

# Анализ надежности газоснабжения потребителей природного газа на объектах ОАО "ГИПРОГАЗЦЕНТР"

**Викторова В.С.**

Институт проблем управления  
им. В.А.Трапезникова РАН  
Профсоюзная 65, Москва,  
Россия  
*ray@ipu.rssi.ru*

**Наместников Г.И.**

ОАО "ГИПРОГАЗЦЕНТР"  
Алексеевская, 26,  
Нижний Новгород, Россия  
*otxr@ggc.nnov.ru*

**Репин Д.Г.**

ОАО "ГИПРОГАЗЦЕНТР"  
Алексеевская, 26,  
Нижний Новгород, Россия

**Свердлик Ю.М.**

ОАО "ГИПРОГАЗЦЕНТР"  
Алексеевская, 26,  
Нижний Новгород, Россия  
*sverdlik@ggc.nnov.ru*

**Спиридович Е.А.**

ОАО "ГИПРОГАЗЦЕНТР"  
Алексеевская, 26,  
Нижний Новгород, Россия

**Степанянц А.С.**

Институт проблем управления  
им. В.А.Трапезникова РАН  
Профсоюзная 65, Москва,  
Россия  
*lfvrk@ipu.rssi.ru*

## Аннотация

Рассматриваются методы моделирования надежности и технической эффективности сложных систем, к классу которых относятся системы газоснабжения. Приведена краткая классификация моделей и методов "надежностного" анализа систем. Обсуждаются методы декомпозиции и агрегирования статических и динамических моделей, пример моделирования объектов газоснабжения, проектируемых в ОАО «ГИПРОГАЗЦЕНТР»

Системы газоснабжения обладают рядом особенностей функционирования, отказов, восстановления, учет которых в "надежностных" моделях анализа требует применения (и развития) практически всех основных методов теории надежности, а также методов моделирования эффективности газоснабжения при условии существования отказов, приводящих к снижению производительности системы газоснабжения. Так, при возникновении отказов на магистральных газопроводах (МГ) и/или компрессорных станциях (КС) функционирование всей системы газоснабжения продолжается, но с пониженными уровнями эффективности газоснабжения. Более того, некоторые виды и наборы отказов приводят к возникновению аварийных событий, когда процессы восстановления уже заключаются не столько в восстановлении отказавшего оборудования, сколько в устранении самой аварии и её последствий. Да и анализ эффективности функционирования всей системы газоснабжения при авариях может заключаться не только в учете неработающего оборудования. "Надежностные" модели для систем с несколькими уровнями эффективности функционирования, уровнями опасностей в литературе называют многоуровневыми.

В многоуровневых моделях функционирования систем среднее (по уровням) значение интегральной эффективности  $E(0, t)$  на интервале  $(0, t)$  может быть представлено так:

$$E(0, t) = \sum_i \int_0^t Pr_i(t) h_i dt + \sum_{i,j} \int_0^t \omega_{i,j}(t) h_{i,j} dt, \quad (1)$$

где  $Pr_i(t)$  – вероятность застать систему в момент  $t$  в  $i$ -м состоянии;

$\omega_{i,j}$  – параметр потока переходов из  $i$ -го состояния в  $j$ -е;

$h_i$  – доход (потери) в единицу времени от пребывания системы в состоянии  $i$ ;

$h_{i,j}$  – единовременные доходы (потери) за переход.

Первый интеграл определяет среднее время пребывания системы на интервале  $(0, t)$  в каждом из состояний, умноженное на доход в единицу времени пребывания в каждом из состояний. А второй интеграл - среднее число переходов между выделенными состояниями, взвешенное доходами (потерями) от каждого перехода. Если, например, при некоторых отказах повреждается «соседнее» оборудование (например, связанное с отказавшим по технологической цепи или расположенное рядом), теряется находящийся в технологической обработке объект (изделие, вещество, информация,

...), происходит воздействие на окружающую среду, то параметр потока отказов позволит оценить потери. Известная традиционная оценка средней эффективности  $E(t)$  в момент времени  $t$  по выражению

$$E(t) = \sum_i Pr_i(t)E_i(t), \quad (2)$$

где  $E_i(t)$  – эффективность в состоянии  $i$  (в частности,  $E_i(t)$  может быть равно  $h_i$ ), в таком случае даст слишком оптимистический результат. Отметим также, что с использованием параметра потока отказов можно оценивать такой основной показатель надежности как вероятность безотказной работы на заданном интервале времени для восстанавливаемых систем, который непосредственно не может быть получен в логико-вероятностных моделях.

Модели, применяемые при исследованиях надежности систем, могут быть разделены на два класса:

- *статические*, в которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в момент времени  $t$ ;
- *динамические*, когда происходящие события, отказы рассматриваются как процессы, развивающиеся во времени.

В рамках статических моделей анализ надежности проводится следующими методами:

- метод, использующий основные формулы теории вероятностей (вероятность суммы и произведения событий, формула полной вероятности) и комбинаторики; применяется, главным образом, для последовательно-параллельных, параллельно-последовательных структурных надежностных схем и схем « $m$  из  $n$ »;
- методы, основанные на записи логических условий, интересующих исследователя функций через состояния элементов системы с последующим применением теории алгебры логики (логико-вероятностные методы, используемые в деревьях отказов, схемах функциональной целостности (СФЦ), блок-схемах надежности).

В рамках динамических моделей применяются:

- моделирование систем марковскими процессами;
- методы теории восстановления, полумарковских и регенерирующих процессов (в основном, используются асимптотические результаты либо для системы в целом, либо для отдельных резервированных звеньев);
- статистическое имитационное моделирование (Монте Карло моделирование)

Классические статические модели для восстанавливаемых систем позволяют рассчитывать лишь дифференциальные (мгновенные) показатели надежности, определяемые в момент времени  $t$  (коэффициент готовности, параметр потока отказов, средняя эффективность в момент времени  $t$ ). Никаких особенностей функционирования, отказов, восстановления они не позволяют учитывать, а учитывают лишь структурное нагруженное резервирование, при независимости отказов, восстановления.

Динамические модели позволяют вычислять все основные показатели надежности невозстанавливаемых и восстанавливаемых систем - мгновенные, интервальные (вероятность безотказной работы (отказа) на интервале времени), независимые от времени стационарные показатели (средняя наработка между отказами, среднее время простоя...). Практически все основные особенности, приводящие к зависимостям в отказах, восстановлении могут быть отражены в динамических моделях. Укажем на некоторые из них, присущие для систем газоснабжения. Помимо многоуровневости функционирования и отказов, имеет место несовместность разных видов отказов элементов и системы, последовательность возникновения отказов разных видов, особенно при моделировании

функционирования с учетом противоаварийных, блокировочных систем, произвольная нагруженность резерва в КС, временное резервирование, обусловленное, например, наличием промежуточных накопителей, ограничения на число ремонтных бригад, ЗИП. Конечно, не все эти особенности обязательно требуется учитывать во всех случаях выполнения проектных работ. Так, при обосновании инвестиций, эскизном проектировании возможен укрупненный “надежностный” анализ с использованием классических логико-вероятностных методов. Задача адекватного моделирования надежности систем сложной структуры, к которым относятся системы газоснабжения, решается только с помощью специализированных программных средств. Причем для преодоления катастрофического роста размерности модели, необходимо проводить декомпозицию системы (структурную, логическую). Для оценки характеристик надежности частей системы, выделяемых при декомпозиции, может потребоваться применение различных расчетных методов. Среди методов оценки показателей надежности систем наиболее адекватны по поставленным задачам методы теории марковских процессов, статистического имитационного моделирования. Эти методы хорошо проработаны и покрывают большинство задач анализа надежности, дополняя друг друга с точки зрения учета специфических факторов надежностной модели. Аналитические марковские модели надежности являются более предпочтительным выбором при анализе высоконадежных систем. Однако здесь возникают известные проблемы размерности (рост пространства состояний модели и связей между состояниями). Вычислительные мощности современных компьютеров позволяют решить часть проблемы, связанную со сложностью численного решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений большой размерности, порождаемых марковскими графами. Однако другая (эргономическая) часть этой проблемы, а именно, трудность входного описания модели и определения ее параметров человеком, остается. В самом деле, быстрдействие, объемы оперативной памяти, средства динамического распределения памяти, присутствующие в современных языках программирования, позволяют легко решать системы уравнений с тысячами и более неизвестных даже на современных персональных компьютерах и ноутбуках, не говоря уже о крупномасштабных специализированных вычислительных кластерах. Для человека же построение марковского графа с тысячей вершин является чрезвычайно трудной задачей. Здесь не помогают даже самые совершенные графические редакторы, внедренные в современное ПО анализа надежности (Relax, Isograph. . .). Более компактным и менее трудоемким способом задания моделей надежности являются схемы функциональной целостности (СФЦ) и деревья отказов (ДО). Возможность представления в деревьях отказов и в схемах функциональной целостности интересующего вершинного события через промежуточные чрезвычайно существенна. Во-первых, критерии отказа системы (возникновения вершинных событий), как правило, формулируются в терминах промежуточных событий. Во-вторых, промежуточные события описывают состояние выделенных при структурной декомпозиции блоков (совокупностей элементов) системы. Рассматривая промежуточное событие в качестве конечного (для конкретного блока), можно, последовательно применяя правила построения деревьев отказов, в конечном счете, добраться до первичных (базовых) событий, каковыми являются, например, отказы элементов системы. Таким образом, имеется, по сути, возможность иерархического описания и построения модели возникновения отказов системы, наиболее выгодной в смысле трудоемкости (уход от полных переборов, присущих, например, марковским моделям) и снижения размерности задачи. Однако классические (статические) деревья отказов, имеющие только три вида логических операторов И, ИЛИ, НЕ и являющиеся визуальной интерпретацией логико-вероятностных методов, не позволяют в полной мере учесть перечисленные особенности “надежностного поведения” сложных систем. В этом случае может быть предложен подход, основанный на агрегировании статических и динамических моделей при использовании мнемоники ДО. Этот подход и был использован при анализе надежности газоснабжения потребителей природного газа на объектах, проектируемых в ОАО «ГИПРОГАЗЦЕНТР». Работы выполнялись на программном комплексе моделирования надежности и безопасности Relax Reliability Studio 2007 (США). Интегрированный многомодульный программный комплекс Relax содержит модули деревьев отказов, деревьев событий, блок-схем надежности, модуль марковского моделирования, модуль прогнозирования показателей безотказности электронных и механических средств (элементов модели), причем имеется база данных для электронного и механического оборудования, модуль анализа видов и последствий отказов и др. Практически все модули сопрягаемы и, в частности, базовое событие в дереве отказов может быть смоделировано

марковским процессом.

Так, при анализе газопровода, имеющего кольцевую топологию, сравнивались два варианта с различными диаметрами газопроводов. Для трех КС на «кольце» и пяти КС, подводящих газ к «кольцу» были построены марковские модели, учитывающие многоуровневость функционирования, ненагруженное резервирование, ограничение на число ремонтных бригад. Уровни эффективности функционирования при отказах определялись гидравлическими расчетами. Для полученных уровней строились деревья отказов, учитывающие возможные состояния КС и отказы газопроводов. Правда, учитывались только безаварийные события отказов элементов (т.е. не рассматривались возможные взрывы, пожары, часто возникающие при разрывах трубопроводов). Принципиально такие события могут быть учтены, но необходимы хотя бы согласованные исходные данные. Для моделирования было построено порядка 50 деревьев отказов, и это только для однократных и некоторых двукратных отказов. Отказами большей кратности пренебрегали, и была сделана оценка вероятности всех неучтенных кратных отказов.