

УДК 65.018.2

УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕДУРЫ FMEA-АНАЛИЗА

© 2021 Ю.С. Клочков¹, Г.А. Фокин¹, О.В. Сыровацкий²

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Газпром межрегионгаз инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 16.11.2021

В статье приводятся результаты развития FMEA-анализа, основанные на интеграции теорий неопределенностей и анализа видов и последствий потенциальных несоответствий. Даются рекомендации по работе экспертной группы в зависимости от конкретной ситуации с неопределенностью. Кроме того, для решения выбора корректирующих мероприятий применен подход сверстки результатов работы экспертной группы к однокритериальной задаче управления рисками.

Ключевые слова: неопределенность, FMEA, однокритериальная задача.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-26-32

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, FMEA-анализ нацелен на количественную оценку риска возникновения видов и последствий потенциальных несоответствий. При этом используется статистически-экспертный метод оценки состояния рассматриваемой системы. В качестве статистической оценки чаще всего выступает анализ возможности возникновения несоответствия, причины или последствия. В качестве экспертной – анализ значимости последствия несоответствия или причины, а также возможности обнаружения несоответствия или причины (зависит от принятой модели оценки риска) [2-9].

Согласно научным теориям, можно выделить следующие типы неопределенностей, возникающие при проведении FMEA-анализа:

- неопределённость среды (1-го рода). Оценивается соотношением между количеством информации о рассматриваемой системе, и уровнем уверенности в достоверности этой информации. То есть между количеством и качеством информации о рассматриваемой системе;

- неопределённость принятия решений (2-го рода). Описывается вероятностью реализации принятого решения. По результатам FMEA разрабатывают корректирующие мероприятия, вероятность реализации которых не равна единице;

- неопределённость последствий принятых решений (3-го рода). Состояние системы динамично и реализация одного утвержденного

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, и.о. проректора по научно-организационной деятельности СПбПУ. E-mail: y.kloch@gmail.com

Фокин Георгий Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Газотурбинные агрегаты для газоперекачивающих станций».

Сыровацкий Олег Валерьевич, начальник научно-образовательного центра ООО «Газпром межрегионгаз инжиниринг». E-mail: sov708@yandex.ru

мероприятия приведет к необходимости пересмотра всего FMEA, так как оценки рисков изменятся. Кроме того, после расчета приоритетного числа риска очень часто команды приходят к необходимости еще раз проверить проведенный анализ, так как возникает расхождение между экспертным пониманием как значимости последствий, так и общей модели действующих рисков в системе и результатами расчетов, что является действием неопределенности последствий принятых решений о баллах, указанных в картах и таблицах FMEA;

- вариационная неопределённость (4-го рода). Вариационная неопределённость связана с изменением параметров и условий функционирования системы – неопределённости формирования новых квазиусловий, иными словами изменчивость. За время проведения FMEA система меняется, сам сбор информации о системе, особенно понимая, что в ней задействован персонал, приводит к изменениям. Фактические FMEA рассчитан на анализ стационарных систем и необходимо учитывать этот недостаток.

1 НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕДУРЫ FMEA-АНАЛИЗА

Неопределенность как мера информации. Представляет собой информационную энтропию известную по работам Хартли, Шенона и других. В нашем случае показывает непредсказуемость появления какого-либо риска или его причины, а также возникновением конкретного последствия, так как имеют место быть системы, в которых риск и/или его причина могут привести к нескольким последствиям с определенной долей вероятности.

Неопределенность как уровень информированности. Описывает состояние разрыва, когда

между фактическим уровнем «информированности» (знаний о рассматриваемой системе) и самой системой существует неопределенность. Как известно, решение этой проблемы при проведении FMEA заключается в сборе адекватной команды экспертов, которые могут охарактеризовать поведение рассматриваемой системы на всех стадиях жизненного цикла.

Неопределенность как необходимость выбора. Основная проблематика данного вида неопределенности связана с тем, что установить четкие критерии оптимальности и эффективности корректирующих мероприятий достаточно сложно. Т.е. возникает необходимость в разработке такой процедуры FMEA, которая предусматривает альтернативные варианты корректирующих мероприятий.

Неопределенность качества информации. Под качество информации имеется в виду такие ее показатели как:

- надежность,
- достоверность,
- полнота,
- ценность,
- актуальность,
- ясность.

Оценка информации с точки зрения неопределенности основана на актуальности и достоверности сведений, данных, их полноте и объективности. Кроме того, качество информации в данном случае может быть выражено через информационную асимметрию, то есть неравномерное распределение знаний о системе среди экспертов, что является нормальным явлением. Если информационная асимметрия выступает в роли побуждающей к профессиональному диалогу и выработке адекватных корректирующих мероприятий, то «симметрии заблуждений» (состояние при котором эксперты в равной степени используют недостоверную, неполную, ненадежную и т.д. информацию или базу знаний) приводит к выработке мало эффективных решений, а в итоге ставит под сомнение целесообразность самого FMEA-анализа.

Неопределенность как источник риска. Риск находится в сложной зависимости от неопределенности, то есть при росте неопределенности возрастает и риск. Величина прироста будет меняться и зависит от такого понятия как «эластичность рисков». Неопределенность может выступать прямым источником риска.

Неопределенность как неоднозначность реализации событий. Решения принимаются в условиях неопределенности, оценить вероятность потенциальных результатов невозможно.

Неопределенность как мера управляемости и стабильности системы. Одной из проявлений неопределенности системы является ее самоорганизованность. В тех случаях, когда вектор самоорга-

низации системы сонаправлен с общим вектором развития, то можно говорить о высоком уровне управляемости системы, в тех случаях, когда имеют место несовпадения векторов (например, в системе возникают субъекты, чьи интересы связаны с несанкционированным отбором газа), то система резко теряет управляемость.

2 МЕТОДИКА СВЕДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ FMEA-АНАЛИЗА К ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНА КОРРЕКТИРУЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

В результате работы с экспертной группой при реализации процедуры FMEA возникает набор альтернативных корректирующих мероприятий и наступает момент выбора. Для каждой альтернативы известны затраты на ее внедрение, а также предлагается выявить связь между конкретным корректирующим мероприятием и рассмотренными несоответствиями, а также их причинами [1]. Тогда примем за D_{ij} величину, на которую будет снижено приоритетное число риска, где i характеризует конкретное корректирующее мероприятие, а j – новое состояние системы со своим набором рисков. Исходную информацию для выбора альтернативы можно представить в виде таблицы 2.

Обозначим через a_{ij} степень влияния конкретного корректирующего мероприятия на приоритетное число риска от конкретного несоответствия:

$$a_{ij} = 100\% \frac{D_{ij} - I_i}{I_i}.$$

Так как в данном выражении величины D_{ij} и I_i имеют разные размерности, то необходимо выполнить соответствующие преобразования. I_i измеряется в рублях и фактически не имеет ограничений сверху, но не может меньше 0. D_{ij} характеризует величину конкретного приоритетного числа риска, поэтому изменяется от 1 до 1000 (в случае, когда выбрана шкала от 1 до 10 при оценке). Поэтому необходимо установить связь между единицей затрат на корректирующие мероприятия и величиной снижения риска. Фактически нужно ответить на вопрос какой допустимый уровень денежных вложений на единицу риска. Можно поступить проще проранжировав все затраты от 1 до 1000.

Но и этого будет недостаточно. Так как D_{ij} представлено конкретной величиной риска, точнее приоритетного числа риска, то возникает следующая проблема: по данной формуле расчета получается, что соотносятся конкретная величина риска и затраты на корректирующее мероприятие (выраженные в единицах от 1 до 1000), что не позволяет сопоставить сколько организация тратит на снижение риска. То есть D_{ij} должно быть представлено не конкретной

Таблица 1 – Рекомендации по улучшению процедуры FMEA, основанные на анализе неопределенностей

№	Неопределенности при проведении процедуры FMEA	Положительные стороны	Отрицательные проявления	Механизм обнаружения	Рекомендации по улучшению процедуры FMEA
1.	Неопределенность как мера информации	Само проведение FMEA-анализа становится системой мероприятий	Несоответствия, их причины и последствия взаимозависимы. Любое изменение в виде сбора информации, введения корректирующих мероприятий приводит к изменению состояния системы и требует повторного проведения процедуры FMEA.	При определении баллов (для расчета ПЧР) возникают несколько верных вариантов, значительно отличающихся результатами расчета ПЧР и зависящими от состояния рассматриваемой системы	Применение современных методов к FMEA, учет зависимых событий
2.	Неопределенность как уровень информированности	–	Слабый уровень понимания экспертами рассматриваемой системы	Карта процесса FMEA заполняется с трудом, имеет незначительный перечень рисков, причин и последствий	Смена состава экспертов
3.	Неопределенность как необходимость выбора	Наличие выбора корректирующих мероприятий	Отсутствие ресурсов для реализации альтернативных схем решения	Эксперты предлагают несколько вариантов решений одной проблемы	Предложение карты процесса FMEA, позволяющей описать альтернативные варианты корректирующих мероприятий
4.	Неопределенность качества информации	Информационная асимметрия	Возможны конфликты в группах экспертов	Эксперты представляют различные группы (разработчики, технологи, потребители и т.д.)	Следование имеющимся рекомендациям (фиксация всех мнений и т.д.)
		«Симметрия заблуждений»	Высокая вероятность мало результативных корректирующих мероприятий	Завышенный уровень согласованности экспертов между собой	Смена состава экспертов
5.	Неопределенность как источник риска	–	Невозможность принятия решений	Нехватка информации и знаний	Запрос дополнительной информации, консультации, применение процедур прогнозирования, деловых игр и т.д.
6.	Неопределенность как неоднозначность реализации событий	Позволяет комплексно подойти к проблеме улучшения новой анализируемой системы	Решения принимаются в условиях значительной неопределенности	Проводится анализ системы, которая обладает очень высокой новизной, фактически опыт и знания по ней еще не накоплены	Применение интерактивной модели FMEA, когда FMEA выступает в роли сборщика данных, оценки и построения базы знаний о новой системе
7.	Неопределенность как мера управляемости и стабильности системы	Есть вероятность самонастройки системы на результат	Существует вероятность дестабилизации системы	Статистически необъяснимые всплески вероятности возникновения несоответствий	Предусмотреть в корректирующих мероприятиях усложнение процедур контроля

Таблица 2 – Исходная информация для выбора альтернативных корректирующих мероприятий

Альтернативы корректирующих мероприятий	Стоимость внедрения корректирующего мероприятия	Будущие величины приоритетных чисел риска (по несоответствиям, причинам или последствиям)		
		1	...	n
X	I	D		
1	I_1	D_{11}	...	D_{1n}
...
m	I_m	D_{m1}	...	D_{mn}

величиной риска, а степень его снижения. Эту степень можно рассчитать либо за счет разницы приоритетных чисел риска до и после мероприятий (при чем значение ПЧР после мероприятий является прогнозным и обладает определенным уровнем неопределенности), либо за счет их отношений, то есть расчета доли.

Для того чтобы учесть важность риска и степень его снижения предлагается следующее. Известны расчеты приоритетного числа риска до внедрения мероприятий, так же даны прогнозные значения величин риска после внедрения корректирующих мероприятий. Введем понятие важности риска и приравняем его по соответствующей шкале к уровню изначального риска.

Предположим, что изначальный риск равный 1000 после корректирующих мероприятий будет равен 700, начальный риск равный 900 станет после корректирующих мероприятий 600 и так далее согласно таблице 3. Тогда рассчитаем d_{ij} – оценка изменений уровня риска после внедрения корректирующих мероприятий следующим образом:

$$d_{ij} = \frac{(ПЧР_{до} - ПЧР_{после}) \cdot B_p}{1000}$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 4.

В результате может возникнуть спорная ситуация, когда снижение риска с 1000 до 700 будет такой же значимой, как и снижение риска с 600 до 100. Это вызывает некоторые опасения, так как известно, что приоритетное число риска

равное 1000 говорит о высокой вероятности получения тяжелых травм и даже смерти персонала или пользователя, поэтому его снижение до 700 должно оставаться приоритетным при любых обстоятельствах. Следовательно, шкала значимости риска не может быть линейной.

Если предложить гиперболическую зависимость при определении шкалы важности риска, то результаты расчетов могут быть иными. Например, как приведено в таблице 5.

То есть необходимо установить важность риска, которая зависит от значения приоритетного числа риска до корректирующих мероприятий, при чем шкала важности должна быть нелинейной, чем выше уровень риска, тем выше уровень его важности.

Для учета затрат необходимо обладать информацией об объеме затрат на устранение последствий несоответствий до корректирующих мероприятий и после них. Это позволит рассчитать эффективность корректирующих мероприятий по уровню затрат, для этого следует воспользоваться следующей формулой:

$$КД_{эк.эфф.} = \frac{Z_{до} - Z_{после}}{Z_{p, макс}}$$

где $Z_{p, макс}$ – максимальное значение между разницей затрат до корректирующих мероприятий и после них (по всем запланированным мероприятиям);

$Z_{до}$ – значение затрат на устранение последствий несоответствий по конкретному риску;

Таблица 3 – значения ПЧР

Значения ПЧР до корректирующих мероприятий	Предлагаемая шкала важности риска	Пример ПЧР после внедрения изменений
$ПЧР_{до}$	B_p	$ПЧР_{после}$
1000	100	700
900	90	600
800	80	500
700	70	400
600	60	100
500	50	100
400	40	100
300	30	100
200	20	100
100	10	100
1	1	1

Таблица 4 – Результаты расчетов уровня риска после внедрения корректирующих мероприятий

Значения ПЧР до корректирующих мероприятий	Предлагаемая шкала важности риска	Пример ПЧР после внедрения изменений	Результаты расчетов
ПЧР _{до}	V_p	ПЧР _{после}	d_{ij}
1000	100	700	30
900	90	600	27
800	80	500	24
700	70	400	21
600	60	100	30
500	50	100	20
400	40	100	12
300	30	100	6
200	20	100	2
100	10	100	0
1	1	1	0

Таблица 5 – Результаты расчетов определения шкалы важности риска при гиперболической зависимости

Значения ПЧР до корректирующих мероприятий	Предлагаемая шкала важности риска	Пример ПЧР после внедрения изменений	Результаты расчетов
ПЧР _{до}	V_p	ПЧР _{после}	d_{ij}
1000	100	700	30
900	72,9	600	21,87
800	51,2	500	15,36
700	34,3	400	10,29
600	21,6	100	10,8
500	12,5	100	5
400	6,4	100	1,92
300	2,7	100	0,54
200	0,8	100	0,08
100	0,1	100	0
1	0,0001	1	0

$Z_{\text{после}}$ – ожидаемое значение затрат на устранение последствий несоответствий после плановых мероприятий.

Далее перемножая d_{ij} и $KD_{\text{эк.эфф.}}$, получаем численную характеристику эффективности корректирующих мероприятий, которая учитывает как изначальную величину риска и степень его снижения, так и объем необходимых средств для реализации запланированного корректирующего мероприятия. Диапазон изменений значений численной характеристики эффективности корректирующих мероприятий составит [0;100).

Далее для итогового выбора корректирующего мероприятия и составления плана внедрения можно воспользоваться принципом «минимаксного сожаления» [1]. Например, после указанных выше вычислений имеет таблицу 7.

Вычисляем максимум по каждому столбцу. Столбец характеризует влияние конкретной альтернативы корректирующего мероприятия

на приоритетное число риска конкретного несоответствия. За тем как показано в таблице ниже вычисляем максимум по строке [1].

После чего находим минимум из последнего столбца. Таким образом получается, что приоритетным корректирующим мероприятием будет мероприятие «б». Далее можно получить план внедрения корректирующих мероприятий. Сначала мероприятие «б», за тем «а» и так далее от минимального значения к максимальному.

ВЫВОДЫ ПО СТАТЬЕ

Применение научных теорий по неопределенности позволило разработать рекомендации по улучшению конкретной процедуры FMEA в зависимости от типов неопределенностей, а также установить их положительные и отрицательные стороны;

Таблица 6 – План корректирующих мероприятий

Альтернативы корректирующих мероприятий	Значения численной характеристики эффективности корректирующих мероприятий		
	1	...	n
<i>X</i>	<i>D</i>		
1	D_{11}	...	D_{1n}
...
m	D_{m1}	...	D_{mn}

Таблица 7 – Принцип «минимаксного сожаления»

Альтернативы корректирующих мероприятий	Значения численной характеристики эффективности корректирующих мероприятий					
	1	2	3	4	5	6
а	9,33	6,50	2,13	5,84	9,68	7,16
б	6,10	8,80	9,54	4,65	4,10	9,17
в	8,60	7,27	3,91	7,30	9,61	1,63
г	9,96	1,21	0,44	3,90	5,74	4,68
д	2,31	7,79	0,85	1,41	2,67	8,78
е	9,73	4,95	5,92	2,11	1,57	2,85
ж	3,84	1,59	7,50	3,46	2,65	9,38
з	1,32	4,47	2,23	2,98	5,92	7,71
и	0,87	4,23	9,61	3,75	1,40	7,40
к	1,25	9,15	4,13	7,07	3,40	3,85
л	7,90	8,21	1,30	3,75	5,32	7,81
максимум	9,96	9,15	9,61	7,30	9,68	9,38

Таблица 8 – Вычисление максимума

Альтернативы корректирующих мероприятий	Преобразованные значения численной характеристики эффективности корректирующих мероприятий						максимум
	1	2	3	4	5	6	
а	0,64	2,65	7,48	1,46	0,00	2,21	7,48
б	3,87	0,35	0,07	2,66	5,57	0,21	5,57
в	1,36	1,88	5,70	0,00	0,06	7,75	7,75
г	0,00	7,94	9,17	3,40	3,94	4,70	9,17
д	7,65	1,36	8,76	5,90	7,00	0,60	8,76
е	0,23	4,20	3,69	5,20	8,11	6,53	8,11
ж	6,12	7,56	2,11	3,84	7,02	0,00	7,56
з	8,65	4,68	7,38	4,32	3,76	1,66	8,65
и	9,10	4,92	0,00	3,55	8,27	1,98	9,10
к	8,71	0,00	5,48	0,23	6,28	5,53	8,71
л	2,06	0,94	8,31	3,55	4,35	1,56	8,31
минимум							5,57

Предложен метод выбора корректирующего мероприятия, из установленных экспертами, основанный на однокритериальной задаче, что

позволило повысить соответствие корректирующих мер цели FMEA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуковский, В. И. Риск в многокритериальных и конфликтных системах при неопределенности: монография / В. И. Жуковский, Л. В. Жуковская; В. И. Жуковский, Л. В. Жуковская; Междунар. науч.-исслед. ин-т проблем упр. – Москва: УРСС, 2004. – ISBN 5-354-00337-7.
2. Панюков, В. Н. Моделирование процедуры FMEA с ИТ-поддержкой в нотации BPMN / В. Н. Панюков, В. Н. Козловский, Д. В. Айдаров // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 12. – С. 28-35.
3. Панюков, Д. И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д. И. Панюков, В. Н. Козловский, Д. В. Айдаров // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 9. – С. 34-43.
4. Панюков, Д. И. Моделирование процедуры FMEA: методология и стратегия / Д. И. Панюков, В. Н. Козловский, Д. В. Айдаров // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 7. – С. 30-38.
5. Панюков, Д. И. Моделирование процедуры FMEA: структура и функции / Д. И. Панюков, В. Н. Козловский, Д. В. Айдаров // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 8. – С. 36-41.
6. Ahmadi, M., Behzadian, K., Ardeshir, A., & Kapelan, Z. (2017). Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(2), 300-310. doi:10.3846/13923730.2015.1068847
7. Alyami, H., Yang, Z., Riahi, R., Bonsall, S., & Wang, J. (2019). Advanced uncertainty modelling for container port risk analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 123, 411-421. doi:10.1016/j.aap.2016.08.007
8. Animah, I., & Shafiee, M. (2020). Application of risk analysis in the liquefied natural gas (LNG) sector: An overview. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63 doi:10.1016/j.jlp.2019.103980
9. Bao, J., Johansson, J., & Zhang, J. (2017). An occupational disease assessment of the mining industry's occupational health and safety management system based on FMEA and an improved AHP model. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1) doi:10.3390/su9010094

UNCERTAINTY-BASED FMEA-ANALYSIS PROCEDURE

© 2021 Yu.S. Klochkov¹, G.A. Fokin¹, O.V. Syrovatskiy²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

²LLC Gazprom Mezhregiongaz Engineering, St. Petersburg, Russia

The article presents the results of FMEA-analysis based on integrating uncertainty theories and process failure mode and effects analysis. We provide guidelines for expert groups depending on actual cases with uncertainty. Moreover, for decision-making in terms of remedial actions, we applied convolution approach to the results of the expert group evaluation to reduce it to a single-objective problem of risk management.

Keywords: uncertainty, FMEA, single-objective problem

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-6-26-32

Yury Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Vice-Rector for Scientific-Organizational Activities of SPbPU. E-mail: y.kloch@gmail.com

Georgy Fokin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Head of the Department «Gas Turbine Units for Gas Pumping Stations».

Oleg Syrovatskiy, Head of Academic Center of LLC Gazprom Mezhregiongaz Engineering. E-mail: sov708@yandex.ru