

Выбор сетевых структур трубопроводных систем стойких к развитию смешанного повреждения

Игорь А. Тарарычкин, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск
donbass_8888@mail.ru



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Системы трубопроводного транспорта используют при доставке потребителям различных веществ, материалов, в том числе и необходимых для поддержания непрерывных производственных процессов. Функционирование таких сложных промышленных объектов связано с определенными рисками и возможностью отказа по различным причинам отдельных узлов и агрегатов. Рассмотрены особенности поведения систем трубопроводного транспорта при возникновении нештатных ситуаций. Развитие таких процессов может стать причиной отключения от источника некоторой части или всех потребителей целевого продукта. Процесс повреждения может происходить в соответствии со следующими механизмами: прогрессирующее повреждение, когда отдельные трубопроводы системы переходят в состояние неработоспособности случайным образом; прогрессирующая блокировка, когда в случайном порядке становятся неработоспособными отдельные транспортные узлы. Сценарий развития аварийной ситуации, при котором в системе возникают как процессы прогрессирующего повреждения линейных элементов, так и блокировки транспортных узлов, называется смешанным повреждением. **Целью работы** является разработка критериев оценки стойкости трубопроводных транспортных систем к смешанному повреждению, а также методов решения типовых задач синтеза сетевых структур, стойких к развитию этого процесса. **Методы исследования.** Способность конкретной системы противостоять развитию смешанного повреждения зависит от ее сетевой структуры и устанавливается с использованием метода имитационного моделирования. Структурные изменения при развитии смешанного повреждения описываются циклограммой, параметры которой указывают количество поврежденных линейных и заблокированных точечных элементов в течение одного цикла воздействия на систему. Сравнение способности сетевых структур противостоять развитию смешанного повреждения возможно только при условии их сопоставимости. Для этого анализируемые системы должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов, а также потребителей целевого продукта. Кроме того, все эти системы должны быть подвергнуты смешанному повреждению с одинаковой циклограммой. **Результаты.** При моделировании процедуры смешанного повреждения определялись такие характеристики процесса как средняя доля линейных элементов системы, повреждение которых приводит к разрыву связи всех потребителей с источником, а также средняя доля узлов, блокировка которых приводит к полному отключению от источника всех потребителей. Разработанный метод оценки стойкости систем к развитию смешанного повреждения позволяет решать следующие практические задачи структурного синтеза: выбор положения источника целевого продукта на заданной сети; выбор места расположения в действующей системе новых потребителей; определение мест присоединения к системе дополнительных технологических фрагментов; выбор присоединительных линейных элементов при подключении к транспортной системе фрагментов расширения. **Выводы.** Смешанное повреждение является опасным сценарием развития аварии и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем. Различные сетевые структуры обладают разной способностью противостоять смешанному повреждению, а характеристики их стойкости следует устанавливать при помощи метода имитационного компьютерного моделирования. Сравнение характеристик стойкости к смешанному повреждению возможно только для сопоставимых сетевых структур, имеющих в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, одинаковой должна быть и используемая циклограмма процесса смешанного повреждения.

Ключевые слова: трубопровод; система; структура; повреждение; сеть; авария; стойкость.

Для цитирования: Тарарычкин И.А. Выбор сетевых структур трубопроводных систем стойких к развитию смешанного повреждения // Надежность. 2020. № 2. С. 12-17. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-12-17>

Поступила 02.01.2020 г. / После доработки 21.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Системы трубопроводного транспорта используют при доставке потребителям различных веществ, материалов, в том числе и необходимых для поддержания непрерывных производственных процессов [1–7].

Функционирование таких сложных промышленных объектов связано с определенными рисками и возможностью отказа по различным причинам технологических узлов и агрегатов [8–11]. В некоторых случаях переход в состояние неработоспособности линейных элементов (трубопроводов) не приводит к заметному ограничению функциональных возможностей системы из-за наличия избыточных связей и альтернативных путей доставки целевого продукта.

Если же в результате внутренних или внешних воздействий в системе происходит последовательный переход в состояние неработоспособности части структурных элементов, то такое развитие аварийной ситуации может привести к отключению от источника сначала некоторых, а затем и всех потребителей целевого продукта. Случайный переход в состояние неработоспособности некоторой совокупности линейных элементов системы называется прогрессирующим повреждением [12, 13].

Переход в состояние неработоспособности отдельного транспортного узла приводит к тому, что прохождение через него транспортных потоков оказывается невозможным, и такой точечный элемент системы оказывается заблокированным. Последовательная блокировка точечных элементов системы в случайном порядке называется в дальнейшем прогрессирующей блокировкой [14, 15].

Если при развитии аварийной ситуации одновременно протекают как процессы прогрессирующего повреждения линейных элементов, так и блокировки транспортных узлов, то такая схема воздействия на систему рассматривается как смешанное повреждение.

Развитие смешанного повреждения связано с быстрой деградацией транспортных возможностей системы, однако, в технической литературе отсутствуют данные о закономерностях этого процесса, а также о методах оценки способности систем противостоять его развитию.

Целью настоящей работы является разработка критериев оценки стойкости трубопроводных транспортных систем к смешанному повреждению, а также методов решения типовых задач синтеза сетевых структур стойких к развитию этого процесса.

Смешанное повреждение характеризуется циклограммой $T(\alpha, \beta)$. Параметры α и β указывают количество последовательно повреждаемых линейных элементов и блокируемых транспортных узлов в течение одного цикла воздействия на систему. При заданной циклограмме смешанного повреждения для каждого момента системного времени можно однозначно указать количество работоспособных структурных элементов анализируемого сетевого объекта.

С использованием метода имитационного компьютерного моделирования [16, 17] определялись следующие характеристики стойкости анализируемого сетевого объекта:

1. Средняя доля линейных элементов системы Φ_{EL} , повреждение которых приводит к разрыву связи источника со всеми потребителями целевого продукта.

2. Средняя доля транспортных узлов Φ_{UZ} , при блокировке которых в условиях смешанного повреждения происходит разрыв связей источника со всеми потребителями целевого продукта.

Все необходимые расчеты выполнялись при помощи вычислительной системы MathCAD [18, 19]. Перечисленные характеристики следует рассматривать, как проекции на координатные оси вектора $\vec{\Phi}^*$, позволяющего оценить способность системы противостоять развитию смешанного повреждения.

Модуль этого вектора $|\vec{\Phi}^*| = \sqrt{\Phi_{EL}^2 + \Phi_{UZ}^2}$ характеризует в целом стойкость анализируемой сетевой структуры [20]. Чем больше значение $|\vec{\Phi}^*|$, тем большей стойкостью к смешанному повреждению обладает рассматриваемый объект. С практической точки зрения ценность указанных характеристик заключается в том, что они позволяют выполнять сравнительный анализ стойкости различных сетевых объектов.

Однако корректное сравнение значений Φ_{EL} , Φ_{UZ} и $|\vec{\Phi}^*|$ возможно только в отношении сопоставимых структур. Для этого они должны иметь в своем составе одинаковое количество:

- линейных элементов;
- транспортных узлов;
- потребителей целевого продукта.

Кроме того, условия повреждения анализируемых сетевых структур должны быть подобными, т.е. описываться одной циклограммой повреждения $T(\alpha, \beta)$.

По результатам проведенной серии вычислительных экспериментов установлено, что соотношение показателей стойкости совокупности сопоставимых сетевых структур не зависит от принятой циклограммы повреждения, а определяется имеющимся набором внутрисистемных связей. Это означает, что для произвольного набора сопоставимых сетевых объектов соотношение их стойкости не зависит от конкретных условий реализации процедуры смешанного повреждения.

Тогда при оценке соотношения стойкости ряда сопоставимых сетевых структур достаточно в условиях тестового воздействия с характеристиками $\alpha = \beta = 1$ определить соответствующие значения $|\vec{\Phi}^*|$. Упорядочение указанных структур с точки зрения их стойкости к смешанному повреждению производится таким образом, что более стойким системам соответствуют и большие значения $|\vec{\Phi}^*|$.

Отметим, что в случае тестового воздействия с циклограммой $T(1,1)$ имеет место последовательное чередование случайного повреждения одного линейного элемента и блокировка одного транспортного узла системы. Именно такая схема воздействия и используется в дальнейшем при сравнительной оценке способности сопоставимых сетевых структур противостоять развитию процесса смешанного повреждения.

Типовые задачи структурного синтеза трубопроводных систем стойких к развитию смешанного повреждения

Изучение особенностей поведения сетевых структур в условиях смешанного повреждения представляет практический интерес. Эти особенности следует учитывать при решении задач структурного анализа и синтеза трубопроводных систем различного уровня сложности и назначения. При этом оценку свойств альтернативных сетевых структур и принятие проектных решений необходимо выполнять с учетом установленных требований по их сопоставимости. Рассмотрим некоторые типовые проектные задачи, а также методы их решения.

Выбор положения источника целевого продукта на заданной сети

Постановка задачи. На заданной структуре сети с известным положением потребителей требуется установить расположение источника целевого продукта, при котором достигается наибольший уровень стойкости системы к смешанному повреждению. Задача структурного синтеза решается в этом случае путем

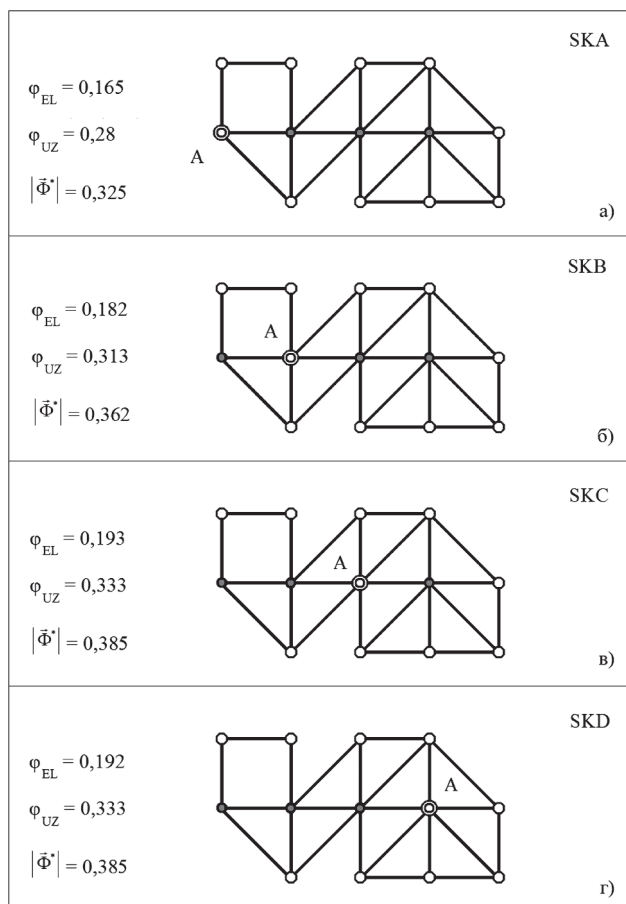


Рис. 1. Структурные схемы трубопроводных систем SKA (а), ..., SKD (г) с различным расположением источника целевого продукта А

сравнения значений $|\bar{\Phi}^*|$ у сетевых объектов с разным расположением источника.

Рассмотрим альтернативные варианты сетевых структур с условным обозначением SKA, ..., SKD, показанные на рис. 1. Они характеризуются разным положением источника А, и содержат по 13 узлов, 23 линейных элемента и 9 потребителей продукта. Каждая из указанных структур при выполнении расчетов подвергалась смешанному повреждению с циклограммой $T(1.1)$.

В этих условиях все перечисленные системы являются сопоставимыми, а сравнение соответствующих значений $|\bar{\Phi}^*|$ оказывается корректным. Результаты расчетов, полученные для выборок объемом 10^4 элементов, приведены на рис. 1.

Видно, что наихудший вариант расположения источника соответствует структурной схеме SKA, а наибольшее значение $|\bar{\Phi}^*|$ наблюдается в случае использования схем SKC и SKD.

При этом стойкость трубопроводных систем построенных на основе структурных схем SKC и SKD оказывается одинаковой. Таким образом, при решении поставленной задачи выбор следует сделать между этими структурными схемами. Окончательное решение в данном случае зависит от дополнительных условий или ограничений, учитывающих, например, возможную стоимость практической реализации каждого из этих двух вариантов.

Выбор расположения в действующей системе новых потребителей целевого продукта

Постановка задачи. В системе с известным расположением источника и нескольких потребителей целевого продукта требуется определить положение дополнительных потребителей, при котором обеспечивается наиболее высокий уровень ее стойкости к смешанному повреждению.

На рис. 2 показаны варианты формирования сетевой структуры с источником А и дополнительными потребителями целевого продукта В, С и D которые планируется включить в состав системы.

Отличия указанных вариантов связаны с различным положением этих потребителей в сети. Необходимо выполнить анализ и принять решение по выбору сетевой структуры с наиболее высоким уровнем стойкости к смешанному повреждению.

Оценим сопоставимость структурных схем, показанных на рис. 2. Все они имеют в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта. В случае смешанного повреждения этих структур с циклограммой $T(1.1)$ соответствующие значения показателей стойкости можно корректно сравнивать между собой.

Установленные в результате имитационного моделирования значения характеристик стойкости для выборок

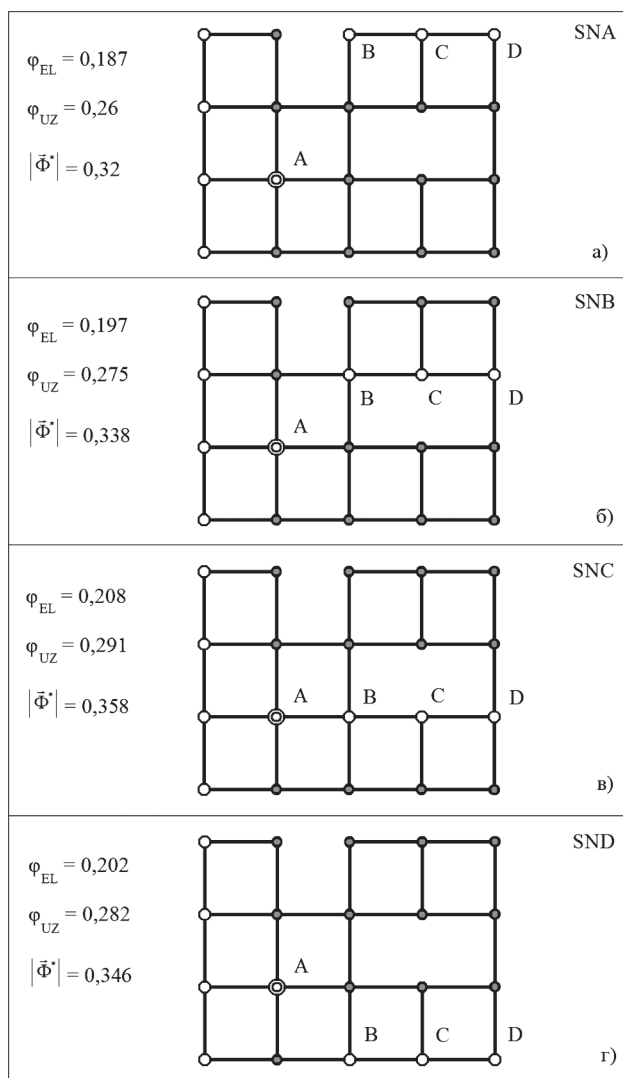


Рис. 2. Структурные схемы трубопроводных систем SNA (а), ..., SND (г) с различным расположением потребителей продукта В, С, D

объемом 10^4 элементов приведены на рис. 2. Видно, что структура с условным обозначением SNC характеризуется наиболее высоким уровнем стойкости к развитию процесса смешанного повреждения. Значение $|\vec{\Phi}^*|$ у такого сетевого объекта превышает соответствующее значение у структуры SNA с наихудшими свойствами примерно в 1,12 раза.

Таким образом, сетевой объект с обозначением SNC и следует рассматривать как результат решения поставленной задачи структурного синтеза.

Выбор места присоединения к действующей системе дополнительного технологического фрагмента

Постановка задачи. Планируемая реконструкция трубопроводной системы связана с расширением ее технологических возможностей и включением дополнительного фрагмента с несколькими потребителями продукта. При этом существует несколько вариантов такого присоединения. Требуется выбрать вариант, при котором достигается наиболее высокий уровень стойкости трубопроводной системы к смешанному повреждению.

Пример структурной схемы трубопроводной системы и соответствующий фрагмент расширения показаны на рис. 3. В составе фрагмента имеются потребители В, ..., G, которые связаны между собой и могут быть присоединены к исходной системе с образованием сетевых структур SFA и SFB (рис. 4).

С точки зрения технологических возможностей вновь образованной системы все указанные варианты присоединения являются равнозначными. Требуется оценить стойкость SFA и SFB к развитию процесса смешанного повреждения, а также выбрать наилучший вариант присоединения к системе фрагмента расширения.

На первом этапе анализа требуется установить, являются ли перечисленные сетевые объекты сопоставимыми. В данном случае ответ будет положительным, поскольку у них совпадает количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, анализируемые объекты в дальнейшем подвергается смешанному повреждению с одинаковой циклограммой $T(1.1)$. Установленные значения $|\vec{\Phi}^*|$ приведены на рис. 4.

Поскольку при выполнении процедуры имитационного моделирования использовались выборки объемом 10^4 элементов, то полученные расчетные значения имеют 2 значащие цифры после запятой. Это означает, что стойкость к смешанному повреждению у сетевых структур

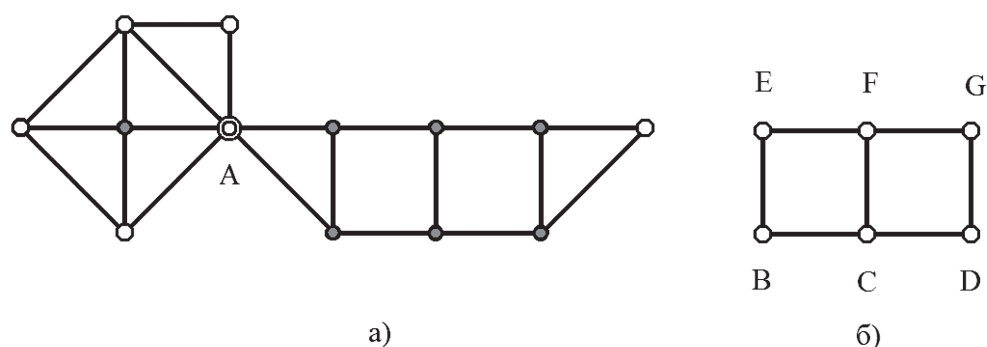


Рис. 3. Структурная схема трубопроводной системы (а) и фрагмент расширения с 6-ю потребителями целевого продукта (б)

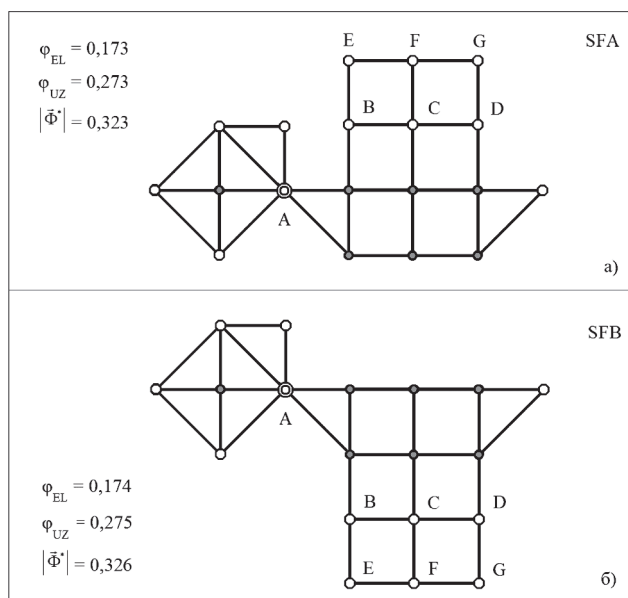


Рис 4. Структурные схемы трубопроводных систем SFA (а) и SFB (б) соответствующие различным вариантам присоединения фрагмента расширения

SFA и SFB оказывается одинаковой. В этих условиях окончательный выбор должен быть сделан с учетом дополнительных критериев, например, по результатам оценки стоимости монтажных работ.

Выбор присоединительных трубопроводов при подключении к транспортной системе фрагмента расширения

Постановка задачи. Реконструкция трубопроводной транспортной системы связана с присоединением фрагмента, в составе которого предусмотрено наличие нескольких потребителей целевого продукта. Для заданного количества дополнительных трубопроводов требуется выбрать места их подсоединения к системе

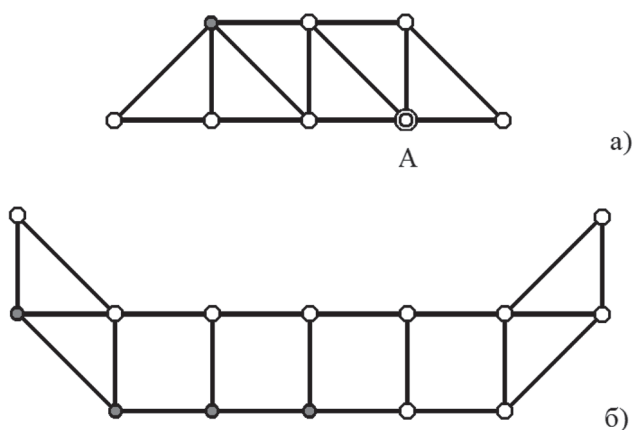


Рис. 5. Структурная схема трубопроводной транспортной системы с источником А и 6-ю потребителями продукта (а), а также схема подключаемого фрагмента расширения с 10-ю потребителями (б)

и фрагменту. Образованная таким образом сетевая структура должна иметь высокий уровень стойкости к развитию процесса смешанного повреждения.

Рассмотрим в этой связи задачу подключения к системе фрагмента расширения, в составе которого имеется 10 потребителей целевого продукта (рис. 5).

Присоединение должно быть выполнено при помощи 4-х дополнительных трубопроводов. На рис. 6 показаны допустимые варианты присоединения, обеспечивающие возможность достижения целей реконструкции. При этом требуется установить, какой из рассмотренных вариантов обеспечивает наибольшую стойкость системы к смешанному повреждению. Оценим сопоставимость сетевых структур SOA, ..., SOD показанных на рис. 6.

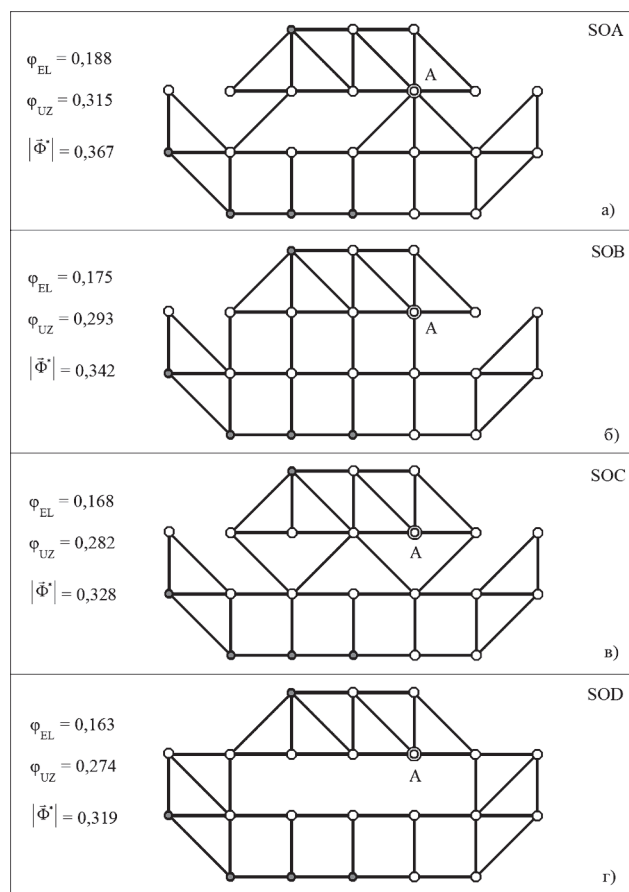


Рис. 6. Структурные схемы трубопроводных систем SOA (а), ..., SOD (г) с различными вариантами расположения присоединительных трубопроводов

Все они содержат одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта, поэтому в условиях смешанного повреждения с циклограммой T(1.1) соответствующие характеристики стойкости можно корректно сравнивать между собой. Результаты расчетов, полученные для указанных сетевых структур с использованием выборок объемом 10^4 элементов, приведены на рис. 6.

Видно, что наибольшее значение $|\bar{\Phi}^*|$ наблюдается в случае смешанного повреждения сетевой структуры

SOA. При этом для рассмотренных вариантов присоединения наибольшее значение $|\Phi^*|$ превышает наименьшее в 1,15 раза. Таким образом, структурную схему, показанную на рис. 6 (а), и следует рассматривать как решение поставленной задачи синтеза.

Выводы

1. Смешанное повреждение является опасным сценарием развития аварии и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем.

2. Различные сетевые структуры обладают разной способностью противостоять смешанному повреждению, а характеристики их стойкости следует устанавливать при помощи метода имитационного компьютерного моделирования.

3. Сравнение характеристик стойкости к смешанному повреждению Φ_{EL} , Φ_{UZ} , $|\Phi^*|$ возможно только для сопоставимых сетевых структур, имеющих в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, одинаковой должна быть и используемая циклограмма процесса смешанного повреждения.

Библиографический список

1. Barker G. The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries. Elsevier Inc., 2018. 510 p.
2. Baron H. The Oil & Gas Engineering Guide: Second Edition. Technip, Paris, 2015. 271 p.
3. Stewart M. Surface Production Operations Facility Piping and Pipeline Systems: Vol. III. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2016. 1108 p.
4. Kleiber M. Process Engineering. Addressing the Gap between Studies and Chemical Industry. Walter de Gruyter GmbH, 2016. 412 p.
5. Ellenberger J.P. Piping and Pipeline Calculations Manual Construction. Design Fabrication and Examination: Second Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2014. 398 p.
6. Mokhtab S, Poe W.A., Speight J.G. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2006. 636 p.
7. Sambasivan M., Gopal S. Handbook of Oil and Gas Piping. A Practical and Comprehensive Guide. Taylor & Francis Group, 2019. 147 p.
8. Nolan D.P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities: Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2019. 507 p.
9. Singh R. Pipeline Integrity Handbook. Risk Management and Evaluation. Elsevier Inc., 2014. 308 p.
10. Cheng Y.F. Stress Corrosion Cracking of Pipelines. John Wiley & Sons Inc., 2013. 257 p.

11. Jawad M.H. Stress in ASME pressure vessels, boilers, and nuclear components. The American Society of Mechanical Engineers. John Wiley & Sons, Inc., 2018. 334 p.

12. Тарарычкин И.А. Структурный синтез трубопроводных транспортных систем, стойких к повреждениям линейных элементов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017, Вып. 1 (107), с. 96–106.

13. Тарарычкин И.А., Блинов С.П. Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур // Мир транспорта. 2017. Том 15. № 2. С. 6–19.

14. Тарарычкин И.А., Блинов С.П. Особенности повреждения сетевых структур и развития аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 3. С. 35–39.

15. Тарарычкин И.А. Стойкость систем трубопроводного транспорта к повреждениям узловых элементов сетевой структуры // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 6. С. 63–68.

16. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., et al. Discrete-Event System Simulation: 5 edition. Prentice Hall., 2009. 638 p.

17. Bandyopadhyay S., Bhattacharya R. Discrete and Continuous Simulation. Theory and Practice. CRC Press, 2014. 375 p.

18. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием пакета MathCad. М.: Горячая линия, Телеком, 2004. 319 с.

19. Охорзин В.А. Компьютерное моделирование в системе Mathcad: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2006. 144 с.

20. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. и др. Вся высшая математика. Том 1. М.: Едиториал УРСС, 2003. 328 с.

Сведения об авторе

Игорь А. Тарарычкин – доктор технических наук, профессор, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск, e-mail: donbass_8888@mail.ru

Вклад автора в статью

Автором проведен анализ особенностей развития процесса смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта. Предложено динамику процесса стационарного случайного воздействия на систему описывать при помощи циклограммы повреждения. Установлены характеристики стойкости и условия сопоставимости сетевых структур в условиях смешанного повреждения.

Выполнен сравнительный анализ способности различных сетевых структур противостоять развитию смешанного повреждения при решении типовых проектных задач.