

УДК 628.1.192

Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук, М.В.БУЛАЕНКО, канд. техн. наук,
И.А.ГАВРИЛЕНКО, С.И.БОГУЧАРСКИЙ

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

КРИТЕРИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОГЕННО-ЭКОЛОГИЧНЫХ КАТАСТРОФ

Рассматривается показатель функциональной надёжности трубопроводной сети – вероятность непрерывной поставки целевого продукта конкретному потребителю в течение определённого периода времени T . Предлагается метод расчёта функциональной надёжности относительно конкретного потребителя с обязательным разбиением всей сети на аварийно-ремонтные зоны.

Розглядається показник функціональної надійності трубопровідної мережі – ймовірність безперервного постачання цільового продукту конкретному споживачеві протягом певного періоду часу T . Пропонується метод розрахунку функціональної надійності відносно конкретного споживача з обов'язковим розбиттям всієї мережі на аварійно-ремонтні зони.

Performance of functional reliability pipeline network is examined – the probability of a continuous supply of concrete of the desired product to the consumer for a certain period of time T . The method for calculating the functional reliability with respect to a particular consumer must partition the entire network for emergency repair zone.

Ключевые слова: трубопроводная сеть, функциональная надёжность, авария, математическая модель.

Эксплуатация трубопроводных напорных систем (ТНС) связана с повышенным риском возникновения аварий, которые могут перерастать в экологическую катастрофу. При этом основной причиной катастрофы может служить не сама авария, а неудовлетворительное состояние ТНС. Поэтому при расследовании причин аварий и катастроф необходимо тщательно проверять текущее состояние ТНС, и в первую очередь – состояние её трубопроводной сети (ТС).

Одним из наиболее существенных критериев для оценки состояния сети является функциональная надёжность (ФН) – способность сети отвечать своему функциональному назначению. В качестве показателя ФН, наиболее полно определяющего техническое и функциональное состояние ТС, целесообразно брать вероятность непрерывной поставки (ВНП) целевого продукта конкретному потребителю в течение определённого периода времени T . Естественно, при установлении виновника катастрофы в качестве конкретных потребителей должна выступать субъекты и организации, по вине которых возникла авария.

Если авария возникла из-за неудовлетворительного состояния ТС (износ, старение и пр.), то виновником возможной катастрофы, вызванной этой аварией, является коммунальное предприятие, эксплуатирующее ТС и отвечающее за её состояние. Гораздо сложнее определить виновника катастрофы, если авария на ТС возникла по другим причинам, например, по причине землетрясения или случайного повреждения трубопровода лицами или организациями, не эксплуатирующими ТС. Тогда коммунальные предприятие является виновником катастрофы (или одним из виновников) только в случае, если на момент аварии ТС находилась в неудовлетворительном состоянии.

Таким образом, оценка ВВП играет очень важную роль в судебной экспертизе для установления виновности или невиновности коммунального предприятия в возникновении аварии на ТС, особенно когда она перерастает в катастрофу.

Неопределенность критерия, постановка задачи исследования

Использование оценки ВВП в качестве показателя ФН для ТС со сложной топологической структурой, которую имеют, например, городские распределительные сети, не всегда приводит к однозначному установлению виновника аварии или катастрофы.

На рис.1 показаны временные зоны эксплуатации ТС, на которые разбивается временная ось $t_{кр}$ графиками оценок ВВП снизу P^{f+} и сверху P^{f++} :

– зона невиновности коммунального предприятия, которая определяется моментом t_0 начала эксплуатации ТС или завершением работ по реновации ТС и моментом t^+ достижения оценкой P^{f+} допустимого значения $P_{дон}^f$, т.е. зона $t_0 \leq t_{кр} < t^+$;

– зона неопределённости, которая определяется моментом t^+ достижения оценкой P^{f+} допустимого значения $P_{дон}^f$ и моментом достижения оценкой P^{f++} допустимого значения $P_{дон}^f$, т.е. зона $t^+ \leq t_{кр} \leq t^{++}$;

– зона виновности коммунального предприятия, которая определяется моментом t^{++} достижения оценкой P^{f++} допустимого значения $P_{дон}^f$, т.е. зона $t^{++} \leq t_{кр}$.

При возникновении аварии в период эксплуатации ТС от t^+ до t^{++} (в зоне неопределённости) однозначно установить виновность или

невиновность коммунального предприятия в этой аварии по оценкам P^f сверху и снизу не представляется возможным.

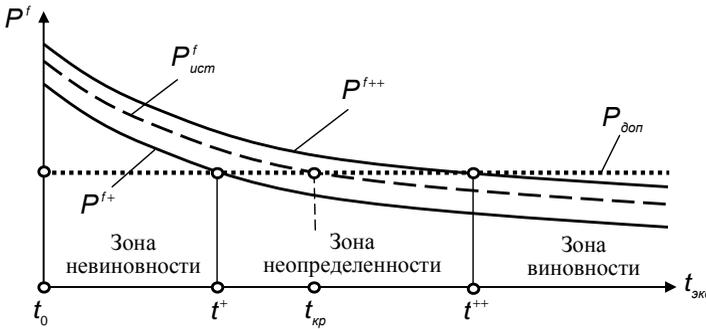


Рис. 1 – Временные зоны эксплуатации транспортной системы

Объясняется это тем, что неизвестен график $P^f_{\text{уст}}$ истинных значений ВНП, который определяет критический момент $t_{\text{кр}}$ перехода ТС из состояния удовлетворительного в неудовлетворительное. Чтобы избежать неопределённости, коммунальное предприятие вынуждено начинать работы по реновации сети не позднее момента t^+ . Преждевременное начало ремонтно-восстановительных работ приводит к неоправданным расходам материальных, трудовых и финансовых ресурсов.

В данной ситуации имеет место противоречие интересов коммунального предприятия: с одной стороны, оно хочет избежать неоправданных расходов по обеспечению должной надёжности ТС и максимально продлить срок её эксплуатации вплоть до момента $t_{\text{кр}}$, с другой – не попасть под штрафные санкции в случае аварии на ТС из-за её неудовлетворительного состояния. Устранение противоречия возможно только путём определения графика $P^f_{\text{уст}}$ истинных значений ВНП.

Таким образом, приходим к основной задаче исследования: разработать аналитический метод определения истинного значения показателя функциональной надёжности (ВНП) для ТС со сложной топологической структурой.

Существующие методы расчёта вероятности непрерывной поставки целевого продукта

Структура ТПС оказывает непосредственное влияние на функцио-нальную надёжность. При проектировании трубопроводных сетей

часто с целью повышения функциональной надёжности используют ввод дополнительной запорной арматуры, резервирование отдельных трубопроводных участков или фрагментов сети, кольцевой подвод труб к потребителям, устройство перемычек и т.п.

Существующие методы расчёта ВВП, учитывающие структуру сети, либо неприменимы для сложных сетей из-за комбинаторного характера математической модели [1], либо позволяют получать только её оценку [2], либо требуют значительных временных затрат для сбора статистических данных. Здесь следует обратить внимание на то, что статистический метод неприемлем для задач проектирования или задач эксплуатации при изменении структуры ТС, например, с целью ведения работ по реновации.

В настоящей работе, как было упомянуто ранее, рассматривается один из возможных показателей функциональной надёжности трубопроводной сети – *вероятность непрерывной поставки* целевого продукта конкретному потребителю в течение определённого периода времени T . Другими словами, это вероятность того, что в течение указанного времени для транспортирования целевого продукта от источника к потребителю существует хотя бы один путь. Объёмы поставок целевого продукта при этом во внимание не принимаются.

Особенности расчёта вероятности непрерывной поставки целевого продукта

Исследование функциональной надёжности трубопроводной сети связано с понятием «аварийно-ремонтная зона» (АРЗ). АРЗ – это наименьший фрагмент сети с конкретным трубопроводным участком, который может быть отсечён от сети с помощью запорной арматуры. Каждый трубопровод принадлежит какой-либо одной АРЗ. Каждая отсекающая задвижка разделяет две зоны.

Трубопроводная сеть любой сложности однозначно разбивается на АРЗ с помощью рекурсивного алгоритма, приведенного в [3].

Предлагаемый метод расчёта функциональной надёжности трубопроводной сети относительно конкретного потребителя базируется на следующих исходных утверждениях:

- Вероятность выхода из строя трубопровода прямо пропорциональна удельной интенсивности возникновения повреждений на этом трубопроводе и его длине.
- Надёжность аварийно-ремонтной зоны (АРЗ) зависит только от состава конструктивных элементов и не зависит от структуры зоны. Отказ любого элемента сети, принадлежащей k -зоне, приводит к отказу всей зоны. Отказ любого элемента сети, не принадлежащей k -зоне,

никакого влияния на функционирование зоны не оказывает. Надёжность АРЗ определяется как надёжность последовательно соединённых элементов, входящих в состав этой зоны.

- Искомый показатель функциональной надёжности трубопроводной сети (вероятность бесперебойной поставки) P^f зависит от:
 - топологических связей между АРЗ;
 - места подключения потребителя к сети;
 - вероятности безотказной работы в течение периода времени T тех АРЗ, которые лежат на каком-либо пути поставки целевого продукта от источника к конкретному потребителю;
 - вероятности безотказной работы в течение периода времени T тех задвижек, которые отсекают АРЗ, определенные в предыдущем пункте.

Аналитический метод расчёта функциональной надёжности

Предлагаемый метод расчёта функциональной надёжности трубопроводной сети относительно конкретного потребителя предполагает обязательное разбиение всей сети на АРЗ. По этой причине данный метод принято называть методом АРЗ.

Расчёт функциональной надёжности методом АРЗ включает семь последовательных этапов:

1. Формирование математической модели трубопроводной сети со сложной топологической структурой в виде взвешенного графа.
2. Разбиение исходного взвешенного графа сложной трубопроводной сети на подграфы, каждый из которых соответствует одной АРЗ [3].
3. Расчет технической надежности каждой АРЗ как независимого макроэлемента в функционировании трубопроводной сети.
4. Преобразование исходного взвешенного графа трубопроводной сети большой размерности во взвешенный граф АРЗ малой размерности (замена микрографа каждой АРЗ одной вершиной, а каждой отсекающей задвижки одним ребром).
5. Построение упрощенного графа АРЗ относительно конкретного потребителя трубопроводной сети.
6. Построение расчётной модели функциональной надёжности трубопроводной 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.

Подробно все этапы метода АРЗ и примеры его использования описаны в [3-6].

Фактически, результатом метода АРЗ является математическая модель функциональной надёжности трубопроводной сети относительно конкретного потребителя. Модель учитывает место подключения потребителя к сети, надёжность конструктивных элементов и структуру сети в той её части, которая обеспечивает транспорт целевого продукта к данному потребителю.

Проверка истинности результатов, получаемых методом АРЗ

Для проверки истинности результатов, получаемых с помощью метода АРЗ, был проведен ряд вычислительных экспериментов, которые базировались на создании виртуальных трубопроводных сетей и имитации процессов их эксплуатации [6]. Имитация процессов эксплуатации виртуальных сетей осуществлялась с помощью генератора случайных чисел, который обеспечил случайное распределение отказов конструктивных элементов сети, как в пространстве, так и во времени.

В связи со значительной трудоёмкостью организации вычислительных экспериментов в качестве тестовых были выбраны простые магистральные трубопроводные сети, состоящих из двух параллельных трубопроводов, соединённых одной перемычкой. Сети отличались друг от друга только конструкцией перемычки. Несмотря на незначительные отличия в структуре, для каждой сети разрабатывалась своя программа эксперимента. Чем проще структура сети, тем менее трудоёмкая процедура проверки истинности результата расчёта.

Результаты цифрового моделирования показали, что при большом числе повторений вычислительных экспериментов относительное среднее время $P_{\text{ср}}^f$ непрерывной поставки целевого продукта потребителю для каждой тестовой сети неукоснительно сходилась к значению функциональной надёжности, рассчитанного методом АРЗ (рис. 2).

По инициативе Минприроды Украины создается экологическая инспекция. Основные задачи новой структуры – это мониторинг окружающей среды, расследование экологических катастроф и наблюдение за предприятиями-загрязнителями. Она будет контролировать транспорт, лесное и водное хозяйство. Научные результаты данной работы позволяют экологической инспекции объективно проводить расследование экологических катастроф, связанных с функционированием НТС, на базе аналитического метода расчета функциональной надёжности.

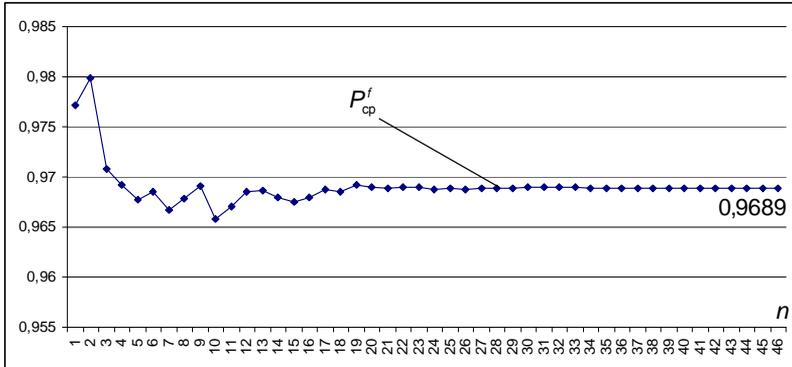


Рис. 2 – Диаграмма зависимости P_{cp}^f от числа экспериментов n в условиях примера относительно потребителя O_{12}

Следует отметить, что разработанный метод АРЗ может с успехом использоваться для расчёта истинной функциональной надёжности реально действующих распределительных и магистральных трубопроводных сетей для составления графиков ремонтно-профилактических работ. Здесь очень важно следить за тем, чтобы трубопроводные участки при проведении работ реновации не опустили показатель функциональной надёжности ниже предельно допустимого. Однако наибольшую пользу метод АРЗ может принести для проектирования новых, реконструкции и развития старых трубопроводных сетей, когда аналитические методы расчёта функциональной надёжности просто не работают.

1. Абрамов Н.Н. Надёжность систем водоснабжения. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.
2. Ильин Ю.А. Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.
3. Самойленко М.И., Гавриленко И.О. Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем. – Х.: ХНАМГ, 2009. – 184 с.
4. Самойленко Н.И., Сенчук Т.С. Функциональная надёжность магистральных трубопроводных транспортных систем. – Харьков: НТМТ, ХНАГХ, 2009. – 276 с.
5. Самойленко Н.И. Аналитический метод расчёта функциональной надёжности трубопроводных сетей // Методические вопросы исследования больших систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – Вып. 61. – С. 379-386.
6. Самойленко Н.И., Костенко А.Б., Сенчук Т.С., Гавриленко И.А., Лобан А.В. Адекватность моделей функциональной надёжности трубопроводных систем. – Х.: «НТМТ», ХНАГХ, 2009. – 115 с.

Получено 19.06.2013