

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Н.И.Самойленко, Т.С.Сенчук

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ



Харьков - 2009

**Министерство образования и науки Украины
Харьковская национальная академия городского
хозяйства**

Н.И.Самойленко, Т.С.Сенчук

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЁЖНОСТЬ
МАГИТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

Под редакцией Н.И.Самойленко

Издательство «НТМТ»

Харьков – 2009

УДК 681.32:519.713

С17

ББК 65.9(2)441

Самойленко М.І., Сенчук Т.С. Функціональна надійність магістральних трубопровідних транспортних систем: Монографія. – Х.: Видавництво «НТМТ», ХНАМГ, 2009. – 276 с. (рос. мовою).

Самойленко Н.И., Сенчук Т.С. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем: Монография. – Х.: Издательство «НТМТ», ХНАГХ. – 2009. – 276 с.

Рекомендовано Ученым советом Харьковской национальной академии городского хозяйства в качестве монографии, протокол № 7 от 24 апреля 2009 г.

Рецензенты:

А.И.Колосов – зав. кафедрой высшей математики Харьковской национальной академии городского хозяйства, доктор технических наук, профессор.

М.Д.Гинзбург – зав. научно-исследовательского центра №11 Научно-исследовательского института АСУТРАНСГАЗ, доктор технических наук, профессор.

Излагаются математические модели и методы расчета функциональной надежности трубопроводных транспортных систем со сложной сетевой структурой. Рассматривается использование метода для сравнительного анализа по критерию функциональной надёжности различных конструкций магистральных трубопроводных систем.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, связанных с проектированием, эксплуатацией и развитием трубопроводных систем.

Табл.: 43. Ил.: 125. Библиограф. наименований: 53.

ISBN 978–966–8603–69–5

© Харьковская национальная академия городского хозяйства,
Самойленко Н.И.,
Сенчук Т.С., 2009

Содержание

Предисловие	6
Раздел 1	
Проблемы надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем	10
1.1. Общая характеристика магистральных трубопроводных транспортных систем как объекта исследования	10
1.2. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем как предмет исследования	16
1.3. Проблемы управления функциональной надёжностью в процессах эксплуатации и развития трубопроводных транспортных систем	21
1.4. Противоречия в процессах эксплуатации и развития трубопроводных транспортных систем и уточнение предмета исследования.	24
1.5. Эксплуатация и развитие магистральных трубопроводных транспортных систем с учетом их надёжности	27
1.6. Цель исследования	30
1.7. Обзор существующих методов расчёта надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем.	32
1.8. Задачи исследования	39
Раздел 2	
Расчёт функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем методом аварийно-ремонтных зон	42
2.1. Формирование математической модели трубопроводной транспортной сети.	44
2.2. Разбиение трубопроводной транспортной сети на аварийно-ремонтные зоны	50

Содержание

2.3.	Расчет технической надежности аварийно-ремонтной зоны как независимого макроэлемента в структуре трубопроводной транспортной системы	60
2.4.	Преобразование исходного графа сети в макрограф АРЗ.	64
2.5.	Построение упрощенного макрографа АРЗ сети относительно конкретного потребителя.	68
2.6.	Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети относительно конкретного потребителя.	71
2.7.	Математическая модель функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя	73

Раздел 3

Структурные методы повышения функциональной надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем		78
3.1.	Особенности магистральных трубопроводных транспортных систем и способы повышения их функциональной надёжности	78
3.2.	Резервирование магистральных трубопроводов.	82
3.3.	Установка дополнительных задвижек как средство повышения функциональной надёжности	93
3.4.	Установка перемычки между параллельными трубопроводами как средство повышения функциональной надёжности системы	101
3.5.	Максимальный эффект повышения функциональной надёжности при симметричной установке перемычки в системе.	114

Раздел 4

Выбор оптимальной конструкции перемычки по критерию функциональной надёжности		127
4.1.	Типы перемычек в магистральных трубопроводных транспортных систем.	128
4.2.	Построение математической модели функциональной надёжности системы с определённым типом перемычки методом АРЗ.	133
4.3.	Первый модифицированный метод АРЗ для построения математической модели функциональной надёжности системы	136

4.4.	Второй модифицированный метод АРЗ для построения математической модели функциональной надёжности системы	147
4.5.	Сравнительный анализ практической полезности типов переключек по критерию функциональной надёжности	164
4.6.	Влияние надёжности запорной арматуры на функциональную надёжность системы	174
	Послесловие	179
	Словарь терминов	181
	Приложения	188
	Приложение А. Пределы относительного повышения функциональной надёжности системы за счёт резервирования	188
	Приложение В. Максимальное абсолютное повышение функциональной надёжности системы за счёт резервирования	189
	Приложение С. Построение математических моделей функциональной надёжности системы с одной перемычкой методом АРЗ.	194
	Приложение D. Построение упрощенных математических моделей функциональной надёжности системы с одной перемычкой первым модифицированным методом АРЗ	230
	Список использованной литературы	272

Предисловие

«Трубопроводный транспорт – прогрессивный, экономически выгодный вид транспорта, ему присущи: универсальность, отсутствие потерь грузов в процессе транспортировки при полной механизации и автоматизации трудоёмких погрузочно-разгрузочных работ, возврата тары и др. В результате этого снижается себестоимость транспортировки (например, для жидких грузов в 3 раза ниже по сравнению с перевозкой их по железным дорогам)». Так 40 лет назад в отдалённом 1977 году Большая советская энциклопедия характеризовала трубопроводный транспорт [4, т. 26, с. 261].

Трудно не согласиться с лестным энциклопедическим отзывом о трубопроводном транспорте. Более того, можно добавить ещё ряд положительных качеств для данного вида транспорта, например, бесшумность, отсутствие контакта целевого продукта со средой, круглосуточное функционирование, отсутствие напряженного трафика, независимость от погодных условий и пр.

По насыщенности магистральными и распределительными трубопроводными системами Украина занимает одно из первых мест в мире. Особенно это касается газовых систем, доставшихся Украине по наследству от бывшего СССР. В настоящее время трубопроводный транспорт продолжает развиваться и постоянно отвоевывать всё новые и новые позиции в различных отраслях хозяйственной деятельности. Всё чаще можно услышать в экономических обзорах о перспективных проектах по созданию новых магистральных нефтеперекачивающих и газовых систем, по развитию существующих водопроводных и тепловых магистралей. Строительство новых городских микрорайонов в обязательном порядке предполагает проектирование и создание коммунальных трубопроводных распределительных систем с различным целевым продуктом (газ, вода, тепло, сжатый воздух и пр.). В свою очередь, расширение сети трубопроводных распределительных систем является одним из приоритетных направлений развития инфраструктуры Украины.

тельных систем автоматически требует соответствующего развития магистральных систем.

Вновь сооружаемые трубопроводные системы или новые трубопроводные участки в существующих системах обладают достаточной надёжностью и не вызывают у субъектов, связанных с транспортной системой, особой тревоги по поводу возможных непредвиденных перебоев с поставкой целевого продукта потребителю. В данном контексте заинтересованными субъектами являются и производители целевого продукта, и эксплуатационники трубопроводных транспортных систем, и потребители.

Высокой надёжностью обладают, увы, только трубопроводные системы с малым сроком эксплуатации. Какую бы начальную прочность не имели системы, какой бы устойчивостью к коррозии и повреждениям не обладали, время неотвратимо работает против них. Полувековая эксплуатация большинства трубопроводных транспортных систем Украины существенно повлияла на их способность работать без сбоев и выполнять свои функциональные задачи. Всё чаще средства массовой информации говорят о высокой степени изношенности существующих трубопроводных транспортных систем, росте их аварийности и угрозы техногенных катастроф, необходимости срочной замены или безотлагательного восстановления работоспособности отдельных трубопроводных участков и целых систем. К тому же, ввод новых участков вовсе не гарантирует обязательного повышения надёжности всей системы.

В условиях рыночной экономики, которую стремится поддерживать, развивать и укреплять Украина, проблема надёжности приобретает новый оттенок.

«Любой предприниматель, вкладывающий личные материальные и денежные средства в производство или несущий ответственность за использование государственных средств, хочет быть уверенным в получении положительного конечного результата. С этой целью разрабатывается бизнес-план, анализ которого может дать ответ на вопрос, какова целесообразность той или иной производственной инновации. Основным показателем бизнес-плана – получаемая прибыль – является очень важной характеристикой эффективности принимаемых решений. Но в условиях

жесткой конкуренции руководствоваться только одной прибылью, какой бы она ни была заманчивой, – это недопустимая вольность, способная погубить самые перспективные начинания и привести к нежелательным результатам. Чтобы избежать неоправданного риска, следует при оценке эффективности принимаемых решений обязательно учитывать показатели надежности» [44].

Все субъекты трубопроводной транспортной системы в равной степени заинтересованы в её высокой надёжности. При этом надёжность должна быть не ниже некоторой допустимой. Если надёжность системы не удовлетворяет данному требованию, то потребитель не получит необходимого для него целевого продукта в нужном количестве или заданного качества и, в конечном итоге, откажется от услуг транспортного предприятия. Такого решения, в первую очередь, следует ожидать от потребителей с непрерывным производственным циклом, когда срыв поставок может привести к большим материальным потерям или экологическим катастрофам.

С точки зрения производителей целевого продукта и эксплуатационников трубопроводной транспортной системы, низкая её надёжность – это потеря потребителей, рост финансовых потерь из-за судебных издержек и штрафных санкций, бесперспективность развития рынка. Как следствие – снижение прибыли для производителей от реализации целевого продукта, для эксплуатационников – от простоев и частичного использования транспортных мощностей.

Для всех субъектов системы проблема надёжности является противоречивой. Так, производители целевого продукта и потребители, с одной стороны хотят, чтобы трубопроводная система была надёжной, с другой – чтобы транспортные услуги были дешёвыми. Эксплуатационники, с одной стороны, стараются обеспечить надёжность системы в обозримом будущем на должном уровне, с другой – выделять минимум финансовых, материальных и трудовых ресурсов на достижение этой надёжности.

Противоречивость проблемы может быть разрешена только с помощью отыскания компромиссного значения текущей надёжности, которое в равной степени удовлетворяло бы всех субъектов системы. Компромиссное значение должно быть выше мини-

мально допустимой величины, оговоренной всеми субъектами в двухсторонних договорных обязательствах. При этом отклонение от минимально допустимого значения должно быть незначительным, поскольку увеличение надёжности для действующих систем даже на сотые доли процента связано с крупными ресурсными затратами.

Безусловно, для определения текущей надёжности необходимо иметь соответствующие методы, математические модели и инженерные методики их адекватной оценки.

Настоящая монография посвящена разработке новых математических моделей и методов расчета количественных показателей безотказного функционирования магистральных трубопроводных систем. В основу монографии положены исследовательские работы, проводимые на протяжении последнего десятилетия (1998 – 2008 г.г.) коллективом ученых кафедры прикладной математики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства в составе: Самойленко Н.И., Сенчук Т.С., Костенко А.Б., Рудя И.А., Гавриленко И.А., Протопоповой В.П., Булаенко Д.А.

Авторы благодарят ученых-производственников гл. инж. коммунального предприятия «СПКБ АСУ водоснабжением», д.т.н. Панасенко А.А. и гл. инженера ОАО «Харьковгоргаз», к.т.н. Седака В.С. за консультационную поддержку и предоставление практической базы для апробации научных результатов исследовательской работы по тематике монографии.

Авторы

РАЗДЕЛ 1

ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

1.1. Общая характеристика трубопроводных транспортных систем как объекта исследования

Исходя из названия монографии, можно предположить, что объектом исследования являются процессы эксплуатации и развития магистральных трубопроводных транспортных систем. Данное предположение совершенно справедливо, но не совсем достаточно. Действительно, процессы эксплуатации и развития магистральных трубопроводных систем, для которых характерна значительная протяженность маршрута транспортирования продуктов (сотни и тысячи километров), попадают под понятие «объект исследования». К ним относятся процессы в (рис.1.1):

- нефте- и газопроводах для транспорта природного газа и нефти от мест добычи к удаленным местам их переработки;
- магистральных продуктопроводах, предназначенных для перемещения готовых нефтепродуктов с заводов в районы потребления;
- гидравлических магистральных трубопроводах для транспорта твердых грузов;
- перспективных магистральных системах будущего для перевозки твердых грузов и людей на значительные расстояния (пневмокапсульные трубопроводы).

Приведенный перечень магистральных трубопроводных транспортных систем далеко не исчерпывает всего разнообразия систем, для которых справедливы результаты настоящего исследования и для которых целесообразно их использовать. Суще-



Рис.1.1 – Классификационная схема объекта исследования

ствуется много систем самого различного хозяйственного назначения, близких к упомянутым магистральным трубопроводным транспортным системам по характеру решаемых задач, конструктивному исполнению, техническому воплощению и принципу осуществления транспорта продукта. Хотя такие системы и не являются доминирующими в исследовании, но, тем не менее, позволяют существенно расширить сферу приложения полученных результатов. К таким системам, в первую очередь, следует отнести подводящие трубопроводные системы. К последним относятся нефтепроводы, предназначенные для транспортировки нефти с промыслов на основные сооружения магистрального нефтепровода, а также нефтепродуктопроводы с нефтеперерабатывающих заводов на головные сооружения магистральных нефтепродуктопроводов. В отличие от магистральных подводящих трубопроводных систем имеют протяженность, исчисляемую десятками километров.

К объекту исследования следует также отнести процессы эксплуатации и развития напорных трубопроводных участков обводнительных, оросительных и дренажных систем, которые имеют протяженность, соизмеримую с протяженностью магистральных или подводящих систем.

Большую долю в трубопроводных транспортных системах составляют водозаборные системы (сооружения). Те из них, которые имеют трубопроводы для транспортирования воды от заборных насосных станций к местам её очистки длиной в несколько километров (а тем более – в несколько десятков километров), также относятся к объекту исследования.

Соизмеримую долю в трубопроводных транспортных системах по отношению к водозаборным системам составляют напорные водоотводящие коллекторы городских канализационных сетей, обеспечивающие удаление сточных вод (бытовых, промышленных, атмосферных и уличеполивочных) за пределы населённых пунктов или промышленных предприятий на достаточно большое расстояние. Процессы эксплуатации и развития в таких сетях также рассматриваются в настоящем исследовании как объект исследования.

К водозаборным и водоотводящим системам следует добавить магистральные тепловые сети, имеющие многокилометровые теплопроводы от источника тепла (котельной, ТЭЦ, водо- или газотермальной скважины и пр.) до потребителя.

Процессы эксплуатации и развития трубопроводных участков от насосных станций второго подъёма или последующих подъёмов, подающих очищенную воду удалённым населённым пунктам или удалённым промышленным предприятиям, длиной несколько километров также входят в объект исследования.

Наконец, к объекту исследования следует отнести процессы эксплуатации и развития протяженных участков городских коммунальных сетей (водопроводных, тепловых, канализационных) и инженерных сетей промышленных предприятий (пневматических, вентиляционных, водопроводных, газовых, тепловых и пр.).

Существенным, признаком всех систем, сетей и сооружений, процессы в которых подпадают под понятие «объект исследования», является наличие в их структуре *протяженных напорных трубопроводных участков* длиной от нескольких километров до тысяч километров. В дальнейшем объект исследования будем именовать ТТС (трубопроводные транспортные системы) или МТТС (магистральные трубопроводные транспортные системы). Как видим, аббревиатура ТТС шире охватывает объект исследования, чем МТТС, поскольку включает в себя как магистральные, так и распределительные системы.

Классификационная схема на рис. 1.1. преследует цель выделить те трубопроводные транспортные системы, которые являются объектом дальнейшего рассмотрения, а также определить место ТТС среди всех транспортных систем. На схеме объекты исследования выделены полужирным шрифтом и серым фоном надписей в прямоугольных блоках.

Объект исследования в обязательном порядке предполагает транспорт продукта от некоторого источника (водозаборная станция, перерабатывающее предприятие, насосная станция, насосный агрегат, скважина, пункт отбора и т.п.) к потребителю продукта. В роли потребителя могут выступать как отдельные лица и организации (в муниципальных системах жизнеобеспечения), так

Магистральные трубопроводные транспортные системы

и отдельные производственные подразделения (распределительные пункты, станции очистки), и целые предприятия (в магистральных и промышленных системах сырьевого обеспечения производства).

Любая ТТС связывает между собой производителя целевого продукт (ЦП) и потребителя ЦП. Простейшая схема системы снабжения целевым продуктом одного потребителя одним производителем показана на рис. 1.2.

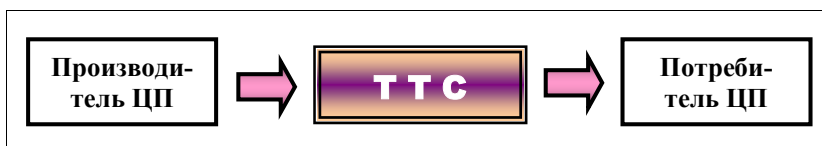


Рис.1.2 – Схема снабжения потребителя продуктом

И производитель, и потребитель не являются ключевыми элементами в настоящем исследовании. В дальнейшем, если не будет оговорено специально, будем производителя ЦП отождествлять с источником продукта и называть или просто источником, или насосным агрегатом, или насосом, а потребителя продукта – просто потребителем.

Простейшую трубопроводную транспортную систему будем графически изображать в виде схемы, показанной на рис. 1.3.

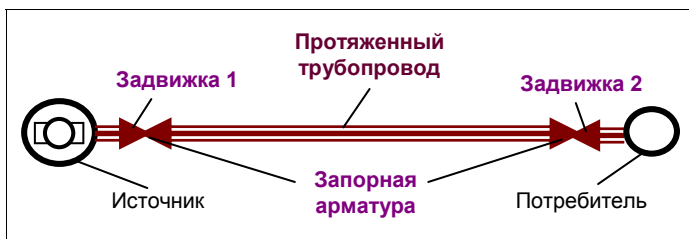


Рис.1.3 – Схема простейшей трубопроводной транспортной системы

Как видно из рис. 1.3, даже в простейшей ТТС присутствует запорная арматура. Наличие запорной арматура в ТТС является вторым существенным признаком объекта исследования. Запорная арматура, как и протяженные трубопроводные участки, являются теми элементами ТТС, с которыми связаны основные научные результаты исследования.

В качестве запорной арматуры в трубопроводных системах выступают задвижки, вентили, краны-регуляторы, клапаны, газорегуляторные устройства и т.п. Одни из них предназначены для регулирования пропускной способности трубопровода в одном направлении, другие – для регулирования пропускной способности трубопровода в двух направлениях, третьи – для предотвращения транспортирования ЦП в обратном направлении.

С точки зрения исследования, запорная арматура представляет собой инструмент для прекращения доступа ЦП на конкретный участок трубопровода на время проведения ремонтных или профилактических работ.

В дальнейшем все виды запорной арматуры будем называть задвижками. При этом рассматриваться она будет не как возможный регулятор пропускной способности трубопроводного участка, а как средство пропуска или не пропуска ЦП через участок с установленной запорной арматуры.

Транспортируемый продукт или носитель продукта (например, вода, пар в тепловых сетях) в ТТС может находиться в жидком или газообразном состоянии. Агрегатное состояние продукта или его носителя в настоящем исследовании не имеет принципиального значения. Главное – это способность продукта или его носителя создавать напор, т.е. обеспечивать транспортирование за счёт разности давлений.

В дальнейшем транспортируемый продукт, в каком бы агрегатном состоянии он не находился, будем называть целевым продуктом, в том числе и тепло, для которого агрегатное состояние вообще не имеет смысла.

1.2. Функциональная надежность магистральных трубопроводных транспортных систем как предмет исследования

Все МТТС, охваченные понятием «объект исследования», имеют не только одинаковые конструктивные элементы (источник, протяженный трубопровод, запорная арматура), но и одинаковое назначение. Все они призваны обеспечить непрерывную доставку потребителю по пространственно протяженным напорным трубопроводам целевого продукта в заданном количестве и заданного качества в течение длительного периода времени (года, десятилетия).

И «заданное количество», и «заданное качество», которые фигурируют в определении назначения МТТС, являются важнейшими функциональными требованиями к системе. Оба требования в равной степени, но по разным причинам, находятся под постоянным вниманием всех субъектов, имеющих отношение к транспортированию целевого продукта. В качестве субъектов МТТС будем рассматривать производителя ЦП, эксплуатационника МТТС и потребителя ЦП.

Производитель ЦП – предприятие, осуществляющее производство, добычу или переработку ЦП. В качестве производителя ЦП могут выступать промысловые предприятия, перерабатывающие заводы и очистные предприятия, предприятия по производству сыпучих материалов и т.д.

Эксплуатационник МТТС – предприятие, эксплуатирующее трубопроводную транспортную систему и обеспечивающее непосредственно транспорт ЦП от производителя к потребителю.

Потребитель ЦП – предприятие, которое непосредственно использует ЦП или как энергетическое сырьё, или как технологическое сырьё для производства, или как продукт для дальнейшей переработки, или как конечный продукт потребления (питьевой, поливочный и т.п.).

Первое функциональное требование (заданное количество) определяет производительность системы и её пропускную способность. Производительность системы должна быть не ниже суммарной потребности в ЦП всех потребителей за единицу вре-

мени (час, сутки, месяц, год и т.д.) с учетом возможных потерь в процессе транспортирования продукта и сбоев оборудования за ту же единицу времени. Другими словами, количество, поступающего от источника целевого продукта в трубопроводную сеть должно соответствовать заданному потреблению и непроизводительным расходам.

Производительность системы задаётся как количество целевого продукта (объем, вес, тепло и т.п.) в единицу времени.

Производительность МТТС интересует производителя ЦП как потенциальная гарантия возможности сбыта продукции. Если производитель уверен в такой гарантии, он не будет тратить время и средства на поиск новых транспортных посредников с потребителем.

Для потребителя производительность МТТС – это условие его нормального существования. Недопоставка ЦП чревата для потребителя большими, порой катастрофическими, потерями. Но даже достаточная производительность системы, но без какого-либо её запаса, лишает потребителя возможности свободно развиваться за счёт дополнительных поставок ЦП.

Для эксплуатационника производительность МТТС – это та производственная мощность, которая определяет и обеспечивает функционирование всей системы в текущее и ближайшее время. Если производительность системы не вызывает беспокойства, то, безусловно, её эксплуатация является более эффективной, а её развитие – более перспективным и целесообразным. Такая система привлекательна как для производителя ЦП, так и для его потребителя.

Таким образом, недостаточная производительность системы делает её неустойчивой и, в конечном итоге, приводит к гибели самой системы. Всю ответственность за должную производительность системы несёт эксплуатационник.

Второе функциональное требование (заданное качество), как и первое, также влияет на устойчивость системы. Это требование диктует системе дополнительные условия к транспортируемому продукту и, как правило, указывает на нижний допустимый порог того или иного параметра (или нескольких параметров) ЦП, по-

мимо его количества. В качестве такого параметра может выступать давление (для ЦП в жидком или газообразном агрегатном состоянии), температура, степень загрязнения или очистки и др.

В ряде транспортных систем для эксплуатационника данное требование не является критичным, например, в тепловых, гидравлических и пневмокапсульных. В последних за качество ЦП ответственность несёт производитель. Однако в большинстве случаев, когда показателем качества ЦП трубопроводных систем является минимально допустимое давление, под которым ЦП непосредственно поступает к потребителю, ответственность за качество частично несёт производитель, а частично эксплуатационник.

Продукт недостаточного качества, безусловно, не нужен потребителю. Продукт недостаточного качества может быть и разрушительным для всей системы. Так, наличие вредных примесей в ЦП приводит к губительной коррозии трубопровода, а чрезмерный напор – к его разрыву. Недостаточное качество ЦП является второй причиной, по которой потребитель и эксплуатационник могут отказаться от такой системы снабжения.

Разное отношение субъектов в системах снабжения к производительности и качеству ЦП делит их на два лагеря. С одной стороны производители и эксплуатационники, стремящиеся привлечь потребителя, с другой – потребитель, желающий получать ЦП в заданном количестве и заданного качества. Поэтому довольно часто производители и эксплуатационники выступают в одном лице как поставщики ЦП. Особенно явно это выражено в системах снабжения, в которых производительность и качество ЦП взаимозависимы. К таким системам относятся все напорные системы снабжения, в которых роль целевого продукта играет транспортируемая жидкость или газ, т.е. все напорные системы, кроме гидравлических, тепловых и пневмокапсульных. В последних эксплуатационник несёт ответственность только за качество носителя ЦП, а производитель – непосредственно за качество самого ЦП.

Результаты настоящего исследования непосредственно касаются качества носителя транспортируемого ЦП и качества самого ЦП, если он представляет собой газ или жидкость. Резуль-

таты исследования никоим образом не связаны с качеством ЦП, если продуктом является тепло, твёрдые и сыпучие материалы, пассажиры пневмокапсульного транспорта и т.п.

Производительность (пропускная способность) системы и качество транспортируемого ЦП играют важную роль на устойчивость и живучесть системы снабжения. Однако данные функциональные показатели не являются определяющими, когда речь идёт о долгосрочных договорах и контрактах на поставку ЦП потребителю.

В условиях рыночной экономики каждый предприниматель для успешного ведения своего бизнеса должен учитывать не только текущие показатели, характеризующие функциональные возможности партнёров, а и стабильность этих показателей в обозримом будущем. Если показатели партнёров имеют тенденцию к скачкообразным изменениям, предприниматель-потребитель должен застраховаться от непредвиденных сбоев в поставках ЦП. С этой целью при заключении договоров на поставку ЦП оговариваются штрафные санкции за нарушение качества ЦП или срыва сроков поставок. При этом, чем больше риск, тем более жесткие санкции накладываются на поставщиков.

Сбой поставок в ТТС может происходить по разным причинам. Одни причины можно предупредить, другие нет. Так, разрыв магистральных труб в результате землетрясения предвидеть практически невозможно, да и вероятность такого события ничтожно мала. А вот выход из строя протяженного трубопровода по причине старения, коррозии или заиливания труб происходит с определённой вероятностью. При этом численное значение вероятности выхода из строя трубопровода достигает такой величины, которая может перечеркнуть весь план поставки ЦП потребителю. Безусловно, в этом случае учитывать возможность срыва поставок следует в обязательном порядке.

Любой трубопроводный участок, как и любая запорная арматура, обладает определённой технической надёжностью, т.е. вероятностью выйти из строя в течение определённого периода времени (сезоны, года, десятилетия). Данные о технической надёжности берутся из технического паспорта трубопровода (за-

Магистральные трубопроводные транспортные системы

порной арматуры) с учётом срока эксплуатации или определяются на основе:

- статистических данных о состояниях данного трубопровода (запорной арматуры) с момента его ввода в эксплуатацию;
- усреднённых данных о состояниях других трубопроводов (запорной арматуры), которые сооружались и эксплуатировались в условиях, аналогичных данному трубопроводу (запорной арматуре).

Эксплуатационник МТТС хорошо осведомлен о техническом состоянии всех конструктивных элементов системы и старается их поддерживать на уровне, не ниже допустимого для решения своих функциональных задач. Частичное восстановление надёжности осуществляется за счёт проведения профилактических работ, которые позволяют очистить трубопроводные участки и запорную арматуру от накопленного ила, ржавчины и осадочных веществ, отрегулировать запорную арматуру. Но как бы качественно ни проводились профилактические работы, с увеличением периода эксплуатации из-за коррозии и физической усталости материала изготовления техническая надёжность всех конструктивных элементов системы постепенно падает. Рано или поздно она достигает критического уровня, для которого вероятность возникновения аварии недопустимо велика. В этом случае эксплуатационник вынужден либо заменить устаревший элемент новым либо зарезервировать его дополнительным элементом.

Поддержание технической надёжности МТТС на должном уровне – это задача и забота эксплуатационника. Производителя и потребителя ЦП не интересует, какой технической надёжностью обладает тот или иной элемент МТТС. Их волнует **функциональная надёжность** МТТС, и в первую очередь, такой его показатель как вероятность непрерывной поставки ЦП от производителя потребителю посредством МТТС в течение определённого периода времени. Каким образом должная функциональная надёжность системы достигается и обеспечивается – это проблема эксплуатационника МТТС.

Функциональная надёжность МТТС является третьим функциональным требованием к системе снабжения, в котором заинтересованы все субъекты системы. Как и в случаях с двумя пре-

дыдущими функциональными требованиями, нарушение данного требования неминуемо влечёт за собой гибель системы или ведёт к поиску новых транспортных посредников на смену старым.

В настоящей монографии рассматриваются два показателя функциональной надёжности:

- ремонтпригодность системы, определяющая свойство системы без прерывания транспортирования целевого продукта потребителям проводить ремонтно-профилактические работы по восстановлению технической надёжности конструктивных элементов системы, которая теряется ими в процессе длительной эксплуатации в результате износа или старения;

- вероятность бесперебойной поставки целевого продукта конкретному потребителю или группе потребителей в течение определённого периода времени, определяющая объективную возможность системы отвечать своему назначению.

Указанные показатели функциональной надёжности, методы их повышения и методы их определения являются предметом настоящего исследования.

1.3. Проблемы управления функциональной надёжностью в процессах эксплуатации и развития трубопроводных транспортных систем

В процессе эксплуатации (оперативного управления) и развития (стратегического управления) МТТС большое значение имеет управление потокораспределением ЦП. Возможность управлять потокораспределением обеспечивает рациональную эксплуатацию сетей, т.е. позволяет экономить материальные, трудовые, временные и финансовые ресурсы предприятий и организаций, эксплуатирующих трубопроводную сеть.

Аналогичная ситуация имеет место и с управлением функциональной надёжностью системы. Возможность управления функциональной надёжностью в процессе эксплуатации и развития МТТС позволяет:

Магистральные трубопроводные транспортные системы

- выбирать в трубопроводной транспортной сети маршрут поставки ЦП конкретному потребителю с минимальными затратами при обеспечении должной надёжности поставки;

- выбирать трубопроводные участки и запорную арматуру для проведения ремонтно-профилактических работ при соблюдении должной надёжности без прерывания процесса транспортирования ЦП конкретным потребителям.

К сожалению, в действующих ТТС не предусмотрена реализация механизма управления функциональной надёжностью по четырём основным причинам [44]:

- нет инженерной методики точного расчета данного показателя для сложных сетевых трубопроводных систем в реальном масштабе времени;

- имеет место временной тренд показателей функциональной надёжности в сторону их ухудшения, вызванный износом и старением всех конструктивных элементов трубопроводной сети;

- существует недооценка показателя функциональной надёжности на этапе проектирования и начальных этапах эксплуатации в виду малого износа и отсутствия старения для всех конструктивных элементов трубопроводной сети;

- имеет место невысокая степень свободы трубопроводной системы по отношению к управлению функциональной надёжностью, которая обеспечивается изменением положения запорной арматуры (оперативное управление) или проведением ремонтно-профилактических работ (неоперативное управление).

Безусловно, среди выше приведенных причин основной является отсутствие инженерной методики расчета показателя функциональной надёжности. Несмотря на отсутствие строгой методики расчёта, данный показатель интуитивно учитывается на разных этапах проектирования, эксплуатации, реконструкции и развития ТТС. Интуитивный учёт имеет место и при управлении этим показателем. Но учёт и изменение функциональной надёжности на качественном уровне («хуже» – «лучше») не может гарантировать безошибочность управленческих решений и обеспечивать эффективность этих решений для сложных МТТС. Только точное количественное определение функциональной надёжно-

сти может позволить качественно решать задачи проектирования и реконструкции ТТС, безошибочно и эффективно управлять системами в процессе их эксплуатации.

Не мене важными причинами, мешающими управлению функциональной надёжностью, является динамика показателей надёжности в процессе эксплуатации трубопроводных систем и её недооценка на начальных стадиях проектирования и эксплуатации систем. В отличие от других показателей, значения которых являются инвариантными по отношению к сроку эксплуатации, значения вероятностных показателей надёжности изменяются по экспоненциальному закону: на начальном этапе эксплуатации они наибольшие, а затем уменьшаются по мере износа и старения всех конструктивных элементов ТТС.

Недооценка надёжности ТТС при проектировании системы и на начальных этапах её эксплуатации отрицательно сказывается на функционировании системы в более поздние периоды её эксплуатации, вплоть до разрушения системы и срыва плановых поставок ЦП.

Последняя причина, негативно сказывающаяся на управлении функциональной надёжностью – малая степень свободы трубопроводной системы – не является столь критичной, как три предыдущие. Даже в условиях малой степени свободы ТТС имеется возможность управлять надёжностью двумя способами:

- *непосредственно*, оперативно изменяя структуру сети с помощью запорной арматуры. Такое управление имеет смысл, когда при разных структурах сети основные показатели качества имеют приблизительно одинаковые значения, а показатели надёжности резко различаются;

- *косвенно*, изменяя техническую надёжность с помощью проведения ремонтно-профилактических работ по восстановлению и обновлению отдельных элементов системы, частично утративших надёжность или исчерпавших свой временной ресурс. Такое управление требует определенной задержки во времени, обусловленной и определяемой продолжительностью проведения регламентных работ по восстановлению и обновлению ненадёжных элементов.

Магистральные трубопроводные транспортные системы

Как видим, основным условием для осуществления управления функциональной надёжностью в процессе управления и развития ТТС является наличие инженерной методики определения точного значения этой надёжности. Причём расчёт показателей надёжности должен быть ориентирован на реальный масштаб времени. Последнее требование может быть удовлетворено только при наличии быстродействующих методов расчёта функциональной надёжности с их последующей программной реализацией.

Таким образом, проблемы управления ТТС со сложной структурой и высокой размерностью (большим числом трубопроводных участков) так же, как и проблемы эксплуатации и развития ТТС с непрерывной поставкой ЦП потребителям, упираются в необходимость разработки точных математических методов оперативного расчёта функциональной надёжности.

1.4. Противоречия в процессах эксплуатации и развития трубопроводных транспортных систем и уточнение предмета исследования

Магистральные трубопроводные транспортные системы являются постоянно эволюционирующими объектами, развитие которых происходит во времени и пространстве. Как и любому эволюционирующему объекту во времени, для МТТС характерно старение, восстановление, обновление. Как объекту, эволюционирующему в пространстве – изменение состава и структуры сети, т.е. добавление новых и удаление старых пространственных и непространственных элементов, подключение новых и отключение прежних потребителей.

Движущей силой развития МТТС является стремление всех субъектов системы устранить противоречия, которые возникают в процессе её эксплуатации и развития. Возникающие противоречия носят самый разный характер, связаны с разными системными объектами и касаются разных их сторон. Перечислим основные противоречия, которые непосредственно касаются функциональной надёжности МТТС. Это, прежде всего:

1. Противоречие между протяженностью магистральной трубопроводной системы (а следовательно, и её важностью для жизнедеятельности населения) и её функциональной надёжностью. Чем длиннее магистраль, тем больше её хозяйственная значимость и тем ниже её надёжность.

2. Противоречие между сроком эксплуатации магистральной трубопроводной системы и её функциональной надёжностью. Чем больше период эксплуатации МТТС, тем меньше функциональная надёжность и тем чаще и сложнее проведение ремонтно-профилактических работ.

3. Противоречие между надёжностью МТТС и объёмами затрат на её достижение. Чем меньше риск прерывания поставок ЦП, тем больше требуется материальных, финансовых и трудовых затрат для обеспечения должной функциональной надёжности. Чем выше степень резервирования системы, тем сложнее и дороже система.

4. Противоречие между необходимостью проведения ремонтно-профилактических работ и требованием непрерывности поставки ЦП потребителю, поскольку основным условием проведения ремонтно-профилактических работ на конкретном участке МТТС является прекращение транспорта ЦП через этот участок и полное его удаление из зоны ремонтно-профилактических работ.

5. Противоречие между необходимостью определения точного значения функциональной надёжности для целей оперативного управления и развития МТТС и отсутствием универсального метода её расчёта для трубопроводных сетей со сложной топологической структурой.

Устранение перечисленных противоречий – это серьёзная и сложная задача, требующая мобилизации усилий и ресурсов как научно-исследовательских, так производственных организаций.

Все перечисленные противоречия по-своему важны, а поэтому трудно указать приоритетность устранения. Тем не менее, какие бы мероприятия по устранению противоречий не проводились, все они связаны с повышением функциональной надёжности системы. А это значит, что проведению любого мероприятия должно предшествовать наличие метода расчёта функциональной на-

дёжности системы. Целесообразность любых действий по повышению функциональной надёжности может быть оценена только при наличии научно обоснованного метода её расчёта. В противном случае усилия, направленные на совершенствование системы, могут привести к негативному результату.

Не менее важным, является устранение 4-го противоречия, которое касается проведения ремонтно-профилактических работ и непрерывности поставки ЦП потребителям. Проведение ремонтно-профилактических работ позволяет восстанавливать теряемую с годами надёжность системы из-за старения и аварий. При отсутствии такой возможности (восстановления надёжности) система либо обречена на разрушение и отмирание, либо вынуждена на время проведения ремонтно-профилактических работ прекращать транспортирование ЦП потребителям. Совершенно очевидно, что из двух ТТС с одинаковой текущей функциональной надёжностью законное право на существование (эксплуатацию) имеет та, которая допускает проведение ремонтно-профилактических работ без прекращения транспортирования ЦП, охватывающих большую часть трубопроводной сети. В идеальном случае система должна допускать проведение ремонтно-профилактических работ на любом участке сети без прерывания подачи ЦП хотя бы одному потребителю. Такая система наиболее привлекательна для всех субъектов системы снабжения: и производителям ЦП, и эксплуатационникам, и потребителям.

Последние два противоречия (4-е и 5-е) являются определяющими для настоящего исследования. Они непосредственно касаются предмета исследования – функциональной надёжности ТТС. Устранение одного из них позволяет восстанавливать надёжность, устранение другого – определять её значение, а это значит – оперировать надёжностью в процессе решения различных задач по транспортированию и распределению ЦП в системе снабжения.

Возможность проведения ремонтно-профилактических работ без нарушения поставок ЦП определяется только избыточностью структуры ТТС и местами расположения потребителей и источника ЦП в этой структуре. Как будет показано далее, определение возможности проведения профилактических работ на различных

участках без прекращения транспортирования ЦП потребителям и определение потребителей, отсекаемых от ЦП во время проведения ремонтно-профилактических работ, являются частными задачами при определении функциональной надёжности сети. Поэтому дальнейшее исследование будет сосредоточено на решении именно задачи определения функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей.

Таким образом, рассмотрение различных противоречий при эксплуатации и развитии МТТС, связанных с функциональной надёжностью сети, позволило выявить основное противоречие (отсутствие универсального метода оперативного расчёта функциональной надёжности) и уточнить предмет исследования – *методы определения показателей функциональной надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем, а именно: вероятности непрерывной поставки ЦП потребителям и ремонтпригодности.*

1.5. Эксплуатация и развитие магистральных трубопроводных транспортных систем с учетом их надёжности

Функциональная надёжность играет важную роль в эксплуатации и развитии МТТС. Развитие МТТС включает в себя проектирование новых фрагментов сети, а порой и полную реконструкцию существующей сети. Безусловно, чтобы избежать преждевременной гибели системы и обеспечить её эффективное функционирование (без сбоев в поставках ЦП потребителю и аварий в сети по внутренним причинам) все этапы проектирования и функционирования должны учитывать показатели функциональной надёжности.

Учитывать показатели функциональной надёжности должны все субъекты, связанные с эксплуатацией и развитием МТТС: и проектировщики, и эксплуатационники, и потребители, и эксперты по внештатным ситуациям. Среди служб эксплуатации учёт показателей надёжностей наиболее важен для работы диспетчерских служб, которые в течение рабочей смены часто принимают решения, связанные с изменением сетевой структуры систем.

Магистральные трубопроводные транспортные системы

Необходимость в изменении структуры возникает каждый раз, когда:

- вводят в сеть новый конструктивный элемент трубопроводной сети (трубопроводный участок, запорная арматура и др.) или выводят старый;
- добавляют новый источник целевого продукта или отказываются от старого;
- включают дополнительный насосный агрегат или отключают действующий;
- подключают к трубопроводной сети нового потребителя или отключают прежнего;
- меняют устаревшие и изношенные конструктивные элементы трубопроводной сети на новые;
- ставят аварийно-ремонтную зону на профилактику или вводят её в эксплуатацию по завершению профилактики.

Перечисленные регламентные ситуации следует дополнить и внештатными ситуациями, которые возникают как по внутренним причинам (например, разрыв трубы в результате старения), так и внешним (например, повреждения сети в результате проведения строительных работ или землетрясений).

При возникновении аварии диспетчер обязан принять оперативные меры по её локализации и устранению. Принимаемые меры связаны с изменением структуры сети, поскольку аварийные участки должны быть выведены из эксплуатации на время устранения аварии.

Любое изменение структуры МТТС влечет за собой изменение её функциональной надежности. Если при этом надежность опускается ниже минимально допустимой, возникает дополнительная угроза катастрофы из-за нарушения поставок ЦП предприятиям-потребителям с непрерывным циклом производства. Чтобы угроза не переросла в реальную катастрофу, диспетчер должен обеспечить и проведение ремонтных работ на аварийном участке, и транспортирование ЦП всем потребителям сети при отключенной зоне с поврежденным участком. Сети с высокой структурной избыточностью, как правило, позволяют диспетчеру справиться с этой задачей. Более того, многие сети позволяют решить такую

задачу несколькими способами. При существующих подходах выбора структуры для дальнейшего функционирования сети диспетчер руководствуется критерием минимума суммарных избыточных напоров в узлах сети. С точки зрения сиюминутной эффективности функционирования системы, данный критерий вполне оправдан. Однако нельзя при этом игнорировать возможные изменения функциональной надёжности. Особенно это касается функциональной надёжности относительно потребителей с непрерывным циклом потребления ЦП. Чтобы в период ликвидации аварии избежать резкого падения функциональной надёжности или максимально снизить риск сбоев в поставках ЦП, следует выбор возможного варианта структуры осуществлять с учётом её надёжности. Наиболее предпочтительным вариантом является тот, который обеспечит допустимую функциональную надёжность относительно всех потребителей. Если такового не окажется, следует выбрать вариант, обеспечивающий допустимую функциональную надёжность относительно потребителей с непрерывным циклом потребления. Если и такого варианта не окажется, то следует выбрать вариант с наименьшим падением функциональной надёжности.

К сожалению, диспетчеры лишены возможности выбирать структуру сети с учётом её функциональной надёжности из-за отсутствия инженерной методики и программного инструментария для количественного определения функциональной надёжности трубопроводных сетей со сложной структурой. Отсутствие методики расчета показателей надёжности для сложных трубопроводных сетей отрицательно сказывается на организации работ по устранению аварий. Без точного расчета надёжности невозможно квалифицированно расставить приоритеты для одновременно возникших или одновременно устраняемых аварий. Без точного расчета невозможно определить, устранение какой аварии обеспечивает наиболее весомое увеличение надёжности системы в целом или надёжности поставки целевого продукта отдельным потребителям.

Эксплуатация МТТС предусматривает большой объём работ по реновации трубопроводов – профилактике и восстановлению физически изношенных участков. Для организации реновационных работ большое значение имеет точный расчёт надёжности,

Магистральные трубопроводные транспортные системы

который позволяет не только выявить ненадёжные фрагменты трубопроводных сетей, а и квалифицированно составить график проведения профилактических работ.

Особую роль расчёт функциональной надёжности играет при проектировании новых сетей или реконструкции уже существующих. Только точный расчет позволяет дать ответ на вопросы:

- какой из вариантов изменения структуры сети по критерию надёжности является предпочтительнее и насколько предпочтительнее;
- какие фрагменты сети требуют реконструкции из-за недостаточной надёжности;
- в каком месте целесообразно подключать нового потребителя к сети, чтобы обеспечить требуемую надёжность поставки ЦП.

Таким образом, показатели технической и функциональной надёжности имеют существенное значение на разных этапах эксплуатации и развития магистральных трубопроводных транспортных систем. Тем не менее, для систем со сложной сетевой структурой данные показатели либо учитываются на интуитивном уровне, либо не учитываются вообще из-за отсутствия методов их определения. Следовательно, процессы функционирования МТТС, имеют определённый ресурс (учёт функциональной надёжности), использование которого позволит повысить эффективность системы на всех этапах её проектирования и эксплуатации как с точки зрения достижения конечной цели (поставки целевого продукта всем потребителям в заданном количестве и заданного качества), так и с точки зрения экологической безопасности.

1.6. Цель исследования

Целью научных исследований, положенных в основу настоящей монографии, являются теоретическое обоснование и развитие методов повышения и определения показателей функциональной надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем со сложной сетевой структурой, а также разработка инженерной методики количественного определения этих показателей при эксплуатации и развитии таких систем.

Цель полностью отвечает основным положениям всех программ по дальнейшему развитию систем газоснабжения и водоснабжения регионов, в т.ч. крупных городов Украины, и соответствующим постановлениям Кабинета министров Украины.

Достижение поставленной цели позволит:

- *проектировщикам* МТТС:
 - конструировать сетевые системы с заданными показателями функциональной надёжности;
 - сравнивать проекты МТТС по критериям функциональной надёжности;
 - оптимизировать сетевые структуры по критериям функциональной надёжности;
 - осуществлять реконструкцию и развитие действующих МТТС с учетом показателей функциональной надёжности;
- *эксплуатационникам* МТТС:
 - обеспечивать эксплуатацию сетевых систем с заданными показателями функциональной надёжности;
 - управлять при необходимости показателями функциональной надёжности;
 - заключать договора с потребителями с учетом показателей функциональной надёжности;
 - формировать для проектных организаций техническое задание и технические условия на реконструкцию и развитие действующих МТТС с учетом показателей функциональной надёжности;
 - выдавать аварийно-ремонтным и восстановительно-профилактическим службам технические задания и технические условия для проведения ремонтных и профилактических работ с учетом показателей функциональной надёжности;
 - разрабатывать план ремонтно-профилактических работ с учетом показателей функциональной надёжности;
- *эксплуатационникам и потребителям* МТТС:

Магистральные трубопроводные транспортные системы

- анализировать текущие и прогнозировать будущие состояния МТТС с учетом показателей функциональной надёжности;

- *потребителям целевого продукта* МТТС:

- выбирать место подключения к сети трубопроводов с учетом показателей функциональной надёжности;

- заключать договора с поставщиками ЦП с учетом показателей функциональной надёжности;

- *экспертам МЧС*:

- проверять соблюдение допустимых норм по функциональной надёжности при эксплуатации МТТС для обеспечения экологической безопасности и предупреждения возможных экологических катастроф;

- осуществлять анализ состояния МТТС при расследовании причин катастрофы с учётом показателей функциональной надёжности.

При достижении поставленной цели эксплуатация и развитие МТТС примет совершенно новый характер – структура сети из сложного и неудобного «врага» проектировщиков и эксплуатационников превратится в «союзника», позволяющего нормализовать работу и тех, и других, повысить качество проектирования и эффективность эксплуатации.

1.7. Обзор существующих методов расчёта надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем

Магистральные трубопроводные транспортные системы являются сложными и дорогостоящими инженерными объектами, развитие и эксплуатация которых связана с неопределённостями различного рода. Так, эксплуатационная нагрузка на сеть зависит от метеоусловий, времени суток, непроизводительных потерь, переменного характера потребления ЦП большинством потребителей. Развитие сети зависит от демографических изменений, расширения географии потребителей, роста удельного потребления, наличия и размеров финансовых трудовых и материальных

ресурсов. В свою очередь, непроизводственные потери зависят от темпов износа и старения всех конструктивных элементов системы, непредвиденного вмешательства внешней среды (повреждения, аварии, катастрофы) на работоспособность системы в целом или её отдельных элементов, качества ремонтно-профилактических работ и т.п.

Неопределённости функционирования МТТС как внутренней природы, так и внешней, затрудняют определение и даже оценку текущего состояния системы, что служит дополнительным неблагоприятным фактором для её эксплуатации и развития.

В связи с высокой неопределённостью состояния МТТС показатели надёжности, как правило, носят вероятностный характер. Исключением, пожалуй, можно считать такой показатель надёжности как ремонтпригодность, поскольку данный показатель позволяет с полной определённой указать, какой элемент сети допускает проведение ремонтно-профилактических работ без прерывания транспортирования ЦП потребителям.

В работах Е.М.Гальперина [11], Ю.А.Ильина [18-19], А.А.Иониной [22-23] предлагаются самые разные показатели, служащие для оценки надёжности. Все они подразделяются на:

- *относительные показатели*, отражающие относительное время пребывания системы в исправном состоянии, состоянии с одним, двумя неработоспособными участками, степень ремонтно-приспособленности, относительное число высококачественных элементов сети и др.;

- *вероятностные показатели* надёжности, характеризующие надёжность сети в целом, надёжность отдельных участков или фрагментов сети, вероятность бесперебойного получения продукта в течение определённого периода времени всеми потребителями одновременно или каждым конкретным потребителем отдельно и др.

Среднее значение многих относительных показателей при бесконечно большом числе накопленных и обработанных данных превращаются в вероятностные показатели. Поэтому в работах С.С.Душкина и И.О.Краева [14], В.А.Петросова [35] показатели надёжности подразделяются не по форме представления, а по их

Магистральные трубопроводные транспортные системы

смысловому значению. Таковыми показателями являются:

- вероятность безотказной работы системы или отдельных её элементов в течение определённого периода времени;
- наработка на отказ;
- долговечность;
- средний ресурс;
- гамма-процентный ресурс;
- назначенный ресурс;
- ремонтпригодность;
- восстанавливаемость.

Из перечисленных показателей выделим два: ремонтпригодность и вероятность безотказной работы элементов в течение заданного периода времени. Напомним, что вероятность безотказной работы – это основной показатель технической надёжности элементов.

Первый показатель важен и интересен по следующим причинам:

- только при условии ремонтпригодности конструктивных элементов осуществимы ремонтно-профилактические работы по восстановлению их технической надёжности, теряемой в процессе эксплуатации;
- только при условии ремонтпригодности конструктивных элементов имеется возможность повышать такие показатели функциональной надёжности системы, как вероятность бесперебойной поставки ЦП потребителям и ремонтпригодность системы.

Повышенный интерес ко второму показателю вызван тем, что он обеспечивает методы расчёта показателя функциональной надёжности (вероятности бесперебойной поставки) очень важной исходной информацией – технической надёжностью отдельных структурных элементов трубопроводной сети. Для определения этого показателя разработан ряд методов (блоки без фона на рис. 1.4).

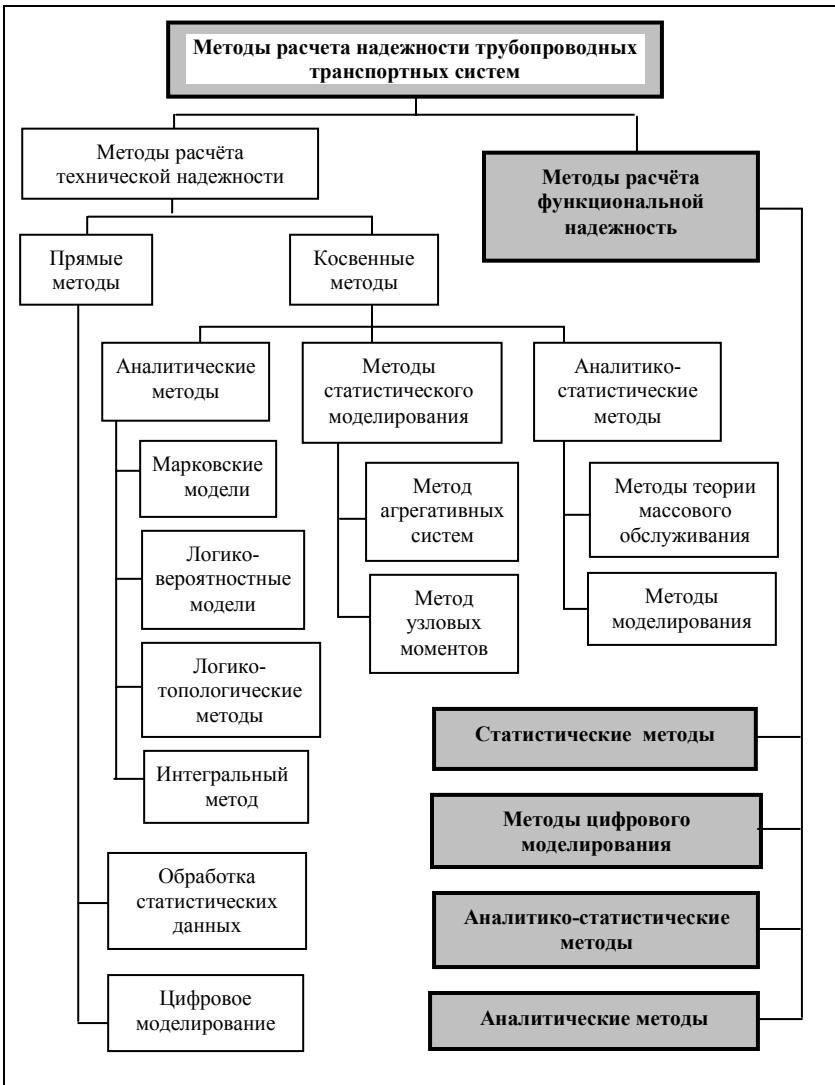


Рис.1.4 – Классификация методов расчёта надёжности трубопроводных транспортных систем

Существующие подходы к решению задач анализа технической надёжности ТТС базируются на применении прямых и косвенных методов расчёта надёжности. Подробный обзор методов с точки зрения учёта структуры систем, а следовательно, и возможности решения задач эксплуатации и развития ТТС, в том числе и проектирования абсолютно новых систем, излагается в [44].

Подчеркнём, что наиболее приемлемыми для проектирования новых и развития существующих ТТС являются аналитические методы, поскольку все статистические методы не в состоянии учитывать структуру системы, которая ещё не эксплуатировалась. В свою очередь, использование аналитических методов для сложно структурированных систем, имеющих в своей структуре мостовые соединения, не обеспечивает разработчиков систем достаточно точными результатами. Так, предлагаемый в [35, с.150-151] метод замены мостового соединения с равновесными плечами параллельным соединением даёт только приблизительный результат.

На рис. 1.4, кроме классификации методов определения технической надёжности, показана классификация методов расчёта функциональной надёжности (блоки с серым фоном).

Определению функциональной надёжности трубопроводных систем посвящено значительно меньше работ. Среди них следует отметить работы [7-10, 37-40, 43-46], которые непосредственно или косвенно затрагивают проблему расчёта функциональной надёжности.

Из приведенной классификации следует, что все методы расчёта функциональной надёжности можно разделить на статистические, аналитико-статистические, аналитические и методы цифрового моделирования.

Статистические методы основаны на обработке данных эксплуатации существующих ТТС. Статистические методы позволяют получить наиболее точные значения функциональной надёжности конкретной ТТС. Общим недостатком статистических методов является необходимость длительного накопления информации о поведении системы. Чем больше период наблюдения и

объём обработанных данных, тем более точные результаты расчёта функциональной надёжности. Другим серьёзным недостатком статистических методов является невозможность использования результатов статистической обработки данных одних систем для получения хотя бы оценки функциональной надёжности других систем. Последний недостаток исключает использование данных методов для проектирования новых и развития существующих ТТС.

Методы цифрового моделирования основаны на построении цифровой модели проектируемых или реконструируемых трубопроводных сетей и имитации их функционирования с последующей статистической обработкой данных о поведении модели. Методы цифрового моделирования ТТС позволяют значительно сократить время расчёта показателей надёжности. Цифровое моделирование предполагает:

- задание цифровой модели системы с использованием генераторов случайных чисел, которые имитируют появление аварийных повреждений в сети во времени и пространстве по равномерному закону распределения;
- задание показательной функции распределения для старения и износа различных элементов трубопроводной сети с последующим построением цифрового графика проведения ремонтно-профилактических работ;
- управление масштабом времени для прогнозирования показателей надёжности по истечению любого наперёд заданного периода эксплуатации;
- программную реализацию статистических методов расчёта, основанных на обработке данных о поведении модели.

Основной недостаток методов цифрового моделирования – необходимость разработки цифровой модели для каждой ТТС. Причина та же – статистические методы расчёта данных модельных экспериментов не могут отражать структуру системы.

Несмотря на недостатки, методы цифрового моделирования играют исключительно важную роль для доказательства справедливости аналитико-статистических и аналитических методов. Цифровое моделирование позволяет организовывать вычисли-

тельные эксперименты для проверки адекватности любых математических моделей, в том числе и моделей, полученных аналитико-статистическими или аналитическими методами для расчёта функциональной надёжности ТТС.

Аналитико-статистические методы предполагают использование статистических методов обработки данных для структурных элементов и фрагментов сети, надёжность которых не зависит от структуры сети. Для окончательного расчёта функциональной надёжности сети используются аналитические подходы.

Аналитические методы, исключая на любой стадии расчёта функциональной надёжности какую-либо обработку накопленной информации о поведении ТТС, являются наиболее предпочтительными для решения задач проектирования и развития ТТС. Данные методы обеспечивают высокую точность расчетов и позволяют исследовать зависимость функциональной надёжности от различных влияющих факторов и условий функционирования на любых интервалах времени. В случае программной реализации аналитические методы позволяют получать результаты практически в масштабе реального времени. При этом время счёта значительно меньше времени ввода исходных данных о структуре сети и технической надёжности её элементов. Результаты аналитических методов, безусловно, должны соответствовать результатам статистической обработки данных в методах цифрового моделирования. На этом соответствии основана проверка адекватности математических моделей, используемых в аналитических методах.

Использование аналитических методов требует математического описания (математической модели) ТТС. Математическая модель сети составляется при условии полной паспортизации сети ТТС. В обязательном порядке паспортные данные сети должны включать информацию о составе и структуре трубопроводной сети, о технических параметрах всех элементов сети, и в первую очередь – о запорной арматуре и трубопроводных участках. Паспортные данные должны содержать сведения о технической надёжности различных элементов сети (например, задвижек) или позволять рассчитывать техническую надёжность по простым формулам (например, трубопроводных участков).

Необходимость паспортизации сети – это основной недостаток аналитических методов. Но паспортизация проводится не специально для расчёта функциональной надёжности сети. Это общее условие для её нормальной эксплуатации и развития. Любое транспортное или коммунальное предприятие, эксплуатирующее трубопроводную сеть, должно иметь исчерпывающую информационную базу о структуре, составе и характеристиках сети и поддерживать её полноту и достоверность в течение всего периода эксплуатации сети.

1.8. Задачи исследования

Анализ существующих методов расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем позволяет сделать следующие выводы:

- статистические методы, которые обеспечивают наиболее адекватные оценки технической и функциональной надёжности независимо от сложности и размерности сетей, требуют слишком больших временных затрат для их реализации и непригодны для проектирования новых сетей со сложной структурой;
- аналитические методы, которые способны при определении показателей надёжности учитывать структуру сети, не обеспечивают должной адекватности и практически непригодны для оценки надёжности сложных магистральных и распределительных сетей;
- аналитико-статистические методы имеют недостатки, которые присущи как статистическим (потребность больших временных затрат на сбор статистических сведений), так и аналитическим методам (высокая размерность и структурная сложность сетей), потому их использование малоперспективно;
- для проведения ремонтно-профилактических работ без прерывания транспортирования ЦП потребителям с целью восстановления технической надёжности конструктивных элементов трубопроводной сети все восстанавливаемые элементы должны обладать ремонтприспособленностью, которая достигается структурной избыточностью сети;

Магистральные трубопроводные транспортные системы

- в силу идентичности математических моделей распределительных и магистральных сетей все аналитические методы, используемые для расчёта технической или функциональной надёжности распределительных сетей, могут быть с успехом использованы и для аналогичных расчётов магистральных сетей.

Сделанные выводы выдвигают требования по усовершенствованию существующих аналитических методов расчёта функциональной надёжности ТТС. Прежде всего, усовершенствование методов должно быть направлено на:

- повышение адекватности результатов расчёта;
- универсализацию методов по отношению к сложности и размерности сетей;
- расширение сферы приложения методов, в том числе обобщение методов расчёта функциональной надёжности распределительных ТТС на расчёт надёжности магистральных ТТС;
- обеспечение оперативности методов расчётов на случай экстренного изменения структуры сети или параметров её отдельных элементов, влияющих на надёжность всей системы;
- возможность определения ремонтпригодности отдельных элементов или фрагментов трубопроводной сети;
- возможность определения степени резервирования поставки ЦП конкретным потребителям.

Совершенствование методов не должно влиять на их способность вести расчёты функциональной надёжности в реальном масштабе времени как для задач эксплуатации и развития сетей, так и проектирования совершенно новых.

Для реализации требований по усовершенствованию существующих аналитических методов расчёта функциональной надёжности ТТС, а также для достижения цели исследования (см. разд.1.6), необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод определения относительного времени (в процентном выражении), в течение которого потребитель распределительных трубопроводных систем получает целевой продукт в зависимости от структуры сети и надёжности ее отдельных элементов. Другими словами, разработать метод расчета надёж-

ности поставки целевого продукта конкретному пользователю в реально существующих или проектируемых коммунальных трубопроводных сетях.

3. Обобщить разработанный метод на магистральные трубопроводные системы.

4. Продемонстрировать целесообразность и эффективность применения разработанного метода расчёта функциональной надёжности при анализе различных конструкций магистральных трубопроводов.

5. Обозначить направления дальнейшего развития теории функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем.

Приведенный перечень является содержательной, или вербальной, постановкой задач настоящего исследования. Решение этих задач позволит осуществлять на всех этапах эксплуатацию и развития МТТС количественный расчёт и учёт показателей функциональной надёжности системы.

РАЗДЕЛ 2

РАСЧЁТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ АВАРИЙНО-РЕМОНТНЫХ ЗОН

Структура трубопроводной транспортной системы оказывает большое влияние на её функциональную надёжность, т.е. на способность системы решать свою основную задачу – непрерывно транспортировать ЦП потребителю. Из систем с равными техническими параметрами трубопроводов более высокой функциональной надёжностью обладают те, структура которых обеспечивает больше альтернативных маршрутов транспортирования ЦП от источников к потребителям. Протяженность маршрутов транспортирования отрицательно сказывается на надёжности системы: чем длиннее маршрут, тем ниже её функциональная надёжность.

Выявление и учёт зависимости функциональной надёжности системы от её структуры играет важную роль в проектировании, эксплуатации и развитии ТТС. Для успешного решения задач проектирования ТТС, рациональной эксплуатации и выбора оптимального варианта развития существующих ТТС необходим метод расчёта функциональной надёжности, который бы с высокой адекватностью позволял рассчитывать вероятность непрерывного транспортирования ЦП от источника к потребителю. Метод должен учитывать как протяженность трубопроводов, так и любую особенность структуры трубопроводной системы, влияющую на искомую функциональную надёжность.

Трубопроводная транспортная сеть наиболее важная и наиболее сложная часть ТТС, осуществляющая транспортировку и распределение ЦП. Фактически, расчёт функциональной надёжности трубопроводной транспортной системы сводится к расчёту функ-

циональной надёжности распределительной трубопроводной сети. Это значит, что расчёт производится без учёта активных источников и в условиях неопределённости в отборе ЦП потребителями.

Среди существующих расчётных методов функциональной надёжности ТТС наиболее перспективным является аналитико-статистический метод, теоретические основы которого подробно изложены в [44]. Метод удачно учитывает пространственную структуру и текущее техническое состояние ТТС, а результатом его использования является конкретное значение (не оценка) функциональной надёжности на расчётный период эксплуатации системы.

В основу метода положено разбиение ТТС на аварийно-ремонтные зоны (АРЗ) и замены структуры ТТС макроструктурой АРЗ, которая полностью наследует функциональную надёжность системы. По этой причине в дальнейшем данный аналитико-статистический метод расчёта функциональной надёжности ТТС будем называть методом АРЗ.

Рассмотрим основные положения метода АРЗ. Для упрощения и конкретизации каждого этапа в методе АРЗ в качестве объекта приложения возьмём водопроводную ТТС, хотя нет никаких принципиальных причин для их особого выделения из рассматриваемого множества напорных трубопроводных сетевых систем.

Метод АРЗ включает семь последовательных этапов [44]:

1. Формирование математической модели трубопроводной транспортной сети со сложной топологической структурой в виде взвешенного графа.
2. Разбиение исходного взвешенного графа сложной трубопроводной транспортной сети на подграфы (макроэлементы), каждый из которых соответствует одной АРЗ.
3. Расчет технической надежности АРЗ как независимого макроэлемента в функционировании ТТС.
4. Преобразование исходного взвешенного графа сети большой размерности во взвешенный макрограф АРЗ малой размерности (замена микрографа каждой АРЗ одной вершиной).

Расчёт функциональной надёжности

5. Построение упрощенного макрографа АРЗ относительно конкретного потребителя трубопроводной транспортной сети.

6. Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети относительно конкретного потребителя.

7. Формирование математической модели функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя с помощью классических методов теории надёжности технических систем и непосредственный расчёт функциональной надёжности.

2.1. Формирование математической модели трубопроводной транспортной сети

В качестве математической модели распределительной трубопроводной транспортной сети, однозначно описывающей распределительную сеть со сложной структурой с целью последующего построения математической модели для определения функциональной надёжности системы, выступает взвешенный граф

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; z, l, \lambda, \mu, p), \quad (2.1)$$

где **V** – множество вершин графа, соответствующих водопроводным колодцам, источнику питания и потребителям; **E** – множество дуг графа, соответствующих реальным трубопроводным участкам; z, l, λ, μ, p – весовые функции на рёбрах графа, соответственно определяющие наличие и расположение запорной арматуры на участке, длину участка, интенсивность износа и интенсивность восстановления участка, техническую надёжность запорной арматуры на участке.

В общем случае граф (2.1) не является ориентированным. В задачах, связанных с проектированием и эксплуатацией ТТС, ориентация графа служит для указания направления транспорта ЦП на каждом трубопроводном участке. При расчёте функциональной надёжности поставки ЦП потребителям информация о направлении движения ЦП не используется, т.е. функциональная надёжность инвариантна по отношению к направлению транспор-

та ЦП. При необходимости направление ЦП на каждом участке в проектируемых и эксплуатируемых сетях определяется с помощью гидравлического расчёта [15–17], который проводят до начала расчёта функциональной надёжности.

Конкретизируем состав и назначение всех элементов математической модели (2.1).

Положим, что множество вершин определяется выражением

$$\mathbf{V} = \{v_i\}_1^n. \quad (2.2)$$

Тогда множество дуг определится выражением

$$\mathbf{E} = \{e_{ij} = (v_i \ v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, \ i \neq j\}. \quad (2.3)$$

Математическое описание множества всех задвижек и их расположения на трубопроводе осуществляется с помощью весовой функции z на множестве $\mathbf{E}$, которая отображает его на множество $\{0, 1, 2, 3\}$ по правилу $z(e_{ij}) = z_{ij}$, причем

$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{без задвижек;} \\ 1, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с задвижкой в начальном колодце } v_i; \\ 2, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с задвижкой в конечном колодце } v_j; \\ 3, & \text{если дуге } e_{ij} \text{ соответствует трубопровод} \\ & \text{с двумя задвижками.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Ещё четыре весовые функции вводятся для указания параметров трубопроводов, влияющих на результаты расчета надежности поставки ЦП конкретным потребителям, а именно:

Расчёт функциональной надёжности

– функция расстояния l , относящая каждой дуге графа $e \in \mathbf{E}$ действительное число $l(e) > 0$ в качестве параметра длины соответствующего трубопровода;

– функция интенсивности отказов λ , относящая каждой дуге графа $e \in \mathbf{E}$ действительное число $\lambda(e) > 0$, которое фиксирует значение параметра интенсивности отказов соответствующего трубопровода;

– функция интенсивности восстановления μ , относящая каждой дуге графа $e \in \mathbf{E}$ действительное число $\mu(e) > 0$, которое фиксирует значение параметра интенсивности восстановления соответствующего трубопровода после его выхода из строя;

– весовая вектор-функция технической надёжности запорной арматуры $\mathbf{p}$, относящая к каждой дуге графа $e \in \mathbf{E}$ двухкомпонентную вектор-строку $\mathbf{p}_{ij}^T = \begin{bmatrix} p^- & p^+ \end{bmatrix}$, элементами которой являются вероятности безотказной работы запорной арматуры, расположенной в начале и конце соответствующего трубопровода, причем

$$\mathbf{p}_{ij}^T = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 0; \\ \begin{bmatrix} p^-(e) & 1 \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 1; \\ \begin{bmatrix} 1 & p^+(e) \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 2; \\ \begin{bmatrix} p^-(e) & p^+(e) \end{bmatrix} & \text{при } z(e_{ij}) = 3. \end{cases} \quad (2.5)$$

Аргументами $p^-(e)$ и $p^+(e)$ функции (2.5) являются вероятностные величины, представляющие собой действительные числа из диапазона $[0, 1]$. Аргумент $p^-(e)$ определяет степень износа и состояние запорной арматуры, находящейся в начале трубопровода, аргумент $p^+(e)$ – в конце трубопровода. При отсутствии запорной арматуры на каком-либо конце трубопровода соответствующие аргументы функции (2.5) приравняются единице.

Выражения (2.1) – (2.5) образуют математическую модель трубопроводной сети для решения задач, связанных с построением математических моделей функциональной надёжности в зависимости от пространственной структуры трубопроводной сети.

Наличие математической модели для конкретной трубопроводной транспортной сети является необходимым условием для программной реализации процедуры разбиения исходного графа сети на аварийно-ремонтные зоны, построения макрографа сети (графа АРЗ) и вычисления технической надёжности каждой зоны.

Сформируем математическую модель для конкретной трубопроводной сети, которая входит в состав системы, изображенной в виде графа на рис. 2.1. Данная сеть будет использована в качестве примера для всех последующих этапов метода АРЗ.

Трубопроводная транспортная сеть питается от одного активного источника $O_{\text{и}}$ и снабжает целевым продуктом четырёх потребителей: $O_{\text{п1}}$, $O_{\text{п2}}$, $O_{\text{п3}}$ и $O_{\text{п4}}$.

Сама трубопроводная транспортная сеть содержит пятнадцать колодцев (вершины графа с номерами от 1 до 15), двенадцать задвижек с обозначением a_j , $j = \overline{1,12}$, одну задвижку с обозначением a_c^- и шестнадцать трубопроводных участков (рёбра графа с обозначением t_i , $i = \overline{1,16}$). Все задвижки в трубопроводной транспортной сети условно изображены на схеме вне колодцев – рядом с вершиной, в соответствующем колодце которой реально расположена та или иная задвижка.

Согласно (2.1), математическая модель для рассматриваемой трубопроводной транспортной сети определяется графом

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; z, l, \lambda, \mu, p). \quad (2.6)$$

Здесь $V = \{v_i\}_{i=1}^{15} = \{1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15\}$ – множество вершин; $E = \{e_{ij} = (v_i \ v_j) \mid i, j = \overline{1, n}, \ i \neq j\} = \{(1 \ 2)$

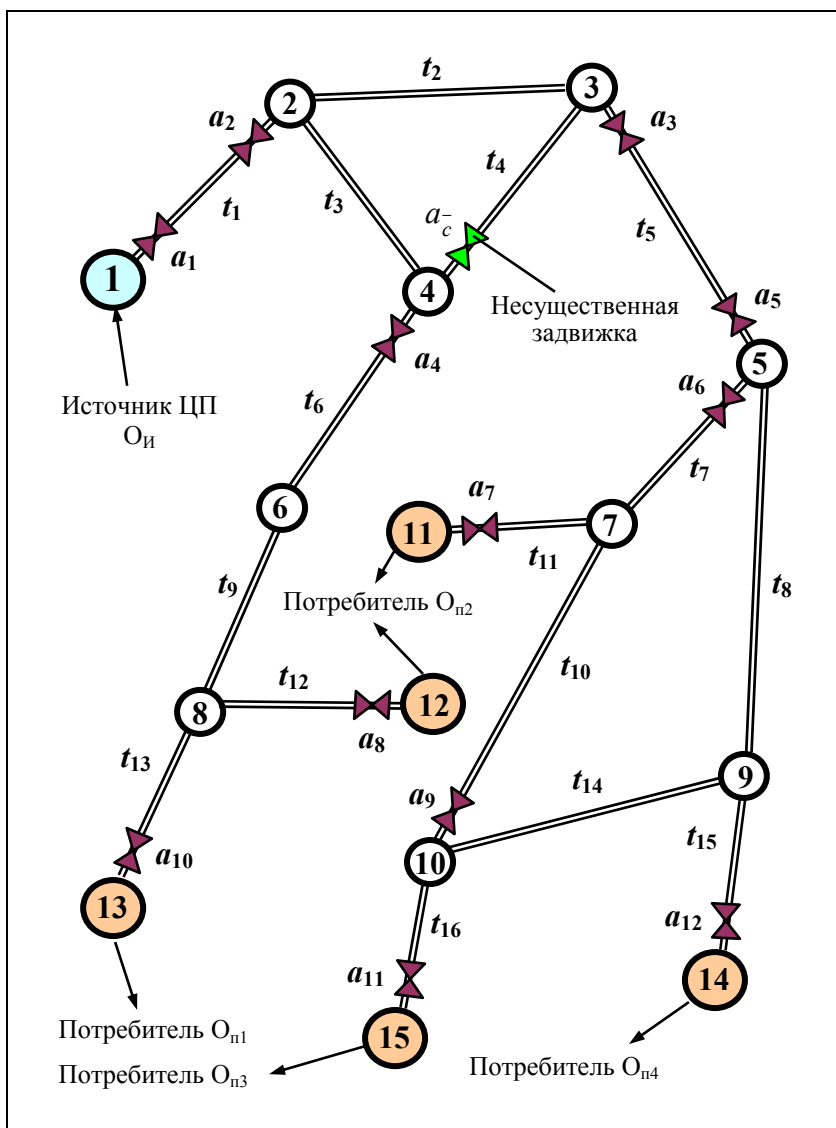


Рис. 2.1 – Схема трубопроводной транспортной системы

$(2\ 3)(2\ 4)(3\ 4)(3\ 5)(4\ 6)(5\ 7)(5\ 9)(6\ 8)(7\ 10)(7\ 11)(8\ 12)$
 $(8\ 13)(9\ 10)(9\ 14)(10\ 15)\}$ – множество рёбер. Значения весовых функций $z, l, \lambda, \mu, \mathbf{p}$ на ребрах графа заданы в табличной форме (табл. 2.1).

Таблица 2.1
 Задание весовых функций взвешенного графа транспортной сети

№ п.п.	Ребро e_{ij}	Весовая функция, [ед. измерения]				
		$z(e_{ij})$	$l(e_{ij}), [\text{км}]$	$\lambda(e_{ij}), [\text{км}^{-1} \text{год}^{-1}]$	$\mu(e_{ij}), [\text{год}^{-1}]$	$\mathbf{p}^T(e_{ij})$
1	(1 2)	3	10	0,20	1 / 0,01	[0,99 0,98]
2	(2 3)	0	8	0,26	1 / 0,007	[1 1]
3	(2 4)	0	7	0,26	1 / 0,007	[1 1]
4	(3 4)	2	6	0,26	1 / 0,007	[1 0,98]
5	(3 5)	3	7	0,26	1 / 0,007	[0,98 0,97]
6	(4 6)	1	5	0,26	1 / 0,007	[0,98 1]
7	(5 7)	1	4	0,40	1 / 0,003	[0,97 1]
8	(5 9)	0	4	0,40	1 / 0,003	[1 1]
9	(6 8)	0	3	0,40	1 / 0,003	[1 1]
10	(7 10)	2	2	0,40	1 / 0,003	[1 0,97]
11	(7 11)	2	0,4	0,40	1 / 0,003	[1 0,97]
12	(8 12)	2	0,4	0,40	1 / 0,003	[1 0,97]
13	(8 13)	2	0,5	0,40	1 / 0,003	[1 0,97]
14	(9 10)	0	0,7	0,40	1 / 0,003	[1 1]
15	(9 14)	2	0,3	0,40	1 / 0,003	[1 0,97]
16	(10 15)	2	0,5	0,40	1 / 0,003	[1 0,97]

Номер по порядку (№ п.п. в табл. 2.1) удобно использовать в качестве индекса или номера дуги.

2.2. Разбиение трубопроводной транспортной сети на аварийно-ремонтные зоны

Аварийно-ремонтная зона (АРЗ) – это часть трубопроводной транспортной сети. Для любой АРЗ справедливы высказывания:

- в случае возникновения аварии или необходимости проведения ремонтно-профилактических работ на любом трубопроводном участке зоны без доступа ЦП к месту работ все остальные трубопроводные участки и потребители этой зоны вынуждено отсекаются запорной арматурой от источника ЦП;

- АРЗ относительно любого своего трубопроводного участка является минимально возможной зоной, отсекаемой запорной арматурой от всей трубопроводной сети для гарантированного прекращения доступа ЦП от источника к этому участку;

- в процессе эксплуатации трубопроводной транспортной сети все потребители одной и той же зоны имеет равную возможность получать ЦП: в каждый период времени они все либо получают ЦП, либо не получают;

- работоспособность конструктивных элементов (трубопроводных участков, колодцев, запорной арматуры и пр.) одной АРЗ не зависит от работоспособности конструктивных элементов других АРЗ;

Последнее высказывание никоим образом не касается запорной арматуры, перевод которой в состояние «закрыто» препятствует доступу ЦП в АРЗ. Такую запорную арматуру будем называть *отсекающей* или *существенной*. Термин «существенная» говорит о том, что соответствующая запорная арматура играет существенную роль в решении производственной задачи по прекращению доступа ЦП в одну из АРЗ и решении аналитической задачи по расчёту функциональной надёжности сети относительно потребителей этой же зоны.

Задание множества вершин $\mathbf{V}$ (2.2), множества рёбер $\mathbf{E}$ (2.3) и весовой функции z на множестве $\mathbf{E}$ (2.4) позволяет произвести однозначное разбиение исходного графа сети $\mathbf{G}$ (2.1) на подграфы функционально независимых АРЗ. Весовые функции l, λ, μ, p не принимают участия в разбиении исходного графа $\mathbf{G}$. Таким образом, для решения задачи разбиения трубопроводной

транспортной сети на АРЗ достаточно задание весового графа сети в усеченной форме

$$\mathbf{G}[z] = (\mathbf{V}, \mathbf{E}; z).$$

Разбиение исходного графа на подграфы АРЗ может производиться вручную или с помощью современных компьютерных технологий. В любом случае процедура разбиения соответствует алгоритму, приведенному на рис. 2.2.

Алгоритм разбиения начинается с ввода данных, определяющих математическую модель исходного графа трубопроводной транспортной сети (блок 2). Вводимые данные представляют собой двумерный массив $\mathbf{E}$ размерности $m \times 3$, в котором задаются все рёбра графа и соответствующие им значения весовой функции z . Здесь m – общее количество рёбер в исходном графе сети. Так, для рассматриваемого примера содержимым массива $\mathbf{E}$ являются данные из табл. 2.1, выделенные серым фоном.

Следующий блок 3 создаёт вспомогательный массив $\Delta\mathbf{E}$, заполняя его множеством всех рёбер исходного графа, и подготавливает (очищает) программный счётчик зон.

Блоки 4 – 10 организуют циклическую обработку исходных данных и вывод результатов обработки. При каждом выполнении цикла формируется подграф новой АРЗ, номер которой s определяется содержимым счётчика (блок 5). В блоке 6 из непустого массива $\Delta\mathbf{E}$ выбирается произвольное ребро e_{pq} . Следующий блок 7 (процедура) из исходного графа $\mathbf{G}$ выделяет s -й подграф $\mathbf{G}_s$, которому принадлежит ребро e_{pq} . Блок 8 фиксирует результаты циклической обработки: номер s очередной АРЗ и соответствующий этой зоне подграф $\mathbf{G}_s$. Конечный блок цикла 9 из вспомогательного массива $\Delta\mathbf{E}$ удаляет все рёбра, принадлежащие подграфу $\mathbf{G}_s$. Циклическая обработка завершается, когда после формирования подграфа очередной АРЗ массив $\Delta\mathbf{E}$ окажется пустым (блок 4).

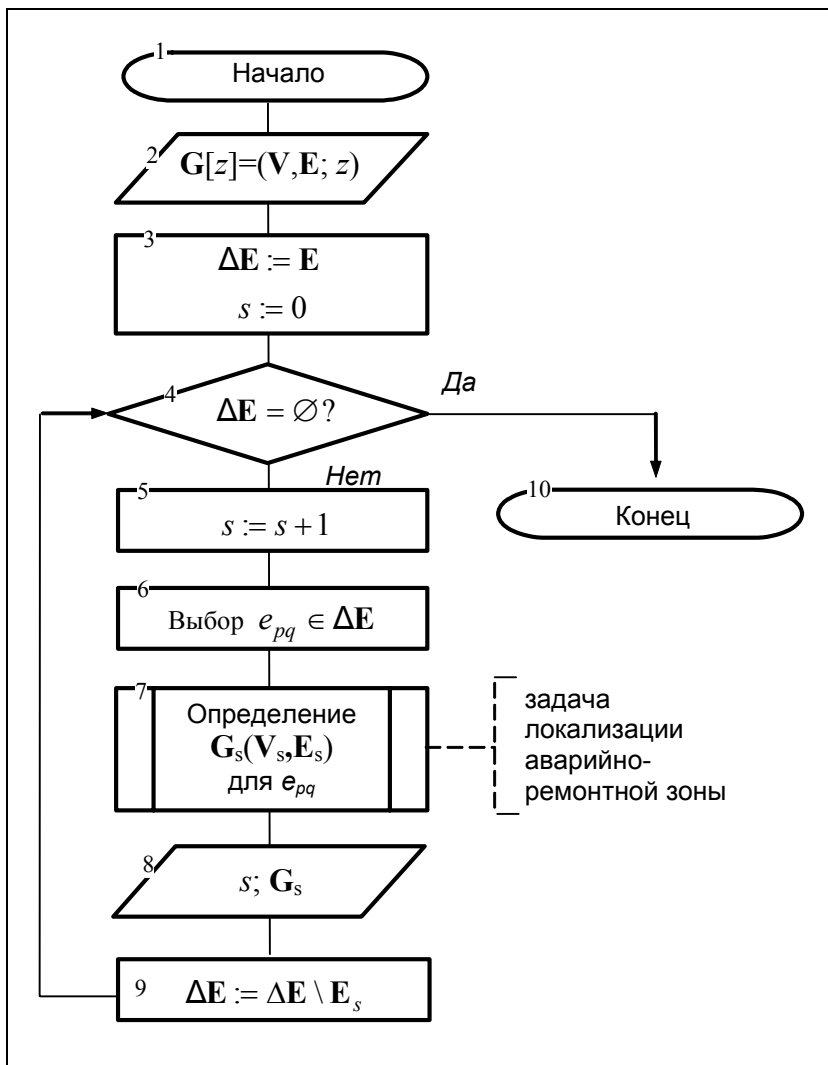


Рис.2.2 – Схема алгоритма разбиения исходного графа сети на подграфы аварийно-ремонтных зон

Выход из цикла по критерию блока 4 приводит к завершению работы всего алгоритма. Номер последней зоны, определяемый, программной переменной s , указывает на общее количество АРЗ в трубопроводной транспортной сети.

В трубопроводной транспортной сети, кроме отсекающей арматуры, может присутствовать *несущественная* запорная арматура, текущее положение которой «закрыто» или «открыто» не влияет на доступ ЦП в АРЗ. Примером такой арматуры может служить задвижка a_c^- на рис. 2.1. Положение несущественной запорной арматуры влияет только на гидравлическое сопротивление трубопроводного участка, в котором она установлена.

В решении задачи «разбиения трубопроводной транспортной сети на АРЗ» конечный результат зависит только от существенной запорной арматуры. Во избежание ошибок, связанных с разбиением запорной арматуры на существенную и несущественную, необходимо, чтобы весовая функция z учитывала всю имеющуюся в сети запорную арматуру. Тогда корректное программное разбиение арматуры на существенную и несущественную производится автоматически в процессе циклического выполнения процедуры определения подграфа АРЗ $G_s[z] = (V_s, E_s; z)$ для произвольно взятого ребра e_{pq} из множества рёбер E (процедурный блок 7).

Определение подграфа АРЗ G_s для произвольного ребра e_{pq} является ключевой процедурой в решении задачи разбиения исходного графа сети на АРЗ. Она заслуживает более подробного рассмотрения.

Каждое ребро e_{ij} исходного графа G входит в несколько подграфов G_r^{ij} , $r = \overline{1, m_{ij}}$, которые могут быть отсечены от исходного графа с помощью различных комбинаций существенных задвижек. Здесь m_{ij} – общее число таких подграфов для ребра e_{ij} . Самый большой отсекаемый подграф – это исходный граф всей трубопроводной транспортной сети. По крайней мере, один

Расчёт функциональной надёжности

из m_{ij} подграфов, пусть таким подграфом $G_r^{ij}[z]$ ($G_r^{ij}[z] \subset G[z]$) будет подграф $G_1[z] = (V_1, E_1; z_1)$, имеет наименьшее число рёбер:

$$card E_1 = \min_r \{card E_r\}, \quad r = \overline{1, m_{ij}}. \quad (2.7)$$

Именно подграф $G_1[z]$ является моделью искомой зоны, которой принадлежит трубопровод, соответствующий ребру e_{ij} . Общее количество различных минимальных подграфов типа $G_1[z]$ такое же, как и количество всех АРЗ в сети. Для каждого минимального подграфа характерным является отсутствие существенной запорной арматуры внутри АРЗ. Только несущественная запорная арматура может находиться внутри АРЗ, и только внутри.

Задача локализации АРЗ для конкретного трубопровода формулируется следующим образом.

Дана математическая модель трубопроводной транспортной сети в виде связного взвешенного графа $G[z] = (V, E; z)$ и указано ребро $e_{ij} \in E$, соответствующее трубопроводному участку, для которого следует определить аварийно-ремонтную зону.

Требуется из всех подграфов $G_g^{ij}[z]$, $g = \overline{1, m_{ij}}$, включающих ребро e_{ij} , входящих в исходный граф $G[z]$ и граничащих с остальной частью графа $G[z] \setminus G_g^{ij}[z]$ только посредством существенной запорной арматуры, найти подграф $G_1[z] = (V_1, E_1; z_1)$, удовлетворяющий критерию $card E_1 = \min_r \{card E_g\}$, $g = \overline{1, m_{ij}}$, где m_{ij} – общее число подграфов $G_g^{ij}[z]$.

Теоретически решение данной задачи может быть получено путем прямого перебора всех возможных комбинаций рёбер, образующих связные подграфы и включающие ребро e_{ij} , с проверкой для каждой комбинации выполнения требований задачи. Однако практически такой способ неэффективен из-за астрономического числа возможных комбинаций.

Решение задачи локализации АРЗ для произвольно взятого ребра e_{pq} из множества $\mathbf{E}$, минуя прямой перебор, можно получить с помощью рекурсивного алгоритма, предложенного Самойленко Н.И. в [53], если исходный граф сети преобразовать в ориентированный граф. При этом каждое ребро e_{ij} в исходном графе заменяется дугой e_{ij} , направленной от вершины v_i к вершине v_j . Данный алгоритм оперирует только рёбрами графа сети, которые непосредственно сопрягаются с указанным ребром e_{pq} , рекурсивно наращивая его до подграфа, гарантированно удовлетворяющего критерию (2.6). Это позволяет исключить из решения задачи подавляющее число рёбер, а само решение сделать компактным, наглядным и простым, особенно при отслеживании решения с помощью компьютерной графики, например, в графической среде AutoCAD.

Рекурсивный алгоритм локализации АРЗ соответствует вычислимой функции

$$f(e_{pq}) = \begin{cases} \mathbf{G}_0, & \text{если } z_{pq} = 3; \\ R(\mathbf{G}_0, v_p), & \text{если } z_{pq} = 2; \\ R(\mathbf{G}_0, v_q), & \text{если } z_{pq} = 1; \\ R(R(\mathbf{G}_0, v_p), v_q), & \text{если } z_{pq} = 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

где

Расчёт функциональной надёжности

$$\forall e_{pq} \in \mathbf{E}, \quad \mathbf{E}_0 = \{e_{pq}\}, \quad \mathbf{V}_0 = \{v_p, v_q\}, \quad \mathbf{G}_0 = (\mathbf{V}_0, \mathbf{E}_0); \quad (2.9)$$

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{если } v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1, \end{cases} \quad (2.10)$$

$$Q(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{если } z_{ij} = 3 \vee z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^- \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+; \\ \mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij}, & \text{если } z_{ij} = 1 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^+ \vee \\ & \vee z_{ij} = 2 \wedge e_{ij} \in \mathbf{E}_r^-; \\ \mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij} \cup R(\mathbf{G}_1, v_s \mid v_s \in \{v_i, v_j\}, v_s \neq v_r), & \\ & \text{если } z_{ij} = 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

Здесь $\mathbf{G}_1 \cup \mathbf{G}_{ij} \Leftrightarrow (\mathbf{V}_1 \cup \{v_r\}, \mathbf{E}_1 \cup e_{ij})$ при условии $i = r \vee j = r$; $\mathbf{E}_r^-$ – множество дуг, исходящих из вершины v_r , $\mathbf{E}_r^- \subseteq \{e_{rj} \mid e_{rj} \in \mathbf{E}\}$; $\mathbf{E}_r^+$ – множество дуг, входящих в вершину v_r , $\mathbf{E}_r^+ \subseteq \{e_{rj} \mid e_{rj} \in \mathbf{E}\}$, $r = \overline{1, n}$.

В рамках принятых в (2.11) обозначений объединение множеств исходящих и входящих дуг $\mathbf{E}_r^- \cup \mathbf{E}_r^+$ представляет собой

множество дуг $\mathbf{E}_r$, инцидентных r -й вершине, а объединение

$\bigcup_{k=1}^n \mathbf{E}_k$ определяет множество $\mathbf{E}$ всех дуг графа сети.

В сложной трубопроводной сети при высокой связности исходного графа рекурсивная обработка может вернуться в вершину, которая уже была обработана. При этом повторная циклическая обработка в (2.10) теряет смысл, хотя и не влияет на конечный результат. Чтобы аннулировать и тем самым уменьшить глубину рекурсии, необходимо модифицировать условие (2.10) следующим образом:

$$R(\mathbf{G}_1, v_r) = \begin{cases} \mathbf{G}_1, & \text{если } v_r \in \mathbf{V}_1 \vee \text{card } \mathbf{E}_r^c = 0; \\ R(Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), v_r), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } v_r \notin \mathbf{V}_1 \wedge \text{card } \mathbf{E}_r^c > 1; \\ Q(\mathbf{G}_1, e_{ij}), & e_{ij} \in \mathbf{E}_r^c, \quad i = r \vee j = r, \\ & i \neq j, \quad \text{если } v_r \notin \mathbf{V}_1 \wedge \text{card } \mathbf{E}_r^c = 1. \end{cases} \quad (2.12)$$

Модификация (2.12) позволяет существенно сократить время работы программы, реализующей алгоритм разбиения, и уменьшить потребность в динамической памяти компьютера при её выполнении.

Выражения (2.8) – (2.12) представляют собой математическую модель процесса разбиения графа сети на подграфы АРЗ.

Решение задачи локализации АРЗ в графической среде *AutoCAD* позволяет визуально наблюдать процесс разбиения исходного графа сети на подграфы АРЗ.

Применительно к рассматриваемому примеру алгоритм разбиения исходного графа сети на подграфы АРЗ приводит к результатам, приведенным на рис. 2.3 и отраженным в табл. 2.2.

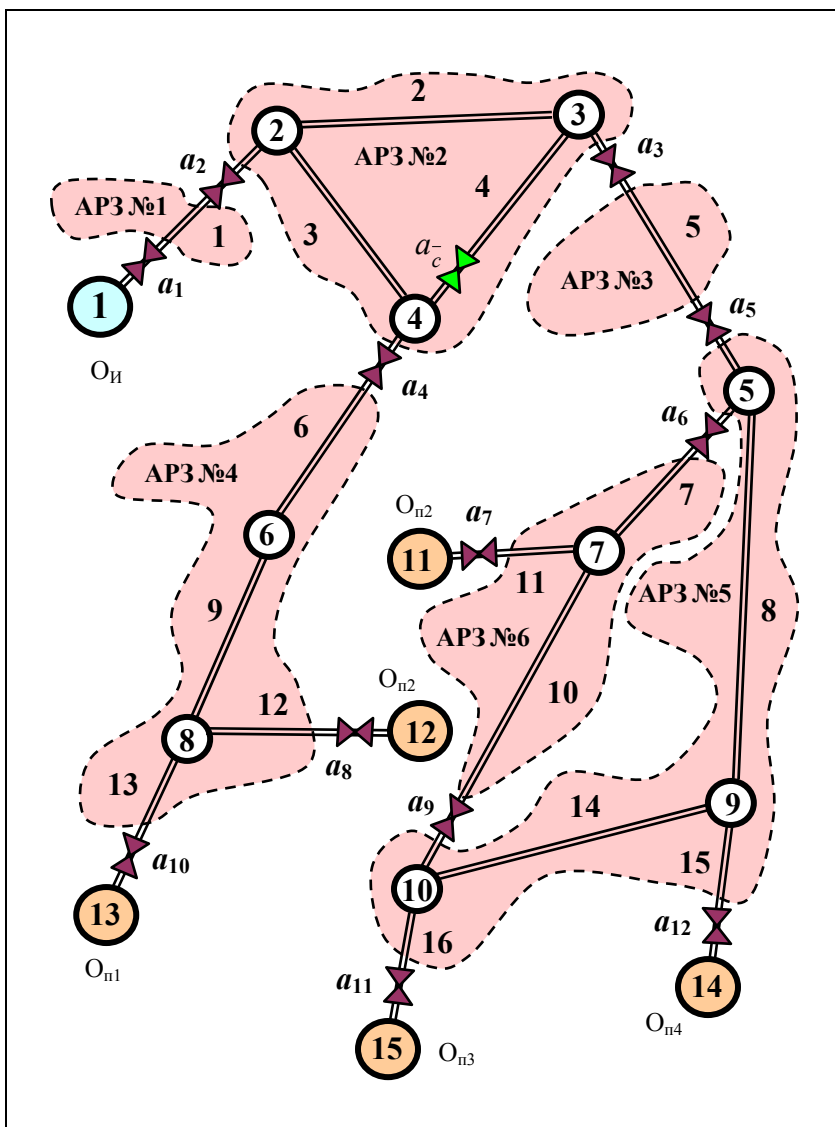


Рис.2.3 – Разбиение исходного графа трубопроводной транспортной сети на подграфы аварийно-ремонтных зон

Результаты разбиения исходного графа сети на подграфы АРЗ

№ под- графа (АРЗ)	Элементы подграфа (АРЗ)		
	Рёбра подграфа (тру- бопроводные участки)	Отсекающие задвиги	Вершины под- графа (колодцы)
1	$e_{1,2}$ (t_1)	a_1, a_2	—
2	$e_{2,3}, e_{2,4}, e_{3,4}$ (t_2, t_3, t_4)	a_2, a_3, a_4	2, 3, 4
3	$e_{3,5}$ (t_5)	a_3, a_5	—
4	$e_{4,6}, e_{6,8}, e_{8,12}, e_{8,13}$ (t_6, t_9, t_{12}, t_{13})	a_4, a_8, a_{10}	6, 8
5	$e_{5,9}, e_{9,10}, e_{9,14}, e_{10,15}$ ($t_8, t_{14}, t_{15}, t_{16}$)	$a_5, a_6, a_9, a_{11}, a_{12}$	5, 9, 10
6	$e_{5,6}, e_{7,10}, e_{7,11}$ (t_7, t_{10}, t_{11})	a_6, a_7, a_9	7

Результаты разбиения указывают на такие особенности трубопроводной транспортной сети:

- сеть состоит из шести аварийно-ремонтных зон;
- задвиги $a_j, j = \overline{1,12}$, являются существенными (отсекающими);
- задвигка a_c^- в АРЗ № 2 является несущественной;
- потребитель $O_{п2}$, которому в исходном графе сети соответствуют вершины 11 и 12, получает ЦП из двух АРЗ (№4 и №6);
- выход из строя АРЗ №1 или №2 приводит к прерыванию поставок ЦП всем потребителям;

Расчёт функциональной надёжности

- выход из строя АРЗ №3 или №5 приводит к прерыванию поставок ЦП потребителям $O_{п3}$ и $O_{п4}$;

- выход из строя АРЗ №4 приводит к прерыванию поставок ЦП потребителю $O_{п1}$;

- выход из строя АРЗ №6 не приводит к прерыванию поставок ЦП потребителям.

Разбиение исходного графа сети на подграфы АРЗ позволяет определить ремонтнопригодность АРЗ и всей сети в целом. Так в условиях рассматриваемого примера только АРЗ №6 обладает ремонтнопригодностью, т.е. проведение аварийно-ремонтных или профилактических работ в этой зоне не приводит к прерыванию поставок ЦП в системе хотя бы одному потребителю. Выход же из строя любой другой АРЗ нарушает непрерывность поставок ЦП, по крайней мере, одному потребителю. Следовательно, вся сеть не обладает ремонтнопригодностью.

2.3. Расчет технической надежности аварийно-ремонтной зоны как независимого макроэлемента в структуре трубопроводной транспортной системы

Техническое состояние аварийно-ремонтной зоны не зависит от технического состояния конструктивных элементов других зон. Выход из строя *любого* элемента одной зоны не влечёт за собой выхода из строя какой-либо другой зоны или какого-либо конструктивного элемента, принадлежащего другим зонам. Поэтому любая АРЗ может рассматриваться как независимый макроэлемент в трубопроводной структуре транспортной сети, состоящий из микроэлементов (запорной арматуры, трубопроводов, колодцев и пр.) и наследующий свойства своих микроэлементов. Если какой-либо микроэлемент переходит в состояние «неисправный», то и соответствующий макроэлемент также переходит в состояние «неисправный». Техническое состояние АРЗ зависит только от технического состояния конструктивных элементов, входящих в состав этой АРЗ, и только этой. При этом техническое состояние АРЗ никоим образом не зависит от того, как микроэлементы объединяются в макроэлемент, т.е. не зависят от топологической

структуры АРЗ. В дальнейшем, структуру АРЗ будем называть микроструктурой.

Функционирование же всей трубопроводной сети зависит не только от технического состояния каждой АРЗ, но и от топологической структуры, объединяющей все АРЗ в единую трубопроводную транспортную сеть. В дальнейшем, топологическую структуру сети на уровне АРЗ будем называть макроструктурой. Решение функциональной задачи ТТС (непрерывная поставка ЦП) по отношению к каждому конкретному потребителю и по отношению ко всем потребителям вместе будет зависеть от технического состояния каждой АРЗ и от того, как АРЗ стыкуются между собой, т.е. от макроструктуры сети.

Из сказанного следуют выводы:

- техническая надёжность АРЗ зависит от состава и технической надёжности её конструктивных элементов и не зависит от её структуры (микроструктуры);
- функциональная надёжность сети зависит от макроструктуры сети, состава АРЗ (макроэлементов) и технической надёжности каждой АРЗ;
- функциональная надёжность сети не зависит от внутренней микроструктуры АРЗ.

Таким образом, для расчёта функциональной надёжности необходимо предварительно рассчитать техническую надёжность всех АРЗ трубопроводной транспортной сети.

Как было отмечено ранее, АРЗ считается работоспособной, если работоспособны все её элементы. Это значит, что технической надёжности АРЗ соответствует последовательная модель надёжности технических систем (рис.2.4).

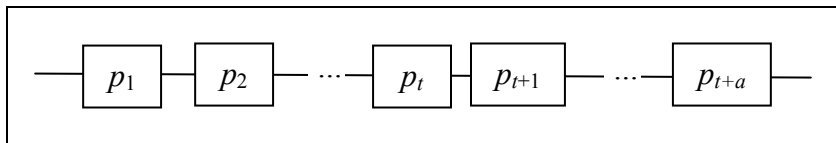


Рис. 2.4 – Последовательная модель технической надёжности АРЗ

Расчёт функциональной надёжности

На рис. 2.4 последовательная модель технической надёжности АРЗ включает надёжности всех трубопроводов $p_1, p_2, \dots, p_t$ и несущественных задвижек $p_{t+1}, p_{t+2}, \dots, p_{t+a}$. Здесь t – общее количество трубопроводов в АРЗ, a – количество несущественных задвижек в зоне. Техническая надёжность всей зоны P_Z в этом случае определяется по формуле

$$P_Z = \left(\prod_{i=1}^t p_i \right) \cdot \left(\prod_{i=t+1}^{t+a} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t+a} p_i. \quad (2.13)$$

Структура АРЗ может иметь самую разную конфигурацию, но как бы трубопроводы и несущественные задвижки не объединялись в единую АРЗ, модель надёжности (2.13) этой зоны будет оставаться одной и той же.

Использование формулы (2.13) предполагает наличие вероятностей безотказной работы всех элементов зоны. Эти вероятности могут быть получены для задвижек на основании паспортных данных устройства с учётом времени эксплуатации. Для трубопроводных участков вероятность их безотказной работы определяется как разность между единицей и относительным временем нахождения этих участков в неработоспособном состоянии на основании накопленных статистических данных либо на основании данных, представленных в табл. 2.1, с помощью формулы

$$p_i = 1 - \frac{\lambda_i l_i}{\mu_i}, \quad i = \overline{1, t}, \quad (2.14)$$

где t – количество трубопроводных участков в АРЗ; λ_i – интенсивность отказов, определяемая как количество отказов в течение года на 1 км трубы с параметрами (толщина стенок, диаметр, материал, срок эксплуатации), соответствующими параметрам i -го трубопроводного участка, $\text{км}^{-1} \text{год}^{-1}$; μ_i – интенсивность восстановления неисправностей, определяемая как величина, об-

ратная времени устранения одной неисправности на трубопроводе i -го типа, год⁻¹; l_i – длина i -го трубопроводного участка, км.

Рассчитаем техническую надёжность всех АРЗ трубопроводной транспортной сети, заданной условием рассматриваемого примера.

Для расчёта технической надёжности предварительно преобразуем табл. 2.1 в табл. 2.3, воспользовавшись формулой (2.14).

Таблица 2.3

Надёжность конструктивных элементов трубопроводной сети

Индекс трубопроводного участка	Индекс АРЗ	Надёжность	
		p_i	$\mathbf{p}^T(e_{ij})$
1	1	0,9800	[0,99 0,98]
2	2	0,9854	[1 1]
3	2	0,9873	[1 1]
4	2	0,9891	[1 0,98]
5	3	0,9873	[0,98 0,97]
6	4	0,9909	[0,98 1]
7	6	0,9952	[0,97 1]
8	5	0,9952	[1 1]
9	4	0,9964	[1 1]
10	6	0,9976	[1 0,97]
11	6	0,9995	[1 0,95]
12	4	0,9995	[1 0,95]
13	4	0,9994	[1 0,95]
14	5	0,9992	[1 1]
15	5	0,9996	[1 0,95]
16	5	0,9994	[1 0,95]

Расчёт функциональной надёжности

Таблица в формате табл. 2.1 удобна для представления исходных данных для проектируемых сетей, когда отсутствует возможность статистической оценки надёжности работы различных элементов сети.

Таблица же в формате табл. 2.3 удобна для представления исходных данных для действующих сетей, когда надёжность каждого его элемента определяется на основе накопленных данных о состоянии этого элемента в процессе эксплуатации.

В табл. 2.3 серым фоном выделены данные, которые участвуют в определении технической надёжности различных АРЗ.

Технические надёжности аварийно-ремонтных зон в соответствии с формулой (2.14) при сохранении для p_i индексации, используемой в табл. 2.3, определяется следующим образом:

- для АРЗ №1 $P_{Z1} = p_1 = 0,98$;
- для АРЗ №2 $P_{Z2} = p_2 p_3 p_4 p_c^- = 0,943$ ($p_c^- = 0,98$ – надёжность несущественной задвижки a_c^-);
- для АРЗ №3 $P_{Z3} = p_5 = 0,9873$;
- для АРЗ №4 $P_{Z4} = p_6 p_9 p_{12} p_{13} = 0,9862$;
- для АРЗ №5 $P_{Z5} = p_8 p_{14} p_{15} p_{16} = 0,9934$;
- для АРЗ №6 $P_{Z6} = p_7 p_{10} p_{11} = 0,9923$.

2.4. Преобразование исходного графа сети в макрограф АРЗ

Четвертый этап метода АРЗ предполагает преобразование исходного взвешенного графа $G[z, l, \lambda, \mu, p]$ транспортной сети в новый взвешенный макрограф АРЗ

$$Z[p, p_a] = (V_z, E_z; p, p_a), \quad (2.15)$$

Здесь V_z – множество вершин макрографа, соответствующих аварийно-ремонтным зонам сети; E_z – множество рёбер макрографа, определяющих топологические связи между АРЗ; p – весовая функция на вершинах графа, определяющая техническую надёжность соответствующей АРЗ; p_a – весовая функция на рёбрах графа, определяющая техническую надёжность задвижек, соответствующих этим рёбрам.

Мощность множества V_z определяется общим количеством АРЗ в сети. Мощность множества E_z определяется общим количеством отсекающих задвижек, и только отсекающих. Несущественные задвижки никоим образом не влияют на структуру макрографа АРЗ.

Четвёртый этап позволяет устранить из исходного графа сети всю графическую информацию, не имеющую отношение к расчёту функциональной надёжности, а пять весовых функций заменить двумя.

Два предыдущих этапа подготавливают исходные данные для процедуры построения взвешенного макрографа АРЗ. Так, 2-й этап (разбиения исходного графа на подграфы АРЗ) определяет состав и структуру макрографа, а 3-й этап (расчёт технической надёжности АРЗ) определяет весовую функцию p . Весовая функция p_a макрографа АРЗ извлекается из весовой функции p исходного графа.

Вершины исходного графа, соответствующие источнику ЦП и потребителям, сохраняют своё назначение и положение в макрографе АРЗ.

В условиях рассматриваемого примера макрограф АРЗ имеет вид, изображенный на рис. 2.5.

Расчёт функциональной надёжности

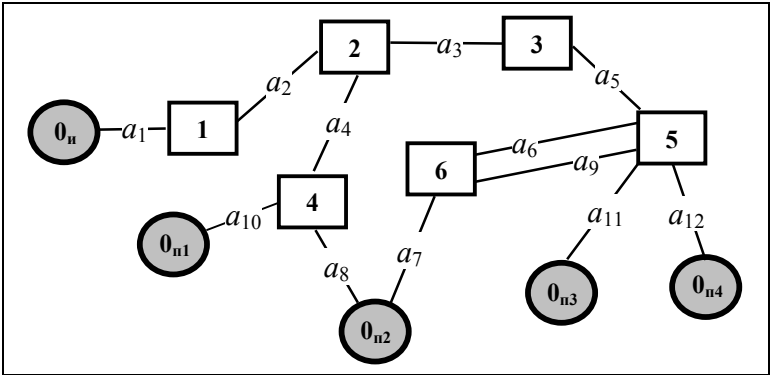


Рис. 2.5 – Макрограф аварийно-ремонтных зон

Весовая функции p макрографа $Z[p, p_a]$ соответствует табл. 2.4.

Таблица 2.4
Весовая функция p на вершинах графа АРЗ

	Номер вершины (№ АРЗ)					
	1	2	3	4	5	6
Весовая функция p	0,98	0,943	0,9873	0,9862	0,9934	0,9923

Весовая функции p_a макрографа $Z[p, p_a]$ соответствует табл. 2.5.

Таблица 2.5
Весовая функция p_a на рёбрах графа АРЗ

	Задвижка ребро											
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Весовая функция p_a	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,95	0,95	0,97	0,95	0,95	0,95

Макрограф АРЗ является наглядным средством для выражения общей структуры ТТС. Он показывает, каким образом и с помощью какой запорной арматуры аварийно-ремонтные зоны стыкуются между собой, с источником ЦП и потребителями. Но самое главное – он содержит в полном объеме всю полезную информацию, необходимую для расчёта функциональной надёжности системы относительно любого потребителя сети.

Граф на рис. 2.5 допускает упрощение. Задвижки a_6 и a_9 , соединяющие зоны №5 и №6, несут одинаковую функциональную нагрузку. Если хотя бы одна из зон №5 и №6 пребывает в аварийном состоянии, то обе задвижки a_6 и a_9 должны находиться в положении «закрыто». Если обе зоны №5 и №6 пребывают в исправном состоянии, то обе задвижки должны находиться в рабочем состоянии «открыто». Поэтому параллельные рёбра, соединяющие в макрографе АРЗ вершины 5 и 6, можно заменить одним обобщенным ребром. Этому ребру будет соответствовать обобщенная задвижка с технической надёжностью $p_{a_{6,9}} = p_{a_6} \cdot p_{a_9} = 0,9215$.

Последовательный тип модели технической надёжности обобщенной задвижки объясняется тем, что отсекающие задвижки в параллельных ребрах отвечают своему назначению только тогда, когда они все одновременно исправны.

Весовая функция p_a упрощенного макрографа АРЗ в условиях рассматриваемого примера соответствует табл. 2.6.

Таблица 2.6

Весовая функция p_a на рёбрах графа АРЗ

	Ребро– задвижка										
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	$a_{6,9}$	a_7	a_8	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Весовая функция p_a	0,99	0,98	0,98	0,98	0,97	0,9215	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

Расчёт функциональной надёжности

Анализ макрографа АРЗ позволяет выявить особенности сети, играющие существенную роль в выполнении очередного этапа расчёта функциональной надёжности. В условиях рассматриваемого примера такими особенностями являются

- только одна АРЗ №1 стыкуется непосредственно с источником;
- потребитель $O_{п2}$ получает ЦП из двух АРЗ (№4 и №6);
- каждый из потребителей $O_{п1}$, $O_{п3}$ и $O_{п4}$ получает ЦП только из одной аварийно-ремонтной зоны (соответственно, АРЗ №4, №5 и №5);
- потребители $O_{п3}$ и $O_{п4}$ получают ЦП из одной и той же АРЗ (№5).

2.5. Построение упрощенного макрографа АРЗ сети относительно конкретного потребителя

Как правило, поставка ЦП конкретному потребителю трубопроводной транспортной сети зависит не от всех АРЗ. Так, поставки ЦП потребителям зон, непосредственно стыкующихся с источником ЦП, зависят только от надёжности этих зон и не зависят от остальных.

В общем случае, если не один маршрут транспортирования ЦП от источника к конкретному потребителю не включает какую-либо зону сети, то работоспособность этой зоны не влияет на функциональную надёжность сети относительно данного потребителя. Данное обстоятельство позволяет упростить макрограф АРЗ для расчёта функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей. Упрощение макрографа АРЗ относительно конкретного потребителя соответственно упрощает анализ макрографа АРЗ на предмет построения расчётной модели для функциональной надёжности сети относительно данного потребителя.

В условиях рассматриваемого примера упрощенный макрограф АРЗ относительно потребителя $O_{п1}$ показан на рис. 2.6.

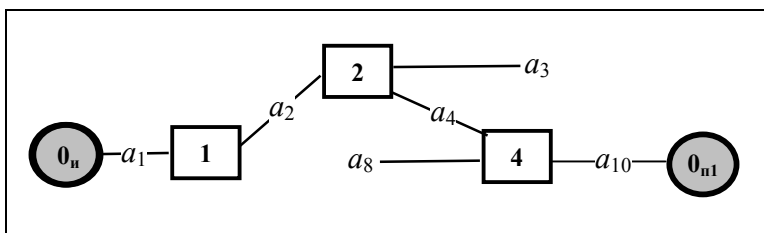


Рис. 2.6 – Упрощенный макрограф АРЗ относительно потребителя $O_{н1}$

Все конструктивные элементы сети, соответствующие элементам графа на рис. 2.6, влияют на функциональную надёжность сети относительно потребителя $O_{н1}$. Так, при неработоспособности любой из зон №1, №2 и №4 транспортирование ЦП к потребителю становится невозможным. В свою очередь, выход из строя любой из задвижек $a_1, a_2, a_3, a_4, a_8, a_{10}$ приводит к неработоспособности одной из зон №1, №2, №4. Работоспособность остальных зон (№3, №5, №6) и задвижек ($a_5, a_6, a_7, a_9, a_{11}, a_{12}$) на транспортирование ЦП к потребителю $O_{н1}$ не влияют, так как могут быть отсечены от маршрутов транспортирования ЦП работоспособной задвижкой a_3 .

Потребитель $O_{н2}$ с целью повышения надёжности поставки имеет возможность получать ЦП из двух зон (№4 и №6). Макрограф АРЗ относительно потребителя $O_{н2}$ показан на рис. 2.7. Как следует из структуры макрографа, все АРЗ и отсекающие задвижки сети оказывают влияние на транспортирование ЦП к потребителю $O_{н2}$.

Потребители $O_{н3}$ и $O_{н4}$ получают ЦП из одной зоны №5. Поэтому данным потребителям соответствует один упрощенный макрограф АРЗ, который показан на рис. 2.8.

Расчёт функциональной надёжности

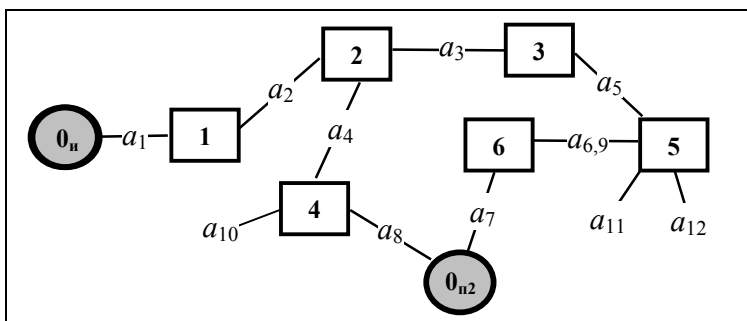


Рис. 2.7 – Упрощенный макрограф AP3 относительно потребителя O_{n2}

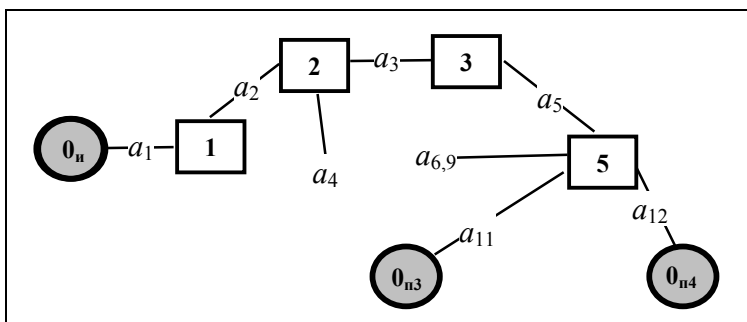


Рис. 2.8 – Упрощенный макрограф AP3 относительно потребителей O_{n3} и O_{n4}

Как следует из рис. 2.8, зоны №4 и №6 и задвижки a_7 , a_8 , a_{10} в упрощенном макрографе не фигурируют, а значит – на функциональную надёжность сети относительно потребителей O_{n3} и O_{n4} они никакого влияния не оказывают.

Все упрощенные графы AP3 содержат лишь полезную информацию для расчёта функциональной надёжности сети относительно конкретных потребителей, что значительно облегчает проведение последующих двух этапов.

2.6. Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети относительно конкретного потребителя

Расчётная модель функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети для каждого конкретного потребителя строится на основе упрощённого макрографа АРЗ относительно данного потребителя.

Расчётная модель наследует структуру упрощенного графа. При этом вершины, соответствующие зонам, и рёбра, соответствующие отсекающим задвижкам, заменяются блоками с указанием технической надёжности соответствующих элементов трубопроводной транспортной сети.

На рис. 2.9 приведены расчётные модели для всех потребителей трубопроводной транспортной сети в условиях рассматриваемого примера.

Последовательная модель надёжности для потребителя $O_{п1}$ (рис. 2.9,а) объясняется тем, что выход из строя любой задвижки или АРЗ, обозначения которых фигурируют на усечённом графе АРЗ (рис. 2.6), приводит к прекращению транспортирования ЦП потребителю $O_{п1}$. Только одновременная безотказная работа всех этих элементов позволяет системе отвечать своему назначению относительно потребителя $O_{п1}$.

Потребителю $O_{п2}$ транспортирование ЦП осуществляется по двум маршрутам. Потребитель будет получать ЦП, если при одновременной работоспособности всех элементов цепочки « $a_1 + \text{АРЗ №1} + a_2 + \text{АРЗ №2} + a_3 + a_4$ » будет работоспособна хотя бы одна из цепочек элементов: « $\text{АРЗ №4} + a_8 + a_{10}$ » или « $\text{АРЗ №3} + a_5 + \text{АРЗ №5} + a_{11} + a_{12} + a_{6,9} + \text{АРЗ №6} + a_7$ ». Только одновременный выход из строя обеих цепочек приводит к вынужденному прекращению подачи ЦП потребителю. Поэтому данным цепочкам соответствует параллельная модель надёжности, которая затем уже последовательно соединяется с первой цепочкой (рис. 2.9,б).

Расчёт функциональной надёжности

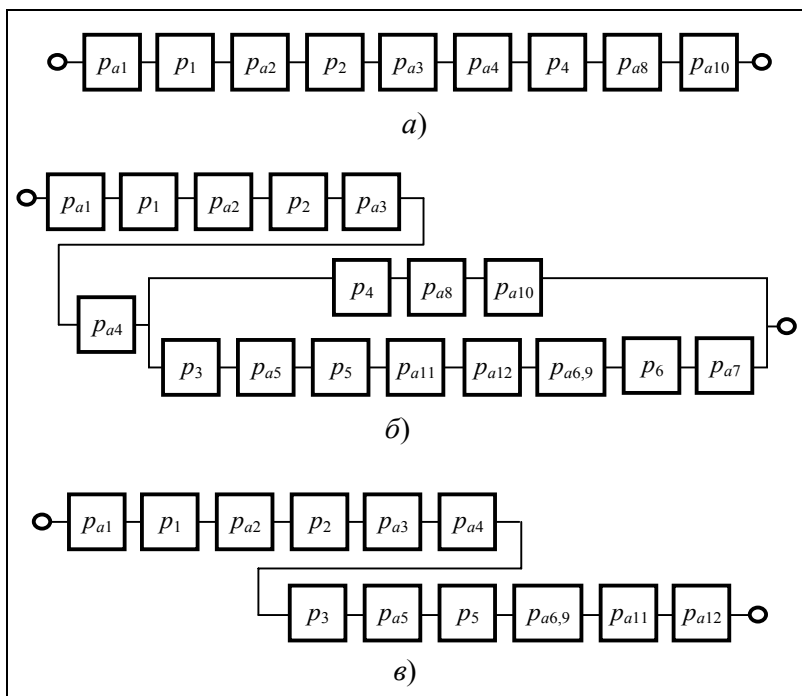


Рис. 2.9 – Расчетные модели функциональной надёжности

Потребителям $O_{п3}$ и $O_{п4}$ соответствует одна и та же расчётная модель (рис. 2.9, в). Как и в случае с потребителем $O_{п1}$, им соответствует последовательная модель надёжности. Объясняется это тем, что выход из строя любой задвижки или АРЗ, обозначения которых фигурируют на усечённом графе АРЗ (рис. 2.8), приводит к прекращению транспортирования ЦП потребителям $O_{п3}$ и $O_{п4}$. Только одновременная безотказная работа всех этих элементов позволяет системе отвечать своему назначению относительно потребителей $O_{п3}$ и $O_{п4}$.

2.7. Математическая модель функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя

Получение математической модели функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя осуществляется на основе расчётных моделей с помощью классических методов теории надёжности технических систем.

Математическая модель формируется для каждого потребителя $\mathbf{O}_k$ трубопроводной системы, $k \in \{1, K\}$. Здесь K – общее количество потребителей. Если несколько потребителей получают ЦП только из одной зоны, то соответствующие им математические модели функциональной надёжности совпадают.

Для формирования математической модели функциональной надёжности относительно потребителя $\mathbf{O}_k$ используются следующие исходные данные:

- расчётная модель функциональной надёжности относительно потребителя $\mathbf{O}_k$;
- весовая функция p на вершинах макрографа АРЗ, определяющая техническую надёжность каждой АРЗ сети;
- весовая функция p_a на рёбрах макрографа АРЗ, определяющая техническую надёжность запорной арматуры всей сети.

Если расчётная модель функциональной надёжности для произвольно взятого потребителя $\mathbf{O}_k$ состоит только из последовательно и параллельно соединённых элементов (нет мостовых соединений), то процесс формирования математической модели, соответствует алгоритму, приведенному на рис. 2.10.

Как следует из алгоритма, формирование математической модели функциональной надёжности сети относительно потребителя $\mathbf{O}_k$ представляет собой циклический процесс замены в расчётной модели участков $U[p]$ с однотипным соединением элементов одним элементом с эквивалентной надёжностью.

Расчёт функциональной надёжности

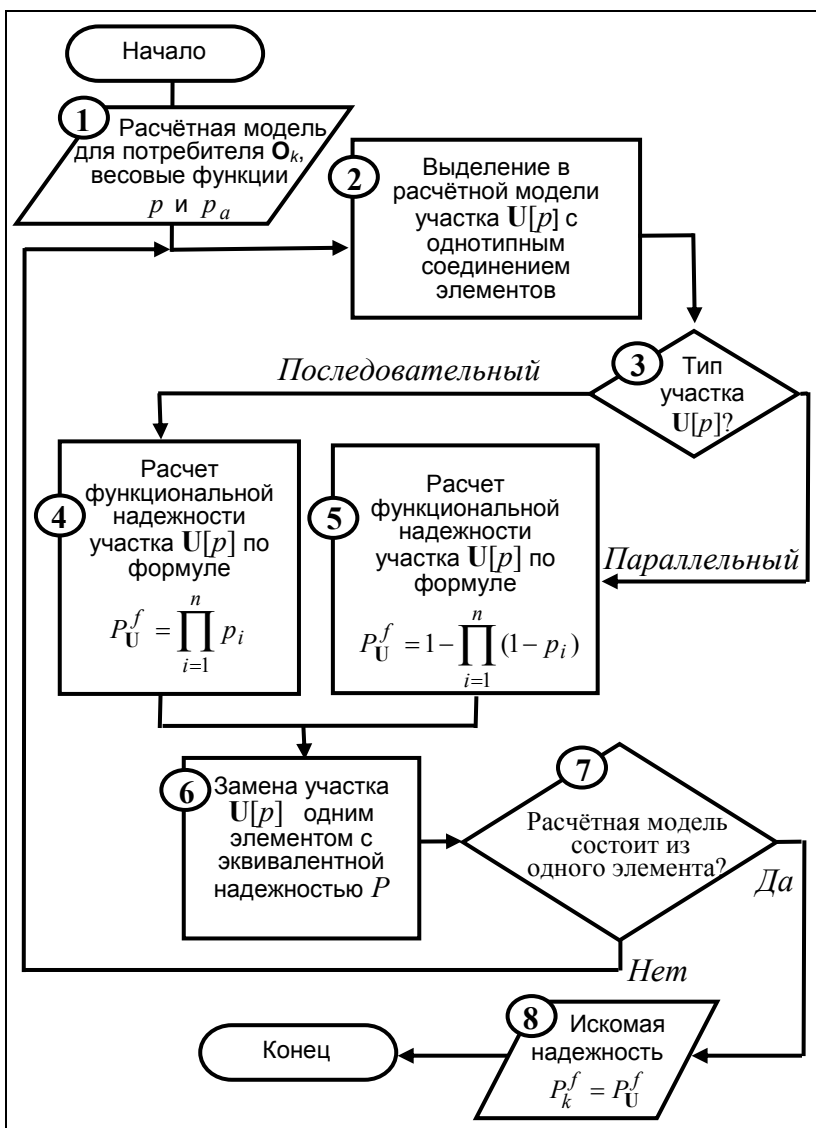


Рис. 2.10 – Схема алгоритма построения математической модели функциональной надёжности сети относительно конкретного потребителя

Эквивалентная надёжность рассчитывается по формуле

$$P_U^f = \prod_{i=1}^n p_i \quad (\text{в случае последовательного соединения элементов})$$

или по формуле $P_U^f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$ (в случае параллельного соединения элементов). Здесь n – количество элементов в однотипном участке; p_i – вероятность безотказной работы конструктивного элемента трубопроводной транспортной сети, соответствующего i -му элементу участка. Значение p_i выбирается согласно весовым функциям p и p_a макрографа АРЗ.

Циклический процесс замены продолжается до тех пор, пока расчётная модель не будет состоять только из одного элемента. Расчетная формула надёжности P_U^f этого элемента и будет являться искомой математической моделью функциональной надёжности сети относительно k -го потребителя системы:

$$P_k^f = P_U^f, \quad k = \overline{1, K}. \quad (3.36)$$

Величина P_k^f показывает, с какой вероятностью трубопроводная сеть обеспечивает поступление ЦП от источника к k -му потребителю системы в течение определённого периода времени (как правило, один год).

В условиях рассматриваемого примера исходными данными являются:

- расчётные модели функциональной надёжности, представленные на рис. 2.9;
- весовая функция p на вершинах макрографа АРЗ, представленная с помощью табл. 2.4;
- весовая функция p_a на рёбрах макрографа АРЗ, представленная с помощью табл. 2.6.

Расчёт функциональной надёжности

Работа алгоритма построения математических моделей для рассматриваемого примера даёт следующие результаты (сгенерированные математические модели):

– для потребителя $\mathbf{O}_1$

$$P_1^f = p_{a1} p_1 p_{a2} p_2 p_{a3} p_3 p_{a4} p_4 p_{a8} p_{a10}; \quad (2.16)$$

– для потребителя $\mathbf{O}_2$

$$P_1^f = p_{a1} p_1 p_{a2} p_2 p_{a3} \times \\ \times [1 - (1 - p_4 p_{a8} p_{a10})(1 - p_3 p_{a5} p_{6,9} p_6 p_{a7} p_{a11} p_{a12})]; \quad (2.17)$$

– для потребителей $\mathbf{O}_3$ и $\mathbf{O}_4$

$$P_1^f = p_{a1} p_1 p_{a2} p_2 p_{a3} p_{a4} p_3 p_{a5} p_{6,9} p_{a11} p_{a12}. \quad (2.18)$$

Здесь $p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{a12}$ – значения весовой функции p_a ;
 $p_1, p_2, \dots, p_6$ – значения весовой функции p .

Расчёты функциональной надёжности по математическим моделям (2.16) – (2.18) дают следующие искомые значения:

$$P_1^f = 0,7664; P_2^f = 0,8377; P_{3,4}^f = 0,6609.$$

Результаты расчёта свидетельствуют, что потребитель $\mathbf{O}_2$, несмотря на свое заурядное положение в общей структуре системы, обеспечивается целевым продуктом с наивысшей надёжностью. Этому способствует резервирование поставки ЦП, обусловленное двойным подключением потребителя к трубопроводной сети: через АРЗ №4 и через АРЗ №5.

* * *

Изложение теоретических основ метода АРЗ и его параллельная иллюстрация на конкретном примере касались трубопроводной транспортной системы с одним источником ЦП. Использо-

ние метода АРЗ в случае двух и более источников ЦП не имеет никаких принципиальных отличий: и последовательность этапов расчёта функциональной надёжности, и их основное содержание остаются прежними.

Отметим несущественные отличия в применении метода АРЗ для систем трубопроводного транспорта с несколькими источниками. Так, на 1-м этапе в задании исходного взвешенного графа сети будет присутствовать не одна, а несколько вершин, каждая из которых соответствует определённому источнику ЦП.

На 4-м и 5-м этапах основной макрограф АРЗ и все упрощенные графы АРЗ будут наследовать все вершины исходного графа сети, соответствующие источникам. При этом упрощённый граф АРЗ для конкретного потребителя должен включать все альтернативные маршруты транспортирования ЦП от всех источников к данному потребителю.

Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной транспортной сети относительно конкретного потребителя (7-й этап) будет начинаться из одной точки, одновременно принадлежащей всем источникам ЦП, образуя таким образом параллельную модель надёжности, каждая ветвь которой соответствует определённому источнику.

Содержание 2-го, 3-го и 7-го этапов остаётся без изменений.

РАЗДЕЛ 3

СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Повышение функциональной надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем – одна из важнейших задач, стоящих перед эксплуатационниками, в решении которой заинтересованы все субъекты системы. В данном разделе будут рассмотрены существующие структурные методы повышения надёжности: резервирование и установка перемычек. Для сравнения влияния структуры сети на её функциональную надёжность используется аналитический метод АРЗ, рассмотренный в предыдущем разделе.

3.1. Особенности магистральных трубопроводных транспортных систем и способы повышения их функциональной надёжности

Магистралью обычно называют главное направление, основную линию в путях сообщения; широкую улицу большого города с интенсивным движением; главный кабель, провод в электрических сетях, в телеграфной и телефонной связи; главную трубу в канализационной или водопроводной сети [4]. Слово магистраль происходит от латинского *magistralis*, что означает – руководящий. Магистраль есть первостепенный элемент некоторой системы, от которого функционально зависят остальные элементы.

Магистральным трубопроводным транспортом называют вид трубопроводного транспорта, осуществляющего поставку продук-

та от мест добычи к местам переработки и потребления [4]. Магистральный трубопроводный транспорт обеспечивает первую ступень в подаче продукта потребителям. На последующих ступенях основной поток транспортируемого продукта с помощью распределительных трубопроводных систем последовательно дробится на менее мощные потоки до тех пор, пока параметры потока не будут удовлетворять требованиям конечных потребителей. При этом поставщик старается осуществить поставку с минимальными суммарными затратами.

При многоступенчатом распределении потоков каждую предыдущую распределительную трубопроводную систему можно считать магистральной по отношению ко всем последующим.

Под понятием «магистральные трубопроводные системы» в контексте настоящей монографии будем понимать не столько трубопроводные системы с функционально высоким приоритетом, сколько системы с повышенной протяженностью трубопроводов. Именно повышенная протяжённость является ключевым параметром систем, на которые ориентировано настоящее исследование.

Таким образом, объектом приложения для настоящего исследования является любая трубопроводная транспортная система, которая в своём составе имеет трубопроводы повышенной протяженности. В качестве таковых могут выступать следующие участки трубопроводных сетей напорных транспортных систем:

- трубопроводы к отдаленным потребителям;
- отводные коллекторы, поставляющие отработанную воду на удаленные загородные очистные сооружения;
- водопроводы от заборных сооружений до городской распределительной сети;
- газопроводы от добывающих скважин до газораспределительных пунктов;
- воздуховоды от компрессорной станции до отдаленных объектов потребления;
- практически все трубопроводные участки магистральных транспортных систем [44].

Повышение функциональной надёжности

Все перечисленные участки играют исключительно важную роль в функционировании трубопроводной сети и системы в целом. Если в системе не предусмотрено резервирование таких участков, то выход из строя одного из них, как правило, приводит к выходу из строя всей системы. При этом система, будь то распределительная или магистральная, не только перестаёт отвечать своему назначению, но и становится объектом повышенной опасности, способной вызвать экологическую катастрофу. В магистральных трубопроводных сетях выход из строя таких участков усугубляется ещё и масштабами потерь и ущербов.

«Независимо от того, какой целевой продукт (газ, вода, нефть, тепло, сжатый воздух, сыпучие материалы и т.п.) транспортируется системой, все протяженные трубопроводные участки должны обладать повышенной надёжностью» [44]. Только высоконадежные системы позволяют обеспечить безаварийную эксплуатацию систем и избежать техногенных катастроф.

При дальнейшем изложении материалов исследования все участки повышенной протяженности распределительных и магистральных сетей будем называть магистральными трубопроводами.

Эксплуатация магистральных трубопроводов сталкивается с проблемой больших расстояний. С одной стороны, чем больше протяженность трубопроводного участка, тем больше функциональная нагрузка, которую несёт этот участок, и тем сильнее сказывается техническое состояние этого участка на общем состоянии системы. С другой стороны, чем больше протяженность трубопровода, тем меньше вероятность его безаварийной работы. Согласно теории надёжности, трубопровод бесконечной длины вообще неработоспособен.

Таким образом, чем длиннее трубопровод, тем острее стоит вопрос по обеспечению его надёжности. В связи с особой актуальностью данного вопроса возникает острая необходимость в разработке методов повышения функциональной надёжности магистральных систем.

Наиболее очевидными методами повышения надёжности магистральных систем являются методы, направленные на повы-

шение прочности трубопроводов и сохранение физических и химических свойств материала труб:

- увеличение толщины стенок магистральных трубопроводов;
- повышение механической прочности и коррозионной устойчивости материала изготовления труб;
- электрозащита трубопроводов от блуждающих токов;
- анодная защита труб от коррозии;
- изоляция труб от агрессивной среды их залегания и пр.

Перечисленные методы позволяют продлить срок службы магистральных трубопроводов.

В процессе длительной эксплуатации трубопроводы часто засоряются и заиливаются, теряя пропускную способность. Многие трубопроводные участки в силу различных причин могут иметь повышенный износ, производственные дефекты или механические повреждения, которые требуют немедленной замены таких участков. Для восстановления и обновления трубопроводов предусматриваются регламентные профилактические работы. Чтобы осуществить такие работы, трубопровод из режима эксплуатации переводится в режим реновационных работ на срок, достаточный для их качественного выполнения. Срок реновации в зависимости от характера и сложности профилактических работ может колебаться в пределах от нескольких часов до нескольких суток или недель. На этот период трубопровод должен быть освобождён от целевого продукта, что также требует определенного периода времени, соизмеримого с периодом проведения самих работ. Естественно, целевой продукт по такому участку сети поставляться потребителям не может, и потребитель несёт убыток. Аналогичная ситуация возникает и при проведении неплановых аварийных работ.

Все потребители сети рассчитывают на непрерывное получение целевого продукта, если только условиями договора на его поставку не оговорено противное. Ряд потребителей, например, предприятия с непрерывным циклом производства, не могут допустить перебои в поставке даже в течение нескольких минут. Чтобы на период проведения профилактических работ потребитель не лишался возможности получать целевой продукт, струк-

Повышение функциональной надёжности

тура сети должна предусматривать альтернативные пути его транспортировки к потребителю.

В практике магистрального трубопроводного транспорта применяют три структурных метода, позволяющих, с одной стороны, обеспечить возможность проведения аварийных и профилактических работ, с другой — повысить функциональную надёжность всей системы:

- метод резервирования трубопроводов;
- метод установка дополнительной запорной арматуры;
- метод установки перемычек между параллельными трубопроводами.

3.2. Резервирование магистральных трубопроводов

Самым распространённым методом, обеспечивающим возможность проведения работ по реновации трубопровода повышенной протяжённости без прерывания транспорта целевого продукта потребителю, является резервирование, т.е. прокладка дополнительных трубопроводов параллельно основному.

При резервировании система запорной арматуры должна обеспечить функциональную независимость всех трубопроводов: перевод любого трубопровода в режим проведения профилактических или ремонтных работ не должен влиять на транспортировку целевого продукта по остальным трубопроводам. Такой метод позволяет при проведении профилактических или аварийных работ не только сохранить основное назначение системы (транспортировать целевой продукт), но и повысить функциональную надёжность всей системы.

В большинстве случаев при резервировании ограничиваются сооружением одного дополнительного трубопровода, т.е. ограничиваются дублированием основного трубопровода. Как правило, сооружение двух параллельных трубопроводов позволяет решить проблему больших расстояний. Анализ экономической эффективности показывает, что сооружение третьего, а тем более четвёртого, пятого и т.д., трубопровода нецелесообразно: незначительное увеличение функциональной надёжности системы при-

водит к неоправданным материальным и трудовым затратам. Исключением, пожалуй, является случаи, когда параллельные трубопроводы обеспечивают повышенную пропускную способность.

Схема простейшей магистральной трубопроводной системы, состоящей из одного трубопровода, показана на рис. 3.1. Здесь задвижка 1 предназначена для регулирования подачи целевого продукта в трубопровод; задвижка 2 – для регулирования подачи целевого продукта из трубопровода к потребителю. Её состояние «закрыто» позволяет держать под некоторым напором целевой продукт в трубопроводе. Состояния «закрыто» задвижки 1 и «открыто» задвижки 2 позволяют освобождать самотёком трубопровод от целевого продукта для проведения профилактических или аварийных работ на трубопроводе. При этом потребитель лишён возможности частично или полностью получать целевой продукт в период проведения профилактических или аварийных работ на трубопроводе или задвижках.

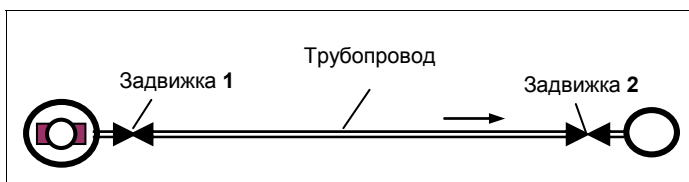


Рис.3.1 – Схема простейшей магистральной трубопроводной системы

Пусть трубопровод имеет надёжность p , а обе задвижки имеют одинаковую техническую надёжность, равную p_a . Тогда модель функциональной надёжности магистрального трубопровода будет иметь вид, показанный на рис. 3.2.

Последовательная модель надёжности объясняется тем, что пользователь получает целевой продукт только тогда, когда работоспособны все элементы системы: и задвижки, и трубопровод. Потребитель лишён возможности получать целевой продукт в

Повышение функциональной надёжности

заданном количестве и заданного качества тогда, когда хотя бы один из элементов системы выйдет из строя.

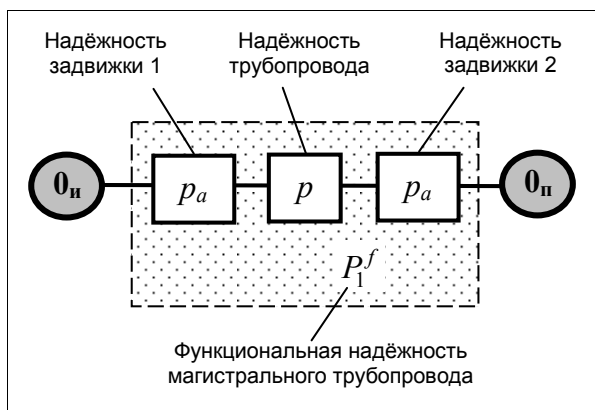


Рис.3.2 – Модель функциональной надёжности простейшего магистрального трубопровода

Функциональная надёжность системы на рис. 3.1, согласно модели на рис. 3.2, определится выражением

$$P_1^f = p_a^2 \cdot p . \quad (3.1)$$

Типичная схема магистральной трубопроводной системы, состоящей из двух параллельных трубопроводов, показана на рис. 3.3. Здесь назначение задвижек 1 и 3 относительно трубопровода 1 и задвижек 2 и 4 относительно трубопровода 2 такое же, как у задвижек 1 и 2 на рис. 3.1 соответственно. Однако потеря работоспособности трубопровода 1 и задвижки 3 или трубопровода 2 и задвижки 4 не приводит к прекращению доступа целевого продукта к потребителю.

Параллельные трубопроводы могут сооружаться специалистами разной квалификации и иметь отличные друг от друга материал, диаметр, степень износа и прочие параметры. В связи с этим техническая надёжность одного из параллельных трубопроводов может отличаться от технической надёжности другого.

В дальнейшем для упрощения расчётов будем считать, что оба трубопровода сооружались в одно и то же время, в одних и тех же условиях и имеют одинаковые технические параметры, т.е. техническая надёжность одного трубопровода равна технической надёжности другого.

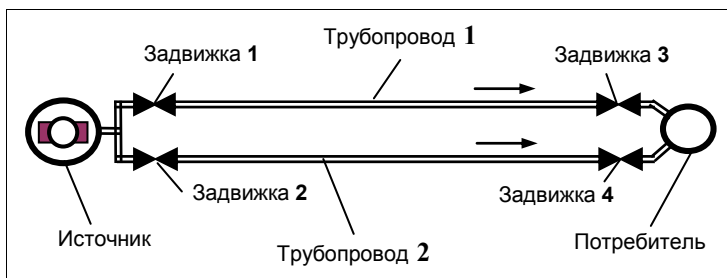


Рис.3.3 – Схема дублирования магистрального трубопровода

Пусть каждый из трубопроводов 1 и 2 имеет техническую надёжность p , а каждая из четырех задвижек 1, 2, 3 и 4 – техническую надёжность p_a . Тогда модель функциональной надёжности сети из двух параллельных трубопроводов будет иметь вид, показанный на рис. 3.4.

Последовательная модель надёжности трубопровода 1 и задвижки 3 объясняется тем, что при проведении ремонтных работ на трубопроводе или задвижке целевой продукт через цепочку этих элементов не транспортируется. Цепочка работоспособна только тогда, когда оба элемента исправны. То же самое касается трубопровода 2 и задвижки 4.

Параллельная модель надёжности цепочки из трубопровода 1 и задвижки 3 с цепочкой из трубопровода 2 и задвижки 4 объясняется тем, что целевой продукт может транспортироваться в системе до тех пор, пока хотя бы одна цепочка исправна. Только выход из строя обеих цепочек не позволяет потребителю получать целевой продукт.

Повышение функциональной надёжности

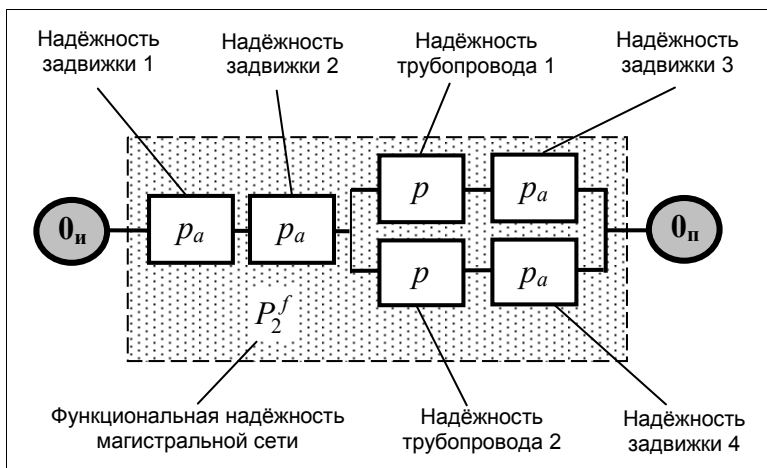


Рис.3.4 – Расчётная модель функциональной надёжности сети с двумя параллельными трубопроводами

Последовательная модель надёжности задвижек 1 и 2 с системой параллельных цепочек объясняется тем, что при выходе из строя хотя бы одной из этих задвижек или системы цепочек транспорт целевого продукта осуществляться не может. Система работоспособна только тогда, когда обе задвижки исправны, а параллельные цепочки позволяют транспортировать целевой продукт потребителю.

Функциональная надёжность системы на рис. 3.3, согласно модели на рис. 3.4, определится выражением

$$P_2^f = p_a^2 \cdot \left[1 - (1 - p \cdot p_a)^2 \right] . \quad (3.2)$$

Аналогичное построение модели надёжности для трубопроводной сети из трёх параллельных трубопроводов (рис. 3.5) приводит к расчётной формуле

$$P_3^f = p_a^3 \cdot \left[1 - (1 - p \cdot p_a)^3 \right]. \quad (3.3)$$

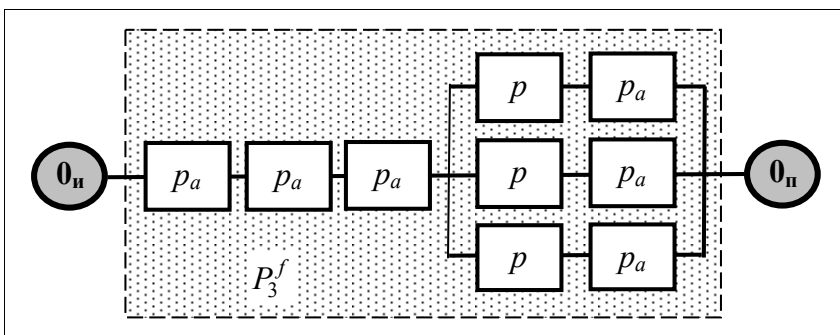


Рис. 3.5 – Расчётная модель функциональной надёжности сети с тремя параллельными трубопроводами

В общем случае, когда система состоит из n параллельных трубопроводов, её функциональная надёжность определяется выражением

$$P_n^f = p_a^n \cdot \left[1 - (1 - p \cdot p_a)^n \right]. \quad (3.4)$$

В случае высокой технической надёжности задвижек ($p_a \approx 1$) формула упрощается:

$$P_n^f = 1 - (1 - p)^n. \quad (3.5)$$

При $n = 2$, т.е. при элементарном резервировании (дублировании) трубопровода, упрощенная математическая модель (3.5) представляется выражением

Повышение функциональной надёжности

$$P_2^f = 1 - (1 - p)^2 \quad (3.6)$$

Табл. 3.1 демонстрирует эффект повышения функциональной надёжности магистральной сети за счёт резервирования трубопровода при различных значениях технической надёжности одного трубопровода p и различной степени резервирования n .

Таблица 3.1

Техн. надёжность трубопровода	Два параллельных трубопровода, $n = 2$		Три параллельных трубопровода, $n = 3$		Четыре параллельных трубопровода, $n = 4$	
p	P_2^f	k_2^f	P_3^f	k_3^f	P_4^f	k_4^f
0,01	0,0199	1,99	0,0297	2,97	0,0394	3,94
0,1	0,19	1,9	0,271	2,71	0,3439	3,44
0,3	0,51	1,7	0,657	2,19	0,7599	2,533
0,5	0,75	1,5	0,875	1,75	0,9375	1,875
0,7	0,91	1,3	0,973	1,39	0,9919	1,417
0,9	0,99	1,1	0,999	1,11	0,9999	1,111
0,99	0,9999	1,01	0,999999	1,0101	0,99999999	1,010101

Данные в табл. 3.1 получены в предположении, что $p_a = 1$.

Табличные величины k_i^f , $i = 2, 3, 4$, представляет собой коэффициент повышения надёжности, показывающий во сколько раз увеличилась функциональная надёжность системы за счёт резервирования трубопровода.

Согласно табл. 3.1, наибольший эффект увеличения надёжности за счёт резервирования наблюдается при малой технической надёжности трубопроводов.

Поскольку $\lim_{p \rightarrow 0} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = n$, то функциональная

надёжность за счёт резервирования может быть увеличена не более, чем в n раз. Так, за счёт дублирования (два трубопровода) – не более, чем в 2 раза, за счёт двукратного резервирования (три трубопровода) – не более, чем в 3 раза; за счёт трёхкратного резервирования (четыре трубопровода) – не более, чем в 4 раза; и т.д. (см. Приложение А.1.).

При высокой технической надёжности трубопровода ($p \approx 1$) эффект повышения функциональной надёжности системы за счёт резервирования полностью отсутствует, поскольку

$$\lim_{p \rightarrow 1} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 1} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = 1 \quad (\text{см. Приложение А.2}).$$

На рис. 3.6 и 3.7 приведены графики функциональной надёжности и коэффициентов k_i^f , $i = 2, 3, 4$, в зависимости от технической надёжности одного трубопровода p . Осевая линия на рис. 3.6 соответствует условной функциональной надёжности системы P_1^f , т.е. надёжности системы при условии отсутствия резервирования (в системе всего один трубопровод). Осевая линия на рис. 3.7 соответствует условному коэффициенту повышения надёжности k_1^f при отсутствии резервирования. В этом случае $k_1^f = 1 = \text{const}$. Пунктирные участки графиков говорят об их неадекватности, поскольку статистико-аналитические методы расчёта функциональной надёжности имеют смысл только для систем с простейшими потоками отказов, т.е. при значениях p , близких к единице.

Графики на рис. 3.6 наглядно демонстрируют, что при значениях технической надёжности близких к нулю ($p \approx 0$) и единице ($p \approx 1$) прирост функциональной надёжности за счёт резервиро-

Повышение функциональной надёжности

вания меньше, чем при значениях из среднего диапазона ($0,05 \leq p \leq 0,95$). Так,

$$\Delta P_{p \approx 0,5}^f \gg \begin{cases} \Delta P_{p \approx 0}^f; \\ \Delta P_{p \approx 1}^f. \end{cases}$$

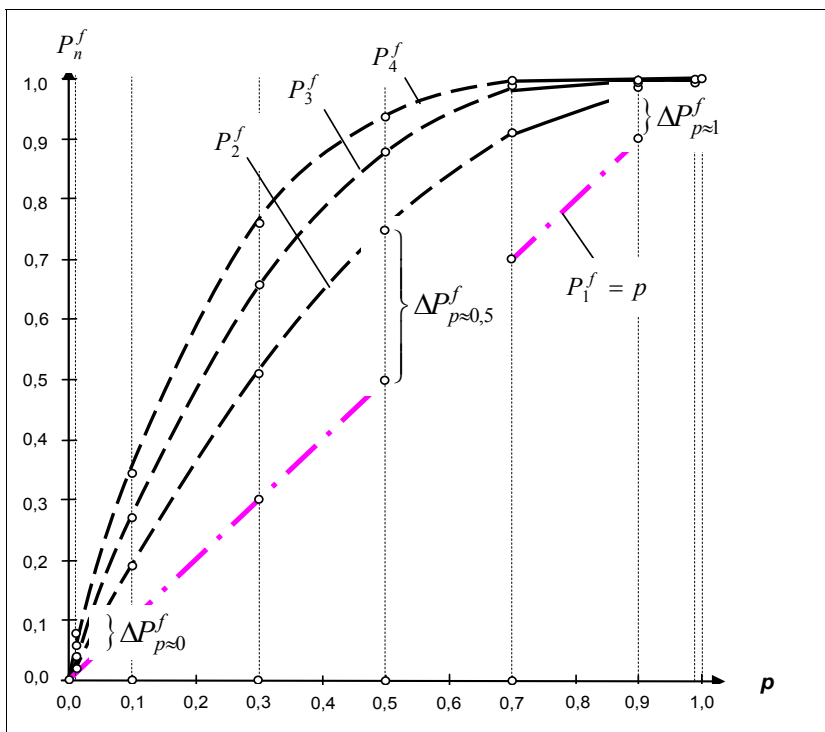


Рис. 3.6 – Графики зависимости функциональной надёжности системы трубопроводного транспорта с резервированием от вероятности технической надёжности трубопровода

Наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы при дублировании трубопровода ($\Delta P_2^f = 0,25$) достигается при $p_2^* = 0,5$. Здесь экстремальное значение p_2^* есть решение задачи одномерной оптимизации при двусторонней ограниченности переменной (Приложение В.1):

$$p_2^* = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} (P_2^f - p) \right] = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^2] - p \} \right].$$

Наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы при двукратном резервировании (три параллельных трубопровода) достигается при $p_3^* = 0,423$ и составляет ($\Delta P_3^f \approx 0,385$). Здесь экстремальное значение p_3^* есть решение задачи одномерной оптимизации при двусторонней ограниченности переменной (Приложение В.2):

$$p_3^* = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} (P_3^f - p) \right] = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^3] - p \} \right].$$

Наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы при трёхкратном резервировании (четыре параллельных трубопровода) достигается при $p_4^* = 0,37$ и составляет ($\Delta P_4^f = 0,4725$). Здесь экстремальное значение p_4^* есть решение задачи одномерной оптимизации при двусторонней ограниченности переменной (Приложение В.3):

$$p_4^* = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} (P_4^f - p) \right] = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} \{ [1 - (1 - p)^4] - p \} \right].$$

Как видим, с ростом степени резервирования n максимальный эффект повышения функциональной надёжности достигается при меньших значениях технической надёжности трубопровода

Повышение функциональной надёжности

$p: p_4^* < p_3^* < p_2^*$, а абсолютное приращение функциональной надёжности при этом возрастает $(\Delta P_4^f > \Delta P_3^f > \Delta P_2^f)$.

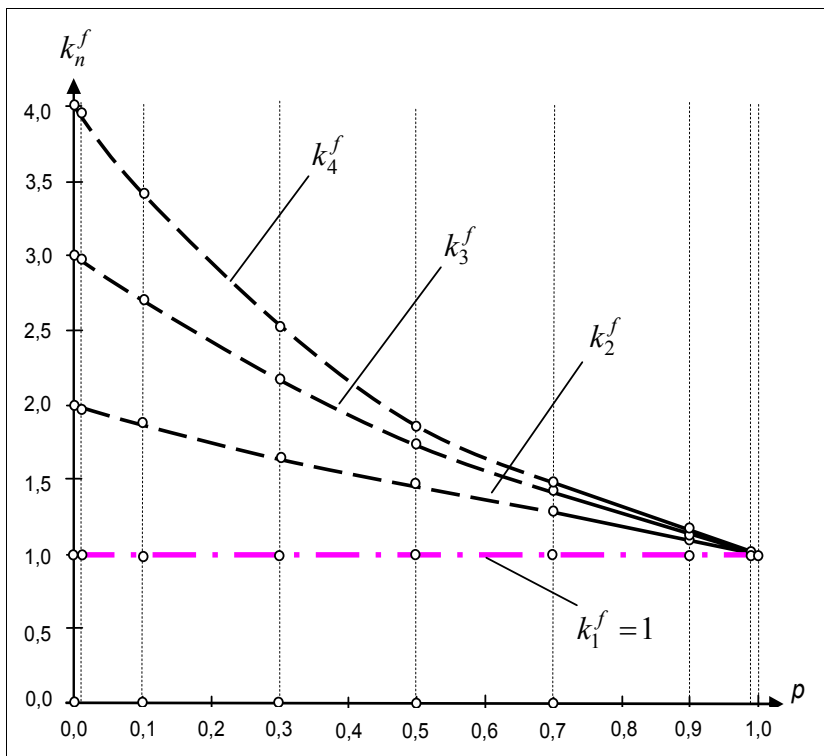


Рис. 3.7 – Графики зависимости коэффициента повышения функциональной надёжности для системы трубопроводного транспорта с резервированием от вероятности технической надёжности трубопровода

Анализ графиков $k_n^f(p)$ на рис.3.7 говорит о слабой эффективности резервирования при высокой технической надёжности одного трубопровода, т.е. при $p \approx 1$. Если к тому же добавить,

что на сооружение каждого дополнительного трубопровода расходуются ресурсы в количествах, соизмеримых с их расходами на сооружение основного трубопровода, то нецелесообразность сооружения более одного дополнительного трубопровода становится очевидной.

Самым важным результатом резервирования является возможность проводить профилактические и ремонтные работы на трубопроводах без прекращения поставки целевого продукта потребителю. А для достижения такого результата достаточно ограничиться дублированием основного трубопровода.

3.3. Установка дополнительных задвижек как средство повышения функциональной надёжности

Многократное резервирование требует значительных затрат материальных, финансовых и трудовых ресурсов. При этом с ростом числа дополнительных параллельных трубопроводов эффект повышения функциональной надёжности падает. В связи с этим возникает потребность в разработке и использовании других методов структурного повышения функциональной надёжности системы.

Одним из наиболее простых структурных методов повышения функциональной надёжности является установка дополнительной высоконадёжной запорной арматуры. На рис. 3.8 изображена схема системы с элементарным резервированием (дублированием) трубопроводов, усиленная двумя дополнительными задвижками $a_{д1}$ и $a_{д2}$.

Задвижка $a_{д1}$ разбивает первый из двух параллельных трубопроводов на два участка: t_1 и t_3 . Задвижка $a_{д2}$ разбивает второй трубопровод на участки t_2 и t_4 . Повышение функциональной надёжности с помощью дополнительных задвижек возможна только при их высокой технической надёжности ($p_{a_{д1}}, p_{a_{д2}} \approx 1$). Максимальный эффект повышения надёжности наблюдается при

Повышение функциональной надёжности

симметричной установке задвижек в системе, т.е. при равных длинах трубопроводных участков t_1, t_2, t_3 и t_4 .

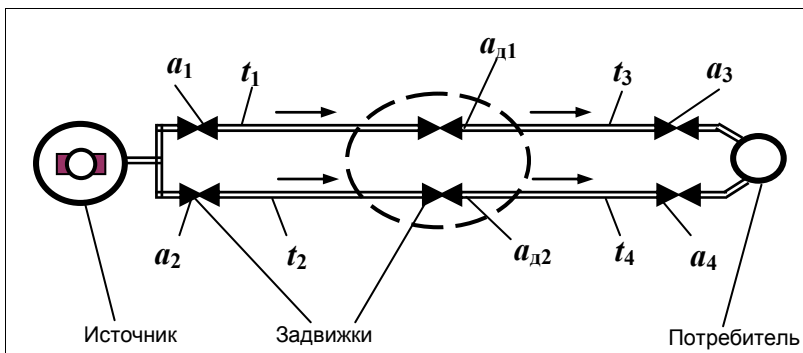


Рис.3.8 – Схема дублирования магистрального трубопровода с установкой дополнительной запорной арматуры

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с дополнительными задвижками приведен на рис. 3.9.

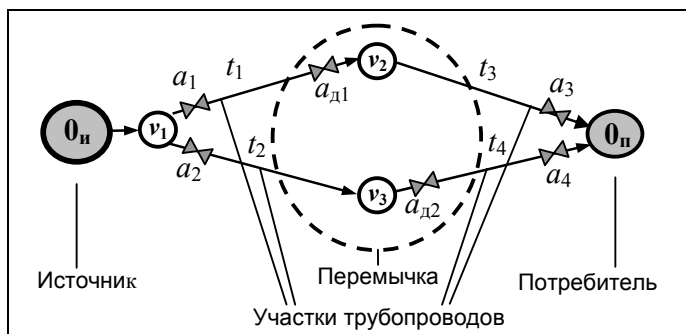


Рис.3.9– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с дополнительной запорной арматурой

В табл. 3.2 представлены данные, отражающие разбиение системы на аварийно-ремонтные зоны (АРЗ). Разбиение проводилось по алгоритму, изложенному в [53].

Таблица 3.2

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{д1}$	—
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	v_3
3	$e_{20п}(t_3)$	$a_{д1}, a_3$	v_2
4	$e_{30п}(t_4)$	$a_{д2}, a_4$	—
5	—	a_1, a_2	v_1

На рис. 3.10 изображен граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению.

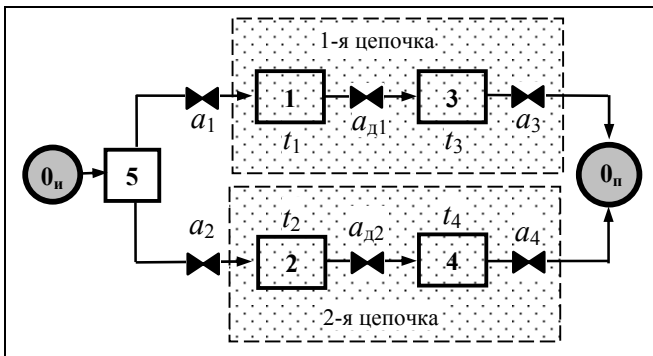


Рис.3.10 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов с дополнительной запорной арматурой

Повышение функциональной надёжности

Следующий этап расчёта функциональной надёжности – синтез модели надёжности по графу АРЗ, рассмотрим более детально.

Пусть p – техническая надёжность каждого из двух параллельных трубопроводов без установки дополнительных задвижек $a_{д1}$ и $a_{д2}$; p_i – техническая надёжность i -го трубопроводного участка t_i или, что то же самое, надёжность i -й АРЗ, $i = \overline{1,4}$; p_{ai} – техническая надёжность i -й задвижки, $i = \overline{1,2}$; $p_{дж}$ – техническая надёжность j -й дополнительной задвижки.

Участкам t_1 (АРЗ №1) и t_3 (АРЗ №3) вместе с задвижками $a_{д1}$ и a_3 (1-я цепочка в графе АРЗ на рис. 3.10) соответствует последовательная модель надёжности, поскольку цепочка работоспособна только тогда, когда исправны все элементы t_1 , t_2 , $a_{д1}$ и a_3 (рис.3.11). То же самое можно сказать про 2-ю цепочку, состоящую из участков t_2 (АРЗ №2) и t_4 (АРЗ №4) вместе с задвижками $a_{д2}$ и a_4 .

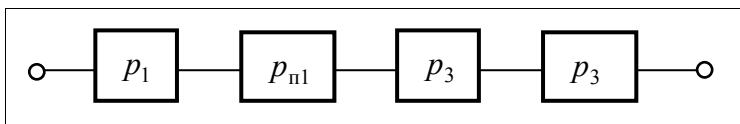


Рис. 3.11 – Последовательная модель надёжности 1-й цепочки

Фрагменту системы, состоящему из 1-й и 2-й цепочек, соответствует параллельная модель надёжности (рис. 3.12). Объясняется это тем, что целевой продукт будет транспортироваться потребителю тогда, когда хотя бы одна из цепочек находится в работоспособном состоянии.

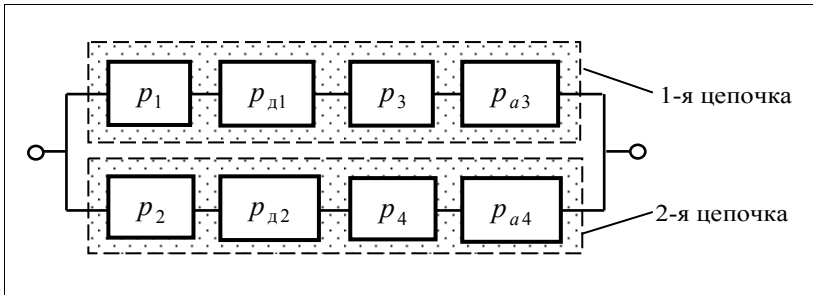


Рис. 3.12 – Параллельная модель надёжности

Целевой продукт будет поступать потребителю, если одновременно работоспособны АРЗ №5, задвижки a_1 и a_2 , а также фрагмент системы, соответствующий двум параллельным цепочкам. Поэтому указанным элементам соответствует последовательная модель надёжности, приведенная на рис.3.13.

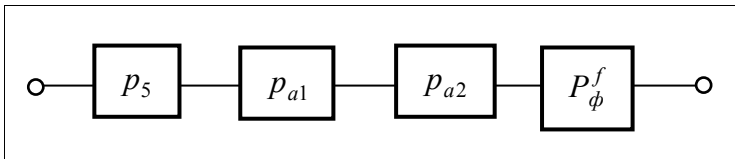


Рис. 3.13 – Последовательная модель надёжности

На рис. 3.13 величина P_{ϕ}^f определяет функциональную надёжность фрагмента системы, соответствующего двум параллельным цепочкам (рис. 3 12). Таким образом, полная модель функциональной надёжности системы, синтезированной по графу АРЗ (рис. 3.10) будет соответствовать смешанной модели надёжности, приведенной на рис. 3.14.

Повышение функциональной надёжности

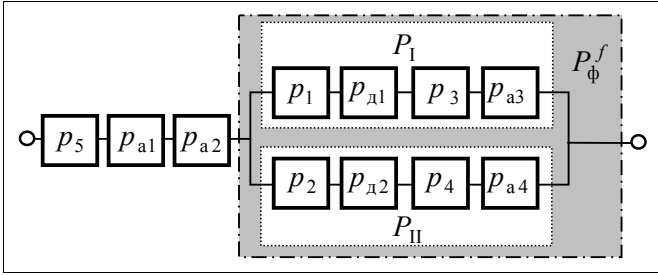


Рис. 3.14 – Смешанная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с дополнительными задвижками

Надёжность 1-й цепочки (рис. 3.12) системы, согласно теории надёжности технических систем, определяется выражением

$$P_I = p_1 p_{d1} p_3 p_{a3}.$$

Аналогично определяется надёжность 2-й цепочки:

$$P_{II} = p_2 p_{d2} p_4 p_{a4}.$$

Надёжность фрагмента системы составит

$$P_{\Phi}^f = 1 - (1 - P_I)(1 - P_{II}) = 1 - (1 - p_1 p_{d1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{d2} p_4 p_{a4}).$$

Наконец, функциональная надёжность всей системы определится следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{2+2д}^f &= p_5 p_{a1} p_{a2} P_{\Phi}^f = \\ &= p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{d1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{d2} p_4 p_{a4})]. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с двумя дополнительными задвижками.

Технической ненадёжностью АРЗ №5 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2, №3 или №4) можно пренебречь, т.е. $p_5 = 1$.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{dj} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $j \in \overline{1,2}$.

С учётом сделанных замечаний выражение (3.6) принимает вид

$$P_{2+2д}^f = p_a^2 \left[1 - (1 - p_1 p_a^2 p_3) (1 - p_2 p_a^2 p_4) \right]. \quad (3.8)$$

Суммарная длина трубопроводных участков каждой из АРЗ №1, №2, №3 или №4 в 2 раза меньше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1, №2, №3 или №4 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p).$$

Отсюда

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2}. \quad (3.9)$$

Подставляя в (3.8) вместо p_1 , p_2 , p_3 и p_4 их выражение через p , получим

Повышение функциональной надёжности

$$P_{2+2д}^f = p_a^2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right]^2 \right\}. \quad (3.10)$$

Выражение (3.10) представляет собой упрощенную математическую модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с двумя дополнительными задвижками. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель принимает вид

$$P_{2+2д}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (3.11)$$

Если теперь сравнить функциональную надёжность системы двух параллельных трубопроводов, рассчитанную по формуле (3.6), с функциональной надёжностью той же системы, но с дополнительными задвижками, рассчитанной по формуле (3.11), то увидим незначительное повышение надёжности $\Delta P_{2д}^f$ (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Элементарное резервирование трубопровода	Функциональная надёжность системы при технической надёжности трубопровода		
	$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$
Без дополнительных задвижек	0,91	0,96	0,99
С дополнительными задвижками	0,923	0,9639	0,9905
Приращение надёжности $\Delta P_{2д}^f$	0,013	0,0039	0,0005
Относительное приращение надёжности	1,43%	0,41%	0,05%

Если техническая надёжность всех задвижек в системе одинакова, но меньше единицы, то увеличение функциональной надёжности будет наблюдаться в меньшей степени и только при условии

$$P_a > \frac{4p}{(1+p)^2}.$$

Малое приращение функциональной надёжности системы за счёт установки дополнительных задвижек требует поиска более эффективных структурных методов повышения надёжности.

3.4. Установка перемычки между параллельными трубопроводами как средство повышения функциональной надёжности

После элементарного резервирования (дублирования) трубопровода и установки дополнительных задвижек дальнейшего повышения функциональной надёжности можно добиться за счёт установки перемычек между двумя параллельными трубопроводами.

Перемычки имеют сравнительно малую длину трубопроводной части (несколько метров), вследствие чего её техническая надёжность значительно превосходит техническую надёжность соединяемых трубопроводов. При начальной оценке функциональной надёжности системы техническую надёжность перемычки целесообразно приравнять единице.

На рис. 3.15 приведена схема устройства перемычки с пятью задвижками при её использовании в условиях элементарного резервирования, т.е. при соединении двух параллельных трубопроводов.

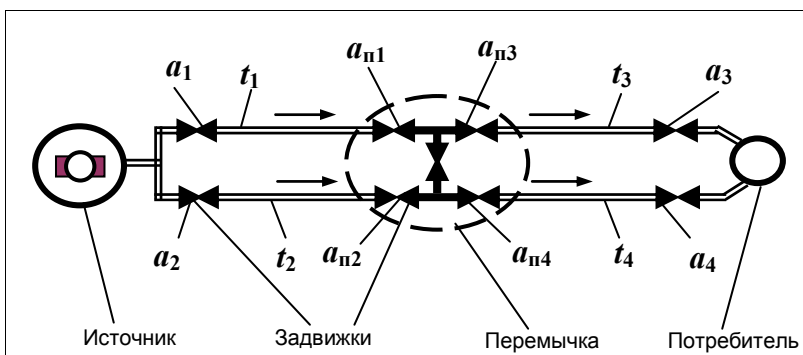


Рис.3.15 – Устройство перемычки

Перемычка разбивает систему двух параллельных трубопроводов на четыре трубопроводных участка: t_1 , t_2 , t_3 и t_4 . В случае необходимости каждый участок может быть отсечён от источника с помощью одной или нескольких задвижек: первый участок t_1 – задвижками a_1 и $a_{п1}$; второй t_2 – a_2 и $a_{п2}$; третий t_3 – $a_{п3}$; четвёртый t_4 – $a_{п4}$.

Расположение пяти задвижек в одном колодце позволяет:

- управлять потоками целевого продукта, используя для его транспортировки от источника к потребителю различные участки системы (рис. 3.16);
- отключать от системы любой из четырёх участков или несколько участков в различных сочетаниях;
- обеспечивать непрерывную поставку ЦП потребителю при проведении аварийных или профилактических работ;
- выбирать один из девяти возможных маршрутов транспортировки целевого продукта (рис. 3.16);
- ускорять освобождение от ЦП участки 1 или 2, направляя его к потребителю одновременно через участки 3 и 4;

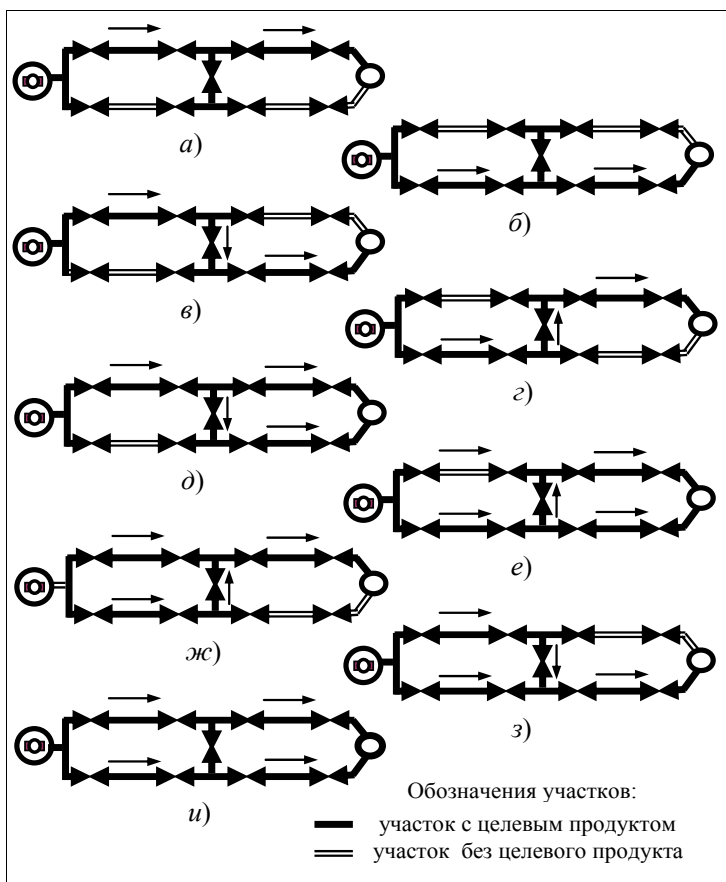


Рис.3.16 – Возможные потоки и маршруты транспорта целевого продукта по двум параллельным трубопроводам с одной перемычкой

– обеспечивать ремонт или замену любой из задвижек перемычки, кроме центральной, без прерывания поставки целевого продукта потребителю.

Перечисленные функциональные возможности перемычки, безусловно, не являются исчерпывающими. Перечень возможно-

Повышение функциональной надёжности

стей следует дополнить ещё, по крайней мере, одной не менее существенной возможностью, а именно: перемычка с пятью задвижками повышает функциональную надёжность системы.

Для сравнительного анализа степени повышения функциональной надёжности проведём полный её расчёт методом, изложенным в [44].

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой рассматриваемого типа (с пятью задвижками) приведен на рис. 3.17.

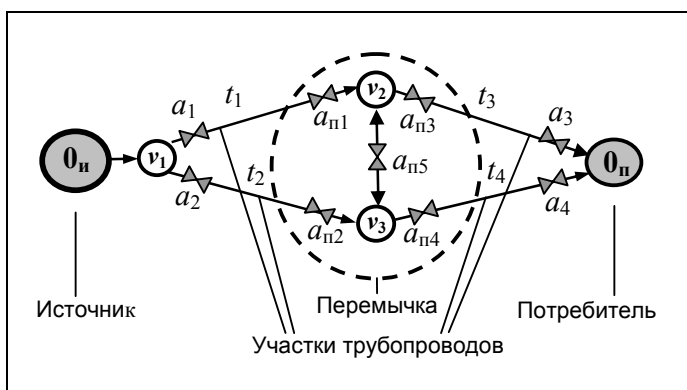


Рис. 3.17– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с пятью задвижками

В табл. 3.4 представлены данные, отражающие разбиение системы на аварийно-ремонтные зоны (АРЗ). Разбиение проводилось по алгоритму, изложенному в [53].

Чтобы исходный граф системы (рис. 3.17) отвечал требованиям алгоритма, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (завдвиж-

ка $a_{п5}$ находится в начальном колодце v_2 трубы перемычки) или 2 (задвижка $a_{п5}$ находится в конечном колодце v_3). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки.

Таблица 3.4

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п}(t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{30п}(t_4)$	$a_{п4}, a_4$	—
5	e_{23} , если $z_{23}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{п5}$	v_2
6	e_{23} , если $z_{23}=1$	$a_{п2}, a_{п4}, a_{п5}$	v_3
7	—	a_1, a_2	v_1

Макрограф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. 3.18.

Следующий этап расчёта функциональной надёжности – синтез модели надёжности по макрографу АРЗ, рассмотрим более детально.

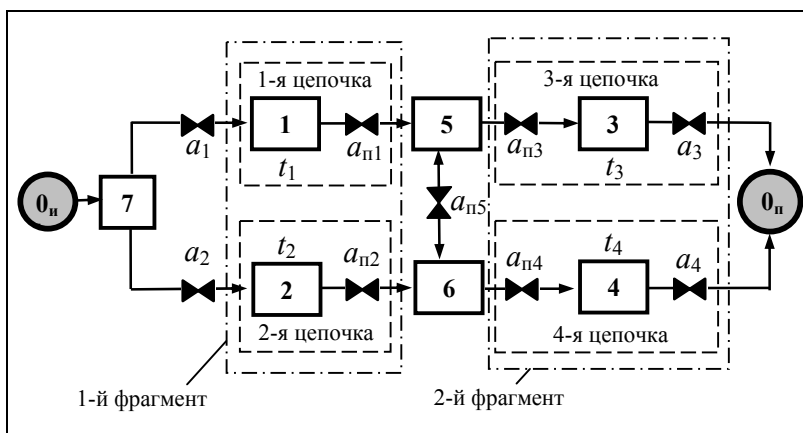


Рис. 3.18 – Макрограф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с пятью задвижками

Пусть p_i – техническая надёжность трубопроводного участка t_i , $i = \overline{1,4}$; p_{ai} – техническая надёжность задвижки, $i = \overline{1,4}$; $p_{пj}$ – техническая надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $j = \overline{1,5}$.

Участку t_1 и задвижке $a_{п1}$ (1-я цепочка в графе АРЗ на рис. 3.18) соответствует последовательная модель надёжности, поскольку цепочка работоспособна тогда, когда исправны оба элемента t_1 и $a_{п1}$ (рис.3.19).

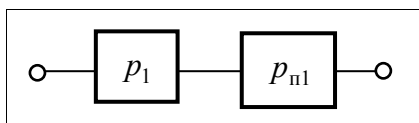


Рис. 3.19 – Последовательная модель надёжности

То же самое можно сказать про 2-ю цепочку, состоящую из задвижки $a_{п2}$ и трубопроводного участка t_2 .

Фрагменту системы, состоящему из 1-й и 2-й цепочек, соответствует параллельная модель надёжности (рис. 3.20), поскольку целевой продукт будет транспортироваться потребителю тогда, когда хотя бы одна из цепочек находится в работоспособном состоянии.

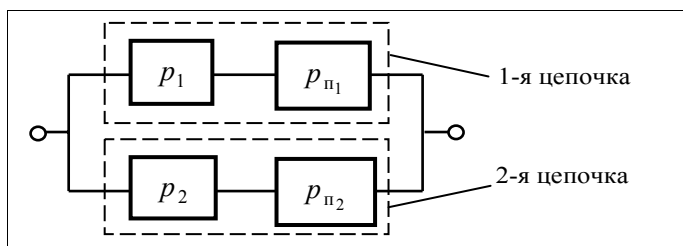


Рис. 3.20 – Параллельная модель надёжности 1-го и 2-го участков системы

Надёжность 1-го фрагмента системы, согласно теории надёжности технических систем, определится выражением

$$P_I = 1 - (1 - p_1 p_{п1})(1 - p_2 p_{п2}). \quad (3.12)$$

Аналогично определяется надёжность 2-го фрагмента системы, состоящего из 3-й и 4-й цепочек элементов:

$$P_{II} = 1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{п4} p_4 p_{a4}). \quad (3.13)$$

Если одна из зон №5 и №6 выйдет из строя, то поставка ЦП потребителю в системе не прекратится. Только одновременный выход из строя обеих зон приводит к прекращению транспорта ЦП. Поэтому этим зонам (3-му фрагменту системы) соответствует параллельная модель надёжности, приведенная на рис. 3.21.

Повышение функциональной надёжности

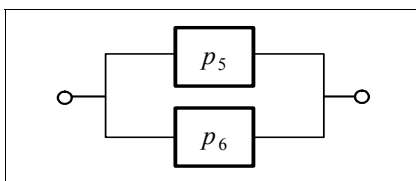


Рис. 3.21 – Параллельная модель надёжности АРЗ №5 и №6

Надёжность 3-го фрагмента системы составит

$$P_{III} = 1 - (1 - p_5)(1 - p_6). \quad (3.14)$$

Все три фрагмента системы совместно с задвижками a_1 , a_2 и $a_{п5}$ образуют последовательную модель надёжности (рис. 3.22), поскольку для проведения аварийно-ремонтных работ при выходе из строя любого из рассмотренных фрагментов системы или любой из указанных задвижек необходимо прекратить поставку целевого продукта потребителю.

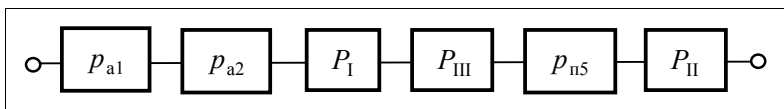


Рис. 3.22 – Последовательная модель надёжности фрагментов системы, входных задвижек a_1 и a_2 и центральной задвижки переключки $a_{п5}$

На рис. 3.23 показана полная модель функциональной надёжности системы, синтезированной по макрографу АРЗ (рис. 3.18).

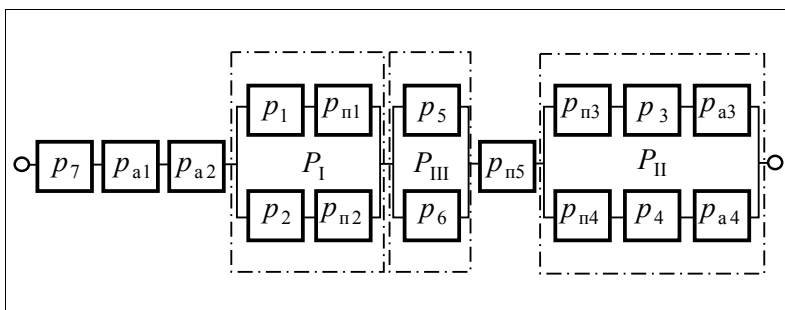


Рис. 3.23 – Смешанная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой с пятью задвижками

Таким образом, окончательное выражение функциональной надёжности всей системы принимает вид

$$P_{2+п1}^f = p_7 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1})(1 - p_2 p_{п2})] p_{п5} \times \\ \times [1 - (1 - p_5)(1 - p_6)][1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (3.15)$$

Технической ненадёжностью АРЗ №5, №6 и №7 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2, №3 или №4) можно пренебречь, т.е.

$$p_5 = p_6 = p_7 = 1. \quad (3.16)$$

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать

$$p_{ai} = p_{пj} = p_a, \quad i \in \overline{1,4}, \quad j \in \overline{1,5}. \quad (3.17)$$

Повышение функциональной надёжности

Условная нулевая длина трубы перемычки и одинаковые условия сооружения и эксплуатации трубопроводных участков системы диктуют равенства: $p_1 = p_2$; $p_3 = p_4$. Более того, как будет обосновано позже, наиболее рациональное расположение перемычки в системе является симметричным, т.е. технические надёжности участков t_1, t_2, t_3 и t_4 связаны равенством

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_{\text{ты}}, \quad (3.18)$$

где $p_{\text{ты}}$ – техническая надёжность трубопровода длиной в два раза короче каждого из двух параллельных трубопроводов системы.

С учётом (3.16) – (3.18) выражение (3.15) принимает вид

$$P_{2+\text{п1}}^f = p_a^3 \left[1 - (1 - p_{\text{ты}} p_a)^2 \right] \left[1 - (1 - p_{\text{ты}} p_a^2)^2 \right]. \quad (3.19)$$

Если считать, что техническая надёжность задвижки p_a значительно превосходит надёжность протяженных трубопроводов, т.е. предположить $p_a = 1$, то выражение (3.19) трансформируется в простую формулу

$$P_{2+\text{п1}}^f = \left[1 - (1 - p_{\text{ты}})^2 \right]^2, \quad (3.20)$$

позволяющую производить сравнительный анализ систем с перемычкой и без таковой по критерию функциональной надёжности.

Для сравнительного анализа воспользуемся формулой (3.6)

$$P_2^f = 1 - (1 - p)^2,$$

где p – техническая надёжность каждого из двух параллельных трубопроводов.

Для сравнения величин P_2^f и $P_{2+п1}^f$ необходимо установить взаимосвязь между p и $p_{\text{ты}}$. Поскольку $p_{\text{ты}}$ определяет техническую надёжность симметричных трубопроводных участков длиной в 2 раза короче длины одного из двух параллельных трубопроводов, то частота отказов (ненадёжность) на таком участке будет в 2 раза меньше частоты отказов на всём трубопроводе:

$$(1 - p_{\text{ты}}) = \frac{1}{2}(1 - p).$$

Отсюда

$$p_{\text{ты}} = \frac{1 + p}{2}. \quad (3.21)$$

Подставляя (3.21) в (3.20), имеем

$$P_{2+п1}^f = \left(\frac{3 + 2p - p^2}{4} \right)^2. \quad (3.22)$$

Выражения (3.20) – (3.22) получены при условии соединения двух параллельных трубопроводов одной перемычкой с пятью задвижками. В общем случае, когда трубопроводы соединяются перемычками одинаковой конструкции в количестве n , выражения (3.20) – (3.22) соответственно принимают вид:

$$P_{2+пn}^f = \left[1 - (1 - p_{\text{ты}})^2 \right]^{n+1}; \quad (3.23)$$

$$p_{\text{ты}} = \frac{n + p}{n + 1}; \quad (3.24)$$

$$P_{2+nn}^f = \left[1 + \left(\frac{1-p}{n+1} \right)^2 \right]^{n+1}. \quad (3.25)$$

Приведенные формулы предполагают симметричную установку в системе всех n перемычек, т.е. перемычки разбивают каждый из двух параллельных трубопроводов на равные по длине участки в количестве $(n+1)$.

В табл. 3.5 представлены значения функциональной надёжности P_{2+nn}^f , рассчитанные по формуле (3.25), и соответствующие коэффициенты повышения функциональной надёжности k_n^f при $n = 0, 1, 2, 3$.

Анализ табл. 3.2 и 3.3 показывает, что в диапазоне рабочих вероятностей безотказной работы трубопроводов ($0,7 \leq p \leq 0,9$) эффект повышения функциональной надёжности за счёт сооружения третьего параллельного трубопровода такой же, как при соединении двух параллельных трубопроводов двумя перемычками.

Если учесть, что затраты на сооружение дополнительного трубопровода несоизмеримо превышают затраты на сооружение двух перемычек, то предпочтение как методу повышения функциональной надёжности магистральных трубопроводных транспортных систем следует отдать установке перемычек. Поэтому данному методу будет уделено повышенное внимание.

Все дальнейшие исследования будут направлены на обоснование выбора мест установки перемычек в трубопроводной системе и на обоснование рационального устройства самих перемычек. При этом критерием выбора места установки и устройства перемычек будет служить степень повышения функциональной надёжности системы.

Таблица 3.5

Техн. надёжн. группы p	Число перемычек n									
	$n = 0$		$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	P_2^f	$k_0^f = \frac{P_2^f}{p}$	P_{2+n1}^f	$k_1^f = \frac{P_{2+n1}^f}{p}$	P_{2+n2}^f	$k_2^f = \frac{P_{2+n2}^f}{p}$	P_{2+n3}^f	$k_3^f = \frac{P_{2+n3}^f}{p}$	P_{2+n4}^f	$k_4^f = \frac{P_{2+n4}^f}{p}$
0,01	0,02	1,99	0,5700	57,0	0,7067	70,76	0,7766	77,66	0,8188	81,876
0,1	0,19	1,9	0,6360	6,36	0,7536	7,536	0,8124	8,124	0,8482	8,482
0,3	0,51	1,7	0,7700	2,5667	0,8454	2,818	0,8830	2,943	0,9058	3,019
0,5	0,75	1,5	0,8789	1,7578	0,9190	1,838	0,9389	1,878	0,9510	1,902
0,7	0,91	1,3	0,9555	1,365	0,9703	1,4001	0,9777	1,3967	0,9821	1,403
0,9	0,99	1,1	0,9950	1,1056	0,9967	0,1071	0,9975	1,1083	0,9980	1,109
0,99	0,9999	1,01	0,99995	1,0101	0,99997	1,01007	0,99997	1,01008	0,99998	1,01008

3.5. Максимальный эффект повышения функциональной надёжности при симметричной установке переключки в системе

Как утверждалось ранее, наибольший эффект повышения функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых переключкой, наблюдается при её симметричной установке в системе. В [44, с. 152 – 163] уже приводилось доказательство данного утверждения при условии пуассоновского распределения отказов в системе и при допущении равенства единице вероятности безотказной работы переключки. Последнее означает, что длина трубопроводной части переключки считается равной нулю и все задвижки системы имеют абсолютную надёжность.

Докажем данное утверждение в общем виде, т.е. когда длина трубопроводной части переключки отлична от нуля, задвижки в системе имеют некоторую надёжность, соизмеримую с надёжностью трубопроводов, а распределение отказов не подчиняется пуассоновскому закону.

Доказательство. Пусть система двух параллельных трубопроводов будет асимметрична по отношению к переключке (рис. 3.24). При этом длина трубопровода от источника ЦП до потребителя составляет L км, а до переключки – l км; вероятности безотказной работы двух параллельных трубопроводов длиной L км (до установки переключки) соответственно равны p_1 и p_2 ; вероятности безотказной работы всех задвижек одинаковы и равны p_a ; вероятности безотказной работы каждого из двух трубопроводных участков переключки $t_{п1}$ и $t_{п2}$ соответственно равны $p_{п1}$ и $p_{п2}$. Пусть также наступления отказов в трубопроводной системе являются независимыми событиями: выход из строя одного конструктивного элемента трубопроводной системы не влечет за собой выхода из строя другого элемента.

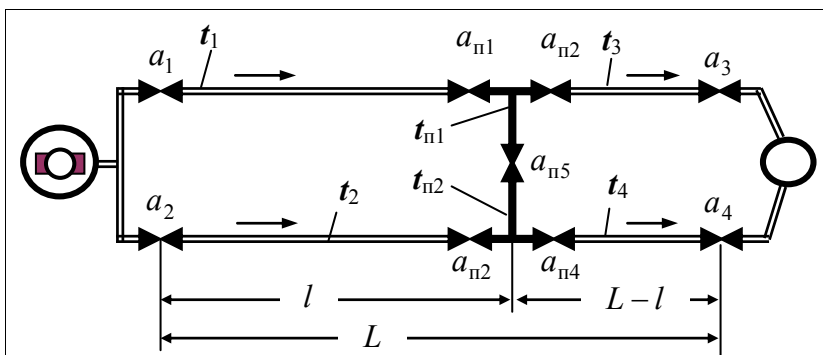


Рис.3.24 – Асимметричная установка переключки

При указанных условиях для доказательства исходного утверждения необходимо представить функциональную надёжность асимметричной системы (рис. 3.24) как функцию от величины l . Затем доказать, что максимум функции достигается при

$$l = L - l = \frac{L}{2}.$$

Чтобы выразить функциональную надёжность системы через величину l необходимо произвести её полный расчёт методом АРЗ [44].

Первые три этапа расчёта функциональной надёжности для системы с асимметричной установкой переключки (рис. 3.24) полностью совпадают с первыми тремя этапами расчёта функциональной надёжности для системы с симметричной установкой переключки (рис. 3.15). Так, исходной граф системы с асимметричной установкой ничем не отличается от исходного графа с симметричной установкой, который изображен на рис. 3.17. Поэтому результаты разбиения исходного графа системы с асимметричной установкой переключки на подграфы АРЗ (2-й этап расчёта) будут соответствовать содержанию табл. 3.4, а преобразование исходного графа в макрограф АРЗ будет соответствовать макрографу, изображенному на рис. 3.18.

Повышение функциональной надёжности

В табл. 3.6 представлены данные, отражающие разбиение системы на аварийно-ремонтные зоны.

Следующий этап расчёта функциональной надёжности – синтез модели надёжности по макрографу АРЗ, рассмотрим более детально

Для выполнения расчёта необходимо составить расчётную модель надёжности системы, изображенной на рис. 3.24. Она в точности соответствует схеме на рис. 3.23.

При асимметричной установке перемычки техническая надёжность каждого участка трубопровода t_1 и t_2 составит

$$p_1 = p_2 = \left(1 - \frac{(1-p)l}{L}\right), \text{ а каждого участка } t_3 \text{ и } t_4 - \\ p_3 = p_4 = \left(1 - \frac{(1-p)(L-l)}{L}\right). \text{ Тогда, если принять техническую}$$

надёжность для всех задвижек $p_{ai} = p_{\pi j} = 1, \quad i \in \overline{1,4}, \quad j \in \overline{1,5}$, то функциональная надёжность системы, согласно формуле (3.13), будет соответствовать выражению

$$P_{2+1\text{М}}^f = \left[1 - \left(1 - \left(1 - \frac{(1-p)l}{L}\right)\right)^2\right] \times \\ \times \left[1 - \left(1 - \left(1 - \frac{(1-p)(L-l)}{L}\right)\right)^2\right]. \quad (3.26)$$

Введём в (3.26) замены $x = \frac{l}{L}$, $(1-x) = \frac{L-l}{L}$ и упростим полученное выражение:

$$\begin{aligned}
P_{2+1\Pi}^f &= \left[1 - (1 - (1 - (1 - p)x))^2\right] \cdot \left[1 - (1 - (1 - (1 - p)(1 - x)))^2\right] = \\
&= \left[1 - (1 - p)^2 x^2\right] \cdot \left[1 - (1 - p)^2 (1 - x)^2\right] = \\
&= (1 - p)^4 \left[\frac{1}{(1 - p)^2} - x^2 \right] \cdot \left[\frac{1}{(1 - p)^2} - (1 - x)^2 \right]. \quad (3.27)
\end{aligned}$$

В выражении (3.27) неизвестная величина x может находиться только в пределах от 0 до 1, поскольку длина l может принимать значения от 0 до L . Для определения оптимального расположения перемычки достаточно найти значение x^* , которое доставляет максимум функции $P_{2+1\Pi}^f$ в (3.27).

Таким образом, определение оптимального расположения перемычки сводится к задаче одномерной условной минимизации целевой функции (3.27) при двусторонней ограниченности переменной x

$$P_{2+1\Pi}^f = (1 - p)^4 \left[\frac{1}{(1 - p)^2} - x^2 \right] \cdot \left[\frac{1}{(1 - p)^2} - (1 - x)^2 \right] \rightarrow \max_{0 \leq x \leq 1}. \quad (3.28)$$

Для унимодальных целевых функций решение задач такого класса можно получить с помощью распространённых прямых методов одномерной минимизации, таких как метод дихотомии, метод Фибоначчи, метод золотого сечения. При этом в качестве начального интервала неопределённости следует взять $\Delta x = [0; 1]$. Но поскольку для использования перечисленных методов необходимо предварительно доказать унимодальный характер целевой функции в задаче (3.28), то более целесооб-

Повышение функциональной надёжности

разным для решения данной задачи является использование классического метода математического анализа для исследования нелинейных одномерных функций.

Определим стационарные точки целевой функции в (3.28), для чего найдём производную функции и приравняем её нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{2+1M}^f}{dx} = (1-p)^4 \left\{ 2(1-x) \left[\frac{1}{(1-p)^2} - x^2 \right] - \right. \\ \left. - 2 \left[\frac{1}{(1-p)^2} - (1-x)^2 \right] \right\} = 0. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Решение уравнения (3.29) даёт три корня: один действительный $x_1 = \frac{1}{2}$ и два мнимых $x_{2,3} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{(1-p)^2}}$. Следовательно, функция P_{2+1M}^f имеет только одну стационарную точку, которая попадает в диапазон допустимых решений (от 0 до 1).

Вычислим в стационарной точке $x_1 = \frac{1}{2}$ вторую производную целевой функции

$$\left. \frac{d^2 P_{2+1M}^f}{dx^2} \right|_{x=\frac{1}{2}} = 1 - \frac{2}{(1-p)^2} - 6(1-x)x = - \left(\frac{2}{(1-p)^2} + \frac{1}{2} \right). \quad (3.30)$$

Поскольку целевая функция в точке $x_1 = \frac{1}{2}$ отрицательна, то функция в данной точке имеет явный максимум. Следовательно, оптимальным решением задачи (3.28) является $x^* = \frac{1}{2}$.

Решение экстремальной задачи (3.28) означает, что перемычка, разделяющая каждый из двух параллельных трубопровода на два строго равных между собой участка, обеспечивает наибольшее увеличение функциональной надёжности всей магистральной системы.

В случае, когда между двумя параллельными трубопроводами устанавливается n перемычек с безотказными задвижками, то для наибольшего увеличения функциональной надёжности системы каждый трубопровод должен быть разделен перемычками на равные части в количестве $(n + 1)$. Данное утверждение вытекает из решения задачи математического программирования при линейных ограничениях:

$$P_{2+nm}^f = p_a^{n+2} \cdot \left[1 - \left(1 - p_a \left[1 - (1 - p)x_1 \right] \right)^2 \right] \cdot \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2 \left[1 - (1 - p)x_i \right] \right)^2 \right] \rightarrow \max_{x_i \in \Omega \subset \mathbf{E}^{n+1}}, \quad (3.31)$$

$$\Omega: f(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) = \sum_{i=1}^{n+1} x_i - 1 = 0; \quad (3.32)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = \overline{1, n+1}. \quad (3.33)$$

Здесь $x_i = \frac{l_i}{L}$, где l_i – длина i -й части каждого трубопровода,

$L = \sum_{i=1}^{n+1} l_i$ – длина каждого из двух параллельных трубопроводов;

p_a – техническая надёжность каждой задвижки.

Задача математического программирования в общем случае решается только прямыми методами оптимизации. Чтобы избежать использования прямых методов, на начальном этапе решения проигнорируем ограничение (3.33). В этом случае задача (3.31) – (3.33) превратится в задачу оптимизации (3.31) – (3.32) при ограничении в виде равенства, которая теперь может быть решена классическим методом, например, методом неопределённых множителей Лагранжа.

Построим функцию Лагранжа в условиях задачи (3.31) – (3.32):

$$\begin{aligned} L(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}, \lambda) &= P_{2+nm}^f - \lambda [f(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})] = \\ &= p_a^{n+2} \cdot \left[1 - \left(1 - p_a [1 - (1 - p)x_1] \right)^2 \right] \times \\ &\times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_i] \right)^2 \right] - \lambda \left(\sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 \right), \quad (3.34) \end{aligned}$$

где λ – неопределённый множитель Лагранжа.

Для поиска стационарных точек функции Лагранжа необходимо решить систему из $(n + 2)$ уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial L}{\partial x_1} = -2p_a^{n+3}(1-p)\left(1-p_a[1-(1-p)x_1]\right) \times \\ & \quad \times \left\{ \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1-p)x_i] \right)^2 \right] \right\} - \lambda = 0; \\ & \frac{\partial L}{\partial x_k} \Big|_{k=2, n+1} = -2p_a^{n+4}(1-p)\left(1-p_a^2[1-(1-p)x_k]\right) \times \\ & \quad \times \left[1 - \left(1 - p_a [1 - (1-p)x_1] \right)^2 \right] \times \\ & \quad \times \left\{ \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq k}}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1-p)x_k] \right)^2 \right] \right\} - \lambda = 0; \\ & \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{aligned} \right.$$

Все уравнения системы, кроме последнего, содержат операторы произведения $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1}(\cdot)$, которые отличаются друг от друга только параметрами индекса. Чтобы выровнять параметры всех операторов $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1}(\cdot)$, каждое k -е уравнение умножим и разделим на величину $\left[1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1-p)x_k] \right)^2 \right]$, $k = \overline{2, (n+1)}$. Кроме того, первое уравнение умножим и разделим на величину

Повышение функциональной надёжности

$p_a \left[1 - \left(1 - p_a [1 - (1 - p)x_1] \right)^2 \right]$. После несложных дополнительных алгебраических преобразований получим новую систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2p_a^{n+4}(1-p)(1-p_a[1-(1-p)x_1]) \cdot [1-(1-p_a[1-(1-p)x_1])^2]}{p_a \left[1 - \left(1 - p_a [1 - (1 - p)x_1] \right)^2 \right]} \times \\ \times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_i] \right)^2 \right] = -\lambda; \\ \frac{2p_a^{n+4}(1-p)(1-p_a^2[1-(1-p)x_k]) \cdot [1-(1-p_a[1-(1-p)x_1])^2]}{1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_k] \right)^2} \times \\ \times \prod_{i=2}^{n+1} \left[1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_i] \right)^2 \right] = -\lambda, \quad k = \overline{1, n+1}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0, \end{array} \right.$$

где $1 - \left(1 - p_a [1 - (1 - p)x_k] \right)^2 \neq 0$, $1 - \left(1 - p_a^2 [1 - (1 - p)x_k] \right)^2 \neq 0$,
или $x_k \neq \frac{1}{1-p}$, $k = \overline{1, n+1}$.

Оставим в правых частях первых $(n+1)$ уравнений равные величины:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{p_a(1-p_a[1-(1-p)x_1])}{1-(1-p_a[1-(1-p)x_1])^2} = \\ & = \frac{-\lambda}{2p_a^{n+4}(1-p)\left[1-(1-p_a[1-(1-p)x_1])^2\right] \prod_{i=2}^{n+1} \left[1-(1-p_a^2[1-(1-p)x_i])^2\right]}; \\ & \left. \frac{2p_a^{n+4}(1-p)(1-p_a^2[1-(1-p)x_k])}{1-(1-p_a^2[1-(1-p)x_k])^2} \right|_{k=\overline{2, n+1}} = \\ & = \frac{-\lambda}{2p_a^{n+4}(1-p)\left[1-(1-p_a[1-(1-p)x_1])^2\right] \prod_{i=2}^{n+1} \left[1-(1-p_a^2[1-(1-p)x_i])^2\right]}; \\ & \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{aligned} \right.$$

Поскольку в первых $(n+1)$ уравнениях все правые части равны, то равны и их левые части:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1-p_a[1-(1-p)x_1]}{p_a\left[1-(1-p_a[1-(1-p)x_k])^2\right]} = \frac{1-p_a^2[1-(1-p)x_2]}{1-(1-p_a^2[1-(1-p)x_2])^2}; \\ & \frac{1-p_a^2[1-(1-p)x_k]}{1-(1-p_a^2[1-(1-p)x_k])^2} = \frac{1-p_a^2[1-(1-p)x_{k+1}]}{1-(1-p_a^2[1-(1-p)x_{k+1}])^2}, \quad k=\overline{1, n}; \\ & \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0, \end{aligned} \right.$$

или

$$\begin{cases} x_1 \begin{cases} = x_k & \text{при } p_a = 1, \\ < x_k & \text{при } p_a < 1, \end{cases} & k = \overline{2, n+1}; \\ x_k = x_{k+1}, & k = \overline{2, n}; \\ \sum_{k=1}^{n+1} x_k - 1 = 0. \end{cases}$$

Из полученной системы следует, что при $p_a = 1$ (заводские безотказы)

$$x_1 = x_2 = \dots = x_{n+1} = \frac{1}{n+1}. \quad (3.35)$$

Поскольку все координаты стационарной точки удовлетворяют ограничению (3.33), то она является стационарной точкой как для задачи (3.31) – (3.32), так и (3.31) – (3.33).

Для определения характера стационарной точки исследуем матрицу Гесса целевой функции в задаче (3.31), вычисленную в этой точке.

Определим сначала все вторые и смешанные частные производные целевой функции при условии $p_a = 1$:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 P_{2+nm}}{\partial x_k^2} = -2(1-p)^4 \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, j}}^{n+1} [1 - (1 - (1-p)x_i)]^2, & k = \overline{1, n+1}; \\ \frac{\partial^2 P_{2+nm}}{\partial x_k \partial x_j} = 4(1-p)^2 (1 - [1 - (1-p)x_k]) (1 - [1 - (1-p)x_j]) \times \\ \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, j}}^{n+1} [1 - (1 - (1-p)x_i)]^2, & k, j = \overline{1, n+1}. \end{cases}$$

Вычислим все вторые и смешанные частные производные целевой функции в стационарной точке с координатами

$$x_1 = x_2 = \dots = x_{n+1} = \frac{1}{n+1}:$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k^2} = -2(1-p)^2 \left(1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2 \right)^n, k = \overline{1, n+1}; \\ \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k \partial x_j} = 4(1-p)^2 \left[1 - \left(1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2 \times \\ \times \left(1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2 \right)^{n-1}, k, j = \overline{1, n+1}. \end{array} \right.$$

Сравним по модулю значения вторых частных и смешанных производных

$$\frac{\left| \frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k^2} \right|}{\frac{\partial^2 P_{2+nM}}{\partial x_k \partial x_j}} = \frac{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2}{2 \left[1 - \left(1 - \frac{1-p}{n+1} \right) \right]^2} = \frac{n^2 + n + 2p - p^2}{2(1-p)^2}. \quad (3.36)$$

Числитель в (3.36) $(n^2 + n + 2p - p^2) > 2$, а знаменатель $2(1-p)^2 < 2$. Все вторые частные производные функции (3.31) при условии $p_a = 1$, взятые по модулю, превышают смешанные производные. В таком случае характер матрицы Гесса для функции (3.31) совпадает с характером матрицы

$$\mathbf{H}_{\text{отн}} = \begin{bmatrix} -\frac{n^2+n}{2} & 1 & \dots & 1 \\ 1 & -\frac{n^2+n}{2} & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & -\frac{n^2+n}{2} \end{bmatrix}$$

размерности $(n+1) \times (n+1)$, где $n > 1$.

Анализ матрицы $\mathbf{H}_{\text{отн}}$ показывает, что все её нечётные главные определители меньше нуля, а все чётные – больше. Следовательно, исследуемая стационарная точка является точкой максимума.

Решение задачи (3.31) – (3.32) $x_1^* = x_2^* = \dots x_{n+1}^* = \frac{1}{n+1}$ с

учётom условия (3.36) свидетельствует о справедливости утверждения, что наибольшее увеличение функциональной надёжности системы достигается при симметричной установке перемычек, т.е. в случае, когда n перемычек делят каждый из двух параллельных трубопроводов на $(n+1)$ равную часть. Однако при чрезмерном увеличении числа перемычек n при неизменных значениях p_a и p добавление новых перемычек может привести к обратному эффекту. Каждая дополнительная перемычка требует установки пяти задвижек, которые хотя и незначительно, но отрицательно влияют на функциональную надёжность системы. При этом положительное влияние каждой новой перемычки на функциональную надёжность постепенно снижается. Поэтому при увеличении числа перемычек n обязательно наступит такой момент, когда функциональная надёжность будет не увеличиваться, а уменьшаться!

РАЗДЕЛ 4

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕМЫЧКИ ПО КРИТЕРИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЁЖНОСТИ

В предыдущем разделе было показано преимущество установки перемычки в магистральных трубопроводных транспортных системах по сравнению с сооружением дополнительных параллельных трубопроводов. При этом предполагалось, что конструкция перемычек включает пять задвижек.

Возникает вопрос, насколько правомерно использовать такие перемычки в практических целях и можно ли улучшить их конструкцию. Данный вопрос является предметом рассмотрения настоящего раздела. Как и ранее, сравнительный анализ влияния структуры сети на функциональную надёжность системы опирается на использование статистико-аналитического метода, изложенного в [44]. Однако для ряда частных случаев структуры сети использование данного метода не представляется возможным из-за неоднозначного перехода от графа AP3 к расчётной модели функциональной надёжности. Авторами предлагается модифицированный статистико-аналитический метод расчёта функциональной надёжности системы на основе использования концепции пуассоновских потоков отказа, которая предполагает, что одновременно два и более отказа в системе наступить не могут. Метод позволяет оценить функциональную надёжность системы и тем точнее, чем выше техническая надёжность протяжённых элементов системы – параллельных трубопроводов. Для параллельных трубопроводов с технической надёжностью, равной 0.9, отклонение расчётной функциональной надёжности системы от действительной составляет не более 0.01, т.е. не более 1%.

Выбор оптимальной конструкции системы

4.1. Типы перемычек в магистральных трубопроводных транспортных системах

Конструкция перемычки включает пять участков, которые на рис. 4.1 обозначены цифрами от 1 до 5. В составе перемычки могут присутствовать задвижки. Если на каждом участке перемычки может располагаться не более одной задвижки, то их общее число не превосходит 5. При наличии в конструкции 5 задвижек они располагаются только одним способом, как показано на рис. 3.15. Аналогичная ситуация имеет место при отсутствии задвижек – существует только один вариант конструкции (рис. 4.1).

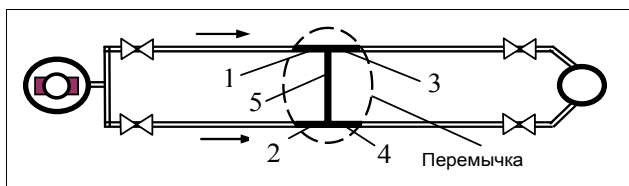


Рис.4.1 – Схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой с числом задвижек $n_a = 0$

Если число задвижек в перемычке находится в диапазоне от 1 до 4, то по законам комбинаторики они могут располагаться несколькими способами.

Пусть на каждом из пяти участков перемычки может располагаться не более одной задвижки. Тогда в зависимости от числа задвижек n_a число способов определяется

Таблица 4.1

Кол-во задвижек n_a	Число способов $C_5^{n_a}$
0	$C_5^0 = 1$
1	$C_5^1 = 5$
2	$C_5^2 = 10$
3	$C_5^3 = 10$
4	$C_5^4 = 5$
5	$C_5^5 = 1$
Всего	$\sum_{i=0}^5 C_5^i = 2^{n_a} = 2^5 = 32$

числом сочетаний $C_5^{n_a}$ (табл. 4.1). Нижний индекс 5 в числе сочетаний $C_5^{n_a}$ определяет количество мест для возможного размещения задвижек в перемычке. Два из пяти мест располагаются на концах трубопроводов, подходящих к перемычке (поз.1 и 2); два – на трубопроводах, отходящих от перемычки (поз. 3 и 4); один – непосредственно на перемычке (поз. 5).

На рис. 4.2 первые четыре места возможного расположения задвижек в перемычке обозначены четырёхконечными звёздочками, а пятое – пятиконечной звёздочкой.

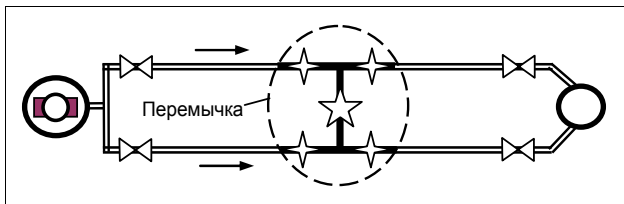


Рис.4.2 – Схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой

Как следует из табл. 4.1, существует 32 способа размещения запорной арматуры в перемычке. Забегая вперёд, отметим, что в зависимости от числа задвижек и мест их расположения эти способы по-разному влияют на изменение функциональной надёжности системы. Одни её повышают, другие – уменьшают, третьи – оставляют без изменения.

Все 32 способа по количеству задвижек и степени влияния на функциональную надёжность системы можно разбить на 18 типов: *A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, R, S*. Каждый тип включает те способы, которые имеют равное общее количество задвижек в перемычке и равную степень влияния на функциональную надёжность системы.

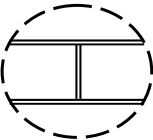
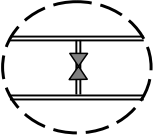
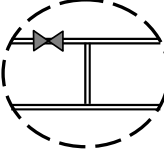
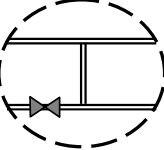
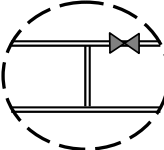
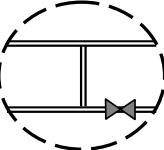
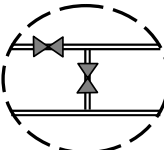
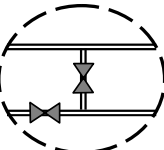
Для полного анализа влияния конструкции перемычки на функциональную надёжность системы необходимо исследовать

Выбор оптимальной конструкции системы

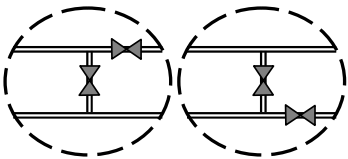
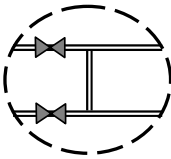
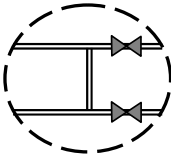
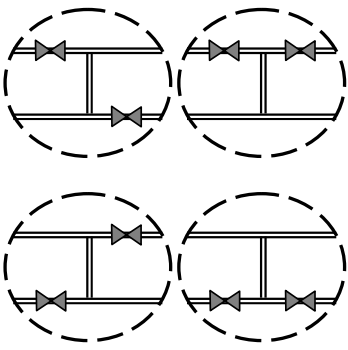
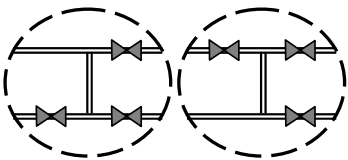
каждый тип перемычки. С целью полного учёта типов перемычек и способов размещения в ней запорной арматуры составлен соответствующий классификатор (табл. 4.2)

Таблица 4.2

Классификатор перемычек

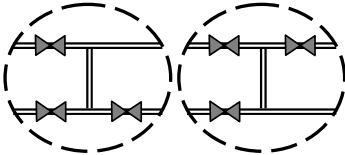
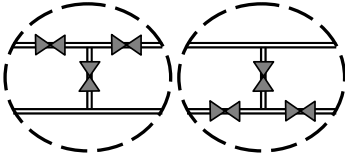
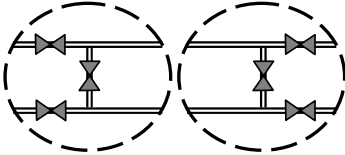
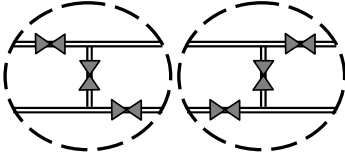
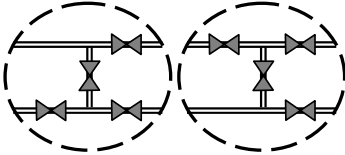
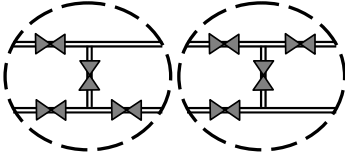
№ п.п.	Тип перемычки	Кол-во задвижек	Способы размещения задвижек в перемычке	Число способов
1	2	3	4	5
1	A	0		1
2	B	1		1
3	C	1	 	2
4	D	1	 	2
5	E	2	 	2

Продолжение табл. 4.2

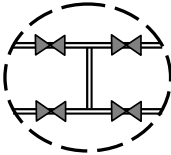
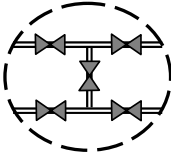
1	2	3	4	5
6	<i>F</i>	2		2
7	<i>G</i>	2		1
8	<i>H</i>	2		1
9	<i>I</i>	2		4
10	<i>J</i>	3		2

Выбор оптимальной конструкции системы

Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5
11	K	3		2
12	L	3		2
13	M	3		2
14	N	3		2
15	O	4		2
16	P	4		2

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5
17	R	4		1
18	S	5		1

4.2. Построение математической модели функциональной надёжности системы с определённым типом перемычки метод АРЗ

Как уже отмечалось ранее, функциональная надёжность трубопроводной системы, имеющей в своём составе перемычку, зависит от типа последней, т.е. от числа задвижек и порядка их расположения в перемычке. Определение математической зависимости функциональной надёжности системы для каждого типа перемычки представляет большой научный и практический интерес.

Основная цель исследования – получить математические модели функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов для каждого из 18 типов перемычек, соединяющих трубопроводы, в зависимости от технической надёжности этих трубопроводов. Искомые математические модели должны быть способны дать адекватное расчётное значение функциональной надёжности при известной технической надёжности каждого из двух параллельных трубопроводов. Такие модели обеспечат не только вычисление функциональной надёжности конкретной системы двух параллельных трубопроводов, но и позволят произве-

Выбор оптимальной конструкции системы

сти сравнительный анализ степени влияния каждого из 18 типов перемычки на повышение функциональной надёжности системы.

Исследования проводились с использованием метода АРЗ для расчёта функциональной надёжности [44], который детально рассмотрен в разделе 2. В подразделе 3.3 уже рассматривалась методика построения математической модели функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа. Результатом построения были математические модели (3.15), (3.19) и (3.20). Аналогичные построения по той же методике были осуществлены для перемычек типов *A*, *C*, *D*, *G*, *H*, *I*, *J*, *K* и *R* (см. Приложение С).

Результаты построения математических моделей функциональной надёжности сведены в табл. 4.3. В таблице, как и ранее, величина p определяет техническую надёжность каждого из двух параллельных трубопроводов.

Все математические модели, присутствующие в табл. 4.3, получены в предположении, что техническая надёжность любой задвижки в системе равна единице.

Таблица 4.3

Математические модели функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой

№ п.п.	Тип перемычки	Кол-во задвижек	Математическая модель функциональной надёжности системы
1	2	3	4
1	<i>A</i>	0	$P_{2+п0}^f = 2p - 1$
2	<i>B</i>	1	Неоднозначность модели
3	<i>C</i>	1	$P_{2+п1,C}^f = \frac{1}{2}(3p - 1)$
4	<i>D</i>	1	$P_{2+п1,D}^f = \frac{1}{2}(3p - 1)$

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4
5	E	2	Неоднозначность модели
6	F	2	Неоднозначность модели
7	G	2	$P_{2+\pi 2,G}^f = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right] p$
8	H	2	$P_{2+\pi 2,H}^f = p \cdot \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]$
9	I	2	$P_{2+\pi 2,I}^f = p$
10	J	3	$P_{2+\pi 3,J}^f = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$
11	K	3	$P_{2+\pi 3,K}^f = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$
12	L	3	Неоднозначность модели
13	M	3	Неоднозначность модели
14	N	3	Неоднозначность модели
15	O	4	Неоднозначность модели
16	P	4	Неоднозначность модели
17	R	4	$P_{2+\pi 4,R}^f = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2$
18	S	5	$P_{2+\pi 5,S}^f = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2$

Выбор оптимальной конструкции системы

В табл. 4.3 математические модели функциональной надёжности системы для перемычек типов *B*, *E*, *F*, *L*, *M*, *N*, *O* и *P* отсутствуют. К сожалению, использование метода АРЗ на этапе перехода от графа АРЗ к расчётным моделям функциональной надёжности для указанных типов перемычек приводит к неоднозначным результатам. Причиной неоднозначности является наличие в перемычке центральной задвижки, расположенной непосредственно на трубе, которая соединяет параллельные трубопроводы.

Избежать неоднозначности, оставаясь в рамках метода АРЗ, не представляется возможным. Решение данной проблемы возможно только при условии модификации метода АРЗ, точнее, модификации этапа перехода от графа АРЗ к расчётной модели функциональной надёжности.

4.3. Первый модифицированный метод АРЗ для построения математической модели функциональной надёжности системы

Рассмотрим особенности применения метода АРЗ при попытке построить математическую модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *N*-типа с расположением задвижек, соответствующим первому способу (см. табл. 4.2). В этом случае система будет иметь вид, показанный на рис. 4.3.

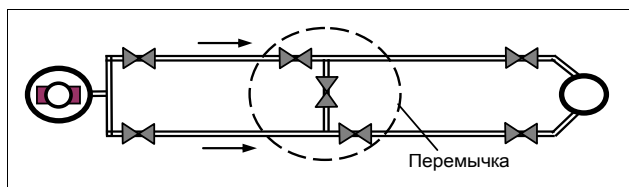


Рис. 4.3 – Схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *N*-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой N-типа, изображен на рис. 4.4.

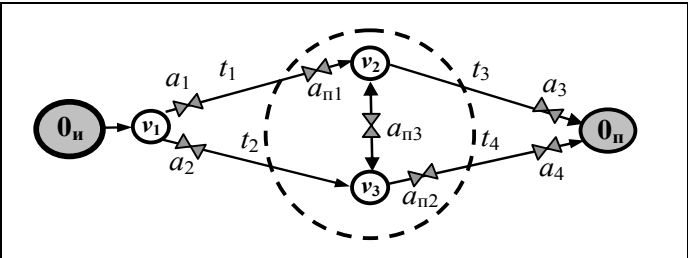


Рис. 4.4 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой N-типа

В табл. 4.4 представлены данные, отражающие разбиение системы на аварийно-ремонтные зоны (АРЗ) по алгоритму, изложенному в [53].

Таблица 4.4

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2), e_{23}(t_n)$ при $z_{23} = 1$	$a_2, a_{п2}, a_{п3}$	v_3
3	$e_{20п}(t_3), e_{23}(t_n)$ при $z_{23} = 2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{a3}$	v_2
4	$e_{30п}(t_4)$,	$a_{п2}, a_{a4}$	—
5	—	a_1, a_2	v_1

Выбор оптимальной конструкции системы

Напомним, чтобы исходный граф системы (рис. 4.4) отвечал требованиям алгоритма, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 или 2.

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. 4.5.

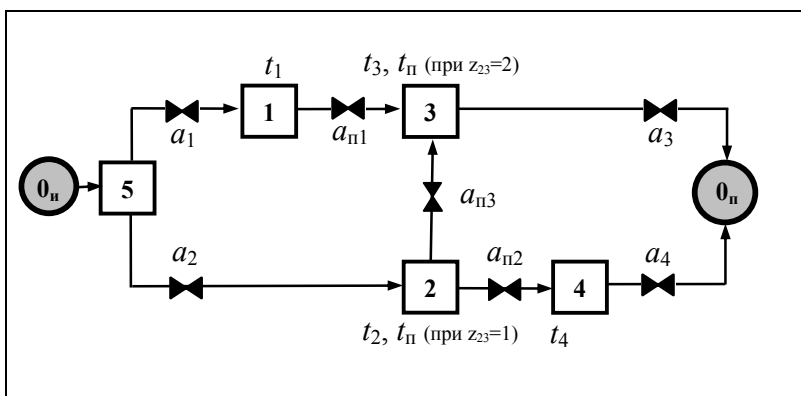


Рис. 4.5 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой N -типа

Дальнейшее использование статистико-аналитического метода, назовем его методом АРЗ, сталкивается с определёнными трудностями, связанными с неоднозначностью перехода от графа АРЗ к модели надёжности. Неоднозначность возникает из-за мостового характера задвижки $a_{п3}$, расположенной в центре перемычки.

Для преодоления неоднозначности перехода предлагается модифицировать метод АРЗ. Модификация метода касается только этапа перехода от графа АРЗ к расчётной модели функциональной надёжности и заключается в построении двух моделей функциональной надёжности системы с последующим их

объединением в одну на основе теорем теории вероятностей «о полной вероятности» и «о вероятности противоположных событий». Одна модель строится в предположении, что центральная задвижка, расположенная непосредственно на трубе перемычки, находится в положение «открыто», другая модель – в положение «закрыто».

Для построения моделей введём следующие обозначения:
 p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,5}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$;
 $p_{пк}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,3}$.

Если центральная задвижка перемычки находится в положении «открыто», то зоны №2 и №3 можно рассматривать как единую зону с суммарной длиной трубопроводных участков равной длине каждого из двух параллельных трубопроводов. Тогда частота отказов в такой зоне будет равна частоте отказов в одном трубопроводе:

$$(1 - p_{2,3}) = (1 - p). \quad (4.1)$$

Здесь $p_{2,3}$ – вероятность безотказной работы единой зоны.

Из (4.1)

$$p_{2,3} = p. \quad (4.2)$$

Построим модели надёжности, согласно требованиям модификации, для графа АРЗ, приведенного на рис. 4.5.

Первая модель (при нахождении центральной задвижки $a_{пз}$ перемычки N -типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. 4.6.

Выбор оптимальной конструкции системы

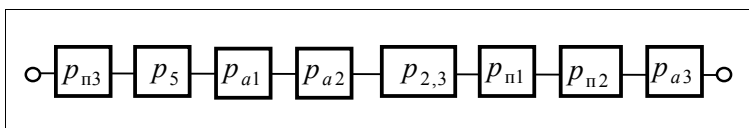


Рис. 4.6 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой N -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

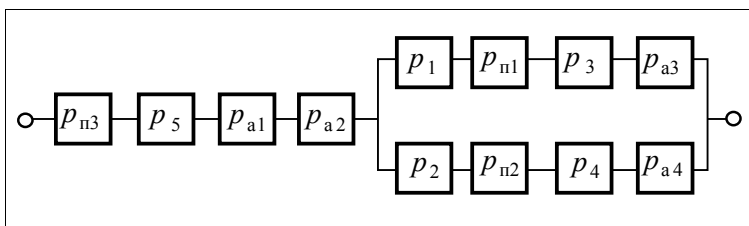


Рис. 4.7 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой N -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Вторая модель функциональной надёжности системы (при нахождении задвижки $a_{п3}$ в положении «закрыто») соответствует схеме, изображённой на рис. 4.7.

Как видно из рис. 4.6 и 4.7, надёжность $p_{п3}$ центральной задвижки $a_{п3}$ образует последовательную модель надёжности с остальной частью системы. Объясняется это тем, что выход из строя центральной задвижки $a_{п3}$ приводит к прекращению транспорта ЦП потребителю.

Согласно расчётной схеме (рис. 4.6), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положе-

нии «открыто» не зависит от APЗ №1, APЗ №3 и задвижки $a_{п1}$ и определяется выражением:

$$P_{2+п3,N,откр}^f = p_{п3} p_5 p_{a1} p_{a2} p_{2,3} p_{п1} p_{п2} p_{a3}. \quad (4.3)$$

Согласно расчётной схеме (рис. 4.7) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п3,N,закр}^f = p_{п3} p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{п2} p_4 p_{a4})]. \quad (4.4)$$

Надёжность p_5 зоны №5 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков принимается равной единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{пj} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $j \in \overline{1,3}$,

С учётом (4.2) и сделанных замечаний выражения (4.3) и (4.4) принимают соответственно вид:

$$P_{2+п3,N,откр}^f = p_a^6 p; \quad (4.5)$$

$$P_{2+п3,N,закр}^f = p_a^4 [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^2)(1 - p_2 p_4 p_a^2)]. \quad (4.6)$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1, №2, №3 и №4 при нахождении центральной задвижки в положении «закрыть» определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

Выбор оптимальной конструкции системы

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (4.7)$$

Подставляя (4.7) в (4.6), получим

$$P_{2+\Pi 3, N, \text{закр}}^f = p_a^4 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right]^2 \right\}. \quad (4.8)$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. 4.3:

– для задвижки $a_{\Pi 3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. 4.6,

$$P_{2+\Pi 3, N, \text{откр}}^f = p; \quad (4.9)$$

– для задвижки $a_{\Pi 3}$ в положении «закрыто», согласно схеме модели на рис. 4.7,

$$P_{2+\Pi 3, N, \text{закр}}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (4.10)$$

Чтобы объединить модели (4.9) и (4.10), необходимо дополнительно иметь априорную вероятность (относительное время) нахождения центральной задвижки $a_{\Pi 3}$ в положениях «открыто»

$p_{\Pi 3, \text{откр}}$. При наличии такой вероятности $p_{\Pi 3, \text{откр}}$ искомая функциональная надёжность системы, согласно теоремам теории вероятности «о полной вероятности» и «о вероятности противоположных событий», примет вид

$$P_{2+п3,N}^f = p_{п3,откр} P_{2+п3,N,откр}^f + (1 - p_{п3,откр}) P_{2+п3,N,закр}^f.$$

При отсутствии априорной информации о состояниях центральной задвижки (например, при проектировании новых сетей) вероятность $p_{п3,откр}$ следует принять равной $\frac{1}{2}$. Тогда объединенная математическая модель будет соответствовать выражению

$$P_{2+п3,N}^f = \frac{1}{2} P_{2+п3,N,откр}^f + \frac{1}{2} P_{2+п3,N,закр}^f. \quad (4.11)$$

Подставляя в (4.11) вместо $P_{2+п3,N,откр}^f$ и $P_{2+п3,N,закр}^f$ их выражения в соответствии с (4.9) и (4.10), получим единую упрощенную математическую модель функциональной надёжности системы:

$$P_{2+п3,N}^f = \frac{1}{2} \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \right\},$$

или

$$P_{2+п3,N}^f = \frac{1}{2} \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \left[3 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (4.12)$$

Предложенная модификация метода АРЗ позволяет получить модели функциональной надёжности для системы двух трубопроводов, соединенных задвижкой любого типа.

Поскольку на практике относительное время нахождения центральной задвижки перемычки в одном из двух положений («открыто», «закрыто») является доминирующим, то действительная функциональная надёжность будет отличаться от (4.12). По сути, в предложенной модификации метода АРЗ величины $P_{2+п3,N,откр}^f$

Выбор оптимальной конструкции системы

и $P_{2+п3,N,закр}^f$ определяют возможный диапазон, в котором находится действительное значение функциональной надёжности.

В практической деятельности для исключения риска целесообразно в качестве функциональной надёжности системы брать нижнюю границу диапазона, т.е. для перемычки N -типа

$$P_{2+п3,N}^f \geq \min\{P_{2+п3,N,откр}^f, P_{2+п3,N,закр}^f\} = p.$$

С другой стороны, разумно устанавливать такое положение центральной задвижки, при котором обеспечивается большая функциональная надёжность системы. Тогда для перемычки N -типа

$$P_{2+п3,N}^f \leq \max\{P_{2+п3,N,откр}^f, P_{2+п3,N,закр}^f\} = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2}\right)^2\right]^2.$$

В дальнейшем исследовании для исключения какой-либо неоднозначности или ошибочного толкования будем при определении функциональной надёжности системы модифицированным методом АРЗ учитывать весь возможный диапазон значений

$$\begin{aligned} \min\{P_{2+пн,тип,откр}^f, P_{2+пн,тип,закр}^f\} &\leq P_{2+пн,тип}^f \leq \\ &\leq \max\{P_{2+пн,тип,откр}^f, P_{2+пн,тип,закр}^f\}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Так, для систем с перемычкой N -типа искомый диапазон соответствует двойному неравенству

$$p \leq P_{2+п3,N}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2}\right)^2\right]^2. \quad (4.14)$$

Получение расчётных диапазонов функциональной надёжности системы для перемычек типа B , E , F , L , M , O , P и S подробно описано в Приложении D. Результаты построения расчётных диапазонов указанных типов перемычек сведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

№ п.п.	Тип пере-мычки	Кол-во задвижек	Математическая модель функциональной надёжности системы
1	2	3	4
1	<i>B</i>	2	$2p - 1 \leq P_{2+п1,B}^f \leq 1 - (1 - p)^2$
2	<i>E</i>	2	$\frac{3p-1}{2} \leq P_{2+п2,E}^f \leq 1 - (1 - p) \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$
3	<i>F</i>	2	$\frac{3p-1}{2} \leq P_{2+п2,F}^f \leq 1 - (1 - p) \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$
4	<i>L</i>	3	$p \leq P_{2+п3,L}^f \leq p + (1 - p) \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$
5	<i>M</i>	3	$p \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \right\} \leq P_{2+п3,M}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2$

Окончание табл. 4.5

1	2	3	4
6	N	3	$p \leq P_{2+n3,N}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2$
7	O	4	$\frac{1+p}{2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \right\} \leq P_{2+n4,O}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2$
8	P	4	$\left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left(\frac{1+p}{2} \right) \leq P_{2+n4,P}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2$
9	S	5	$1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \leq P_{2+n5,S}^f \leq \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2$

4.4. Второй модифицированный метод АРЗ для построения математической модели функциональной надёжности системы

Построение математических моделей функциональной надёжности системы вида (4.4) с помощью модифицированного метода АРЗ имеет ряд существенных недостатков, а именно:

- априорная вероятность $p_{пз,откр}$ может быть определена только статистическими методами;
- априорная вероятность $p_{пз,откр}$ для разных трубопроводных систем имеет разные значения;
- для вновь проектируемых систем априорная вероятность $p_{пз,откр}$ неизвестна;
- вероятность $p_{пз,откр}$ может изменять своё значение в процессе эксплуатации системы по произвольному закону.

В силу приведенных недостатков предложенный метод позволяет определять только нижнюю и верхнюю границы диапазона, в котором находится действительное значение функциональной надёжности системы. Использовать диапазон в практических целях малоэффективно, поскольку он даёт только оценку функциональной надёжности.

Безусловно, для всех субъектов системы трубопроводного снабжения желательно иметь более точную оценку функциональной надёжности. Чем уже диапазон определения функциональной надёжности системы, тем более точная оценка. Авторами предлагается вторая модификация метода АРЗ на основе концепции пуассоновских потоков отказа, которая обеспечивает более точную оценку функциональной надёжности.

Как известно, одной из особенностей пуассоновского потока отказов является утверждение о том, что одновременно два и более отказов в системе произойти не могут. Данное утверждение и явилось предпосылкой для разработки нового (второго) модифицированного метода АРЗ.

Выбор оптимальной конструкции системы

Рассмотрим теоретические основы второго модифицированного метода АРЗ с параллельной иллюстрацией его использования на конкретном примере. В качестве примера возьмем построение математической модели функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *E*-типа, т.е. на примере получения формулы для расчёта функциональной надёжности $P_{2+п2,E}^f$. Данный тип включает два различных способа размещения задвижек в перемычке (см. табл. 4.2). Воспользуемся первым вариантом конструкции перемычки. Тогда система будет иметь вид, показанный на рис. 4.8

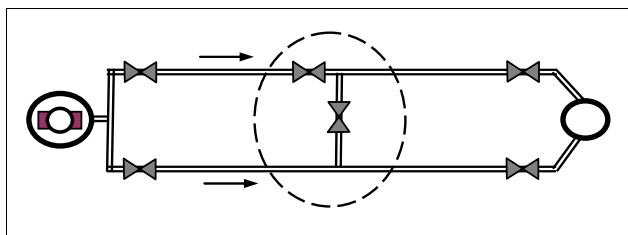


Рис. 4.8 – Схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *E*-типа

Второй модифицированный метод АРЗ, как и первый, включает все этапы построения математической модели функциональной надёжности системы, присущие методу АРЗ. Напомним эти этапы:

1. Формирование математической модели трубопроводной транспортной сети в виде взвешенного графа.
2. Разбиение исходного взвешенного графа трубопроводной транспортной сети на подграфы, каждый из которых соответствует одной АРЗ.
3. Расчет технической надёжности АРЗ.

4. Преобразование исходного взвешенного графа сети во взвешенный макрограф AP3 (замена каждой AP3 одной вершиной).

5. Построение расчётных моделей функциональной надёжности магистральной сети.

6. Анализ расчётной модели с целью выявления и удаления из модели несущественных связей между аварийно-ремонтными зонами и самих зон, не влияющих на функциональную надёжность.

7. Построение математической модели функциональной надёжности сети с помощью классических методов расчета надежности технических систем.

Второй модифицированный метод AP3 предполагает выполнение первых четырёх этапов метода AP3 без каких-либо изменений и добавлений. Так, для системы на рис. 4.8 результатами выполнения указанных этапов являются:

- исходный граф системы (рис. 4.9);
- таблица разбиения элементов системы на аварийно-ремонтные зоны (табл. 4.6);
- граф AP3 системы (рис. 4.10).

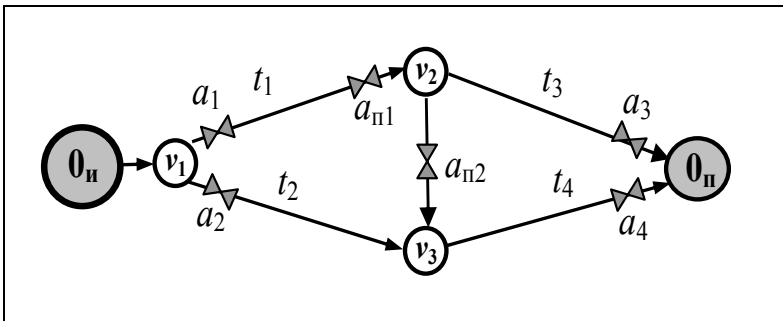


Рис. 4.9 – Исходный граф для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой E-типа

Таблица 4.6

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие за- движки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4), e_{23}$, если $z_{23}=1$	$a_2, a_{п2}, a_4$	v_3
3	$e_{20п}(t_3), e_{23}$, если $z_{23}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_3$	v_2
4	—	a_1, a_2	v_1

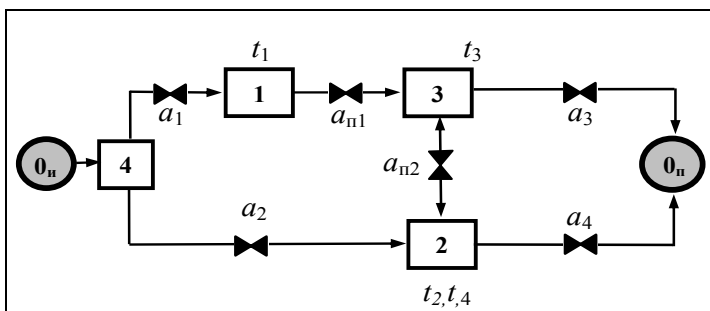


Рис. 4.10 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой E-типа

Вторая модификация метода АРЗ заключается в кардинальном изменении 5-го и 7-го этапов.

На 5-м этапе выдвигаются гипотезы, составляющие полную группу несовместных событий. Число гипотез должно быть на единицу больше числа аварийно-ремонтных зон с трубопроводами ненулевой длины. Для системы в условиях примера следует выдвинуть такие гипотезы:

- гипотеза H_1 , состоящая в том, что в системе наступил отказ в трубопроводе из АРЗ №1;
- гипотеза H_2 , состоящая в том, что в системе наступил отказ в трубопроводе из АРЗ №2;
- гипотеза H_3 , состоящая в том, что в системе наступил отказ в трубопроводе из АРЗ №3;
- гипотеза H_4 , состоящая в том, что в система работает безотказно.

Другие гипотезы не рассматриваются, т.к. по условию пуассоновских потоков более одного отказа в системе одновременно не происходит.

Далее определяются вероятности выдвинутых гипотез $P(H_i)$, $i = \overline{1, k}$, k – общее количество гипотез. В условиях примера $k = 4$.

Вероятность последней гипотезы $P(H_k)$ определяется с помощью известной технической надёжности p каждого из двух параллельных трубопроводов системы. Поскольку вероятность отказа для каждого трубопровода равна $(1 - p)$, то вероятность отказа в двух параллельных трубопроводах будет в 2 раза больше, т.е. $2(1 - p)$. Отсюда вероятность безотказной работы всей системы (гипотеза H_k) составит $1 - 2(1 - p)$, или

$$P(H_k) = 2p - 1. \quad (4.15)$$

Выражение (4.15) справедливо для любого типа перемычки в системе из двух параллельных трубопроводов при пуассоновском характере отказов в системе.

Гипотеза H_k и сумма гипотез $\sum_{i=1}^{k-1} H_i$ являются противоположными событиями, для которых

Выбор оптимальной конструкции системы

$$P(H_k) + P\left(\sum_{i=1}^{k-1} H_i\right) = 1.$$

Поскольку все выдвинутые гипотезы являются несовместными, то

$$P\left(\sum_{i=1}^{k-1} H_i\right) = P(H_1) + P(H_2) + \dots + P(H_{k-1}) = 1 - P(H_k),$$

или

$$P(H_1) + P(H_2) + \dots + P(H_{k-1}) = 2(1 - p). \quad (4.16)$$

Выражение (4.16) также справедливо для любого типа перемычек. При этом суммарная вероятность гипотез $2(1 - p)$ распределяется между гипотезами $H_1, H_2, \dots, H_{k-1}$ пропорционально длинам трубопроводных частей соответствующих АРЗ.

В условиях примера выражение (4.15) принимает вид

$$P(H_1) + P(H_2) + P(H_3) = 2(1 - p). \quad (4.17)$$

Поскольку длины трубопроводных частей для АРЗ-1, АРЗ-2 и АРЗ-3 соотносятся, как $1 : 2 : 1$, то вероятности соответствующих гипотез $P(H_1), P(H_2), P(H_3)$ соотносятся таким же образом:

$$P(H_1) : P(H_2) : P(H_3) = 1 : 2 : 1. \quad (4.18)$$

Соотношения (4.17) и (4.18) позволяют определить априорные вероятности остальных гипотез:

$$P(H_1) = \frac{1}{4} [2(1 - p)] = \frac{1}{2} (1 - p); \quad (4.19)$$

$$P(H_1) = \frac{1}{2}[2(1-p)] = 1-p; \quad (4.20)$$

$$P(H_1) = \frac{1}{4}[2(1-p)] = \frac{1}{2}(1-p). \quad (4.21)$$

Далее определяются условные вероятности безотказной работы системы $P(A/H_i)$, $i = \overline{1, k}$, т.е. вероятности работы системы при условии осуществления гипотезы H_i . Здесь A – событие, которое заключается в бесперебойной поставке целевого продукта потребителю, т.е. в работоспособности системы.

Естественно, условная вероятность последней гипотезы определяется равенством

$$P(A/H_k) = 1, \quad (4.22)$$

которое справедливо для всех типов перемычек.

Условные вероятности $P(A/H_i)$ для остальных гипотез ($i = \overline{1, k-1}$) определяются с помощью метода АРЗ применительно к рассматриваемой системе с отсеченной i -й АРЗ. Практически это осуществляется путем построения по уже построенному макрографу АРЗ расчетных схем функциональной надёжности, при условии, что все существенные задвижки i -й АРЗ находятся в положении «закрыто» (условие отсечения зоны).

В условиях примера расчётная схема и соответствующая математическая модель условной вероятности события A для каждой из гипотез H_1, H_2 и H_3 при абсолютной надёжности всех задвижек представлены в табл. 4.7.

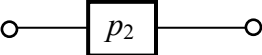
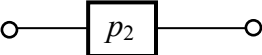
В таблице технические надёжности АРЗ определяются по методике определения технической надёжности трубопроводных участков системы, которая использовалась для получения выра-

Выбор оптимальной конструкции системы

жений (3.16) и (4.5). В условиях рассматриваемого примера данная методика приводит к следующим результатам:

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}; \quad p_2 = p.$$

Таблица 4.7

Гипотеза	Отсеченная зона	Расчётная схема	Условная вероятность
H_1	АРЗ №1		$P(A/H_1) = p$
H_2	АРЗ №2		$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)^2$
H_3	АРЗ №3		$P(A/H_3) = p$

Условные вероятности $P(A/H_i)$ в табл. 4.7 можно трактовать как:

- надёжность системы без i -й АРЗ;
- вероятность безотказной работы системы без i -й АРЗ;
- вероятность поставки целевой продукции потребителю системой без i -й АРЗ в расчётный период времени.

На последнем этапе второго модифицированного метода на основании теоремы «о полной вероятности» строится искомая математическая модель функциональной надёжности системы (независимо от типа перемычки):

$$P_{2+\Pi}^{f*} = P(A) = \sum_{i=1}^k P(H_i) P(A / H_i). \quad (4.23)$$

Здесь верхний индекс «звёздочка» обозначает, что математическая модель функциональной надёжности получена на основе концепции пуассоновских потоков отказов.

Поскольку все необходимые данные, которые фигурируют в (4.23), для системы с перемычкой *E*-типа получены, то искомая математическая модель функциональной надёжности для этой системы примет вид

$$\begin{aligned} P_{2+\Pi 2, E}^{f*} &= P(A) = \sum_{i=1}^4 P(H_i) P(A / H_i) = \\ &= \frac{1}{2}(1-p) p + (1-p) \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 + \frac{1}{2}(1-p) p + (2p-1). \end{aligned}$$

После упрощения последнего выражения окончательно имеем

$$P_{2+\Pi 2, E}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}. \quad (4.24)$$

По изложенному методу были синтезированы математические модели надёжности для систем двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычками остальных типов. Основные результаты синтеза представлены в табл. 4.8.

Разработка второго модифицированного метода АРЗ – мера вынужденная: базовый метод АРЗ не позволяет получить однозначную математическую модель функциональной надёжности, а первый модифицированный метод практически нереализуем из-за сложности определения вероятности $p_{\Pi 3, \text{откр}}$.

Таблица 4.8

Тип пере- мычки	Гипо- теза	Вероятность гипотезы	Условная вероятность	Функциональная надёжность системы
1	2	3	4	5
A	H_1	$P(H_1) = 2(1-p)$	$P(A / H_1) = 0$	$P_{2+n0}^{f*} = 2p - 1$
	H_2	$P(H_2) = 2p - 1$	$P(A / H_2) = 1$	
B	H_1	$P(H_1) = 1 - p$	$P(A / H_1) = p$	$P_{2+n1,B}^{f*} = 4p - 2p^2 - 1$
	H_2	$P(H_2) = 1 - p$	$P(A / H_2) = p$	
	H_3	$P(H_3) = 2p - 1$	$P(A / H_3) = 1$	
C	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A / H_1) = 1 - \frac{3}{2}(1-p)$	$P_{2+n1,C}^{f*} = \frac{12p - 3p^2 - 5}{4}$
	H_2	$P(H_1) = \frac{3}{2}(1-p)$	$P(A / H_2) = 0$	
	H_3	$P(H_3) = 2p - 1$	$P(A / H_3) = 1$	

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5
D	H_1	$P(H_1) = \frac{3}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = 0$	$P_{2+\Pi 1,D}^{f*} = \frac{12p - 3p^2 - 5}{4}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = 1 - \frac{3}{2}(1-p)$	
	H_3	$P(H_3) = 2p - 1$	$P(A/H_3) = 1$	
E	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+\Pi 2,E}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}$
	H_2	$P(H_2) = 1 - p$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)^2$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	H_4	$P(H_4) = 2p - 1$	$P(A/H_4) = 1$	
F	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+\Pi 2,F}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}$
	H_2	$P(H_2) = 1 - p$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)^2$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	H_4	$P(H_4) = 2p - 1$	$P(A/H_4) = 1$	

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5
G	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2}p$	$P_{2+n2,G}^{f*} = \frac{5p - p^3 - 2}{2}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2}p$	
	H_3	$P(H_3) = 1-p$	$P(A/H_3) = 0$	
	H_4	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	
H	H_1	$P(H_1) = 1-p$	$P(A/H_1) = 0$	$P_{2+n2,H}^{f*} = \frac{5p - p^3 - 2}{2}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2}p$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \frac{1+p}{2}p$	
	H_4	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	
I	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+n2,I}^{f*} = 3p - p^2 - 1$
	H_2	$P(H_2) = 1-p$	$P(A/H_2) = 0$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	H_4	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5
J	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = 0$	$P_{2+\Pi 3, J}^{f*} = \frac{38p - 8p^2 - 6p^3 + p^4 - 9}{16}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_5	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	
K	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	$P_{2+\Pi 3, K}^{f*} = \frac{38p - 8p^2 - 6p^3 + p^4 - 9}{16}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = 0$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_5	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5
L	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = p$	$P_{2+п3,L}^{f*} = \frac{13p - 5p^2 - p^3 - 3}{4}$
	H_2	$P(H_2) = 1-p$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)^2$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = p$	
	H_4	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	
M	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \left(\frac{1+p}{2}\right)p$	$P_{2+п3,M}^{f*} = \frac{5p - p^3 - 2}{2}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2}\right)p$	
	H_3	$P(H_3) = 1-p$	0	
	H_5	$P(H_4) = 2p-1$	$P(A/H_4) = 1$	

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5
N	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+\Pi 4, N}^{f*} = \frac{20p - 6p^2 - 4p^3 + p^4 - 3}{8}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \frac{1+p}{2}$	
	H_5	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	
O	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	$P_{2+\Pi 4, O}^{f*} = \frac{20p - 6p^2 - 4p^3 + p^4 - 3}{8}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \frac{1+p}{2}$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_5	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5
P	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+\Pi 4, P}^{f*} = \frac{20p - 6p^2 - 4p^3 + p^4 - 3}{8}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \left(\frac{1+p}{2} \right)^2$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \frac{1+p}{2}$	
	H_5	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	
R	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+\Pi 4, K}^{f*} = \frac{10p - 4p^2 - 2p^3 + p^4 - 1}{4}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_5	$P(H_5) = 2p - 1$	$P(A/H_5) = 1$	

Окончание табл. 4.8

1	2	3	4	5
S	H_1	$P(H_1) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_1) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	$P_{2+n5,S}^{f*} = \frac{10p - 4p^2 - 2p^3 + p^4 - 1}{4}$
	H_2	$P(H_2) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_2) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_3	$P(H_3) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_3) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_4	$P(H_4) = \frac{1}{2}(1-p)$	$P(A/H_4) = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]$	
	H_5	$P(H_5) = 2p-1$	$P(A/H_5) = 1$	

Результаты, полученные с помощью второго модифицированного метода АРЗ, соответствуют заниженной оценке функциональной надёжности системы. Объясняется это тем, что система гипотез в методе базируется на концепции пуассоновских потоков отказов и не учитывает возможности одновременного возникновения отказов в двух и более АРЗ, точнее одновременного проведения аварийно-ремонтных работ по устранению двух и более отказов. Если такой учёт произвести, то вероятность гипотезы H_k (в системе нет отказов), для которой условная вероятность безотказной работы $P(A/H_k)=1$, автоматически увеличится: число отказов остаётся прежним, а суммарное время пребывания в неработоспособном состоянии сокращается за счёт взаимного перекрытия временных периодов проведения аварийно-ремонтных работ.

Таким образом, использование второго модифицированного метода АРЗ целесообразно только в тех случаях, когда остальные методы не работают или не позволяют получить очевидную расчётную модель функциональной надёжности системы. К тому же, всегда следует учитывать, что результатом второго модифицированного метода является заниженная оценка функциональной надёжности.

Достоинством второго модифицированного метода по сравнению с первым является получение более точного результата: нижняя оценки функциональной надёжности по второму методу выше, чем по первому. Кроме того, если исходная надёжность трубопроводов стремится к единице ($p \rightarrow 1$), то расчётное значение функциональной надёжности по второму методу стремится к истинному значению.

4.5. Сравнительный анализ практической полезности типов перемычек по критерию функциональной надёжности

Информационной базой для сравнительного анализа практической полезности перемычек различного типа являются четыре таблицы: табл. 4.9; 4.10, 4.11 и 4.12.

Первая табл. 4.9 содержит расчётные значения функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с дополнительными задвижки, не соединённых перемычкой. В таблице приводятся два варианта вычисления функциональной надёжности: один – методом АРЗ на основе теории надёжности технических систем; другой (помеченный символом «*») – вторым модифицированным методом АРЗ на основе концепции пуассоновских потоков отказов, согласно которой два отказа и более одновременно в системе произойти не могут. Первый вариант расчёта при условии, что все задвижки обладают абсолютной надёжностью, даёт точные значения функциональной надёжности системы, второй – только оценку (заниженную).

Таблица 4.9

Метод расчёта	Функциональная надёжность системы		
	при $p = 0,7$	при $p = 0,8$	при $p = 0,9$
Метод АРЗ, $P_{2+2д}^f$	0,923	0,9639	0,9905
2-й модифицированный метод АРЗ, $P_{2+2д}^{f*}$	0,8335	0,924	0,9805

Расчёты по обоим методам проводились в рабочем диапазоне технической надёжности p каждого из двух параллельных трубопроводов: 0,7; 0,8 и 0,9. При этом функциональная надёжность системы P_2^f рассчитывалась по формуле (3.11), а функциональная надёжность P_2^{f*} по математической модели функциональной надёжности системы, полученной вторым модифицированным методом АРЗ:

$$P_{2+2д}^{f*} = \sum_{i=1}^5 P(H_i) P(A / H_i) = \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 +$$

Выбор оптимальной конструкции системы

$$\begin{aligned}
 & + \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 + \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 + \frac{(1-p)}{2} \cdot \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 + \\
 & + (2p-1) \cdot 1 = \frac{5p - p^2 - p^3 - 1}{2}. \quad (4.25)
 \end{aligned}$$

Назначение первой таблицы – предоставить для сравнительного анализа базовые данные по функциональной надёжности системы, которые в дальнейшем будут служить критерием практической полезности для каждого типа перемычки.

Вторая табл. 4.10 содержит расчётные значения функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой определённого типа, полученные методом АРЗ для тех же значений технической надёжности p каждого из двух параллельных трубопроводов, которые фигурируют в табл. 4.9.

Таблица 4.10

№ п.п.	Тип перемычки	Расчётная величина	Расчётные значения $P_{2+п, \text{тип}}^f(p)$			Целесообразность практического использования по критерию функциональной надёжности
			$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$	
1	2	3	4	5	6	7
1	A	$P_{2+п0}^f$	0,4	0,6	0,8	Противопоказано, $P_{2+п0}^f < P_2^f$
2	C	$P_{2+п1,C}^f$	0,55	0,7	0,85	Противопоказано, $P_{2+п1,C}^f < P_2^f$
3	D	$P_{2+п1,D}^f$	0,55	0,7	0,85	Противопоказано, $P_{2+п1,D}^f < P_2^f$

Окончание табл. 4.10

1	2	3	4	5	6	7
7	G	$P_{2+п2,G}^f$	0,6842	0,805	0,8978	Противопоказано, $P_{2+п2,G}^f < P_2^f$
8	H	$P_{2+п2,H}^f$	0,6842	0,805	0,8978	Противопоказано, $P_{2+п2,H}^f < P_2^f$
9	I	$P_{2+п2,I}^f$	0,7	0,8	0,9	Противопоказано, $P_{2+п2,I}^f < P_2^f$
10	J	$P_{2+п3,J}^f$	0,8309	0,891	0,9476	Противопоказано, $P_{2+п3,J}^f < P_2^f$
11	K	$P_{2+п3,K}^f$	0,8309	0,891	0,9476	Противопоказано, $P_{2+п3,K}^f < P_2^f$
17	R	$P_{2+п4,R}^f$	0,9555	0,9801	0,995	Целесообразно, $P_{2+п4,R}^f > P_2^f$ приблизит. на 1,87%
18	S	$P_{2+п5}^f$	0,9555	0,9801	0,995	Целесообразно, $P_{2+п5}^f > P_2^f$ приблизит. на 1,87%

В табл. 4.10 приведены расчётные данные по математическим моделям, представленным в табл. 4.3, которые определяют функциональную надёжность системы только для десяти типов переключек: A, C, D, G, H, I, J, K, R и S.

Третья табл. 4.11 содержит расчётные диапазоны значений функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, полученные с помощью первого модифицированного метода АРЗ для тех же значений технической надёжности p каждого из двух параллельных трубопроводов, которые фигурируют в табл. 4.9 и 4.10.

Таблица 4.11

№ п.п.	Тип пере-мычки	Расчётная величина	Расчётные значения $P_{2+пл, тип}^f(p)$			Целесообразность практического использования по критерию функциональной надёжности
			$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$	
1	2	3	4	5	6	7
1	<i>B</i>	$P_{2+п1,B}^f$	0,4 ÷ 0,91	0,6 ÷ 0,96	0,8 ÷ 0,99	Противопоказано, $P_{2+п1,B}^f < P_2^f$
2	<i>E</i>	$P_{2+п2,E}^f$	0,55 ÷ 0,91675	0,7 ÷ 0,962	0,85 ÷ 0,9902	Противопоказано, $P_{2+п2,E}^f < P_2^f$
3	<i>F</i>	$P_{2+п2,F}^f$	0,55 ÷ 0,9168	0,7 ÷ 0,962	0,85 ÷ 0,9902	Противопоказано, $P_{2+п2,E}^f < P_2^f$
4	<i>L</i>	$P_{2+п3,L}^f$	0,7 ÷ 0,9168	0,8 ÷ 0,962	0,9 ÷ 0,9902	Противопоказано, $P_{2+п2,E}^f < P_2^f$
5	<i>M</i>	$P_{2+п3,M}^f$	0,6461 ÷ 0,923	0,7711 ÷ 0,9639	0,8914 ÷ 0,9905	Нецелесообразно, $P_{2+п3,M}^f \leq P_2^f$

Окончание табл. 4.11

1	2	3	4	5	6	7
6	N	$P_{2+\pi 3,N}^f$	$0,7 \div 0,923$	$0,8 \div 0,9639$	$0,9 \div 0,9905$	Нецелесообразно, $P_{2+\pi 3,N}^f \leq P_2^f$
7	O	$P_{2+\pi 4,O}^f$	$0,7845 \div 0,923$	$0,8675 \div 0,9639$	$0,941 \div 0,9905$	Нецелесообразно, $P_{2+\pi 4,O}^f \leq P_2^f$
8	P	$P_{2+\pi 4,P}^f$	$0,7845 \div 0,923$	$0,8675 \div 0,9639$	$0,941 \div 0,9905$	Нецелесообразно, $P_{2+\pi 4,P}^f \leq P_2^f$
9	S	$P_{2+\pi 5,S}^f$	$0,923 \div 0,9975$	$0,964 \div 0,99$	$0,9905 \div 0,9975$	Целесообразно, $P_{2+\pi 5,S}^f \geq P_2^f$

Выбор оптимальной конструкции системы

Расчётные диапазоны в табл. 4.11 соответствуют математическим моделям, представленным в табл. 4.5, которые определяют функциональную надёжность системы для восьми типов переключек: *B, E, F, L, M, N, O, P* и *S*.

Четвёртая табл. 4.12 содержит расчётные значения оценки функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с одной переключкой, полученные вторым модифицированным методом АРЗ, т.е. по математическим моделям, представленным в табл. 4.8. Данная таблица включает все типы переключек.

Таблица 4.12

№ п.п.	Тип переключки	Расчётная величина	Расчётные значения $P_{2+пн, тип}^{f*}(p)$			Целесообразность практического использования по критерию функциональной надёжности
			$p = 0,7$	$p = 0,8$	$p = 0,9$	
1	2	3	4	5	6	7
1	<i>A</i>	$P_{2+п0}^{f*}$	0,4	0,6	0,8	Противопоказано, $P_{2+п0}^{f*} < P_2^{f*}$
2	<i>B</i>	$P_{2+п1,B}^{f*}$	0,82	0,92	0,98	Противопоказано, $P_{2+п1,B}^{f*} < P_2^{f*}$
3	<i>C</i>	$P_{2+п1,C}^{f*}$	0,4425	0,635	0,8212	Противопоказано, $P_{2+п1,C}^{f*} < P_2^{f*}$
4	<i>D</i>	$P_{2+п1,D}^{f*}$	0,4425	0,635	0,8212	Противопоказано, $P_{2+п1,D}^{f*} < P_2^{f*}$
5	<i>E</i>	$P_{2+п2,E}^{f*}$	0,8268	0,922	0,9802	Противопоказано, $P_{2+п2,E}^{f*} < P_2^{f*}$
6	<i>F</i>	$P_{2+п2,F}^{f*}$	0,8268	0,922	0,9802	Противопоказано, $P_{2+п2,F}^{f*} < P_2^{f*}$

Продолжение табл. 4.12

1	2	3	4	5	6	7
7	G	$P_{2+\pi 2,G}^{f*}$	0,5785	0,744	0,8855	Противопоказано, $P_{2+\pi 2,G}^{f*} < P_2^{f*}$
8	H	$P_{2+\pi 2,H}^{f*}$	0,5785	0,744	0,8855	Противопоказано, $P_{2+\pi 2,H}^{f*} < P_2^{f*}$
9	I	$P_{2+\pi 2,I}^{f*}$	0,61	0,76	0,89	Противопоказано, $P_{2+\pi 2,I}^{f*} < P_2^{f*}$
10	J	$P_{2+\pi 3,J}^{f*}$	0,7414	0,8511	0,9376	Противопоказано, $P_{2+\pi 3,J}^{f*} < P_2^{f*}$
11	K	$P_{2+\pi 3,K}^{f*}$	0,7414	0,8511	0,9376	Противопоказано, $P_{2+\pi 3,K}^{f*} < P_2^{f*}$
12	L	$P_{2+\pi 3,L}^{f*}$	0,8268	0,922	0,9802	Противопоказано, $P_{2+\pi 3,L}^{f*} < P_2^{f*}$
13	M	$P_{2+\pi 3,M}^{f*}$	0,5785	0,744	0,8855	Противопоказано, $P_{2+\pi 3,M}^{f*} < P_2^{f*}$
14	N	$P_{2+\pi 3,N}^{f*}$	0,866	0,9402	0,985	Малоэффективно, $P_{2+\pi 3,N}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизит. на 2,04%
15	O	$P_{2+\pi 4,O}^{f*}$	0,866	0,9402	0,985	Малоэффективно, $P_{2+\pi 4,O}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизит. на 2,04%

Выбор оптимальной конструкции системы

Окончание табл. 4.12

1	2	3	4	5	6	7
16	P	$P_{2+\Pi 4, P}^{f*}$	0,866	0,9402	0,985	Малозэффективно, $P_{2+\Pi 4, O}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизит. на 2,04%
17	R	$P_{2+\Pi 4, R}^{f*}$	0,8985	0,9564	0,9895	Целесообразно, $P_{2+\Pi 4, R}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизит. на 4,08%
18	S	$P_{2+\Pi 5}^{f*}$	0,8985	0,9564	0,9895	Целесообразно, $P_{2+\Pi 5}^{f*} > P_2^{f*}$ приблизит. на 4,08%

Все три табл. 4.10, 4.11 и 4.12 содержат в последних колонках результаты сравнительного анализа. Отметим, что при анализе влияния перемычек различного типа на функциональную надёжность следует значения функциональную надёжности $P_{2+\Pi l, \text{тип}}^f(p)$ в табл. 4.10 и 4.11 сравнивать со значениями базовой функциональной надёжностью P_2^f в табл. 4.9, а значения $P_{2+\Pi l, \text{тип}}^{f*}(p)$ в табл. 4.12 – со значениями P_2^{f*} в табл. 4.9.

В табл. 4.13 сведены результаты анализа практической целесообразности использования перемычек различного типа как средства повышения функциональной надёжности системы. В основе анализа использованы три расчётных метода:

- метод АРЗ;
- первый модифицированный метод АРЗ;
- второй модифицированный метод АРЗ.

Таблица 4.13

№ п.п.	Тип пере-мычки	Целесообразность практического использования по критерию функциональной надёжности		
		Метод АРЗ	1-й модиф. метод АРЗ	2-й модиф. метод АРЗ
1	<i>A</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
2	<i>B</i>	–	Противопоказано	Противопоказано
3	<i>C</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
4	<i>D</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
5	<i>E</i>	–	Противопоказано	Противопоказано
6	<i>F</i>	–	–	Противопоказано
7	<i>G</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
8	<i>H</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
9	<i>I</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
10	<i>J</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
11	<i>K</i>	Противопоказано	–	Противопоказано
12	<i>L</i>	–	Противопоказано	Противопоказано
13	<i>M</i>	–	Неэффективно	Противопоказано
14	<i>N</i>	–	Неэффективно	Малоэффективно
15	<i>O</i>	–	Неэффективно	Малоэффективно
16	<i>P</i>	–	Неэффективно	Малоэффективно
17	<i>R</i>	Целесообразно	–	Целесообразно
18	<i>S</i>	Целесообразно	Целесообразно	Целесообразно

Выбор оптимальной конструкции системы

Как видно из табл. 4.13, результаты анализа не являются противоречивыми. Это свидетельствует, прежде всего, о правомерности использования первого и второго модифицированных методов АРЗ для оценки функциональной надёжности магистральных трубопроводных систем.

Сравнительный анализ таблиц 4.10, 4.11 и 4.12 с 4.9 показал, что 12 из 18 типов перемычек, а именно: *A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K* и *L* понижают функциональную надёжность системы. Поэтому их использование в практических целях противопоказано.

Использование перемычка *M*-типа не способствует повышению функциональной надёжности системы даже при условии абсолютной технической надёжности самой перемычки. Поскольку реальная вероятность безотказной работы перемычки меньше единицы, то функциональная надёжность системы незначительно падает. Поэтому в любом случае использование перемычки *M*-типа нецелесообразно.

Перемычки типа *N, J* и *P* оказывают незначительное влияние на изменение функциональной надёжности системы – приблизительное увеличение на $1 \div 2 \%$ (табл. 4.10 и 4.12). Поскольку изменение функциональной надёжности не является самым большим из возможных, то перемычки данных типов не представляют особого практического интереса.

Перемычки типа *R* и *S* по сравнению с перемычками остальных типов оказывают максимальное влияние на функциональную надёжность – приблизительное увеличение $2 \div 4 \%$ (табл. 4.10 и 4.12). Перемычки данных типов наиболее предпочтительны для практического использования. Поэтому в дальнейшем им будет уделяться повышенное внимание.

Данные всех четырёх таблиц хорошо согласуются между собой и подтверждают справедливость сделанных выводов.

4.6. Влияние надёжности запорной арматуры на функциональную надёжность системы

На первый взгляд, перемычка *R*-типа, содержащая в своей конструкции на одну задвижку меньше, чем перемычка *S*-типа,

более пригодна для практического применения. Однако такое суждение не совсем верное. У каждого типа есть свои преимущества и недостатки.

Все модели функциональной надёжности, представленные в табл. 4.3, 4.5 и 4.8, получены при условии абсолютной надёжности всех задвижек. Поэтому, если срок службы задвижек значительно превышает срок эксплуатации системы и если в процессе эксплуатации задвижки не требуют профилактического обслуживания с прекращением доступа к ним целевого продукта, то перемычка *R*-типа более эффективна, чем перемычка *S*-типа. В противном случае предпочтение отдаётся перемычке *S*-типа, несмотря на то, что она требует установку дополнительной (центральной) задвижки.

Смена приоритетов у перемычек типов *R* и *S* объясняется следующим образом.

Для замены или ремонта любой задвижки в перемычке *R*-типа необходимо прекратить транспортировку целевого продукта от источника к потребителю. То же самое касается и задвижек a_1 и a_2 (рис.4.11).

Математическая модель функциональной надёжности системы с учётом технической надёжности задвижек (см. рис. 4.12) имеет вид

$$P_{2+п4,K}^f = p_a^6 \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left[1 - \left(1 - p_a \frac{1+p}{2} \right)^2 \right], \quad (4.26)$$

где p_a – техническая надёжность каждой задвижки системы; p – техническая надёжность каждого из двух параллельных трубопроводов.

Выбор оптимальной конструкции системы

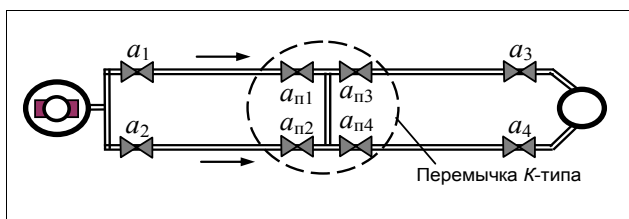


Рис. 4.11 – Схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *R*-типа

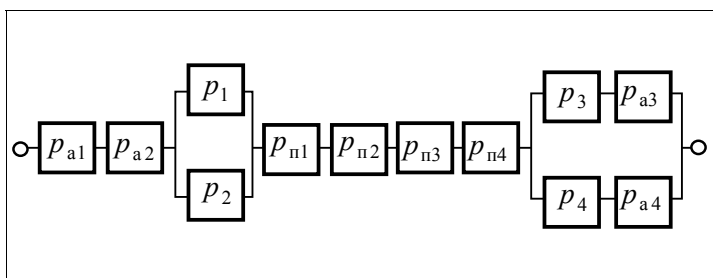


Рис. 4.12 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *R*-типа.

Для замены или ремонта любой задвижки в перемычке *L*-типа, кроме центральной $a_{п5}$ (рис. 4.13), нет необходимости прерывать поставку целевого продукта потребителю. Поэтому математическая модель функциональной надёжности системы в данном случае (см. рис. 4.14) имеет вид

$$P_{2+п4,L}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - p_a \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left[1 - \left(1 - p_a^2 \frac{1+p}{2} \right)^2 \right], \quad (4.27)$$

где p_a – техническая надёжность каждой задвижки системы; p – техническая надёжность каждого из двух параллельных трубопроводов.

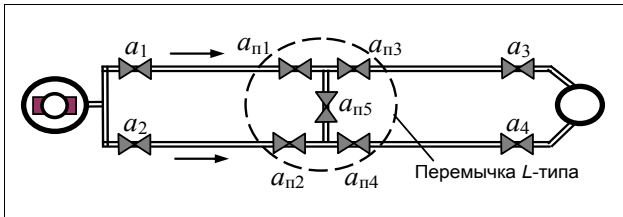


Рис. 4.13 – Схема системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа

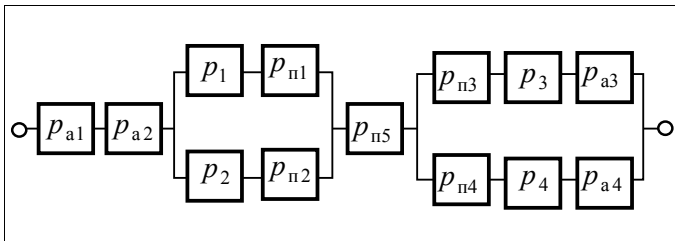


Рис. 4.14 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа.

В табл. 4.14 приведены значения функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой R-типа (2-я колонка) и S-типа (3-я колонка) в зависимости от технической надёжности задвижки p_a при технической надёжности каждого из двух параллельных трубопроводов $p = 0,9$.

Таблица 4.14

Техническая надёжность задвижки p_a	Функциональная надёжность системы	
	R -типа	S -типа
0,9	0,5617	0,7320
0,95	0,7263	0,8320
0,99	0,9358	0,9623

Сравнительный анализ практической полезности перемычки по критерию функциональной надёжности системы при неабсолютной технической надёжности задвижек ($p_a < 1$) убедительно свидетельствует в пользу перемычки S -типа.

Послесловие

Настоящая монография является результатом научно-исследовательской работы, проводимой авторами в соответствии с задачами «Целевой комплексной программы развития транспортного комплекса Украины «Транспорт» (1992–2010 г.г.) и «Общегосударственной программы реформирования и развития жилищно-коммунального хозяйства на 2004–2010 г.г.», утверждённой Законом Украины от 24.06.2004 года, №1869–IV.

Информационной базой, послужившей отправной точкой в исследованиях и предпосылкой для получения новых научных результатов, явились работы Рудя И.А. [37–40], Гавриленко И.А. [7–10, 45–47], Самойленко Н.И. [43–48, 53].

Основными научными результатами настоящей монографии являются:

- развитие метода АРЗ для расчёта функциональной надёжности распределительных трубопроводных транспортных сетей и его обобщение на магистральные трубопроводные транспортные сети;
- построение математических моделей функциональной надёжности магистральной трубопроводной системы из двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой (для каждого типа перемычки построена своя математическая модель).

Практическое значение научных результатов вытекает из целей исследований, которые довольно подробно изложены в подразделе 1.6 (стр. 30–32). Уместно только добавить, что развитие метода АРЗ обеспечило возможность проводить анализ магистральных трубопроводных транспортных систем на целесообразность использования того или иного типа перемычки с учётом способности последних *сохранять непрерывность поставки целевого продукта потребителю при проведении ремонтно-профилактических или аварийных работ.*

Настоящая монография, как и работы Рудя И.А., Сенчук Т.С. и Гавриленко И.А., представляет собой отдельные фрагменты общей теории функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем, разрабатываемой на кафедре прикладной мате-

Послесловие

матики и информационных технологий Харьковской национальной академии городского хозяйства. Данные фрагменты ориентированы на определение двух наиболее важных системных показателей функциональной надёжности: вероятности непрерывной поставки ЦП конкретному пользователю в течение определённого периода времени и ремонтнопригодности системы.

Безусловно, проведенные исследования не исчерпывают всего комплекса задач, решение которых необходимо для окончательного формирования общей теории функциональной надёжности ТТС. К нерешённым или частично решённым задачам следует отнести:

- разработку универсального алгоритма расчёта функциональной надёжности сети с учётом возможных мостовых соединений в графе аварийно-ремонтных зон;
- обобщение метода АРЗ на расчёт функциональной надёжности трубопроводной системы с двумя и более источниками ЦП;
- определение предельно допустимых параметров трубопроводных систем при заданных ресурсах или условиях, и в том числе – оптимального количества перемычек в магистральных системах;
- доказательство адекватности математических моделей функциональной надёжности и постановка вычислительных экспериментов для её проверки;
- цифровое моделирование методов расчёта
- и др..

Как видим, разработка общей теории функциональной надёжности предоставляет обширное поле деятельности для ученых-аналитиков и производственников. Только аналитический «урожай» с этого поля позволит автоматизировать процессы проектирования, эксплуатации и развития ТТС с учётом их функциональной надёжности.

Общая теория функциональной надёжности ждёт своих исследователей, и прежде всего – молодых!

Проф., д-р техн. наук Самойленко Н.И.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

арматура трубопроводная – вспомогательные устройства трубопроводов, которые делятся в зависимости от назначения на запорную (краны, задвижки), предохранительную (клапаны), регулирующую (вентили, регуляторы давления), отводную (воздухоотводчики, конденсатоотводчики), аварийную (сигнальные гудки) и др. [4, т.2, с.209]

безотказность – свойство системы непрерывно сохранять *работоспособность* [4, т.3, с.854]

большая система – управляемая система, рассматриваемая как совокупность взаимосвязанных управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования [4, т.3, с.531]

вероятность – возможность осуществления чего-либо [29, с.65]

вероятность *мат.* – числовая характеристика степени возможности появления какого-либо определенного события в тех или иных определенных, могущих повторяться неограниченное число раз условиях [29, т.3, с.854]

вероятность безотказной работы $R(t)$ – важнейший количественный показатель *надежности*, равный *вероятности* того, что за время t система не достигнет состояния отказа [29, т.3, с.854]

водовод – водопроводящее сооружение для пропуска (подачи) воды самотёком или под напором к месту её потребления; один из основных элементов системы водоснабжения [4, т.5, с.184]

водопроводная сеть – совокупность водопроводных линий (трубопроводов) для подачи воды к местам потребления [4, т.5, с.192]

восстанавливаемость – свойство системы или элемента возвращать утраченные технические характеристики, определяется периодом восстановления или функцией распределения времени восстановления [34, с.145]

газовая сеть – система трубопроводов (газопроводов), служащая для транспортировки горючих газов и распределения их между потребителями; основной элемент системы газоснабжения населённого пункта [4, т.6, с.13]

гамма-процентный ресурс – время, в течение которого труба достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ [34, с.144]

гидравлический транспорт – способ перемещения твёрдых материалов потоком воды [4, т.6, с.468]

долговечность – свойство технической системы непрерывно сохранять *работоспособность* с необходимыми перерывами для ремонтов и технического обслуживания при условии экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации [29, т.3, с.854]

Кирхгофа первое правило – алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, если считать подходящие к узлу токи положительными и отходящие – отрицательными [23, с.201]

Кирхгофа второе правило – алгебраическая сумма произведений токов на сопротивления (включая и внутреннее) равна алгебраической сумме электродвижущих сил, действующих в замкнутом контуре. При этом и токи, и электродвижущие силы, совпадающие с произвольно выбранным направлением обхода контура, считаются положительными, а направленные навстречу обходу – отрицательными [23, с.201]

магистраль (от лат. *magistralis* – руководящий) – главное направление, основная линия в путях сообщения; широкая улица большого города с интенсивным движением; главный кабель, провод в электрических сетях, в телеграфной и телефонной связи; главная труба в канализационной и или водопроводной сети [4, т.15, с.151]

магистральный канал – главный распределительный канал в оросительной сети или основной проводящий канал в осушительной сети [4, т.15, с.151]

магистральный нефтепровод – нефтепровод, предназначенный для транспортировки нефти на значительные расстояния, нередко до 2000 км и более [4, т.17, с.531]

магистральный продуктопровод – магистральный трубопровод, предназначенный для перемещения готовых нефтепродуктов с заводов в районы потребления [4, т.26, с.261]

магистральный трубопроводный транспорт – вид *трубопроводного транспорта*, осуществляющий транспорт продукта от места добычи к местам переработки и потребления [4, т.26, с.261]

надежность – понятие, включающее в себя *безотказность*, *долговечность*, приспособленность к ремонту [29, т.3, с.854]

надежность изделия – свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации может включать *безотказность*, *долговечность*, *ремонтпригодность* и *сохраняемость* в отдельности или определенное сочетание этих свойств как изделия в целом, так и его частей [4, т.17, с.205]

надежность кибернетической системы – способность систем сохранять свои наиболее существенные свойства (безотказность, ремонтпригодность и др.) на заданном уровне в течение фиксированного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации [47, т.2, с.60]

назначенный ресурс – время работы трубы, после которого её эксплуатация должна быть прекращена независимо от её состояния и поставлена на *санацию* [34, с.144]

нефтепровод – комплекс сооружений для транспортировки нефти и продуктов её переработки от места их добычи или про-

изводства к пунктам потребления или перевалки на железнодорожный или водный транспорт [4, т.17, с.531]

нефтепродуктопровод – комплекс сооружений для транспортировки продуктов переработки нефти от места их добычи или производства к пунктам потребления или перевалки на железнодорожный или водный транспорт [4, т.17, с.531]

одоризация – придание газу характерного запаха [4, т.26, с.316]

отказ – постепенная или внезапная потеря устройством работоспособности [29, т.3, с.854]

оптимальное резервирование – одна из экстремальных задач в теории надежности [29, т.3, с.856]

пневматический транспорт – вид *трубопроводного промышленного транспорта*, представляющий собой совокупность установок и систем для перемещения сыпучих и штучных грузов с помощью воздуха или газа [4, т.20, с.61]

пнеumoкапсульный транспорт – вид *пневматического транспорта*, предназначенный для перемещения штучных грузов в контейнерах (капсулах) на значительные расстояния под действием перепада давления воздуха в трубопроводе [4, т.20, с.62]

подводящий нефтепровод – *нефтепровод*, предназначенный для транспортировки нефти с промыслов на основные сооружения *магистрального нефтепровода* или нефтепродуктопроводов с нефтеперерабатывающих заводов на головные сооружения магистральных *нефтепродуктопроводов* [4, т.17, с.531]

промышленный трубопроводный транспорт – вид *трубопроводного транспорта*, осуществляющий транспортировку грузов, поддающихся передаче по трубам, в пределах производственного предприятия для продолжения технологического процесса [4, т.26, с.261]

работоспособность – состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, предъявляемым к его основным параметрам [4, т.17, с.205]

работоспособность – способность много и производительно работать [33, с.553]

резервирование – метод повышения *надежности* путем введения избыточности того или иного рода [29, т.3, с.855]

ремонтпригодность – свойство сети или её элементов, характеризующее их приспособленность к восстановлению и сохранению заданной технической характеристики [34, с.145]

ремонтприспособленность – свойство системы, определяющее удобство её технического обслуживания и проведение ремонтных работ [29, т.3, с.854]

ремонтприспособленность трубопроводной сети – качественный показатель (да, нет), определяющий свойство трубопроводной сети или её конструктивных элементов проводить ремонтно-профилактические работы без прерывания поставки целевого продукта всем потребителям сети (*авторское определение*)

санация (лат. sanatio – лечение, оздоровление) – система мероприятий по восстановлению физически изношенных технических объектов, в т.ч. трубопроводов [33, с.621]

сеть – система путей, линий, расположенных на каком-нибудь пространстве [33, с.621]

сложная техническая система – техническая система, состоящая из конструктивно независимых узлов, обладающая способностью перестраивать свою структуру для сохранения работоспособности при отказе отдельных частей и имеющая два и более работоспособных состояния [4, т.17, с.206]

сохраняемость – свойство изделия, устройства, сооружения непрерывно сохранять (в заданных пределах) значения установленных для них показателей качества во время и после хранения и транспортировки [4, т.24, с.216]

средний ресурс – математическое ожидание ресурса, т.е. средняя длительность работы трубы до определённого состояния или между капитальным и средним ремонтами [34, с.144]

степень резервирования поставки ЦП – количество непересекающихся маршрутов поставки ЦП от источника (источников) конкретному потребителю (*авторское определение*)

степень ремонтоприспособленности – относительный показатель ремонтприспособленности системы, определяемый как отношение числа ремонтприспособленных элементов сети к общему числу элементов (*авторское определение*)

структура – взаимное расположение частей, составляющих одно целое [33, с.673]

суммарная вероятность работоспособности системы – один из возможных показателей надежности *сложной технической системы*, равный сумме вероятностей всех работоспособных состояний системы [4, т.17, с.206]

тепловая сеть – система *трубопроводов* (теплопроводов) для транспортирования и распределения теплоносителя (горячей воды или пара) при централизованном теплоснабжении. Различают магистральные и распределительные сети [4, т.25, с.443]

транспорт – область материально производства, связанная с перемещением людей и грузов [4, т.26, с.154]

транспортные сети – трубопроводный транспорт в рамках нефтебазовых, внутрипромысловых (нефте-, газо- и продуктопроводов) и городских коммунальных сетей, область материального производства, связанная с перемещением людей и грузов [4, т.26, с.154]

топография – поверхность какой-либо местности; взаимное расположение её пунктов, частей [45, с.500]

трубопровод – сооружение для транспортировки газообразных и жидких веществ, твердого топлива, строительных материалов, зерна и др. под воздействием разности давлений (напоров) в различных сечениях [4, т.26, с.260]

трубопроводный транспорт – вид транспорта, осуществляющий передачу на расстояние жидких, газообразных и твердых продуктов по *трубопроводам* [4, т.27, с.260–261]

функциональная надёжность системы – вероятность выполнения функциональной задачи системы в течение определённого периода времени T

функциональная надёжность трубопроводной транспортной системы – вероятность бесперебойной поставки целевого продукта потребителю в течение определённого периода времени

функция интенсивности отказа $\lambda(t)$ – условная плотность распределения *отказа* при условии, что техническая система проработала безотказно время t . Если существует плотность рас-

пределения $f(t) = F'(t)$, то $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$ [29, т.3, с.854–855]

функция распределения наступления отказа $F(t)$ до момента t – разность между 1 и *вероятностью безотказной работы*, т.е. $1-R(t)$ [29, т.3, с.854]

целевой продукт – продукт, транспортируемый потребителю по *трубопроводу*. В качестве целевого продукта могут выступать природный газ, вода, нефть, сжатый воздух, тепло и т.п.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Пределы относительного повышения функциональной надёжности системы за счёт резервирования

А.1. Верхний предел

При многократном резервировании с низкой технической надёжностью трубопровода ($p \approx 0$) предельное повышение функциональной надёжности системы составит

$$\begin{aligned}\lim_{p \rightarrow 0} \frac{P_n^f}{p} &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = \\ &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1 - [1 - C_n^1 p + C_n^2 p^2 - \dots + (-1)^k C_n^k p^k + \dots + (-1)^n C_n^n p^n]}{p} = \\ &= \lim_{p \rightarrow 0} [C_n^1 + C_n^2 p - \dots + (-1)^k C_n^k p^{k-1} + \dots + (-1)^n p^{n-1}] = C_n^1 = n.\end{aligned}$$

А.2. Нижний предел

При многократном резервировании с высокой технической надёжностью трубопровода ($p \approx 1$) предельное повышение функциональной надёжности системы составит

$$\lim_{p \rightarrow 1} \frac{P_n^f}{p} = \lim_{p \rightarrow 1} \frac{1 - (1 - p)^n}{p} = \frac{1 - (1 - 1)^n}{1} = 1.$$

Таким образом, при высокой надёжности трубопровода без резервирования ($p \approx 1$) эффект повышения функциональной надёжности системы за счёт резервирования полностью отсутствует.

Приложение В. Максимальное абсолютное повышение функциональной надёжности системы за счёт резервирования

Максимальное абсолютное повышения функциональной надёжности системы за счёт резервирования находится с помощью решение задачи математического программирования, в которой целевой функцией выступает разность

$$P_n^f - p,$$

где P_n^f – функция функциональной надёжности системы при $(n-1)$ -кратном резервировании магистрального трубопровода; p – переменная, определяющая техническую надёжность трубопровода, т.е. надёжность системы до резервирования; n – константа, равная количеству параллельных трубопроводов в системе с резервированием.

На переменную p , поскольку она является вероятностью отказа трубопровода за определённый период времени (календарный год, период проведения профилактических работ, период наработки на отказ и пр.), накладывается двустороннее ограничение

$$0 \leq p \leq 1.$$

Таким образом, данная задача математического программирования является задачей одномерной оптимизации при двусторонней ограниченности переменной, математическая модель которой имеет вид

$$P_n^f - p \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \quad (\text{B.1})$$

В общем случае задача (B.1) решается только прямыми методами. Поскольку искомое решение, как будет показано ниже, находится внутри области допустимых решений, т.е. внутри отрезка $[0, 1]$, то оно может быть найдено с помощью метода Эйлера для решения задач безусловной оптимизации.

Приложение

При определении функции P_n^f в нижеприведенных моделях оптимизационных задач предполагается, что каждый резервный трубопровод имеет техническую надёжность, равную p , т.е. абсолютно идентичен резервируемому трубопроводу как по исполнению, так по условиям и временным периодам эксплуатации.

Число трубопроводов n на единицу больше кратности резервирования.

В.1. Простое резервирование

При однократном резервировании математическая модель оптимизационной задачи поиска максимального абсолютного увеличения функциональной надёжности имеет вид

$$(P_2^f - p) = [1 - (1 - p)^2] - p = p - p^2 \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \quad (\text{В.2})$$

Единственную стационарную точку $p_0 = 0,5$ находим из равенства

$$\frac{d(p - p^2)}{dp} = 1 - 2p = 0.$$

Найденная стационарная точка целевой функции лежит внутри области допустимых решений.

Отрицательность второй производной целевой функции

$$\frac{d^2(p - p^2)}{dp^2} = -2 < 0$$

свидетельствует о наличии максимума в стационарной точке.

Таким образом, имеем решение задачи (В.2), не прибегая к прямым методам решения:

$$p_2^* = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} (P_2^f - p) \right] = 0,5.$$

При этом максимальное абсолютное увеличение функциональной надёжности системы составит

$$(P_2^f - p)^* = 0,25.$$

В.2. Двойное резервирование

При двукратном резервировании математическая модель оптимизационной задачи поиска максимального абсолютного увеличения функциональной надёжности имеет вид

$$(P_3^f - p) = [1 - (1 - p)^3] - p = p^3 - 3p^2 + 2p \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \quad (\text{В.3})$$

Необходимое условие для определения стационарных точек

$$\frac{d(p^3 - 3p^2 + 2p)}{dp} = 3p^2 - 6p + 2 = 0.$$

Целевая функция имеет две стационарные точки $p_{01} \approx 0,4227$ и $p_{02} \approx 1,5774$.

Единственная допустимая стационарная точка $p_{01} = 0,4227$ является точкой максимума, поскольку

$$\left. \frac{d^2(p^3 - 3p^2 + 2p)}{dp^2} \right|_{p_{01} \approx 0,4227} = -6 + 6p < 0.$$

Таким образом, имеем решение задачи (В.3)

Приложение

$$p_3^* = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} (P_3^f - p) \right] \approx 0,4227.$$

Максимальное абсолютное увеличение функциональной надёжности системы составит

$$(P_3^f - p)^* \approx 0,385.$$

В.3. Тройное резервирование

При трёхкратном резервировании математическая модель оптимизационной задачи поиска максимального абсолютного увеличения функциональной надёжности принимает вид

$$\begin{aligned} (P_4^f - p) &= [1 - (1 - p)^4] - p = \\ &= -p^4 + 4p^3 - 6p^2 + 3p \rightarrow \max_{0 \leq p \leq 1}. \end{aligned} \quad (\text{В.4})$$

Необходимое условие для определения стационарных точек:

$$\frac{d(3p - 6p^2 + 4p^3 - p^4)}{dp} = -4p^3 + 12p^2 - 12p + 3 = 0.$$

Полученное уравнение

$$-4p^3 + 12p^2 - 12p + 3 = 0$$

разделим на 4 и введём новую переменную $x = p - 1$. Новое уравнение

$$x^3 + 0,25 = 0$$

имеет три одинаковых действительных корня мнимых. $x_{01} = x_{02} = x_{03} \approx -0,63$. Возвращаясь к исходной переменной,

имеем $p_{01} = p_{02} = p_{03} = x + 1 = 0,37$. Следовательно, целевая функция (В.4) имеет единственную допустимую стационарную точку $p_0 = 0,37$. При этом в стационарной точке целевая функция достигает своего максимума, поскольку

$$\left. \frac{d^2(3p - 6p^2 + 4p^3 - p^4)}{dp^2} \right|_{p_{01}=0,37} = -12 + 24p - 12p^2 \\ = -12(1 - p)^2 < 0.$$

Таким образом, решением задачи (В.4) является величина

$$p_4^* = \arg \left[\max_{0 \leq p \leq 1} (P_4^f - p) \right] = 0,37.$$

Максимальное абсолютное увеличение функциональной надежности системы составит

$$(P_4^f - p)^* \approx 0,4725.$$

С. Построение математических моделей функциональной надёжности системы с одной перемычкой методом АРЗ

Построение математических моделей для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с одной перемычкой типа *A*, *C*, *D*, *G*, *H*, *I*, *J*, *K*, *R* или *S* производится методом АРЗ, изложенному в [44]. Разбиение системы на аварийно-ремонтные зоны (АРЗ) осуществляется по алгоритму, изложенному в [53].

С.1. Перемычка А-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой А-типа (без задвижек) приведен на рис. С.1.

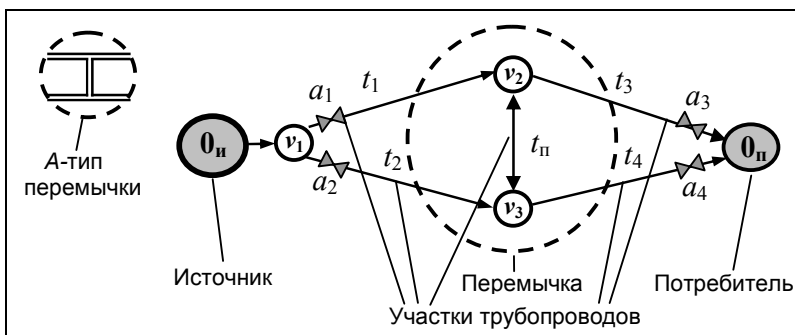


Рис. С.1 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой А-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.1) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке $t_п$ отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.1.

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{13}(t_2), e_{20п}(t_3), e_{30п}(t_4), e_{23}(t_n)$	a_1, a_2, a_3, a_4	v_2, v_3
2	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.2.

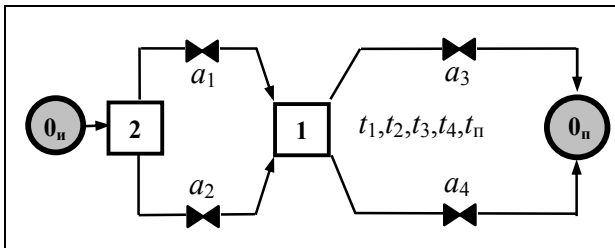


Рис. С.2 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой А-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,2}$; p_{ai} – техническая надёжность i -й задвижки, $i = \overline{1,4}$. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.3.

Последовательный тип расчётной модели объясняется тем, что транспорт ЦП будет осуществляться только при условии одновременной работоспособности всех элементов транспортной сети.

Приложение

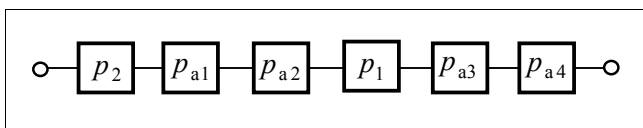


Рис. С.3 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых переключкой А-типа

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.3), соответствует выражению

$$P_{2+п0}^f = p_2 p_{a1} p_{a2} p_1 p_{a3} p_{a4}. \quad (\text{С.1})$$

Технической ненадёжностью АРЗ №2 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1) можно пренебречь, т.е. $p_2 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$. С учётом сделанных замечаний выражение (С.1) примет вид

$$P_{2+п0}^f = p_a^4 p_1. \quad (\text{С.2})$$

Если считать, что техническая надёжность задвижки p_a значительно превосходит надёжность протяженных трубопроводов АРЗ №1, т.е. положить $p_a = 1$, то выражение (С.2) трансформируется в простую формулу

$$P_{2+п0}^f = p_1. \quad (\text{С.3})$$

Для сравнительного анализа функциональной надёжности $P_{2+п0}^f$ системы двух трубопроводов, соединённых переключкой А-типа (рис. С.1), и функциональной надёжности P_2^f той же сис-

темы без перемычки (рис. 3.3) или соединённых перемычкой другого типа, необходимо выразить p_1 через техническую надёжность p (вероятность безотказной работы каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3).

Суммарная длина трубопроводных участков АРЗ №1 в 2 раза больше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1 будет в 2 раза больше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = 2(1 - p). \quad (\text{C.4})$$

Отсюда

$$p_1 = 2p - 1. \quad (\text{C.5})$$

Подставляя (C.5) в (C.2), имеем

$$P_{2+\Pi 0}^f = p_a^4(2p - 1). \quad (\text{C.6})$$

Выражение (C.6) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой А-типа (рис. С.1). При абсолютной надёжности задвижек математическая модель упрощается:

$$P_{2+\Pi 0}^f = 2p - 1. \quad (\text{C.7})$$

Здесь, как и в (C.6), p – вероятность безотказной работы каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3.

С.2. Перемычка С-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой С-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.4.

Приложение

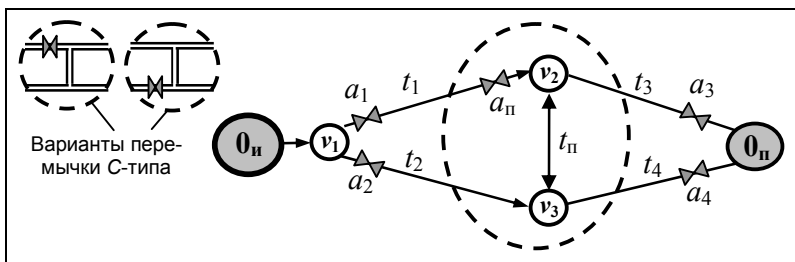


Рис. С.4— Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой С-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.4) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке t_n отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.2.

Таблица С.2

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	a_1, a_n	—
2	$e_{13}(t_2), e_{20n}(t_3), e_{30n}(t_4), e_{23}(t_n)$	a_2, a_3, a_4, a_n	v_2, v_3
3	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.5.

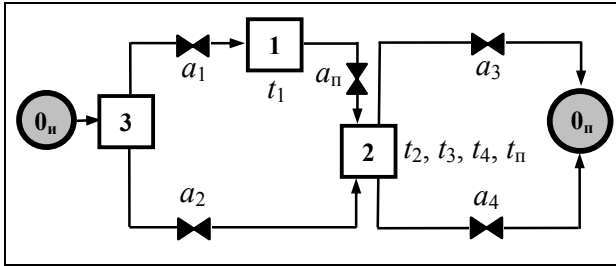


Рис. С.5 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой С-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,3}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; p_n – техническая надёжность задвижки, принадлежащей перемычке. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.6.

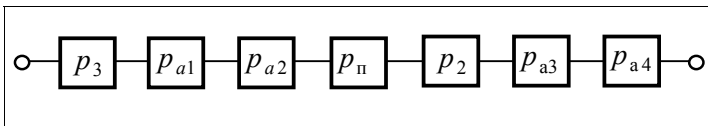


Рис. С.6 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой С-типа

Поставка ЦП потребителю в системе с перемычкой С-типа возможна только при условии работоспособности всех элементов системы, кроме трубопроводов АРЗ №1. Надёжность зоны №1 на функциональную надёжность системы не влияет.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.6), соответствует выражению

$$P_{2+n,C}^f = p_3 p_{a1} p_{a2} p_n p_2 p_{a3} p_{a4}. \quad (C.8)$$

Приложение

Технической ненадёжностью АРЗ №3 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №2) можно пренебречь, т.е. $p_3 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{\pi} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$. С учётом сделанных замечаний (С.8) примет вид

$$P_{2+\pi 1,C}^f = p_a^5 p_2. \quad (\text{С.9})$$

Суммарная длина трубопроводных участков АРЗ №2 в полтора раза больше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №2 будет в 1,5 раза больше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_2) = \frac{3}{2}(1 - p). \quad (\text{С.10})$$

Отсюда

$$p_2 = \frac{1}{2}(3p - 1). \quad (\text{С.11})$$

Подставляя (С.11) в (С.9), имеем

$$P_{2+\pi 1,C}^f = \frac{1}{2} p_a^4 (3p - 1). \quad (\text{С.12})$$

Выражение (С.12) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой С-типа. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+\pi 1,C}^f = \frac{1}{2}(3p - 1). \quad (\text{С.13})$$

С.3. Перемычка D-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой D-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.7.

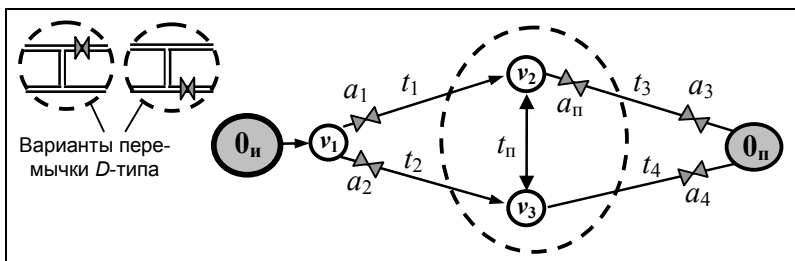


Рис.С.7– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой D-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.7) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке t_n отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.3.

Таблица С.3

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4), e_{23}(t_n)$	a_1, a_2, a_n, a_4	v_2, v_3
2	$e_{20п}(t_3),$	$, a_n, a_3$	—
3	—	a_1, a_2	v_1

Приложение

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.8.

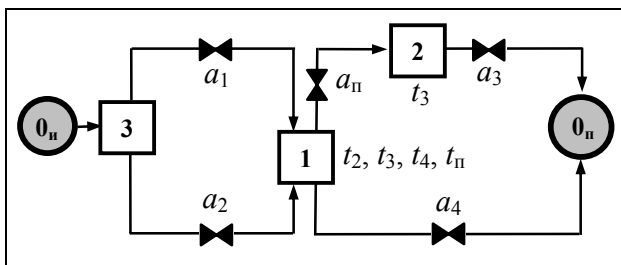


Рис. С.8 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой D -типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,3}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; p_{π} – техническая надёжность задвижки, принадлежащей перемычке. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.9.

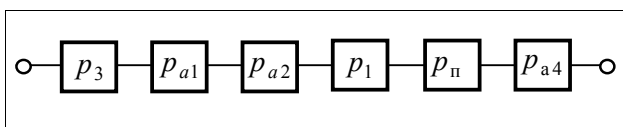


Рис. С.9 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой D -типа

Поставка ЦП потребителю в системе с перемычкой D -типа возможна только при условии работоспособности всех элементов системы, кроме трубопроводов АРЗ №2 и задвижки a_3 . Техниче-

ская надёжность зоны №2 и задвижки a_3 . на функциональную надёжность системы не влияет.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.9), соответствует выражению

$$P_{2+\Pi 1,D}^f = p_3 p_{a1} p_{a2} p_1 p_n p_{a4}. \quad (\text{С.14})$$

Технической ненадёжностью АРЗ №3 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1) можно пренебречь, т.е. $p_3 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{\Pi} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$. С учётом сделанных замечаний (С.14) примет вид

$$P_{2+\Pi 1,D}^f = p_a^4 p_1. \quad (\text{С.15})$$

Суммарная длина трубопроводных участков АРЗ №1 в полтора раза больше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1 будет в 1,5 раза больше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = \frac{3}{2}(1 - p). \quad (\text{С.16})$$

Отсюда

$$p_1 = \frac{1}{2}(3p - 1). \quad (\text{С.17})$$

Подставляя (С.17) в (С.15), имеем

$$P_{2+\Pi 1,D}^f = \frac{1}{2} p_a^4 (3p - 1). \quad (\text{С.18})$$

Приложение

Выражение (С.18) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой *D*-типа. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+\pi 1, D}^f = \frac{1}{2}(3p - 1). \quad (\text{С.19})$$

С.4. Перемычка *G*-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой *E*-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.10.

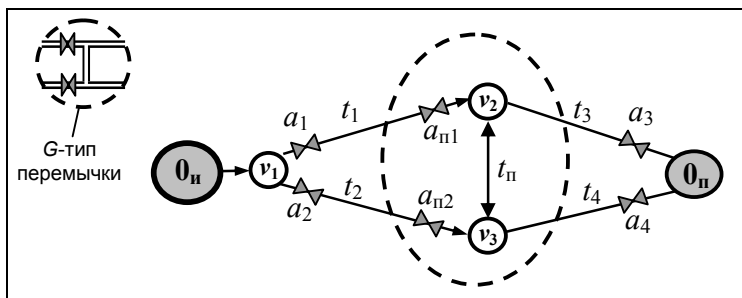


Рис.С.10– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой *G*-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.10) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке t_π отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.4.

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п}(t_3),$ $e_{30п}(t_4), e_{23}(t_n)$	$a_{п1}, a_{п2}, a_3, a_4$	v_2, v_3
4	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.11.

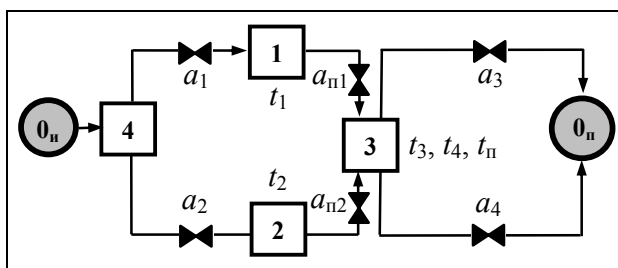


Рис. С.11 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой G-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,4}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,2}$. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.12.

Приложение

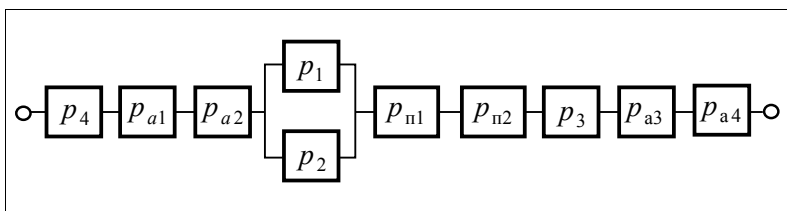


Рис. С.12 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой G-типа

Поставка ЦП потребителю в системе с перемычкой G-типа возможна, если хотя бы одна из зан №1 и №2 находится в исправном состоянии. Поэтому в расчётной схеме на рис. С.21 им соответствует параллельная модель надёжности. Если только обе зоны окажутся неработоспособными или откажет любой другой элемент сети, то в этом случае транспорт ЦП потребителю будет прекращён. Надёжность поставки ЦП через эти элементы соответствует последовательной модели на рис. С.12.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.12), соответствует выражению

$$P_{2+п2,G}^f = p_4 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p_{п1} p_{п2} p_3 p_{a3} p_{a4}. \quad (C.20)$$

Технической ненадёжностью АРЗ №4 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2 или №3) можно пренебречь, т.е. $p_4 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{пk} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,2}$. С учётом сделанных замечаний выражение (C.20) примет вид

$$P_{2+п2,G}^f = p_a^6 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p_3. \quad (C.21)$$

Суммарная длины трубопроводных участков АРЗ №3 равна длине каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на

рис. 3.3, т.е. $p_3 = p$. Суммарные длины трубопроводных участков АРЗ №1 и №2 равны между собой и в 2 раза короче длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1 или №2 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (\text{C.22})$$

Подставляя в выражение (C.21) вместо p_3 и скобок $(1 - p_1)$, $(1 - p_2)$ их выражения через p , получим

$$P_{2+п2,G}^f = p_a^6 \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right] p. \quad (\text{C.23})$$

Выражение (C.23) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой G-типа. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+п2,G}^f = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right] p. \quad (\text{C.24})$$

С.5. Перемычка H-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой H-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.13.

Приложение

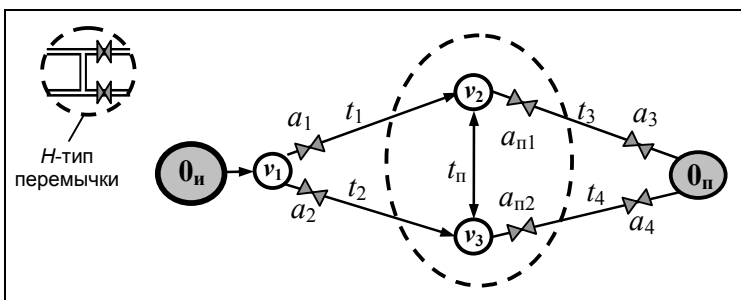


Рис.С.13 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой H-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.13) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке t_n отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.5.

Таблица С.5

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{20п}(t_3), e_{23}(t_n)$	$a_1, a_2, a_{п1}, a_{п2}$	v_2, v_3
2	$e_{13}(t_2)$	$a_{п1} \cdot a_3$	—
3	$e_{30п}(t_4)$	$a_{п2} \cdot a_4$	—
4	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.14.

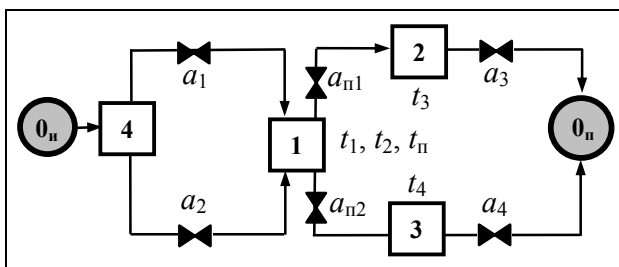


Рис. С.14 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой H -типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,4}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пк}$ – техническая надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,2}$. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.15.

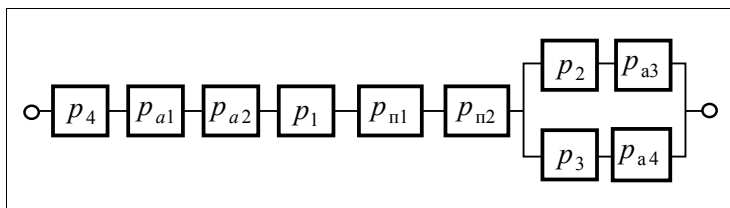


Рис. С.15 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой H -типа

Поставка ЦП потребителю в системе с перемычкой H -типа возможна, если хотя бы одна из зон №2 и №3 находится в исправном состоянии. Поэтому в расчетной схеме на рис. С.15 им соответствует параллельная модель надёжности. Если только обе зоны окажутся неработоспособными или откажет любой другой элемент сети, то в этом случае транспорт ЦП потребителю будет

Приложение

прекращён. Надёжность поставки ЦП через эти элементы соответствует последовательной модели на рис. С.15.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.24), соответствует выражению

$$P_{2+\Pi 2, H}^f = p_4 p_{a1} p_{a2} p_1 p_{\Pi 1} p_{\Pi 2} [1 - (1 - p_2 p_{a3})(1 - p_3 p_{a4})]. \quad (\text{С.25})$$

Технической ненадёжностью АРЗ №4 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2 или №3) можно пренебречь, т.е. $p_4 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{\Pi k} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,2}$. С учётом сделанных замечаний выражение (С.25) примет вид

$$P_{2+\Pi 2, H}^f = p_a^4 p_1 [1 - (1 - p_2 p_a)(1 - p_3 p_a)]. \quad (\text{С.26})$$

Суммарная длины трубопроводных участков АРЗ №1 равна длине каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3, т.е. $p_1 = p$. Суммарные длины трубопроводных участков АРЗ №3 и №4 равны между собой и в 2 раза короче длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №2 или №3 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_2) = (1 - p_3) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (\text{С.27})$$

Отсюда

$$p_2 = p_3 = \frac{1}{2}(1 + p). \quad (\text{С.28})$$

Подставляя в выражение (С.26) вместо p_1 , p_2 и p_3 их выражения через p , получим

$$P_{2+\pi 2, H}^f = p_a p_1 \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]. \quad (\text{C.29})$$

Выражение (C.29) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой *H*-типа. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+\pi 2, H}^f = p \cdot \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]. \quad (\text{C.30})$$

С.6. Перемычка *I*-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой *I*-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.16.

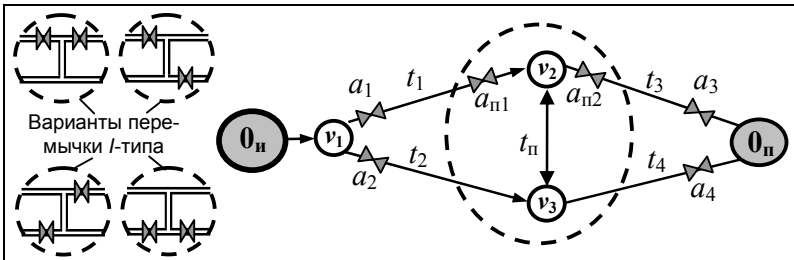


Рис. С.16– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой *I*-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.16) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответст-

Приложение

вующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке t_n отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.6.

Таблица С.6

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4), e_{23}(t_n)$	$a_2, a_{п1}, a_{п2}, a_4$	v_2, v_3
3	$e_{20п}(t_3)$	$a_{п2}, a_3$	—
4	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.17.

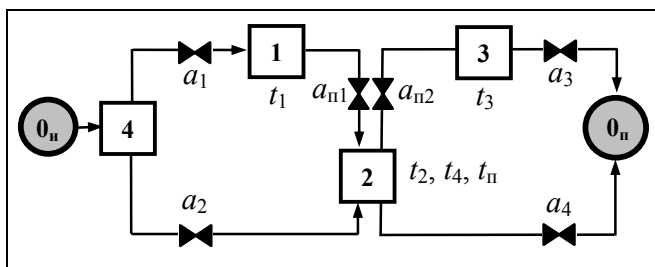


Рис. С.17 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой I-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,4}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$;

p_{nk} – технические надёжность задвижки, принадлежащей пере-
мычке, $k = \overline{1,2}$. Тогда расчётная модель функциональной надёж-
ности системы имеет вид, показанный на рис. С.18.

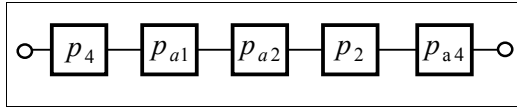


Рис. С.18 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой I -типа

Поставка ЦП потребителю в системе с перемычкой I -типа воз-
можна только при условии одновременной безотказной работы
зон №2, №4 и задвижек $a_{п1}, a_{п2}, a_4$. Поэтому расчётная схема на
рис. С.18 представляет собой последовательную модель надёж-
ности этих элементов. Надёжность же зон №1, №3 и задвижек
 $a_{п1}, a_{п2}, a_3$ на функциональную надёжность системы не влияет.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно
расчётной модели (рис. С.18), соответствует выражению

$$P_{2+п2,I}^f = p_4 p_{a1} p_{a2} p_2 p_{a4}. \quad (C.31)$$

Технической ненадёжностью АРЗ №4 из-за сравнительно не-
большой суммарной длины трубопроводных участков (по сравне-
нию с АРЗ №2) можно пренебречь, т.е. $p_4 = 1$. Если все задвижки
в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных
условиях в течение равных периодов времени, то можно считать,
что $p_{aj} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$. С учётом сделанных замечаний выраже-
ние (C.31) примет вид

$$P_{2+п2,I}^f = p_a^3 p_2. \quad (C.32)$$

Приложение

Если пренебречь длиной участка t_{Π} , то суммарная длины трубопроводных участков АРЗ №2 равна длине каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3, т.е. $p_2 = p$. Тогда

$$P_{2+\Pi 2, I}^f = p_a^3 p \quad (C.33)$$

Выражение (C.33) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой H -типа. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+\Pi 2, I}^f = p \quad (C.34)$$

С.7. Перемычка J -типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой J -типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.19.

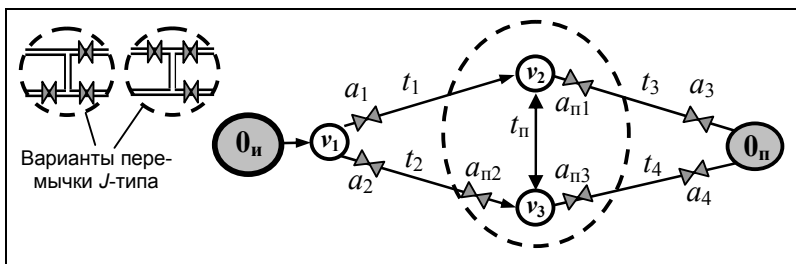


Рис. С.19 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой J -типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.19) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (заводские на участке t_n отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.7.

Таблица С.7

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{23}(t_n)$	$a_1, a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}$	v_2, v_3
2	$e_{13}(t_2)$	a_2, a_{n2}	—
3	$e_{20n}(t_3)$	a_{n1}, a_3	—
4	$e_{30n}(t_4)$	a_{n3}, a_4	—
5	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.20.

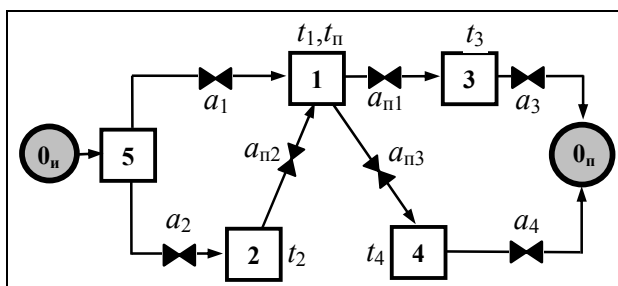


Рис. С.20 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой J-типа

Приложение

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,5}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,3}$. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.21.

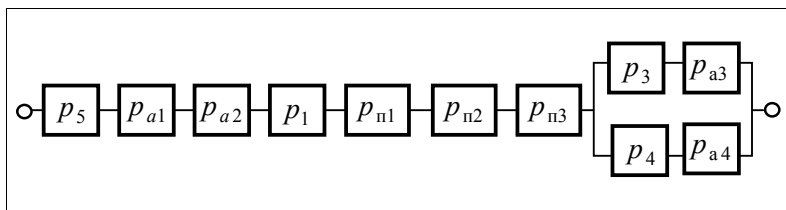


Рис. С.21 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой J-типа

В расчётной схеме отсутствует надёжность АРЗ №2. Связано это с тем, что надёжность поставки ЦП не зависит от состояния АРЗ №2. Поставка ЦП потребителю в системе с перемычкой J-типа возможна, если хотя бы одна из зон №3 и №4 находится в исправном состоянии. Поэтому в расчётной схеме на рис. С.21 им соответствует параллельная модель надёжности. Если только обе зоны одновременно окажутся неработоспособными или откажет любой другой элемент сети, то в этом случае транспорт ЦП потребителю будет прекращён.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.21), соответствует выражению

$$P_{2+п3,J}^f = p_5 p_{a1} p_{a2} p_1 p_{п1} p_{п2} p_{п3} [1 - (1 - p_3 p_{a3})(1 - p_4 p_{a4})]. \quad (\text{С.35})$$

Технической ненадёжностью АРЗ №5 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравне-

нию с АРЗ №1, №3 или №4) можно пренебречь, т.е. $p_5 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{nk} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,3}$. С учётом сделанных замечаний выражение (С.35) примет вид

$$P_{2+п3,J}^f = p_a^5 p_1 [1 - (1 - p_3 p_a)(1 - p_4 p_a)]. \quad (\text{С.36})$$

Если пренебречь длиной трубопроводного участка $t_{п}$, то суммарная длина трубопроводных участков каждой из АРЗ №1, №3 или №4 в 2 раза меньше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1, №3 или №4 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (\text{С.37})$$

Отсюда

$$p_1 = p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2}. \quad (\text{С.38})$$

Подставляя в выражение (С.36) вместо p_1 , p_3 и p_4 их выражения через p , получим

$$P_{2+п3,J}^f = p_a^5 \frac{1 + p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1 + p}{2} p_a \right)^2 \right]. \quad (\text{С.39})$$

Выражение (С.39) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, со-

Приложение

единённых перемычкой J -типа При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+п3,J}^f = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (C.40)$$

С.8. Перемычка K -типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой K -типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.32.

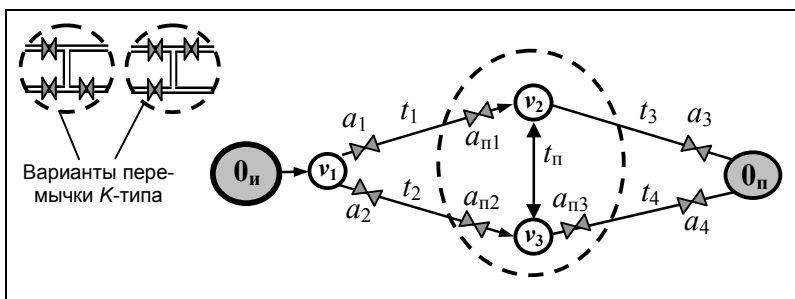


Рис.С.22 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой K -типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.22) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке t_n отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.8.

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п}(t_3), e_{23}(t_п)$	$a_{п1}, a_{п2}, a_{п3}, a_3$	v_2, v_3
4	$e_{30п}(t_4)$	$a_{п3}, a_4$	—
5	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.23.

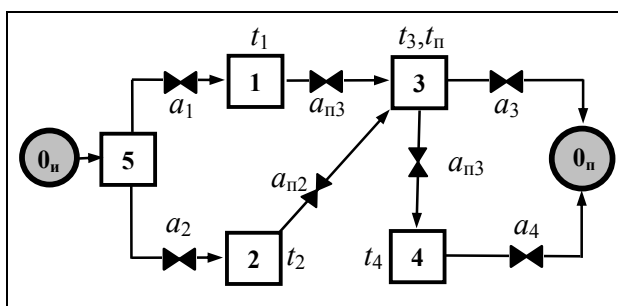


Рис. С.23 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой К-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,5}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$;

Приложение

p_{nk} – технические надёжность задвижки, принадлежащей пере-
мычке, $k = \overline{1,3}$. Тогда расчётная модель функциональной надёж-
ности системы имеет вид, показанный на рис. С.24.

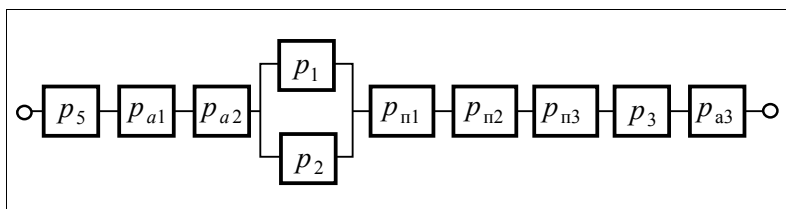


Рис. С.24 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых переключением К-типа

В расчётной схеме отсутствует надёжность АРЗ №4. Связано это с тем, что надёжность поставки ЦП не зависит от состояния АРЗ №4. Поставка ЦП потребителю в системе с переключением G-типа возможна, если хотя бы одна из зон №1 и №2 находится в исправном состоянии. Поэтому в расчётной схеме на рис. С.15 им соответствует параллельная модель надёжности. Если только обе зоны одновременно окажутся неработоспособными или откажет любой другой элемент сети, то в этом случае транспорт ЦП потребителю будет прекращён.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.24), соответствует выражению

$$P_{2+п3,K}^f = p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p_{п1} p_{п2} p_{п3} p_3 p_{a3}. \quad (C.41)$$

Технической ненадёжностью АРЗ №5 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2 или №3) можно пренебречь, т.е. $p_5 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то

можно считать, что $p_{aj} = p_{пк} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,3}$. С учётом сделанных замечаний выражение (С.41) примет вид

$$P_{2+п3,K}^f = p_a^6 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p_3. \quad (\text{С.42})$$

Если пренебречь длиной трубопроводного участка $t_{п}$, то суммарная длина трубопроводных участков каждой из АРЗ №1, №2 или №3 в 2 раза меньше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1, №2 или №3 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = \frac{1}{2}(1 - p). \quad (\text{С.43})$$

Отсюда

$$p_1 = p_2 = p_3 = \frac{(1 + p)}{2}. \quad (\text{С.44})$$

Подставляя в выражение (С.42) вместо p_1 , p_3 и p_4 их выражения через p , получим

$$P_{2+п3,K}^f = p_a^6 \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (\text{С.46})$$

Выражение (С.46) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой K -типа. При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+п3,K}^f = \frac{1+p}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (\text{С.47})$$

С.9. Перемычка R-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой R-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. С.25.

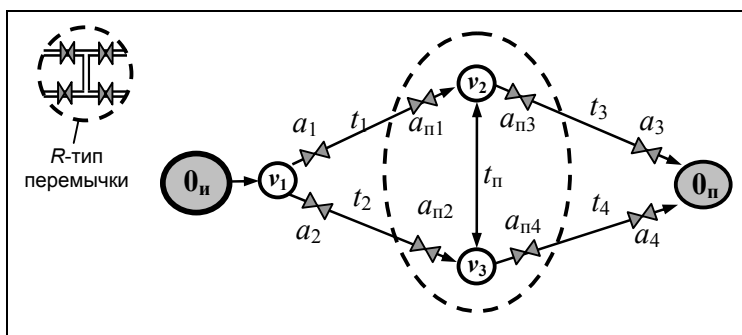


Рис.С.25– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой R-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.25) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , соответствующей перемычке, установить значение весовой функции z_{23} равным 0 (задвижки на участке $t_п$ отсутствуют). Результаты разбиения отражены в табл. С.9.

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{23}(t_n)$	$a_1, a_{п1}$	
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п}(t_3),$	$a_{п3}, a_{a3}$	—
4	$e_{30п}(t_4),$	$a_{п4}, a_{a4}$	—
5	$e_{23}(t_n)$	$a_{п1}, a_{п2}, a_{п3}, a_{п4}$	v_2, v_3
6	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.36.

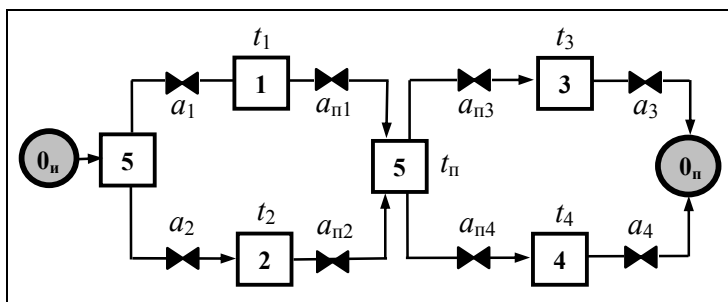


Рис. С.26 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой R-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,6}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей пере-

Приложение

мычке, $k = \overline{1,4}$. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.27.

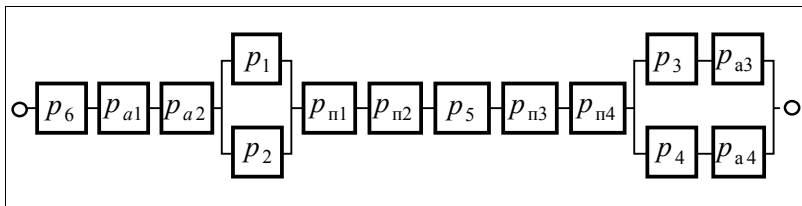


Рис. С.27 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых переключкой R-типа

Поставка ЦП потребителю в системе с переключкой R-типа не прекращается если работоспособна одна из зон №1, №2. Поэтому на расчётной схеме им соответствует параллельная модель надёжности. Аналогично, поставка ЦП не прекращается если работоспособен участок, состоящий из зоны №3 и задвижки a_3 , или участок, состоящий из зоны №4 и задвижки a_4 . Этим участкам (включая соответствующие задвижки) в расчётной схеме также соответствует параллельная модель. Выход из строя одной из АРЗ №4 или №5 или выход из строя одной из задвижек $a_1, a_2, a_{п1}, a_{п2}, a_{п3}, a_{п4}$, или одновременный выход зон №1 и №2, или зон №3 и №4 (включая соответствующие задвижки) приводит к прекращению поставки ЦП потребителю. Поэтому в схеме на рис. С.27 этим элементам соответствует последовательная модель надёжности.

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.27), соответствует выражению

$$P_{2+п4,R}^f = p_6 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p_{п1} p_{п2} p_5 \times \\ \times p_{п3} p_{п4} [1 - (1 - p_3 p_{a3})(1 - p_4 p_{a4})]. \quad (\text{С.48})$$

Технической ненадёжностью АРЗ №5, как и АРЗ №6, из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2, №3 или №4) можно пренебречь, т.е. $p_5 = p_6 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{pk} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,4}$. С учётом сделанных замечаний выражение (С.48) примет вид

$$P_{2+п4,R}^f = p_a^6 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] [1 - (1 - p_3 p_a)(1 - p_4 p_a)] . \quad (\text{С.49})$$

Суммарная длина трубопроводных участков каждой из АРЗ №1, №2, №3 и №4 в 2 раза меньше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1, №2, №3 или №4 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p) . \quad (\text{С.50})$$

Отсюда

$$p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2} . \quad (\text{С.51})$$

Подставляя в выражение (С.49) вместо $(1 - p_1)$, $(1 - p_2)$ правую часть выражения (С.50), а вместо p_3 и p_4 правую часть выражения (С.51), получим

$$P_{2+п4,R}^f = p_a^6 \left[1 - \left(\frac{1 - p}{2} \right)^2 \right] \left[1 - \left(1 - \frac{1 + p}{2} p_a \right)^2 \right] . \quad (\text{С.52})$$

Выражение (С.52) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, со-

Приложение

единённых перемычкой R -типа При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+п4,R}^f = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (C.53)$$

С.10. Перемычка S-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой S-типа приведен на рис. С.28.

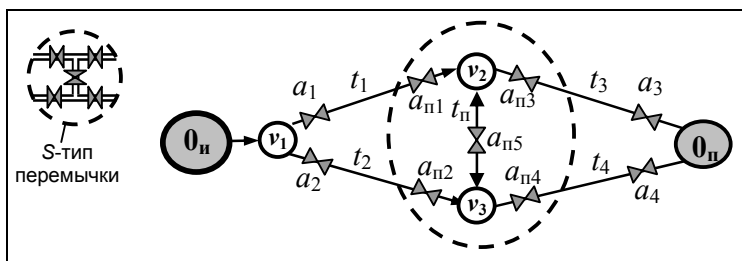


Рис. С.28 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой S-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. С.28) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок $t_п$, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{п5}$ находится в начале трубы $t_п$) или 2 (задвижка $a_{п5}$ находится в конце трубы $t_п$). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. С.10.

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п}(t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{30п}(t_4)$	$a_{п4}, a_4$	—
5	e_{23} , если $z_{23}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{п5}$	v_2
6	e_{23} , если $z_{23}=1$	$a_{п2}, a_{п4}, a_{п5}$	v_3
7	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. С.29.

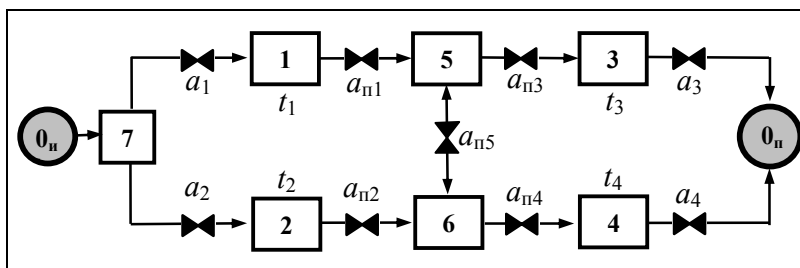


Рис. С.29 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой S-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,7}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$;

Приложение

p_{nk} – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,5}$. Тогда расчётная модель функциональной надёжности системы имеет вид, показанный на рис. С.30.

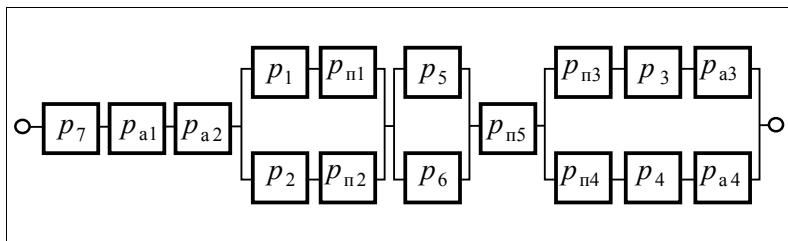


Рис. С.30 – Смешанная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа

Переход от графа АРЗ к расчётной модели функциональной надёжности системы подробно описан в п.3.3

Искомая функциональная надёжность всей системы, согласно расчётной модели (рис. С.30), соответствует выражению

$$P_{2+п5,S}^f = p_7 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{n1})(1 - p_2 p_{n2})] p_{п5} \times \\ \times [1 - (1 - p_5)(1 - p_6)][1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (С.54)$$

Технической ненадёжностью АРЗ №5, №6 и №7 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2, №3 или №4) можно пренебречь, т.е. $p_5 = p_6 = p_7 = 1$. Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать $p_{aj} = p_{nk} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,5}$. С учётом сделанных замечаний выражение (С.54) принимает вид

$$P_{2+\Pi 4,S}^f = p_a^2 [1 - (1 - p_1 p_a)(1 - p_2 p_a)] [1 - (1 - p_3 p_a^2)(1 - p_4 p_a^2)] . \quad (C.55)$$

Суммарная длина трубопроводных участков каждой из АРЗ №1, №2, №3 и №4 в 2 раза меньше длины каждого из двух параллельных трубопроводов в системе на рис. 3.3. Поэтому частота отказов (ненадёжность) в АРЗ №1, №2, №3 или №4 будет в 2 раза меньше частоты отказов трубопровода:

$$(1 - p_1) = (1 - p_2) = (1 - p_3) = (1 - p_4) = \frac{1}{2}(1 - p) . \quad (C.56)$$

Отсюда

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{(1 + p)}{2} . \quad (C.57)$$

Подставляя в выражение (C.55) вместо p_1, p_2, p_3, p_4 правую часть выражения (C.57), получим

$$P_{2+\Pi 5,S}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right] \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right] . \quad (C.58)$$

Выражение (C.58) представляет собой математическую модель функциональной надёжности системы двух трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа При абсолютной надёжности задвижек ($p_a = 1$) математическая модель упрощается:

$$P_{2+\Pi 5,S}^f = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2 . \quad (C.59)$$

Приложение D. Построение упрощенных математических моделей функциональной надёжности системы с одной перемычкой первым модифицированным методом APЗ

Построение математических моделей для расчёта функциональной надёжности производится первым модифицированным методом APЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой типа *B*, *E*, *F*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P* или *S*. Разбиение системы на аварийно-ремонтные зоны (APЗ) осуществляется по алгоритму, изложенному в [].

D.1. Перемычка *B*-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой *B*-типа (одна задвижка на участке t_n) приведен на рис. D.1.

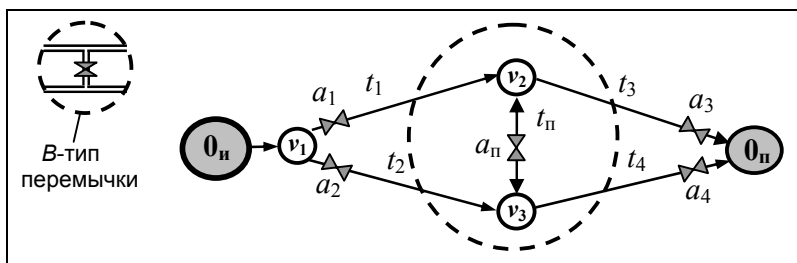


Рис. D.1 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой *B*-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. D.1) отвечал требованиям алгоритма разбиения на APЗ, следует для дуги e_{23} , участок t_n , установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка a_n находится в начале трубы t_n) или 2 (задвижка a_n находится в конце трубы t_n). Объясняется это тем, что при нулевой длине

трубы переключки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.1.

Таблица D.1

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{20п}(t_3),$ $e_{23}(t_п)$ при $z_{23} = 2$	$a_1, a_2, a_п$	v_2
2	$e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4),$ $e_{23}(t_п)$ при $z_{23} = 1$	$a_3, a_4, a_п$	v_3
3	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.2.

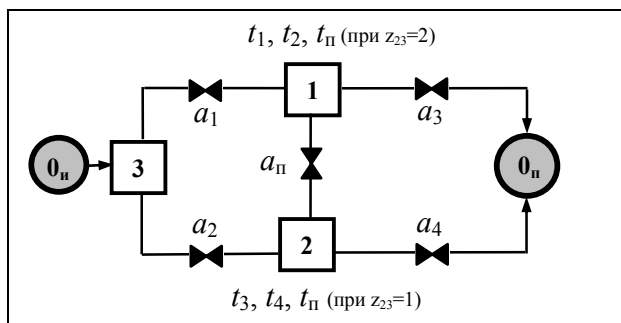


Рис. D.2 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной переключкой В-типа

Приложение

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,3}$; p_{a_j} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; p_{Π} – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке.

Если центральная задвижка a_{Π} находится в положении «открыто», то зоны №1 и №2 можно рассматривать как единую зону с суммарной длиной трубопроводных участков в 2 раза превышающей длину каждого из двух параллельных трубопроводов. Тогда частота отказов такой зоны также будет в 2 раза превышать частоту отказов одного трубопровода:

$$(1 - p_{1,2}) = 2(1 - p). \quad (D.1)$$

Здесь $p_{1,2}$ – вероятность безотказной единой зоны. Из (D.1)

$$p_{1,2} = 2p - 1, \quad (D.2)$$

где $p > \frac{1}{2}$.

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки a_{Π} перемычки В-типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.3, а вторая (при нахождении задвижки a_{Π} в положении «закрыто») – схеме на рис. D.4.

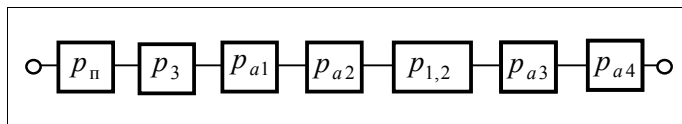


Рис. D.3 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой В-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

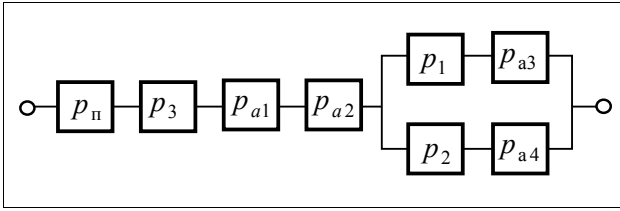


Рис. D.4 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой B-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.3), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» не зависит от APЗ №1 и задвижки a_{n1} и определяется выражением:

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{откр}}^f = p_{\Pi} p_3 p_{a1} p_{a2} p_{1,2} p_{a3} p_{a4}. \quad (D.3)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.4), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{закр}}^f = p_{\Pi} p_3 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{a3})(1 - p_2 p_{a4})]. \quad (D.4)$$

Надёжность p_3 зоны №3 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков принимается равной единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{\Pi} = p_a$, $j \in \overline{1,4}$.

Приложение

Исходные вероятности p_1 и p_2 безотказной работы соответственно зон №1 и №2 при закрытой центральной задвижке a_{Π} равны p .

С учётом (D.2) и сделанных замечаний выражения (D.71) и (D.72) принимают соответственно вид:

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{откр}}^f = 2p_a^5(1-p); \quad (\text{D.5})$$

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{закр}}^f = p_a^3 \left[1 - (1 - pp_a)(1 - pp_a) \right]. \quad (\text{D.6})$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.1:

– для задвижки $a_{\Pi 2}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.3,

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{откр}}^f = 2(1-p); \quad (\text{D.7})$$

– для задвижки $a_{\Pi 2}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.4,

$$P_{2+\Pi 1, B, \text{закр}}^f = 1 - (1-p)^2. \quad (\text{D.8})$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с перемычкой B-типа имеет вид

$$2(1-p) \leq P_{2+\Pi 1, B}^f \leq 1 - (1-p)^2. \quad (\text{D.9})$$

D.2. Перемычка E-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой E-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. D.5.

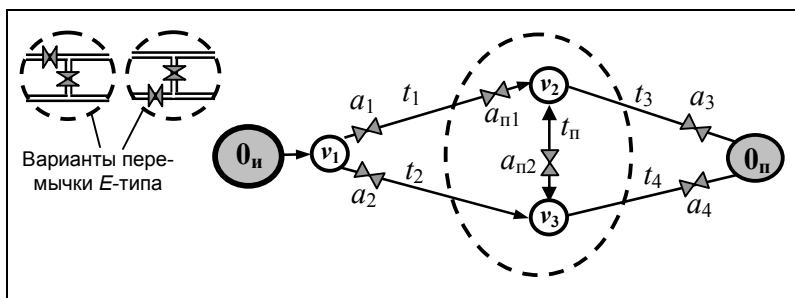


Рис. D.5 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной пере-мычкой E-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. D.4) отвечал требованиям алгоритма разбиения на APЗ, следует для дуги e_{23} , участок t_n , установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка a_{n2} находится в начале трубы t_n) или 2 (задвижка a_{n2} находится в конце трубы t_n). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.2.

Граф APЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.5.

Таблица D.2

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4),$ $e_{23}(t_n)$ при $z_{23} = 1$	$a_2, a_{п2}, a_4$	v_3
3	$e_{20п}(t_3),$ $e_{23}(t_n)$ $z_{23} = 2$	$a_{п1}, a_{п2}, a_3$	v_2
4	—	a_1, a_2	v_1

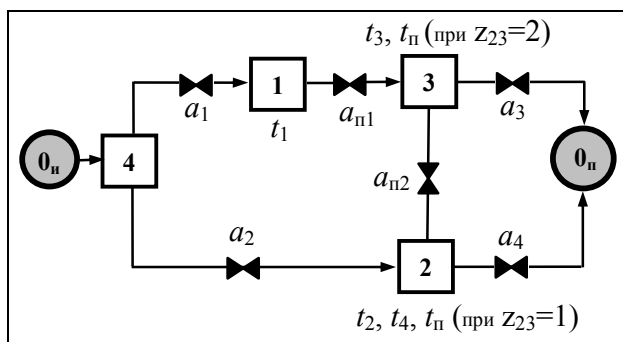


Рис. D.6 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой E-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,4}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – техническая надёжность k -й задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,2}$.

Если центральная задвижка $a_{п2}$ находится в положении «открыто», то зоны №2 и №3 можно рассматривать как единую зону с суммарной длиной трубопроводных участков в полтора раза превышающей длину каждого из двух параллельных трубопроводов. Тогда частота отказов в такой зоне также будет в полтора раза превышать частоту отказов в одном трубопроводе:

$$(1 - p_{2,3}) = \frac{3}{2}(1 - p). \quad (D.10)$$

Здесь $p_{2,3}$ – вероятность безотказной единой зоны. Из (D.10)

$$p_{2,3} = \frac{3p - 1}{2}, \quad (D.11)$$

где $p > \frac{1}{3}$.

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п2}$ перемычки E -типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.7., а вторая (при нахождении задвижки $a_{п2}$ в положении «закрыто») – схеме на рис. D.8.

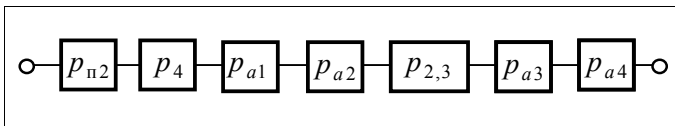


Рис. D.7 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой E -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

Вторая модель надёжности (при нахождении задвижки $a_{п2}$ в положении «закрыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.8.

Приложение

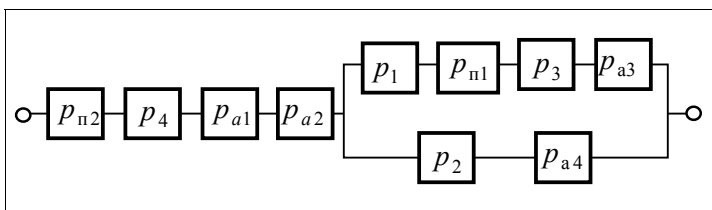


Рис. D.8 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *E*-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.7), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» не зависит от АРЗ №1 и задвижки $p_{п1}$ и определяется выражением:

$$P_{2+п2,E,откр}^f = p_{п2} p_4 p_{a1} p_{a2} p_{2,3} p_{a3} p_{a4}. \quad (D.12)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.8) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п2,F,закр}^f = p_{п2} p_4 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{a4})]. \quad (D.13)$$

Надёжность p_4 зоны №4 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков следует принять равной единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{пk} = p_a$, $j \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,2}$.

Совместная вероятность $p_{2,3}$ безотказной работы зон №2 и №3 при открытой центральной задвижке $a_{п2}$ составляет $\frac{3p-1}{2}$.

Исходная вероятность p_2 безотказной работы зоны №2 при закрытой центральной задвижке $a_{п2}$ равна p .

С учётом (D.11) и сделанных замечаний выражения (D.12) и (D.13) принимают соответственно вид:

$$P_{2+п2,E,откр}^f = p_a^5 \frac{3p-1}{2}; \quad (D.14)$$

$$P_{2+п2,E,закр}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - p_1 p_a^2 p_3 \right) (1 - p p_a) \right]. \quad (D.15)$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1 и №3 определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.16)$$

Подставляя (D.16) в (D.15), получим

$$P_{2+п2,E,закр}^f = p_a^3 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right] [1 - p p_a] \right\}. \quad (D.17)$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.5:

Приложение

– для задвижки $a_{п2}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.7,

$$P_{2+п2,E,откр}^f = \frac{3p-1}{2}; \quad (D.18)$$

– для задвижки $a_{п2}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.8,

$$P_{2+п2,E,закр}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right] (1-p). \quad (D.19)$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с переключкой E -типа имеет вид

$$\frac{3p-1}{2} \leq P_{2+п2,E}^f \leq 1 - (1-p) \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (D.20)$$

D.3. Переключка F -типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с переключкой F -типа приведен на рис. D.9.

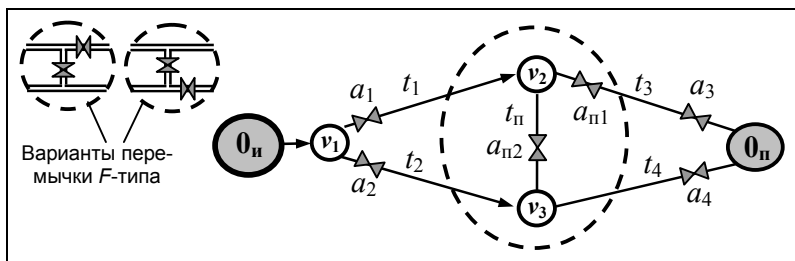


Рис. D.9 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной переключкой F -типа

Приложение

Чтобы исходный граф системы (рис. D.9) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок $t_{п}$, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{п2}$ находится в начале трубы $t_{п}$) или 2 (задвижка $a_{п2}$ находится в конце трубы $t_{п}$). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.3.

Таблица D.3

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1),$ $e_{23}(t_{п})$ при $z_{23} = 1$	$a_1, a_{п1}, a_{п2}$	v_2
2	$e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4),$ $e_{23}(t_{п})$ $z_{23} = 2$	$a_2, a_{п2}, a_4$	v_3
3	$e_{20п}(t_3)$	$a_{п1}, a_3$	—
4	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.10.

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,4}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – техническая надёжность k -й задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,2}$.

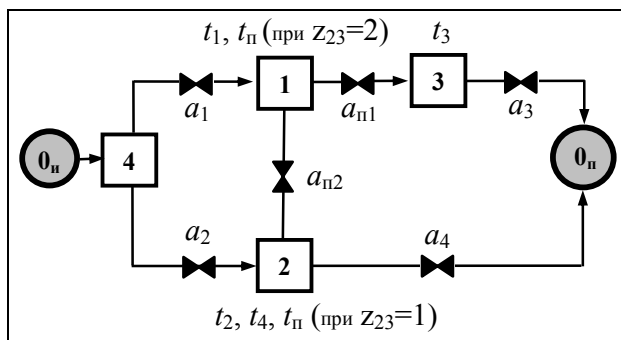


Рис. D.10 – Граф AP3 для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой F-типа

Если центральная задвижка $a_{п2}$ находится в положении «открыто», то зоны №1 и №2 можно рассматривать как единую зону с суммарной длиной трубопроводных участков в полтора раза превышающей длину каждого из двух параллельных трубопроводов. Тогда частота отказов в такой зоне также будет в полтора раза превышать частоту отказов в одном трубопроводе:

$$(1 - p_{1,2}) = \frac{3}{2}(1 - p). \quad (D.21)$$

Здесь $p_{1,2}$ – вероятность безотказной единой зоны. Из (D.10)

$$p_{2,3} = \frac{3p - 1}{2}, \quad (D.22)$$

где $p > \frac{1}{3}$.

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п2}$ перемычки F-типа в положении «открыто») соответ-

ствуется схеме, изображённой на рис. D.11, а вторая (при нахождении задвижки $a_{п2}$ в положении «закрыто») – схеме на рис. D.12.

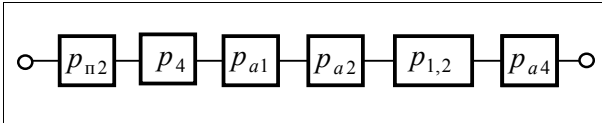


Рис. D.11 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой F -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

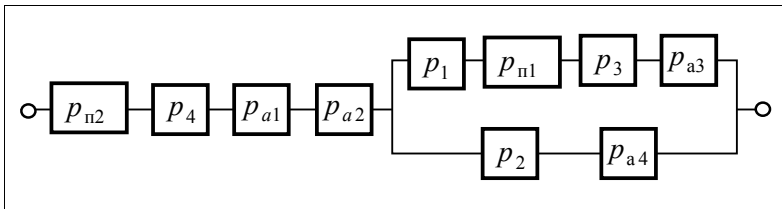


Рис. D.12 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой F -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.11), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» не зависит от АРЗ №3 и задвижки a_{a3} и определяется выражением:

$$P_{2+п2,F,откр}^f = p_{п2} p_4 p_{a1} p_{a2} p_{1,2} p_{a4}. \quad (D.23)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.12) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

Приложение

$$P_{2+\Pi 2, F, \text{закр}}^f = p_{\Pi 2} p_4 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{\Pi 1} p_4 p_{\Pi 3} p_3 p_{a3}) (1 - p_2 p_{a4})]. \quad (\text{D.24})$$

Надёжность p_4 зоны №4 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков следует принять равной единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{aj} = p_{\Pi k} = p_a$, $j \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,2}$.

Исходная вероятность p_2 безотказной работы зоны №2 при закрытой центральной задвижке $a_{\Pi 2}$ равна p .

С учётом (D.22) и сделанных замечаний выражения (D.23) и (D.24) принимают соответственно вид:

$$P_{2+\Pi 2, F, \text{откр}}^f = p_a^4 \frac{3p-1}{2}; \quad (\text{D.25})$$

$$P_{2+\Pi 2, F, \text{закр}}^f = p_a^3 [1 - (1 - p_1 p_a^2 p_3) (1 - p p_a)]. \quad (\text{D.26})$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1 и №3 определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}. \quad (\text{D.27})$$

Подставляя (D.27) в (D.26), получим

$$P_{2+\pi 2, F, \text{закр}}^f = p_a^3 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right] [1 - pp_a] \right\}. \quad (\text{D.28})$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.9:

– для задвижки $a_{\pi 2}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.11,

$$P_{2+\pi 2, F, \text{откр}}^f = \frac{3p-1}{2}; \quad (\text{D.29})$$

– для задвижки $a_{\pi 2}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.12,

$$P_{2+\pi 2, F, \text{закр}}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right] (1-p). \quad (\text{D.30})$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с перемычкой F -типа имеет вид

$$\frac{3p-1}{2} \leq P_{2+\pi 2, F}^f \leq 1 - (1-p) \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]. \quad (\text{D.31})$$

D.4. Перемычка L -типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой L -типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. D.13.

Приложение

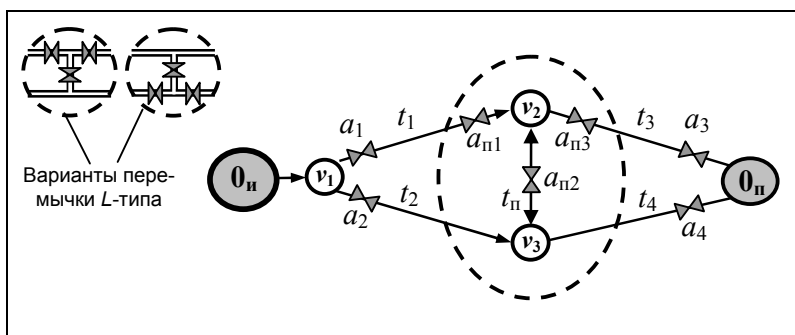


Рис. D.13 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной пере-
мычкой L-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. D.13) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок $t_{п}$, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{п2}$ находится в начале трубы $t_{п}$) или 2 (задвижка $a_{п2}$ находится в конце трубы $t_{п}$). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.4.

Граф АРЗ, соответствующий проведённому разбиению, изображён на рис. D.14.

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,5}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,3}$.

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2), e_{30п}(t_4), e_{23}(t_n)$ при $z_{23} = 1$	$a_2, a_{п2}, a_4$	v_3
3	$e_{20п}(t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{23}(t_n)$ при $z_{23} = 2$	$a_{п1}, a_{п2}, a_{п3}$	v_2
5	—	a_1, a_2	v_1

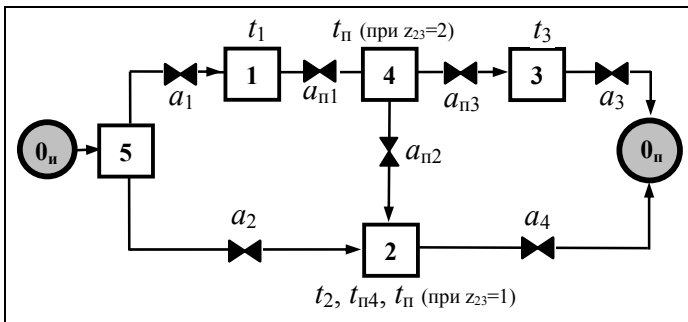


Рис. D.14 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой L-типа

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п2}$ перемычки O-типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.15, а вторая (при нахождении задвижки $a_{п2}$ в положении «закрыто») – схеме на рис. D.16.

Приложение

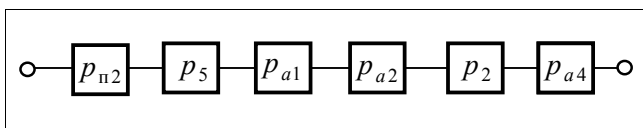


Рис. D.15 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой L-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

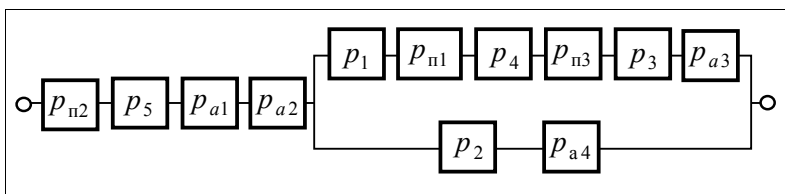


Рис. D.16 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой L-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.15), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки $a_{п2}$ в положении «открыто» не зависит от АРЗ №1, №3 и №4 и задвижек a_3 , a_{a4} , $a_{п1}$ и $a_{п3}$ и определяется выражением:

$$P_{2+п3,L,откр}^f = p_{п2} p_5 p_{a1} p_{a2} p_2 p_{a4}. \quad (D.32)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.16) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки $a_{п2}$ в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п3,L,закр}^f = p_{п2} p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_4 p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{a4})]. \quad (D.33)$$

Надёжность p_4 зоны №4 и надёжность p_5 зоны №5 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков принимаются равными единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{pj} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $j \in \overline{1,3}$.

Исходная вероятность p_2 безотказной работы зоны №2 равна вероятности безотказной работы трубопровода p .

С учётом сделанных замечаний выражения (D.32) и (D.33) принимают соответственно вид:

$$P_{2+\Pi 3, L, \text{откр}}^f = p_a^4 p; \quad (\text{D.34})$$

$$P_{2+\Pi 3, L, \text{закр}}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - p_1 p_a^3 p_3 \right) \left(1 - p_2 p_a \right) \right]. \quad (\text{D.35})$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1 и №3 определяются, согласно формуле (3.24), т.е.

$$p_1 = p_3 = \frac{1+p}{2}. \quad (\text{D.36})$$

Подставляя (D.36) в (D.35), получим

$$P_{2+\Pi 3, L, \text{закр}}^f = p_a^2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right] \left[1 - \frac{1+p}{2} p_a \right] \right\}. \quad (\text{D.37})$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические

Приложение

модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.13:

– для задвижки $a_{п3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.15,

$$P_{2+п3,L,откр}^f = p; \quad (D.38)$$

– для задвижки $a_{п3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.16,

$$\begin{aligned} P_{2+п3,L,закр}^f &= 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{1+p}{2} \right] = \\ &= p + (1-p) \left(\frac{1+p}{2} \right)^2. \end{aligned} \quad (D.39)$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с перемычкой L -типа имеет вид

$$p \leq P_{2+п3,L}^f \leq p + (1-p) \left(\frac{1+p}{2} \right)^2. \quad (D.40)$$

D.5. Перемычка M -типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой M -типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. D.17.

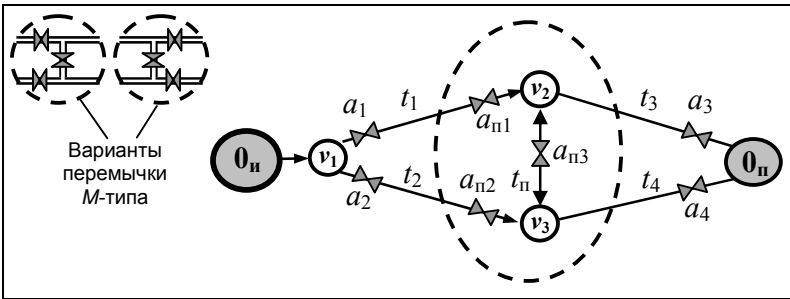


Рис. D.17– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой *M*-типа

Чтобы исходный граф системы (рис. D.17) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок $t_{п}$, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{п3}$ находится в начале трубы $t_{п}$) или 2 (задвижка $a_{п3}$ находится в конце трубы $t_{п}$). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.5.

Таблица D.5

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п}(t_3), e_{23}(t_{п})$ при $z_{23} = 2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_3$	v_2

Приложение

4	$e_{30п}(t_4), e_{23}(t_n)$ при $z_{23} = 1$	$a_{п2}, a_{п3}, a_4$	v_3
5	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.18.

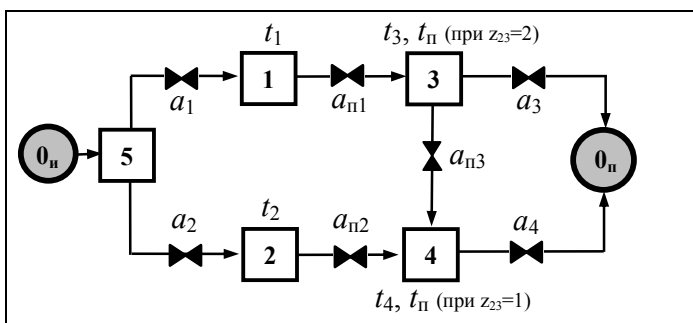


Рис. D.18 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой М-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,5}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – техническая надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,3}$.

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п3}$ перемычки О-типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.19, а вторая (при нахождении задвижки $a_{п3}$ в положении «закрыто») – схеме на рис. D.20.

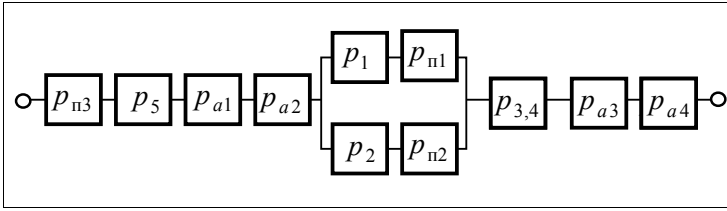


Рис. D.19 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *М*-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

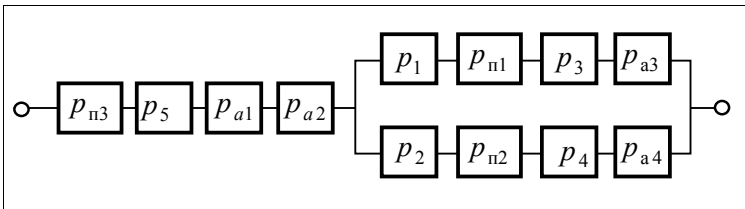


Рис. D.20 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой *М*-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.19), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» определяется выражением:

$$P_{2+п3,M,откр}^f = p_{п3} p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1})(1 - p_2 p_{п2})] p_{3,4} p_{a3} p_{a4}. \quad (D.41)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.20) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п3,M,закр}^f =$$

Приложение

$$= p_{п3} p_5 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{п2} p_4 p_{a4})]. \quad (D.42)$$

Надёжность зоны №5 p_5 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков следует принять равными единице.

Суммарная длина трубопроводных участков АРЗ №3 и №4 равна длине каждого из двух параллельных трубопроводов. Поэтому их общая надёжность $p_{3,4} = p$.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{пj} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $j \in \overline{1,3}$,

С учётом сделанных замечаний выражения (D.41) и (D.42) принимают соответственно вид:

$$P_{2+п3,M,откр}^f = p_a^5 p [1 - (1 - p_3 p_a)(1 - p_4 p_a)]; \quad (D.43)$$

$$P_{2+п3,M,закр}^f = p_a^3 [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^2)(1 - p_2 p_4 p_a^2)]. \quad (D.44)$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1 и №2 определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.45)$$

Подставляя (D.45) в (D.43) и (D.44), получим

$$P_{2+п3,M,откр}^f = p_a^5 p \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]; \quad (D.46)$$

$$P_{2+\Pi 3, M, \text{закр}}^f = p_a^3 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right]^2 \right\}. \quad (\text{D.47})$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.17:

– для задвижки $a_{\Pi 3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.19,

$$P_{2+\Pi 3, M, \text{откр}}^f = p \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]; \quad (\text{D.48})$$

– для задвижки $a_{\Pi 3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.20,

$$P_{2+\Pi 3, M, \text{закр}}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (\text{D.49})$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с перемычкой M -типа имеет вид

$$p \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \leq P_{2+\Pi 3, M}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (\text{D.50})$$

D.6. Перемычка N -типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой N -типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. D.21.

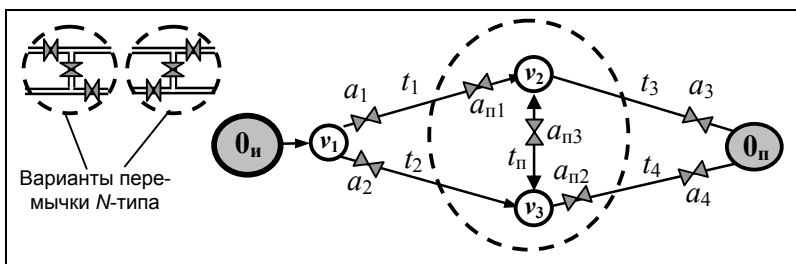


Рис. D.21– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной пере-мычкой N-типа

Подробное построение математической модели функциональ-ной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой N-типа описано в подразд. 4.3.

D.7. Перемычка O-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности сис-темы двух параллельных трубопроводов с перемычкой O-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. D.22.

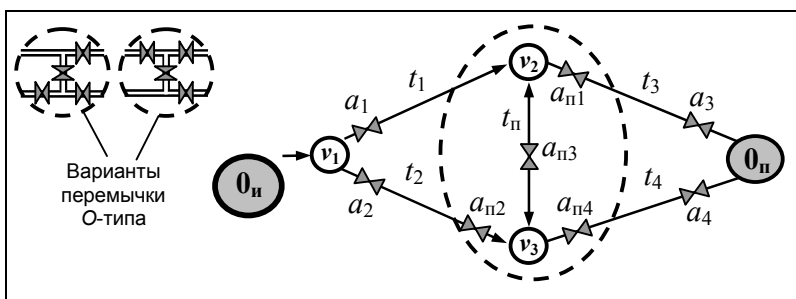


Рис. D.22– Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной пере-мычкой O-типа

Приложение

Чтобы исходный граф системы (рис. D.22) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок t_{Π} , установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{\Pi 3}$ находится в начале трубы t_{Π}) или 2 (задвижка $a_{\Pi 3}$ находится в конце трубы t_{Π}). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.6.

Таблица D.6

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12}(t_1), e_{23}(t_{\Pi})$ при $z_{23} = 2$	$a_1, a_{\Pi 1}, a_{\Pi 3}$	v_2
2	$e_{13}(t_2)$	$a_2, a_{\Pi 2}$	—
3	$e_{20\Pi}(t_3),$	$a_{\Pi 1}, a_{a3}$	—
4	$e_{30\Pi}(t_4),$	$a_{\Pi 4}, a_{a4}$	—
5	$e_{23}(t_{\Pi})$ при $z_{23} = 1$	$a_{\Pi 2}, a_{\Pi 3}, a_{\Pi 4}$	v_3
6	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.23.

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,6}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{\Pi k}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,4}$.

Приложение

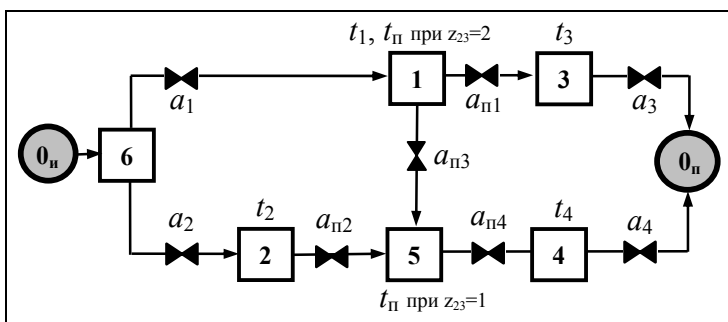


Рис. D.23 – Граф AP3 для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой O-типа

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п3}$ перемычки O-типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.24.

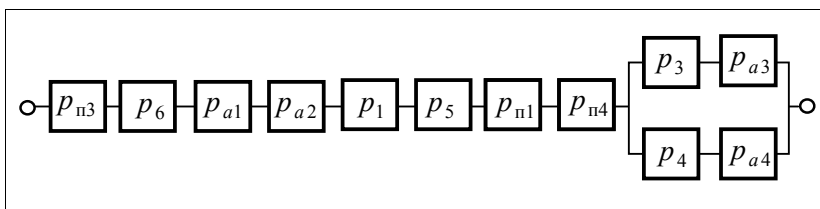


Рис. D.24 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой O-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

Вторая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п3}$ в положении «закрыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.25.

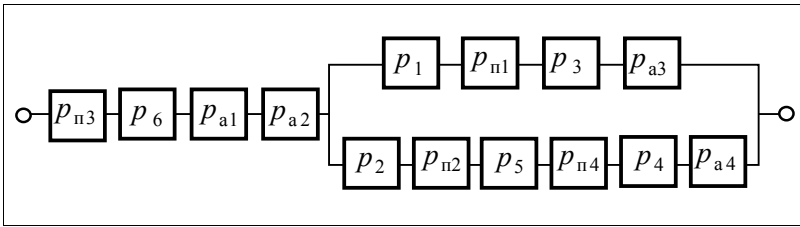


Рис. D.25 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой О-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.24), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» не зависит от надёжности p_2 АРЗ №2 и надёжности p_{a2} задвижки a_2 и определяется выражением:

$$P_{2+п4, O, \text{откр}}^f = p_{п3} p_6 p_{a1} p_{a2} p_1 p_5 p_{п1} p_{п4} \times \\ \times [1 - (1 - p_3 p_{a3})(1 - p_4 p_{a4})]. \quad (D.51)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.25) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п4, O, \text{закр}}^f = p_{п3} p_6 p_{a1} p_{a2} \times \\ \times [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{п2} p_5 p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.52)$$

Надёжность p_5 зоны №5 и надёжность p_6 зоны №6 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков следует принять равными единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов

Приложение

времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{\pi j} = p_a$,
 $i \in \overline{1,4}, j \in \overline{1,4}$,

С учётом сделанных замечаний выражения (D.51) и (D.52) принимают соответственно вид:

$$P_{2+\pi 4, O, \text{откр}}^f = p_a^5 p_1 [1 - (1 - p_3 p_a)(1 - p_4 p_a)]; \quad (\text{D.53})$$

$$P_{2+\pi 4, O, \text{закр}}^f = p_a^3 [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^2)(1 - p_2 p_4 p_a^3)]. \quad (\text{D.54})$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1, №2, №3 и №4 определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (\text{D.55})$$

Подставляя (D.55) в (D.53) и (D.54), получим

$$P_{2+\pi 4, O, \text{откр}}^f = p_a^5 \left(\frac{1+p}{2} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right]; \quad (\text{D.56})$$

$$P_{2+\pi 4, O, \text{закр}}^f = p_a^3 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right] \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right] \right\}. \quad (\text{D.57})$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.22:

– для задвижки $a_{\pi 3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.24,

$$P_{2+п4,O,откр}^f = \left(\frac{1+p}{2} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]; \quad (D.58)$$

– для задвижки $a_{п3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.25,

$$P_{2+п4,O,закр}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.59)$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с перемычкой O-типа имеет вид

$$\left(\frac{1+p}{2} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \leq P_{2+п4,O}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.60)$$

D.8. Перемычка P-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой P-типа (одна несимметрично установленная задвижка) приведен на рис. D.26.

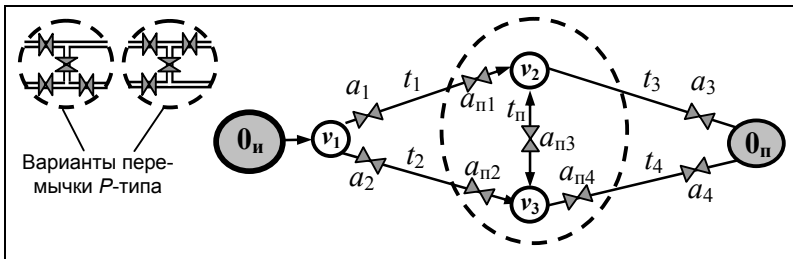


Рис. D.26 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой P-типа

Приложение

Чтобы исходный граф системы (рис. D.26) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок $t_{п}$, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{п3}$ находится в начале трубы $t_{п}$) или 2 (задвижка $a_{п3}$ находится в конце трубы $t_{п}$). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.7.

Таблица D.7

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12} (t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13} (t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п} (t_3), e_{23} (t_{п})$ при $z_{23} = 2$	$a_{п1}, a_{a3}$	v_2
4	$e_{30п} (t_4)$	$a_{п4}, a_{a4}$	—
5	$e_{23} (t_{п})$ при $z_{23} = 1$	$a_{п2}, a_{п3}, a_{п4}$	v_3
6	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.27.

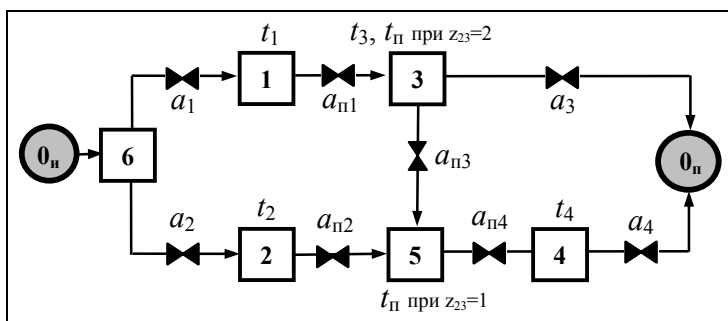


Рис. D.27 – Граф AP3 для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой P -типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й AP3, $i = \overline{1,6}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пk}$ – техническая надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,4}$.

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п3}$ перемычки P -типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.28, а вторая (при нахождении задвижки $a_{п3}$ в положении «закрыто») – схеме на рис. D.29.

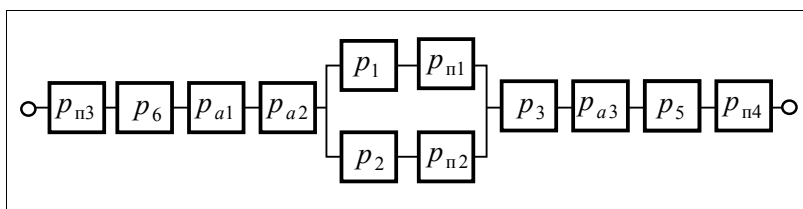


Рис. D.28 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой P -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

Приложение

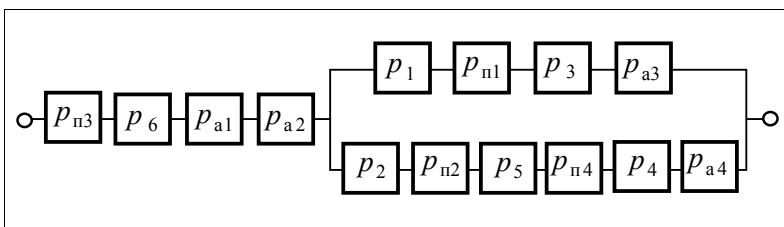


Рис. D.29 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой P -типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.28), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» не зависит от надёжности p_4 АРЗ №4 и надёжности p_{a4} задвижки a_4 и определяется выражением:

$$P_{2+п4,P,откр}^f = p_{п3} p_6 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1})(1 - p_2 p_{п2})] p_3 p_{a3} p_5 p_{п4}. \quad (D.61)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.49) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п4,P,закр}^f = p_{п3} p_6 p_{a1} p_{a2} \times [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{п2} p_5 p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.62)$$

Надёжность p_5 зоны №5 и надёжность p_6 зоны №6 p_6 из-за сравнительно малой длины трубопроводных участков следует принимаются равными единице.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов

времени, то можно считать, что $p_{ai} = p_{пj} = p_a$,
 $i \in \overline{1,4}$, $j \in \overline{1,4}$,

С учётом сделанных замечаний выражения (D.61) и (D.62) принимают соответственно вид:

$$P_{2+п4,P,откр}^f = p_a^5 [1 - (1 - p_1 p_a)(1 - p_2 p_a)] p_3; \quad (D.63)$$

$$P_{2+п4,P,закр}^f = p_a^3 [1 - (1 - p_1 p_3 p_a^2)(1 - p_2 p_4 p_a^3)]. \quad (D.64)$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1, №2, №3 и №4 определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (D.65)$$

Подставляя (D.65) в (D.63) и (D.64), получим

$$P_{2+п4,P,откр}^f = p_a^4 \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right] \left(\frac{1+p}{2} \right); \quad (D.66)$$

$$P_{2+п4,P,закр}^f = p_a^2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^2 \right] \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right] \right\}. \quad (D.67)$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.26:

– для задвижки $a_{п3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.28,

Приложение

$$P_{2+п4,P,откр}^f = \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left(\frac{1+p}{2} \right); \quad (D.68)$$

– для задвижки $a_{п3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.29,

$$P_{2+п4,P,закр}^f = 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.69)$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с перемычкой О-типа имеет вид

$$\left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right] \left(\frac{1+p}{2} \right) \leq P_{2+п4,P}^f \leq 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (D.70)$$

D.9. Перемычка S-типа

Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов с перемычкой S-типа приведен на рис. D.30.

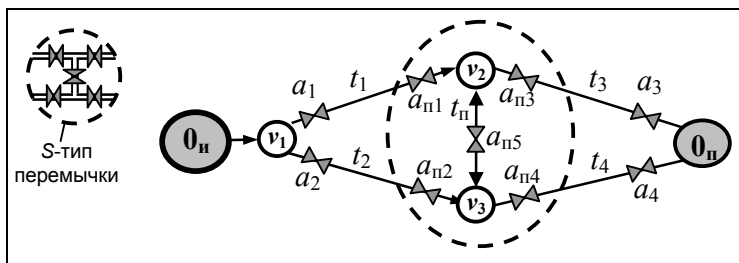


Рис. D.30 – Исходный граф для расчёта функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой S-типа

Приложение

Чтобы исходный граф системы (рис. D.30) отвечал требованиям алгоритма разбиения на АРЗ, следует для дуги e_{23} , участок $t_{п}$, установить значение весовой функции z_{23} равным 1 (задвижка $a_{п5}$ находится в начале трубы $t_{п}$) или 2 (задвижка $a_{п5}$ находится в конце трубы $t_{п}$). Объясняется это тем, что при нулевой длине трубы перемычки значения весовой функции $z_{23} = 1$ и $z_{23} = 2$ указывают на одно и то же расположение задвижки. Результаты разбиения отражены в табл. D.8.

Таблица D.8

№ АРЗ	Конструктивные элементы АРЗ		
	Трубопроводные участки системы (рёбра графа)	Отсекающие задвижки	Колодцы (вершины графа)
1	$e_{12} (t_1)$	$a_1, a_{п1}$	—
2	$e_{13} (t_2)$	$a_2, a_{п2}$	—
3	$e_{20п} (t_3)$	$a_{п3}, a_3$	—
4	$e_{30п} (t_4)$	$a_{п4}, a_4$	—
5	e_{23} , если $z_{23}=2$	$a_{п1}, a_{п3}, a_{п5}$	v_2
6	e_{23} , если $z_{23}=1$	$a_{п2}, a_{п4}, a_{п5}$	v_3
7	—	a_1, a_2	v_1

Граф АРЗ, соответствующий проведенному разбиению, изображён на рис. D.31.

Приложение

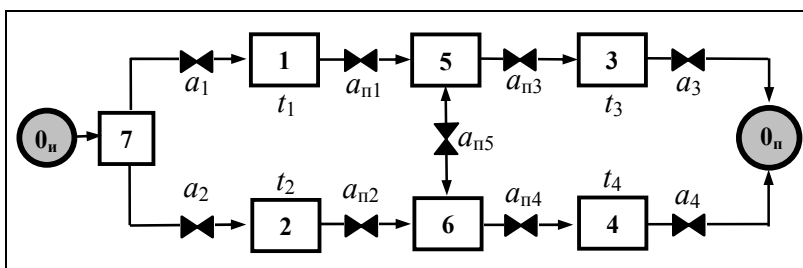


Рис. D.31 – Граф АРЗ для системы двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой S-типа

Пусть p_i – общая техническая надёжность трубопроводов i -й АРЗ, $i = \overline{1,7}$; p_{aj} – техническая надёжность j -й задвижки, $j = \overline{1,4}$; $p_{пк}$ – технические надёжность задвижки, принадлежащей перемычке, $k = \overline{1,5}$.

Первая модель надёжности (при нахождении центральной задвижки $a_{п3}$ перемычки S-типа в положении «открыто») соответствует схеме, изображённой на рис. D.32, а вторая (при нахождении задвижки $a_{п3}$ в положении «закрыто») – схеме на рис. D.33.

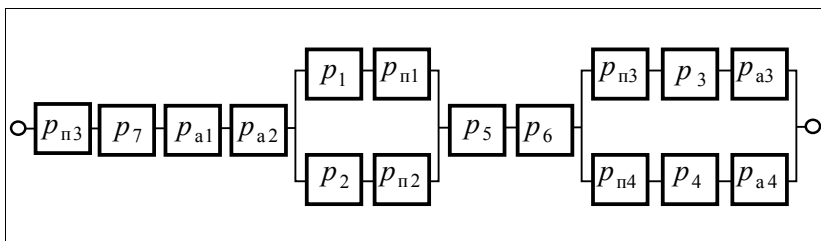


Рис. D.32 – Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «открыто»

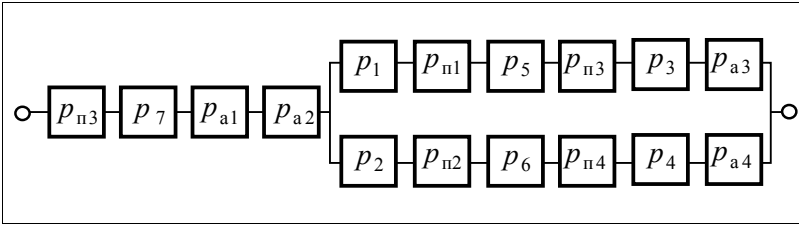


Рис. D.33– Расчётная модель функциональной надёжности системы двух параллельных трубопроводов, соединённых перемычкой S-типа, при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто»

Согласно расчётной схеме (рис. D.32), функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «открыто» определяется выражением:

$$P_{2+п5,откр}^f = p_{п3} p_7 p_{a1} p_{a2} [1 - (1 - p_1 p_{п1})(1 - p_2 p_{п2})] \times \\ \times p_5 p_6 [1 - (1 - p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.71)$$

Согласно расчётной схеме (рис. D.33) функциональная надёжность системы при нахождении центральной задвижки в положении «закрыто» определяется выражением:

$$P_{2+п5,закр}^f = p_{п3} p_7 p_{a1} p_{a2} \times \\ \times [1 - (1 - p_1 p_{п1} p_5 p_{п3} p_3 p_{a3})(1 - p_2 p_{п2} p_6 p_{п4} p_4 p_{a4})]. \quad (D.72)$$

Технической ненадёжностью АРЗ №5, №6 и №7 из-за сравнительно небольшой суммарной длины трубопроводных участков (по сравнению с АРЗ №1, №2, №3 или №4) можно пренебречь, т.е. $p_5 = p_6 = p_7 = 1$.

Если все задвижки в системе имеют один и тот же тип и эксплуатировались в равных условиях в течение равных периодов времени, то можно считать $p_{aj} = p_{пk} = p_a$, $i \in \overline{1,4}$, $k \in \overline{1,5}$.

Приложение

С учётом сделанных замечаний выражения (D.71) и (D.72) принимают соответственно вид:

$$P_{2+\Pi 5, \text{откр}}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - p_1 p_a \right) \left(1 - p_2 p_a \right) \right] \left[1 - \left(1 - p_3 p_a^2 \right) \left(1 - p_4 p_a^2 \right) \right]; \quad (\text{D.73})$$

$$P_{2+\Pi 5, \text{закр}}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - p_1 p_a^3 p_3 \right) \left(1 - p_2 p_a^3 p_4 \right) \right]. \quad (\text{D.74})$$

Исходные вероятности безотказной работы каждой из зон №1, №2, №3 и №4 определяются, согласно формуле (3.24), следующим образом:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \frac{1+p}{2}. \quad (\text{D.75})$$

Подставляя (D.75) в (D.73) и (D.74), получим

$$P_{2+\Pi 5, \text{откр}}^f = p_a^3 \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a \right)^2 \right] \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} p_a^2 \right)^2 \right]; \quad (\text{D.76})$$

$$P_{2+\Pi 5, \text{закр}}^f = p_a^3 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 p_a^3 \right]^2 \right\}. \quad (\text{D.77})$$

Если считать техническую надёжность всех задвижек абсолютной, т.е. $p_a = 1$, то имеем две упрощенные математические модели функциональной надёжности для системы, схема которой приведена на рис. D.30:

– для задвижки $a_{\Pi 3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.32,

$$P_{2+\Pi 5, \text{откр}}^f = \left[1 - \left(1 - \frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2; \quad (\text{D.78})$$

– для задвижки $a_{\Pi 3}$ в положении «открыто», согласно схеме модели на рис. D.33,

$$P_{2+\Pi 5, \text{закр}}^f = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \right\}. \quad (\text{D.79})$$

Таким образом, искомая упрощенная модель функциональной надёжности системы с переключкой S-типа имеет вид

$$1 - \left[1 - \left(\frac{1+p}{2} \right)^2 \right]^2 \leq P_{2+\Pi 5}^f \leq \left[1 - \left(\frac{1-p}{2} \right)^2 \right]^2. \quad (\text{D.80})$$

Список использованной литературы

1. *Абрамов Н.Н.* Теория расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
2. *Абрамов Н.Н., Поспелов М.М.* Расчёт водопроводных сетей. – М.: Госстройиздат, 1962. – 227 с.
3. *Беляев Ю.К.* Статистические методы в теории надежности. – М.: Знание, 1978. – 66 с.
4. Большая советская энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1970–1978. – Т.3, 17, 24, 26.
5. *Вендров А.М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – СПб: БХВ, 2000. – 240 с.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техника, 2005. – Вып. 63. – С.195–199.
8. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Расчёт надёжности поставки целевого продукта конкретному потребителю в системах трубопроводного транспорта // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техника, 2006. – Вып. 67. – С.222–228.
9. *Гавриленко И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и проектирование систем тепло-, газо- и водоснабжения с учетом надежности // II Всеукраинская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы энерго-, ресурсосбережения жилищно-коммунального хозяйства». – Алушта, ХО НТТ КГ и ПО, ХНАГХ, 2006. – С. 77-79.
10. *Гавриленко І.О.* Надійність постачання цільового продукту в складних трубопровідних транспортних системах. – Автореферат дис...канд..техн. наук: 05.22.01.– Харків: ХНАМГ, 2006. – 22 с.
11. *Гальперин Е.М.* Расчёт кольцевых водопроводных сетей с учётом надёжности функционирования. – Саратов: Саратовский ГУ, 1989. – 104 с.
12. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
13. ГОСТ 27.002-83 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1984.
14. *Душкин С.С., Краев И.О.* Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения. – К., 1993.–164 с.

15. *Евдокимов А.Г.* Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. – Харьков: Вища. шк., 1980. – 208 с.
16. *Евдокимов А.Г., Панасенко А.А.* Оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – Харьков: Основа, 1996.–136 с.
17. *Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.* Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. – Х.: Вища школа, 1980. – 144 с.
18. *Ильин Ю.А.* Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
19. *Ильин Ю.А.* Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
20. Интегрированная диалоговая система рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды / Под общ. ред. *Евдокимова А.Г. и Самойленко Н.И.* – Донецк: РИП «Лебедь», 1994. – 192 с.
21. Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов / Под ред. *Самойленко Н.И.* - Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. – 232 с.
22. *Ионин А.А.* Надёжность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
23. *Ионин А.А.* Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989.– 439 с.
24. *Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высш. шк., 1963. – 560 с.
25. *Клемин А.И.* Надёжность ядерных энергетических установок. Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 344 с.
26. *Коваленко И.Н.* Исследования по анализу надежности сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1976. – 211 с.
27. *Коваленко И.Н., Кузнецов И.Ю.* Методы расчета высоконадежных систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
28. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Полумарковские процессы и их приложения. – К.: Наук. думка, 1976. – 138 с.
29. *Лосев Э.А.* Топологические методы нахождения вероятностных характеристик системы электроснабжения промышленных предприятий (Тр. ВНИИПЭМ). – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 111-115.
30. Математическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1977–1985. – Т.3. – 1184 стб.
31. Надёжность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко.* Т.2. Надёжность электроэнергетиче-

Литература

ских систем / Под ред. *М.Н. Розанова*. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.

32. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т. / Под общ. ред. *Ю.Н. Руденко*. Т.4. Надежность систем теплоснабжения – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 351 с.

33. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. *И.А. Ушакова*. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

34. *Ожегов С.И.* Словарь русского языка. – М.: Рус. яз., 1986. – 797 с.

35. *Петросов В.А.* Управление региональными системами водоснабжения. – Харьков: Основа, 1999. – 320 с.

36. Рациональная эксплуатация и развитие систем водоснабжения и водоотведения. Т.1. Компьютеризация в системах водоснабжения / Под ред. *Евдокимова А.Г и Самойленко Н.И.* – Харьков: ХТУРЭ, 1997. – 276 с.

37. *Рудь И.А.* Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности. – Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.

38. *Рудь И.А.* Модели надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Радиоэлектроника и информатика, Харьков, 2000. №3 – С.86-87.

39. *Рудь И.А.* Расчёт надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 1999. – Вып. 20. – Ч.1. – С.37–42.

40. *Рудь И.А., Самойленко Н.И.* Эксплуатация и развитие инженерных сетей с учётом надёжности // Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления. Материалы II Международной междисциплинарной НПК. – Харьков, 2001. – С.142–143.

41. *Рябинин И.А.* Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971. – 347 с.

42. *Рябинин И.А., Киреев Ю.Н.* Надежность судовых электроэнергетических систем и судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1975. – 234 с.

43. *Самойленко Н.И.* Компьютерные интегрированные информационно-графические технологии рациональной эксплуатации и развития инженерных сетей. – Дис...д-ра техн. наук: 05.13.02; 05.13.04. – Харьков, 1996. – 370 с.

44. *Самойленко Н.И.* Функциональная надёжность трубопроводных транспортных систем : Монография / Самойленко Н.И., Гавриленко И.А. : ХНАГХ. – Горловка : ЧП «Видавництво Ліхтар», 2008. – 180 с.

45. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Анализ функциональной надёжности различных конструкций магистральных трубопроводов // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 2009. – Вып. 86. – С.197–203.
46. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А.* Метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных транспортных систем // Устойчивое развитие городов. Материалы VI Международной НПК. – Харьков: ХНАХ, 2008.
47. *Самойленко Н.И., Гавриленко И.А., Передерий Т.С.,* Повышение надёжности функционирования магистрального трубопровода // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка, 2006. – Вып. 72. – С.193-200
48. *Сенчук Т.С., Самойленко Н.И.* Резервирование магистральных трубопроводов как средство повышения функциональной надёжности // Коммунальное хозяйство городов, К.: Техніка, 2009. – Вып. 86. – С.219–227.
49. Словарь иностранных слов. – М.: Рус. яз., 1986. – 608 с.
50. *Черкесов Г.Н.* Надёжность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.
51. Энциклопедия кибернетики. – К.: Гл.редакция УСЭ, 1974. – Т2. – 624 с.
52. *Эндрени Дж.* Моделирование при расчетах надёжности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
53. *Samoilenko M.I.* On emergency localisation in water supply networks. Pros. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. Hamburg, 1995.

Наукове видання
САМОЙЛЕНКО Микола Іванович,
СЕНЧУК Тетяна Сергіївна

НАДІЙНІСТЬ
ТРУБОПРОВІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ
СИСТЕМ

Монографія
(рос. мовою)

Відповідальний за випуск – Самойленко М.І.
Комп'ютерна верстка – Самойленко М.І.
Технічне редагування – Сенчук Т.С.

Видавництво «НТМТ»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 1748 від 15.04.2004 р.
61072, м. Харків, пр. Леніна, 58, к. 106.

Підписано до друку 29.04.2009.
Формат 60х84/16. Папір 80 г/м².
Умов.-друк. арк. – 16,0. Обл.-вид. арк. – 19,3.
Тираж 300 примірників.

Напечатано в типографии ООО «Современная печать» на цифровом
лазерном издательском комплексе Rank Xerox DocuTech 135.

Адрес: г. Харьков, ул. Лермонтовская, 27.

Телефон (057) 752-47-90