектных и эксплуатационных характеристик – уровня выходного эффекта и эксплуатационных затрат, непосредственно связанных с динамикой изменения работоспособности системы.

Ниже на рис. 3 представлен примерный график изменения работоспособности во времени. Уровень работоспособности системы, находящейся в определенном техническом состоянии, обычно определяется производительностью системы, потенциально допустимой для данного состояния в соответствии с техническими условиями. Снижение уровня работоспособности вызывается следующими видами отказов: скачкообразное изменение – внезапными отказами, а плавное - постепенными (параметрическими) отказами – износом. Восстановление работоспособности происходит в случае ремонта (замены) отказавших элементов, а также после проведения регламентных работ при техническом обслуживании и устранения скрытых отказов.

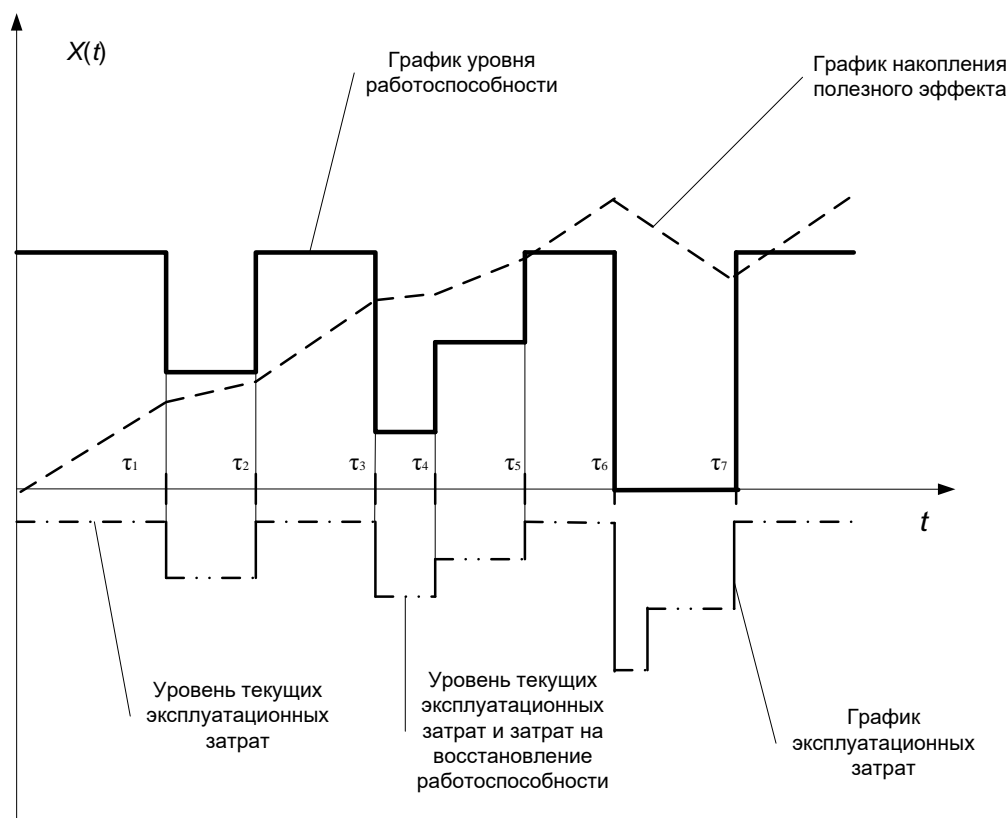


Рис. 3. График изменения работоспособности

Каждой из возможных траекторий изменения работоспособности $x(t)$ соответствует график производительности, эксплуатационных затрат, а моментам скачкообразного изменения траектории - определенные события и связанные с ними эффекты. Таким образом, для каждой траектории может быть определен «результат» F , т.е. «условный» показатель при условии, что процесс функционирования сопровождался подобным изменением работоспособности.

Показатель функционирования системы P_ϕ на промежутке времени $(0, T)$ определяется по всей совокупности траекторий, т.е. как «ожидаемое» значение:

$$(1) \quad P_\phi = M\{F(x(0, T))\}$$

Оператор M математически обоснованно может быть определен, например, тогда, когда процесс $x(t)$ случайный; в этом случае оператор M соответствует математическому ожиданию функционала F . В таком виде могут быть представлены любые показатели надежности и эффективности.

В иных случаях используются различные процедуры формирования числовой оценки показателей в зависимости от имеющейся исходной информации и цели анализа. Рассматриваются две группы показателей:

- 1) Частные показатели, характеризующие функционирование системы при оговоренных условиях,
- 2) Обобщенные показатели, как некоторая свертка частных показателей.

Частные показатели наиболее часто используются при оценке свойств безопасности / живучести / уязвимости. Дело в том, что указанные свойства проявляются при реализации редких событий внешних неблагоприятных воздействий, для которых статистические оценки ненадежны. Поэтому, как правило, используют частные (условные) показатели для оценки указанных свойств при реализации конкретного события (исходного события аварии, боевого повреждения, природного явления). Именно последствия таких событий должны подлежать анализу при оценке работоспособности территориально распределенных систем.

Частные показатели ранжируют с учетом важности (опасности) исходных событий и ожидаемой частоты их появления на основе экспертных заключений. Обобщенные показатели при этом обычно формируются как выпуклая линейная комбинация частных показателей.

4 Модели работоспособности систем и их представление

Большие территориально распределенные системы в большинстве случаев представляют собой совокупность «узловых» элементов, соединенных коммуникационно-технологическими связями. Поэтому для описания работоспособности таких систем необходимо использование совокупности моделей в зависимости от уровня декомпозиции структуры системы.

Будем предполагать, что узловые элементы являются «сосредоточенными» объектами со сложной структурой. Их работоспособность обеспечивается выбором подходящего состава оборудования, резервированием наиболее ответственных единиц техники, введением контроля, диагностирования технического состояния и технического обслуживания. Указанные меры направлены на устранение вредных последствий внутренних факторов снижения работоспособности – отказов, внезапных (поломки и пр.) и постепенных, обусловленных старением оборудования, приводящему к снижению его функциональных характеристик и повышению опасности отказа. С учетом сказанного задача анализа работоспособности узловых элементов полностью отвечает постановкам задач теории надежности/эффективности.

Таким образом, оказывается возможным использовать весь имеющийся арсенал моделей работоспособности и методов расчета надежностных показателей [1]. Наиболее употребительные модели работоспособности имеют следующие представления.

- 1) Структурные блок-схемы, сетевые модели в виде графов – сочетаются с комбинаторными методами теории вероятностей (например, метод минимальных путей и сечений и логико-вероятностный метод, в основе которых лежит, по сути, метод перебора). Эти модели и методы применимы, в основном, для оценки показателей безотказности систем без восстановления и готовности.
- 2) Графы пространства состояний работоспособности системы. Данная модель позволяет отобразить несколько уровней работоспособности (многоуровневая модель). Наиболее часто предполагается, что случайный процесс переходов в пространстве состояний является марковским. В этом случае возможно аналитическое решение задачи расчета показателей надежности/эффективности (МПД-метод) [3]. Другое естественное ограничение аналитических методов – размерность (количество состояний-вершин) графа переходов. В общем случае следует использовать метод вероятностного моделирования
- 3) Программно-алгоритмические модели для реализации метода статистического моделирования. Эти модели наиболее универсальны, но имеют определенные проблемы при оценке высоконадежных систем, что может потребовать использования специальных ускоренных алгоритмов моделирования [3].

Подверженность узловых элементов внешним неблагоприятным воздействиям будет предполагаться «глобальной» в том смысле, что при таком воздействии узловой элемент с некоторой вероятностью «уничтожается» полностью. Эта вероятность определяется эффективностью средств защиты узлового элемента, если таковая предусмотрена.

Линии связи между узлами целесообразно рассматривать как отдельные элементы структуры. Влияние внутренних факторов на работоспособность линии связи характеризуется заданными (или полученными расчетным путем) показателями безотказности / ремонтпригодности, что позволяет использовать бинарную модель работоспособности («работоспособна/неработоспособна»).

Внешние же неблагоприятные воздействия на линии связи (в силу их протяженности) могут иметь локальный характер, приводя, возможно, к частичной потере работоспособности, что также будет определять и объем необходимых ремонтно-восстановительных работ.

Агрегированная модель работоспособности системы, таким образом, может быть представлена сетевым графом. Среди множества путей в графе выделяется подмножество *путей успешного функционирования* таким образом, что наличие такого пути означает работоспособность системы.

5 Сценарный подход в анализе работоспособности

При анализе работоспособности изначально предполагается (хотя и не обязательно), что система исправна. Со временем под влиянием неблагоприятных воздействующих факторов происходит деградация системы с понижением уровня ее работоспособности. Возможен и обратный процесс восстановления работоспособности при проведении ремонтов и технического обслуживания. Результат взаимодействия этих процессов отображается системой показателей. Если ограничиться рассмотрением только внутренних факторов, то исчерпывающую картину дают показатели надежности/эффективности, получаемых при использовании чисто надежностных вероятностных моделей.

Внешние неблагоприятные воздействия, как указывалось, труднопредсказуемы в статистическом смысле (в противном случае они могут быть учтены в вышеупомянутой вероятностной модели). По этой причине объективно необходимо проводить отдельно анализ работоспособности в условиях внешних воздействий.

Для такого анализа подходит методология сценарного подхода. В соответствии с этим подходом:

- с помощью экспертов формируется перечень возможных неблагоприятных внешних воздействий,
- для каждого воздействия на основе сценария строится траектория изменения работоспособности системы с учетом структуры системы и средств поддержания (восстановления) работоспособности,
- проводится оценка результата внешнего воздействия на основе анализа траектория изменения работоспособности (см. п.3).

Имеется еще один аргумент в пользу раздельного анализа работоспособности: это существенно более высокая «скорость» процессов деградации при внешних воздействиях, чем под влиянием внутренних факторов. По этой причине при внешних воздействиях изменения состояния системы под влиянием внутренних факторов можно не учитывать. Таким образом, при оценке последствий от внешнего неблагоприятного воздействия необходимо только знание технического состояния системы на момент возникновения этого воздействия, фактически знание структурных параметров (состав работоспособных элементов и связей между ними).

Само внешнее воздействие на элемент системы может приводить не только к отказу данного элемента, но и к последовательности «индуцированных» отказов, называемых цепными отказами.

Система показателей в отсутствии статистических данных по внешним воздействиям базируется, в основном, на учете структурных параметров системы. Одним из таких показателей является *показатель важности* элемента системы, которая определяется по степени влияния отказа элемента на выходной эффект. Аналогично может быть определен дополнительный *показатель критичности*, по степени потенциально нанесенного ущерба.

Подобный принцип используется и в анализе опасности (критичности) внешних воздействий.

6 Модели оценки ущерба

На основе показателя ущерба проводится упорядочение элементов по важности, определяется критичность отказов и внешних неблагоприятных воздействий.

При сетевом представлении структуры системы ее работоспособность определяется множеством путей успешного функционирования. В системе с резервированием узловых элементов и связей таких путей будет несколько (например, m). При этом через конкретный компонент структуры может проходить некоторое количество k путей. Отказ данного компонента означает разрыв этих путей. И значение k может служить мерой важности/критичности компонента. Условие $k = m$ будет означать отказ системы.

В сетевой структуре ТРК может быть несколько входных вершин – источников ресурсов, и несколько выходных – соответствующих отдельным видам конечного продукта. В качестве примера можно указать сетевые инженерные инфраструктуры зданий и сооружений, в состав которых входят системы электроснабжения, газоснабжения, теплоснабжения, водоснабжения и т.д. Эти системы взаимосвязаны, так что нарушение нормального функционирования одной из них отражается функционировании других.

Общий принцип определения критичности отказов применим и в данном случае.

Наряду с рассмотренным подходом анализа критичности на основе построения путей успешного функционирования представляется целесообразным рассмотреть метод сценарного моделирования с оценкой ущерба на основе входо-выходной модели, производной от экономической модели В. Леонтьева [4].

Для инженерных систем технические коэффициенты матрицы Леонтьева, имеющие в экономической модели значения в диапазоне от 0 до 1, и определяющие взаимное влияние отраслей, принимают вид булевых переменных 0 или 1. Эти значения характеризуют наличие или отсутствие связи между узлами сети.

Метод сценарного моделирования на основе входо-выходной модели позволяет определить «накопленную недееспособность» системы после появления отказа. То есть, для каждого сценария эти модели определяют сокращение возможностей (накопление ущерба) на определенных, отдельных узлах сети [5].

Для оценки ущерба используется уравнение (2):

$$(2) \quad q = (I - A^t)^{-1} c,$$

где q – вектор ущерба, c – вектор сценария или вектор внешних возмущений, A – матрица смежности.

Как сказано выше, модель анализа предполагает, что любая взаимозависимость изображается булевой переменной со значениями 0 или 1 в матрице смежности A . Если компонент k не имеет зависимости от компонента j , то $a_{kj} = a_{jk} = 0$.

Накопленный ущерб для сценария $c_i = 1$ получим по формуле (3):

$$(3) \quad S_i = \sum_{j=1}^n q_j.$$

Наибольший ущерб причиняется системе при реализации определенного сценария при отказе конкретного узла, который и является критически важным узлом системы.

Заключение

При анализе работоспособности территориально распределенных комплексов в обязательном порядке необходимо учитывать внешние неблагоприятные воздействия. Недостаток статистических данных по внешним воздействиям требует анализ работоспособности технических объектов с применением вероятностных моделей дополнять анализом работоспособности с использованием принципов ситуационного подхода. Дополнительные показатели важности и критичности элементов, а также оценки опасности внешних воздействий, позволяют более полно учесть реальные условия внешней среды при выборе средств обеспечения работоспособности территориально распределенных комплексов. Эти показатели определяются в рамках сценарного подхода.

Литература

1. *Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др.* Надежность технических систем: Справочник. Под ред. И. А. Ушакова. Москва, «Радио и связь» 1985.
2. ГОСТ 27.002-89. «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения»
3. *Буянов Б.Б., Волик Б.Г., Лубков Н.В., и др.* Методы анализа и синтеза структур управляющих систем. Под ред. Б.Г. Волика. – Москва, Энергоатомиздат, 1988. 296 с.
4. *J Santos, L.May, Al Haimar* Risk-Based Input-Output Analysis of Influenza Epidemic Consequences on Interdependent Workforce Sectors. Risk Anal. 2013 Sep; 33(9): 1620–1635. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3640689>
5. *Гребенюк Г.Г., Никитов С.М., Серeda Л.А., Роцин А.А.* Модели и алгоритмы анализа взаимосвязанных сетевых инженерных инфраструктур зданий и сооружений. Настоящий сборник.