Нечеткая оценка функциональной живучести технической системы

В. В. Виноградов
ГУАП (Санкт-Петербург)

З. И. Абдулаева, А. Д. Шматко
СЗГМУ им. И.И. Мечникова (Санкт-Петербург)

***Abstract*. Purpose: To propose a fuzzy model for assessing the functional survivability of a technical system, with structural redundancy, a time reserve and resistance, which is provided by means of ensuring survivability. Method: The report uses: Bernoulli's independent testing scheme, fuzzy model of element's resistance, fuzzy time reserve for system restoration from failure. Result: The estimation of the survival probability of the system in the form of a fuzzy number of any kind is obtained. The risk is assessed that the probability of survival will be lower than the tech requirements for the system. The possibility that the time reserve, which the system possesses, is not enough for carrying out the restoration measures is estimated. Conclusions: The evaluation of the functional survivability of a technical system can be performed by the joint application of probabilistic and fuzzy-logical descriptions.**

Keywords: tech system; functional survivability; time reserve; resistance; redundancy; means of ensuring survivability (MES); survival probability; risk

Под функциональной живучестью в докладе понимается [4], [5], [7], [8] способность технической системы и приданных ей средств обеспечения живучести (СОЖ) сохранять эффективность своего функционирования на минимально-приемлемом уровне в условиях неблагоприятных внешних воздействий (НВ) широкого спектра. В работах [3], [4], [8] активно применяются вероятностные описания для моделирования живучесть, однако применение вероятностных оценок в задачах этого класса требует специального подтверждения (отсутствует массовость и статистическая однородность событий, оценка формируется в условиях существенной информационной неопределенности).

Поэтому представляется целесообразным, для различных уровней неопределенности, применять в оценке живучести, наряду с вероятностными, иные оценочные подходы. В частности, доказали свою успешность усилия по гибридизации вероятностных и нечетко-логических моделей [10], [12], [6], [7].

В качестве примера для оценки живучести возьмём систему автономного энергоснабжения с равностойкими элементами, которые одновременно подвергаются однократному мощному НВ [4], [7]. В этом случае, вероятность выживания системы по функциональному критерию ε сразу после НВ оценивается по схеме независимых испытаний Бернулли:

$$Surv1\ (\varepsilon, g) = Prob\ \{Eff > \varepsilon \mid g\} = \\ = \sum_{u=0}^{N} F(u, \varepsilon) * p(g)^{N-u}(1-p(g))^{u} \qquad (1)$$

Здесь g – мощность НВ (в физических единицах), p(g) – вероятность того, что при воздействии силы g элемент системы сохранит свою работоспособность (уровень стойкости), N – число элементов системы, ε – минимально допустимый уровень эффективности функционирования системы, в процентах от максимума, Eff – нечеткая случайная величина эффективности системы сразу после НВ, F(u, ε) – число функционально работоспособных состояний системы при условии наличия в системе ровно u отказавших (пораженных) элементов.

Формула (1) весьма напоминает классическую формулу Шеннона [9] для вероятности безотказной работы невосстанавливаемой системы с однородными элементами. Объяснение этому сходству простое: в обоих случаях все элементы системы одновременно погружаются в условия независимых испытаний, поэтому распределение числа отказавших элементов оказывается биномиальным.

Параметр Eff является нечеткой случайной величиной, т.е. определен как в вероятностном, так и в возможностном пространствах. В свою очередь, Surv1 – это вероятность, поскольку она вычисляется по схеме Бернулли. Но она же и возможность, поскольку модель стойкости элемента, наряду с параметрами, подтвержденными в ходе испытаний, содержит экспертные сведения о возможности сохранения элементом работоспособности в условиях НВ мощностью g. В частном случае, вероятность p(*) можно рассматривать как характеристику случайной величины (такой подход предлагается в [3]). В более общем случае, p(*) может рассматриваться как нечеткое число произвольного вида, представляющее собой интеграл по вероятностной плотности распределения с нечеткими параметрами, определяемыми экспертно (например, по схеме из [3]).

Если техническая часть системы полностью вышла из строя по результатам НВ, то сохраняется надежда на выживание системы за счёт дополнительных аспектов, например, резерва времени. Например, если повреждена система магистральных трубопроводов, но уцелели подземные хранилища газа, потребители могут запитываться какое-то время из этих хранилищ, пока регулярное снабжение энергоресурсами не будет восстановлено. Аналогичным образом, естественная способность зданий аккумулировать и сохранять тепло, формирует резерв времени для систем теплоснабжения [5]. В общем случае необходимо, в интересах обеспечения живучести системы, чтобы резерв времени tд (нечеткая величина) оказался больше ожидаемого времени восстановления tв (нечеткая величина):

$$Surv2 = Poss\ \{t\partial > tв \mid НВ\}. \tag{2}$$

В работе [10] предложен алгоритм парного сравнения двух унимодальных нечетких чисел, на выходе которого вычисляется возможность того, что фактические значения этих чисел после НВ будут удовлетворять условию из соотношения (2). В задаче оценки живучести указанный подход применен в работе [7].

Результирующая вероятность выживания системы, исходя из (1) и (2), может быть определена по формуле полной вероятности:

$$Surv = Surv1 + (1\text{-}Surv1) * Surv2 \tag{3}$$

В формуле (3) Surv – это нечеткая величина произвольного вида, которую целесообразно сравнить со скалярным нормативным значением L и определить риск того, что вероятность выживания опустится ниже своего нормативного значения:

$$Risk = Poss\ \{Surv < L \mid НВ\} \tag{4}$$

Выражение (4) оценивается с применением разбиения нечеткого числа Surv на горизонтальные сегментные интервалы принадлежности, с оценкой локального уровня риска для каждого интервала (этот подход подробно излагается в [1]).

В заключение отметим, что совместное применение нечетких и вероятностных описаний при моделировании живучести снимает большую часть вопросов, которые возникают при использовании каждого из способов моделирования по отдельности.

Список литературы

[1] Абдулаева З.И., Недосекин А.О. Стратегический анализ инновационных рисков. СПб: СПбГПУ, 2013. 150 с.

[2] Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечётких моделей. Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.

[3] Грачев С. Е Вероятностная теория стойкости элемента // В кн.: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 46. Л., ВИСИ, 1993. С. 11–22.

[4] Недосекин А.О. Концепция оценки живучести автономного энергоисточника // В кн.: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 46. Л., ВИСИ, 1993. С. 5–11.

[5] Недосекин А.О., Смирнов А.В. Вероятностный анализ живучести системы теплоснабжения // Энергетическое строительство. 1992. №11. С. 24–28.

[6] Недосекин А.О., Макаренко Д.П. Абдулаева З.И. Нечетко-вероятностная модель для оценки рисков ответственных технических систем // Информация и космос. 2018. С. 92–99.

[7] Недосекин А.О., Макаренко Д.П., Виноградов В.В. Нечетко-множественная оценка функциональной живучести комбинированной системы холодоснабжения с резервом времени // Мягкие вычисления и измерения. 2018. В печати.

[8] Черкесов Г.Н., Недосекин А.О. Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многоразовых воздействиях высокой точности // Надежность. 2016. № 2. С. 3–15.

[9] Шеннон К. Надежные схемы из ненадежных реле // В кн.: Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. С. 114–153.

[10] Abdoulaeva Z.I., Kurbanbaeva D.F., Topuzov M.E.Application of the matrix aggregate computer (MAV) in problems of forecasting disease recommendations // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017.

[11] Nedosekin A., Kokosh A. Investment risk estimation for arbitrary fuzzy factors of the investment project // In: Fuzzy sets and soft computing in economy and finance (ed. by I. Z. Batyrshin). – Saint-Petersburg, 2004. Vol. 2. P.P. 423–437. Also available on www.twirpx.com.

[12] Puri M.D., Ralescu D.A. Fuzzy Random Variables // J. Math. Anal. App. 1986. v. 114. pp. 409–422.