

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ С МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ДЕГРАДАЦИЕЙ

д.т.н., проф. В.С. Харченко, Д.А. Черепяхин, к.т.н. Н.К. Байда

Предлагается методика оценки живучести систем с многоступенчатой деградацией, которая использует аппарат диаграмм деградации и Д - матрицы. Исследуется влияние параметров систем на показатели надежности и живучести.

Постановка задачи. Условия функционирования и требования, предъявляемые к системам управления (СУ) перспективных комплексов вооружений, определяют актуальность разработки методов и средств обеспечения их живучести и методик, позволяющих получить качественную и количественную оценку СУ. Методика оценки живучести должна обеспечивать возможность описания состояний с различными уровнями качества функционирования (в процессе многоступенчатой деградации), в которых может находиться система вследствие отказов или ухудшения характеристик ее компонентов как при наличии, так и при отсутствии экстремальных воздействий [1-3].

Цель статьи - разработка методики оценки живучести произвольной системы с использованием матриц деградации (Д - матриц) [4], представляющих таблицу, образованную пересечением возможных состояний (с любым допустимым уровнем качества функционирования) двух произвольно взятых компонентов, ячейки которой соответствуют состояниям подсистемы, состоящей из указанных компонентов. В качестве рассматриваемых состояний одного или обоих компонентов матрицы используются допустимые состояния подсистемы, состоящей из двух и более базовых элементов.

Общая характеристика методики и основные допущения. В состав методики входят следующие этапы:

- анализ функциональных и конструктивных особенностей рассматриваемой системы с целью выявления компонентов, допускающих деградацию качества функционирования;
- анализ условий работы системы и поставленных перед ней задач для определения допустимых величин деградации как отдельных элементов, так и системы в целом;
- анализ возможных и определение допустимых состояний исследуемой системы с использованием матриц деградации;
- вероятностная оценка функционирования системы в состояниях с

различными уровнями качества.

Рассмотрим последовательность оценки живучести на примере системы, состоящей из трех подсистем: **пс1 - пс3**, каждая из которых, в свою очередь, состоит из трех элементов: **эi.1 - эi.3**, где **i** – порядковый номер подсистемы. Примем следующие допущения:

- подсистемы представляют собой различные по функциональному назначению устройства; следовательно, структурная схема надежности системы изображается в виде последовательного соединения ее подсистем;

- каждая подсистема содержит по три элемента, отказ одного или двух из которых не приводит данную подсистему и систему в целом в состояние полного отказа, а лишь снижает производительность данной подсистемы (частично работоспособное состояние);

- повышение живучести системы обеспечивается на уровне подсистем благодаря идентичности элементов и выполняемых ими функций внутри подсистемы; в случае отказа элемента его функции выполняются исправными элементами данной подсистемы, но за более длительное время или с худшим качеством; отказ подсистемы, а следовательно, и системы в целом, наступает после отказа всех элементов хотя бы одной подсистемы;

- в процессе функционирования системы может возникнуть ситуация, когда вследствие отказов элементов подсистем система перейдет в состояние, характеризующееся такой величиной показателя производительности или качества, при которой она не может быть использована по назначению. В этом случае можно говорить об отказе системы;

- рассматривается этап нормальной эксплуатации системы, когда интенсивность отказов ее элементов можно считать постоянной; при вероятностной оценке различных состояний анализируемой системы будет использован экспоненциальный закон распределения случайных величин.

Получение и анализ Д - матриц. После анализа структурных и функциональных особенностей системы перейдем к непосредственному анализу возможных состояний системы, для чего воспользуемся Д - матрицами. В их ячейках описываются возможные состояния совокупности анализируемых компонентов. В рассматриваемом случае понадобится построение двух Д - матриц: описывающей *промежуточные* состояния системы, состоящей из первой и второй подсистем и *финальной*, для получения которой используются состояния "промежуточной" системы, полученные на предыдущем этапе, и возможные состояния третьей подсистемы.

В общем случае финальная матрица содержит число ячеек, соответствующее произведению числа состояний, в которых может находиться каждая подсистема. В большинстве случаев можно говорить о существовании состояний, для которых показатель качества функционирования снижается ниже допустимого предела, что следует квалифицировать как отказ всей системы. Для уменьшения размерности Д - матриц такие состояния можно не учитывать при построении очередной матрицы деградации (в случае, если задачей исследования не является определение вероятности

или ожидаемого времени перехода в каждое из возможных состояний системы, включая состояния, в которых система не работоспособна).

Учитывая допущение об идентичности элементов подсистемы, можно сделать вывод о постоянстве величины потери качества системы независимо от того, какой именно элемент или пара элементов отказали в подсистеме. Таким образом, каждая подсистема может находиться в четырех состояниях: **si.1**, (**i** – порядковый номер): все элементы подсистемы исправны, подсистема дает максимальный вклад в качество системы; **si.2**: произошел отказ одного элемента подсистемы, величина показателя качества функционирования системы уменьшилась на $\Delta q_1(\%)$; **si.3**: произошел отказ двух элементов подсистемы, величина показателя качества функционирования системы уменьшилась на $\Delta q_2(\%)$; **si.4**: произошел отказ всех (трех) элементов подсистемы, система неработоспособна.

Как уже упоминалось, для уменьшения размерности результирующей матрицы, на каждом этапе построения Д - матриц в качестве исходных данных используем состояния компонентов, заведомо не переводящие систему в неработоспособное состояние. Число звездочек у элементов матрицы соответствует номеру шага анализа. Каждой ячейке присваивается уникальное имя, а также, приводится выражение для вычисления вероятности перехода рассматриваемой совокупности компонентов в состояние, соответствующее данной ячейке. Кроме того, указывается величина показателя качества функционирования системы (**q**) после перехода в данное состояние при условии, что все нерассмотренные компоненты системы находятся в исправном состоянии (т.е. работают с максимальным качеством).

Допустим, что необходимым условием работоспособности системы является ее производительность на уровне не менее 50% от номинального значения (когда в системе нет отказавших элементов). В случае, если производительность системы окажется ниже указанной величины, в соответствующую ячейку вносится метка о недопустимом снижении качества функционирования (НСКФ), а соответствующее ей состояние исключается из рассмотрения при построении очередных Д - матриц. Первая Д - матрица представляет собой возможные состояния промежуточной системы, состоящей из 1 и 2 подсистем. При построении второй (финальной) Д - матрицы (табл. 1) в качестве базовых используем шесть допустимых состояний промежуточной системы (совокупность 1 и 2 подсистем) и три допустимых состояния третьей подсистемы (P_{ji} - вероятность безотказной работы (ВБР) **j** - элемента данной подсистемы; P_{sk} - вероятность нахождения данной подсистемы в состоянии **k**; λ_i - интенсивность отказов элемента подсистемы **i**; **t** - рассматриваемое время функционирования системы). Результатом построения матрицы деградации системы является множество допустимых состояний $s^{**1} - s^{**12}$, каждое из которых характеризуется определенным уровнем качества функционирования системы и величиной вероятности перехода системы

в это состояние с течением времени, которая вычисляется по выражениям $P_{s^{**1}(t)} - P_{s^{**12}(t)}$.

Таблица 1

Финальная матрица деградации

| пс3 пс1,2 | s3.1 | s3.2 | s3.3 |
|--------------|--|--|--|
| s*1 | s^{**1} $P_{s^{**1}} = P_{31}^3 P_{32}^3 P_{33}^3$ $P_{s^{**1}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot e^{-3\lambda_2 t} \cdot e^{-3\lambda_3 t}$ $q^{**1} = 100\%$ | s^{**2} $P_{s^{**2}} = P_{31}^3 P_{32}^3 P_{33}^2 Q_{33}$ $P_{s^{**2}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot e^{-3\lambda_2 t} \times$ $\times 3e^{-2\lambda_3 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_3 t})$ $q^{**2} = 85\%$ | s^{**3} $P_{s^{**3}} = P_{31}^3 P_{32}^3 P_{33} Q_{33}^2$ $P_{s^{**3}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot e^{-3\lambda_2 t} \times$ $\times 3e^{-\lambda_3 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_3 t})^2$ $q^{**3} = 70\%$ |
| s*2 | s^{**4} $P_{s^{**4}} = P_{31}^3 P_{32}^2 Q_{32} P_{33}^3$ $P_{s^{**4}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot 3e^{-2\lambda_2 t} \times$ $\times (1 - e^{-\lambda_2 t}) \cdot e^{-3\lambda_3 t}$ $q^{**4} = 80\%$ | s^{**5} $P_{s^{**5}} = P_{31}^3 P_{32}^2 Q_{32} P_{33}^2 Q_{33}$ $P_{s^{**5}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot 9e^{-2\lambda_2 t} \times$ $\times (1 - e^{-\lambda_2 t}) \cdot e^{-2\lambda_3 t} (1 - e^{-\lambda_3 t})$ $q^{**5} = 65\%$ | s^{**6} $P_{s^{**6}} = P_{31}^3 P_{32}^2 Q_{32} P_{33} Q_{33}^2$ $P_{s^{**6}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot 9e^{-2\lambda_2 t} \times$ $\times (1 - e^{-\lambda_2 t}) \cdot e^{-\lambda_3 t} (1 - e^{-\lambda_3 t})^2$ $q^{**6} = 50\%$ |
| s*3 | s^{**7} $P_{s^{**7}} = P_{31}^3 P_{32} Q_{32}^2 P_{33}^3$ $P_{s^{**7}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot 3e^{-\lambda_2 t} \times$ $\times (1 - e^{-\lambda_2 t})^2 \cdot e^{-3\lambda_3 t}$ $q^{**7} = 72\%$ | s^{**8} $P_{s^{**8}} = P_{31}^3 P_{32} Q_{32}^2 P_{33}^2 Q_{33}$ $P_{s^{**8}}(t) = e^{-3\lambda_1 t} \cdot 9e^{-\lambda_2 t} \times$ $\times (1 - e^{-\lambda_2 t})^2 \cdot e^{-2\lambda_3 t} (1 - e^{-\lambda_3 t})$ $q^{**8} = 55\%$ | <p style="text-align: center;">НСКФ $q = 40\%$</p> |
| s*4 | s^{**9} $P_{s^{**9}} = 3P_{31}^2 Q_{31} P_{32}^3 P_{33}^3$ $P_{s^{**9}}(t) = 3e^{-2\lambda_1 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t}) \times$ $\times e^{-3\lambda_2 t} \cdot e^{-3\lambda_3 t}$ $q^{**9} = 75\%$ | s^{**10} $P_{s^{**10}} = 9P_{31}^2 Q_{31} P_{32}^2 P_{33}^2 Q_{33}$ $P_{s^{**10}}(t) = 9e^{-2\lambda_1 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t}) \times$ $\times e^{-3\lambda_2 t} \cdot e^{-2\lambda_3 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_3 t})$ $q^{**10} = 60\%$ | <p style="text-align: center;">НСКФ $q = 45\%$</p> |
| S*5 | s^{**11} $P_{s^{**11}} = 9P_{31}^2 Q_{31} P_{32}^2 Q_{32} P_{33}^3$ $P_{s^{**11}}(t) = 9e^{-2\lambda_1 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t}) \times$ | <p style="text-align: center;">НСКФ $q = 45\%$</p> | <p style="text-align: center;">НСКФ $q = 30\%$</p> |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | $\times e^{-2\lambda_2 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}) \cdot e^{-3\lambda_3 t}$ $q^{**11} = 60\%$ | | |
|--|--|--|--|

Окончание таблицы 1

| | | | |
|-----|---|---------------------------|---------------------------|
| S*6 | s^{**12} $P_{s^{**12}} = 3P_{31} Q_{31}^2 P_{32}^3 P_{33}^3$ $P_{s^{**12}}(t) = 3e^{-\lambda_1 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_1 t})^2 \times$ $\times e^{-3\lambda_2 t} \cdot e^{-3\lambda_3 t}$ $q^{**12} = 55\%$ | НСКФ $q = 40\%$ | НСКФ $q = 25\%$ |
|-----|---|---------------------------|---------------------------|

Следующий этап оценки живучести системы – количественная оценка вероятности нахождения системы в состояниях с различными уровнями качества. Данный этап включает в себя анализ условий эксплуатации системы, наличие, тип и кратность экстремальных воздействий, действующих на систему и т.д.

Результаты оценки живучести с использованием Д - матриц. Приняты следующие значения интенсивности отказов элементов 1 - 3 подсистем соответственно: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.0001$ 1/ч. Время использования системы по назначению составляет порядка пяти лет, т.е. около 44000 часов.

Используя выражения, определяющие вероятность нахождения системы в состояниях с различной производительностью, проследим динамику изменения этих параметров на протяжении всего времени эксплуатации системы (рис.1). На графиках символами **Pc(t), Qc(t), P**1(t) - P**12(t)** обозначены вероятность безотказной работы системы, вероятность ее полного отказа, вероятности нахождения в состояниях **s**1 - s**12** (согласно финальной матрице) соответственно. Учитывая, что в реальных системах возможно существование большого числа состояний незначительно отличающихся по уровню качества, то целесообразно их объединение в группы, характеризующиеся заданным уровнем близости значений показателя. В рассматриваемом примере двенадцать состояний с допустимыми уровнями качества объединены в три группы по следующим диапазонам производительности: 90-100%; 70-90%; 50-70% от номинального значения (рис.2). Графики вероятности нахождения системы в этих группах состояний от времени **Pq1(t), Pq2(t) и Pq3(t)** представлены на рис.2.

Окончательные результаты проведенной оценки живучести оформляются в виде диаграммы деградации [5, 6] (рис.2), на которой различные уровни качества функционирования приведены в соответствие с наиболее вероятным временем перехода системы в различные состояния. Эта диаграмма в совокупности с оценками вероятностей работы системы в различных состояниях позволяет провести анализ живучести за весь период ее эксплуатации.

Заключение. Предложенная методика оценки живучести позволяет:

а) прогнозировать динамику изменения качества функционирования системы и оценивать вероятность нахождения в состояниях с различным уровнем качества для фиксированного момента времени;

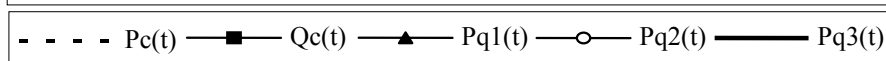
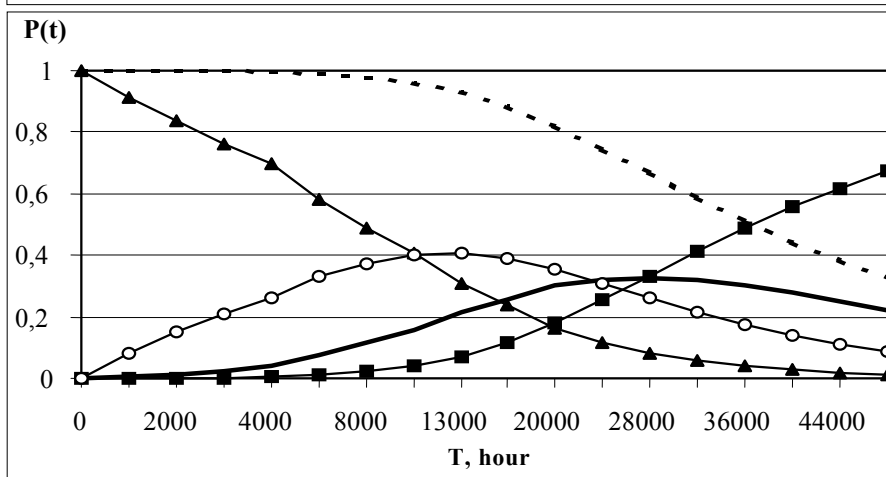
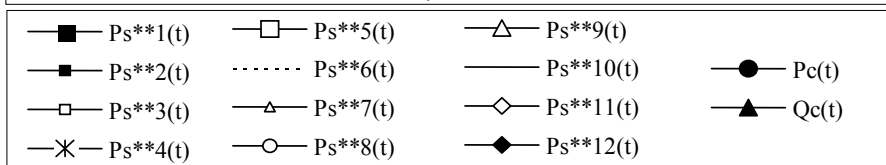
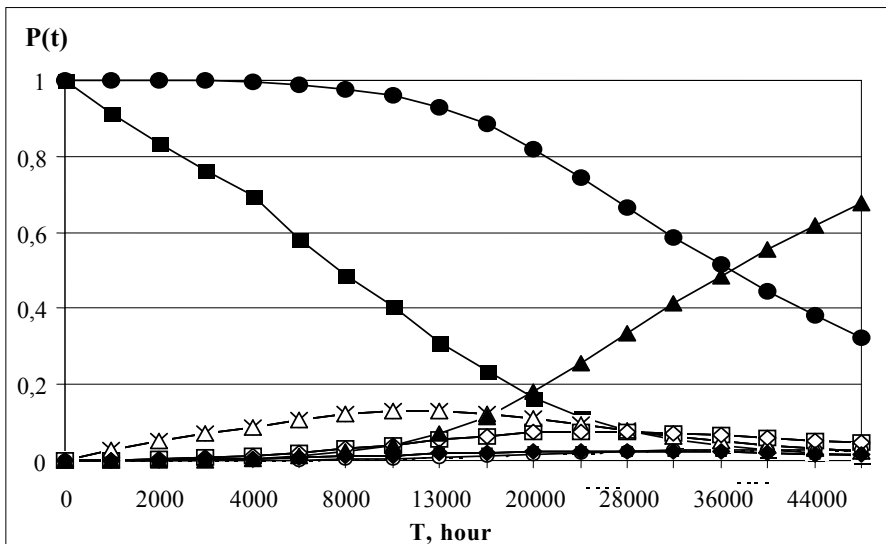


Рис.1. Графики зависимости вероятности нахождения системы в различных группах состояний, ВБР и вероятности отказа от времени функционирования

б) получать оперативную информацию об ожидаемых изменениях в системе после перехода ее в состояние с определенным уровнем качества функционирования вследствие отказов элементов.

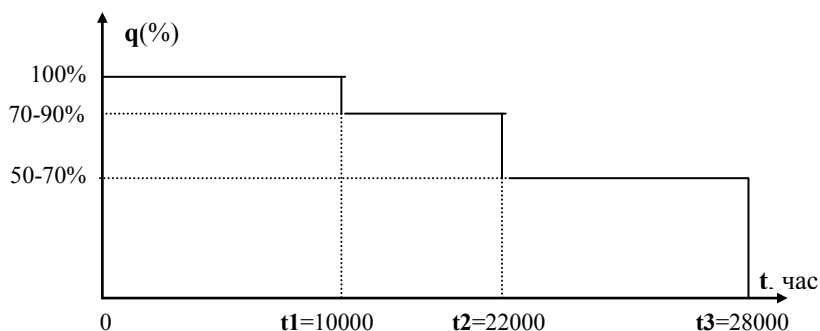


Рис.2. Диаграмма деградации

Подход к анализу систем на основе Д - матриц может быть развит для применения в задачах оценки безопасности СУ. Для этого диаграммы деградации и Д - матрицы должны учитывать условия перехода системы в критические(опасные) состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А.Г. Додонов и др. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.
2. Раков В.И. Эффективность судовых радиоэлектронных систем. – Л.: Судостроение, 1974. – 328 с.
3. Теорія надійності та живучості елементів і систем літальних комплексів. Підручник / За ред. В.С. Харченка. – Харків : МО України, 1997. – 503 с.
4. Харченко В.С., Черепяхин Д.А., Сидоренко Н.Ф. Оценка безопасности транспортных систем управления, допускающих снижение качества функционирования // ИКСЗТ. – 2000. – №4 (25). – С. 97 - 98.
5. Харченко В.С. Анализ и синтез живучих систем управления с использованием диаграмм деградации // Системи обробки інформації. – Харків : НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 1999. – №2(6). – С.115 - 119.
6. Kharchenko V.S. Probabilistic Assessment of Survivability and Safety of Unmanned Control Systems with Multistage Degradation by the Use of QD-diagrams // Proceeding of International Conference PSAM'5, vol.1, Osaka, Japan, November 27 - 30, 2000. - pp. 525 - 531.

Поступила в редколлегию 5.02.2001