

УДК 021.438

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА РИСКОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГАЗОКОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*канд. техн. наук, доц. О.Е. ШЕСТОПАЛОВА, А.Н. ВОРОНИН, Г.В. МУДРАГЕЛЬ,
канд. техн. наук, доц. В.К. ЛИПСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается решение задачи анализа рисков функционирования оборудования магистрального трубопроводного транспорта – газокompрессорной установки, находящейся в реальной эксплуатации на отечественном предприятии по транспортированию газа. Поставленная задача решалась путем идентификации рисков с применением методов экспертного анализа и функционального моделирования установки с применением универсального языка описания сложных систем методологии IDEF0, и получением количественных оценок вероятностей наступления неблагоприятных событий функционирования с использованием авторской имитационной вероятностной модели, разработанной и реализованной в среде GPSS World. Результаты исследований позволили идентифицировать три разновидности режимов отказа функционирования газокompрессорной установки и рассчитать вероятности наступления всех событий, связанных с выделенными режимами. Полученные результаты позволяют оценить негативные последствия рисков событий эксплуатации установки и выработать рекомендации по управлению рисками с целью повышения качества предоставляемых услуг по транспортировке газа.

Введение. Одним из инструментов обеспечения надежности функционирования сложных систем являются методы риск-анализа, включающие в себя идентификацию опасностей, квантификацию опасностей путем оценки рисков и разработку рекомендаций по уменьшению рисков. Как правило, в качестве количественной меры риска выступает комплексный показатель, учитывающий вероятность возникновения события, неблагоприятного с точки зрения целенаправленного функционирования системы, и величину негативных последствий этого события [1].

Задачей данного исследования являлась идентификация рисков функционирования объектов магистрального трубопроводного транспорта и оценка вероятностей наступления рисков событий в процессе функционирования этих объектов с применением разработанной и реализованной в среде GPSS World вероятностной имитационной модели.

Объект и методы исследования. Объектом исследования являлся процесс функционирования газокompрессорной установки магистрального трубопроводного транспорта. Установка представляет собой два одинаковых газоперекачивающих агрегата ГПА-16-01, находящихся в реальной эксплуатации на предприятии по транспортированию газа. В процессе эксплуатации функционирует один из агрегатов, второй находится в резерве. В случае отказа эксплуатируемого агрегата происходит подключение резервного, а отказавший агрегат подвергается ремонту для дальнейшего использования его в качестве резерва. Таким образом, в процессе непрерывной эксплуатации газокompрессорной установки оба газовых газоперекачивающих агрегата (далее – ГПА1 и ГПА2) функционируют в режиме периодических отказов с заменой отказавшего оборудования на резервное и восстановлением (ремонтом) отказавшего оборудования для последующего резервирования.

Для поэтапного решения задачи исследования использовались следующие методы:

- функциональное моделирование структуры процессов функционирования газокompрессорной установки с применением методологии IDEF0 [2, 3] и экспертный анализ реальных эксплуатационных показателей газокompрессорной установки;
- имитационное вероятностное моделирование объекта исследования и статистическая обработка результатов модельных экспериментов в среде GPSS World [4].

Идентификация рисков и постановка задачи оценки рисков. Первоначальным и ответственным этапом анализа риска является идентификация опасностей. Существующим методам идентификации присуща доля субъективизма, при этом не выявленные этапы проведения процедуры идентификации опасности в дальнейшем, естественно, не подлежат рассмотрению и учёту. Нужно подчеркнуть, что в отрасли магистрального трубопроводного транспорта опасности могут возникать на стадиях сооружения, эксплуатации, ликвидации. На каждой из этих стадии может происходить зарождение опасностей и переход от одной стадии к другой. В рамках одной стадии также может происходить зарождение опасностей и переход от одного процесса к другому. Из этого следует, что при проведении оценки безопасности

одной из задач является выработка стратегии, которая бы позволяла выявлять исчерпывающие перечни опасных факторов, приводящих к возникновению опасностей.

Идентификация может осуществляться различными методами.

Задачу идентификации и описания процессов, влияющих на безопасную деятельность предприятия магистрального трубопроводного транспорта, можно решать с использованием метода моделирования. В данном случае удобно использовать методологию функционального моделирования структуры процессов IDEF0 [5], которая позволяет при составлении модели деятельности предприятия магистрального трубопроводного транспорта использовать процессный и системный подходы.

В настоящее время методология IDEF0 входит в состав общей методологии IDEF, включающей в себя ряд частных методологий моделирования различных аспектов сложных систем, в том числе:

IDEF1 – информационное моделирование;

IDEF1X – моделирование данных;

IDEF3 – моделирование «потоков» процессов и др. [5].

Методология функционального моделирования уже нашла широкое применение. Например, в США она принята в виде федерального стандарта FIPS 183, в России – в виде рекомендаций по стандартизации Р 50.1.28-2001, в Беларуси – в виде методических рекомендаций ТК РБ 4.2-МР-05-2002, оказывающих помощь в построении моделей на базе IDEF0.

В основе методологии IDEF0 лежит универсальный графический язык моделирования систем, позволяющий ограниченными набором структурных примитивов и связей описывать иерархию процессов любой системы с достаточной полнотой и наглядностью. При построении модели с использованием IDEF0 применяются декомпозиция функций и связей системы глубиной, как правило, не более 4-х уровней [2, 3]. Полученное модельное описание в дальнейшем используется для анализа процессов с целью определения путей обеспечения безопасности и надежности, уточнения распределения полномочий и ответственности и т.п.

Применение методологии функционального моделирования позволит внедрить системный и процессный подходы. В результате применения системного и процессного подходов можно выделить основные процессы, которые будут способствовать наилучшему достижению желаемых результатов. Целесообразность и рациональность использования системного и процессного подходов при оценке безопасности в сфере магистрального трубопроводного транспорта обусловлены тем, что зарождение опасностей происходит при выполнении какого-либо вида работ, т.е. в процессах, а проявление опасностей связано уже с производственными объектами. При этом необходимо учитывать последовательную, а также параллельную схему расположения процессов в функциональной модели деятельности предприятия. Для каждого входа процесса изначально необходимо определить критерии и дать количественные характеристики.

Для получения вероятностей неблагоприятных событий необходимо каждый из «входов» преобразовать таким образом, чтобы каждому «входу» можно было назначить количественные значения натуральных показателей.

Процессы, связанные с функционированием ГПА, и процессы с преобразованными «входами», записанные при помощи языка функционального моделирования, представлены на рисунке 1.

Для параметризации функциональной модели был осуществлен экспертный анализ, в результате которого получены следующие данные:

- случайное время наступления отказа ГПА1 и ГПА2 можно считать распределенным по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, составляющим 145,83 суток;
- случайное время подключения резервного ГПА имеет равномерный тип распределения и составляет 25 ± 5 минут;
- случайное время ремонта отказавшего ГПА имеет равномерный тип распределения и составляет $2 \pm 0,2$ суток;
- эксплуатация газокompрессорной установки осуществляется непрерывно, причем длительность одной рабочей смены обслуживающего персонала составляет 12 часов (0,5 суток).

Как следует из результатов функционального моделирования и экспертного анализа, очевидной причиной нарушения непрерывного режима эксплуатации газокompрессорной установки является возникновение ее простоя во время замены отказавшего ГПА на резервный. Поэтому первоначально цель оценки рисков функционирования газокompрессорной установки была сформулирована следующим образом: определить вероятность простоя установки из-за затрат времени на подключение резерва после наступления отказа.

Реализация модели в GPSS World и анализ результатов моделирования. Основной особенностью эксплуатации газокompрессорной установки является непрерывный характер функционирования. Эксплуатируемый ГПА обслуживает непрерывный технологический поток газа, следовательно, стандартное

для GPSS World представление входного потока дискретным потоком заявок [4] в данном случае использоваться быть не может. Поэтому в процессе реализации модели были приняты следующие решения:

- рассматривать в качестве входного потока в данной системе условный непрерывный поток временных интервалов, равных длительности рабочей смены (0,5 суток);
- все события, происходящие в системе, идентифицировать не только по времени их наступления, но и по принадлежности к конкретной рабочей смене;
- считать основной характеристикой рабочей смены реальную длительность суммарного времени эксплуатации оборудования (ГПА1 и/или ГПА2).

Решение потребовало ввести следующую классификацию рабочих смен:

- *смена нормального режима*, т.е. смена, в течение которой не возникали отказы оборудования и, следовательно, реальная длительность суммарного времени эксплуатации оборудования оказалась равной номинальной длительности смены (0,5 суток);
- *смена режима отказа*, т.е. смена, в течение которой имел место отказ ГПА и время простоя, связанное с заменой отказавшего ГПА на резервный, и, следовательно, реальная длительность суммарного времени эксплуатации оборудования оказалась меньше номинальной длительности смены.

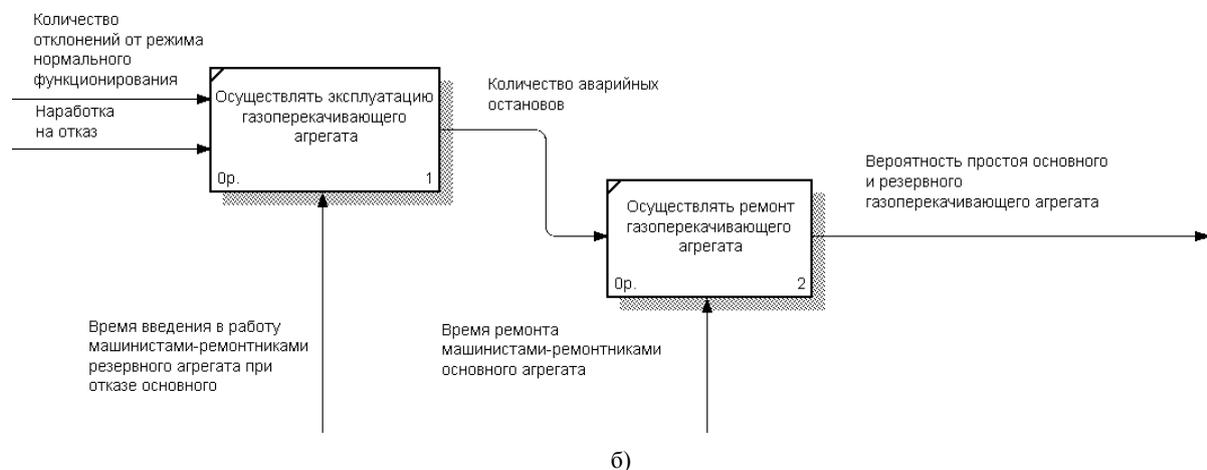
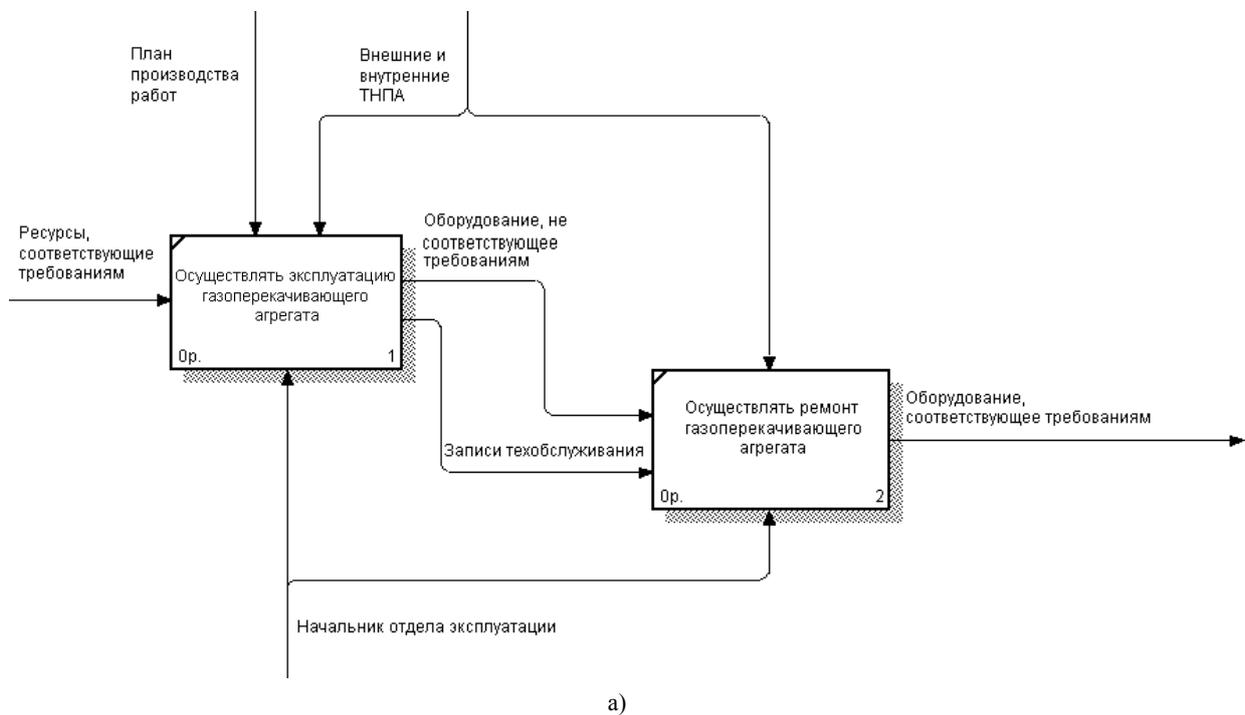


Рис. 1. Процессы, связанные с функционированием ГПА, записанные при помощи языка функционального моделирования

В процессе моделирования в GPSS World выяснилась необходимость отдельного рассмотрения и, соответственно, отдельной реализации в имитационной статистической модели двух типов смен режима отказа. Различие типов обусловлено следующими особенностями наступления отказов. В *режиме отказа первого типа* отказ основного ГПА и подключение резерва происходит в течение одной рабочей смены. Такая ситуация для случая, когда основным является ГПА1, а после его отказа подключается и используется резервный ГПА2, приведена на рисунке 2.

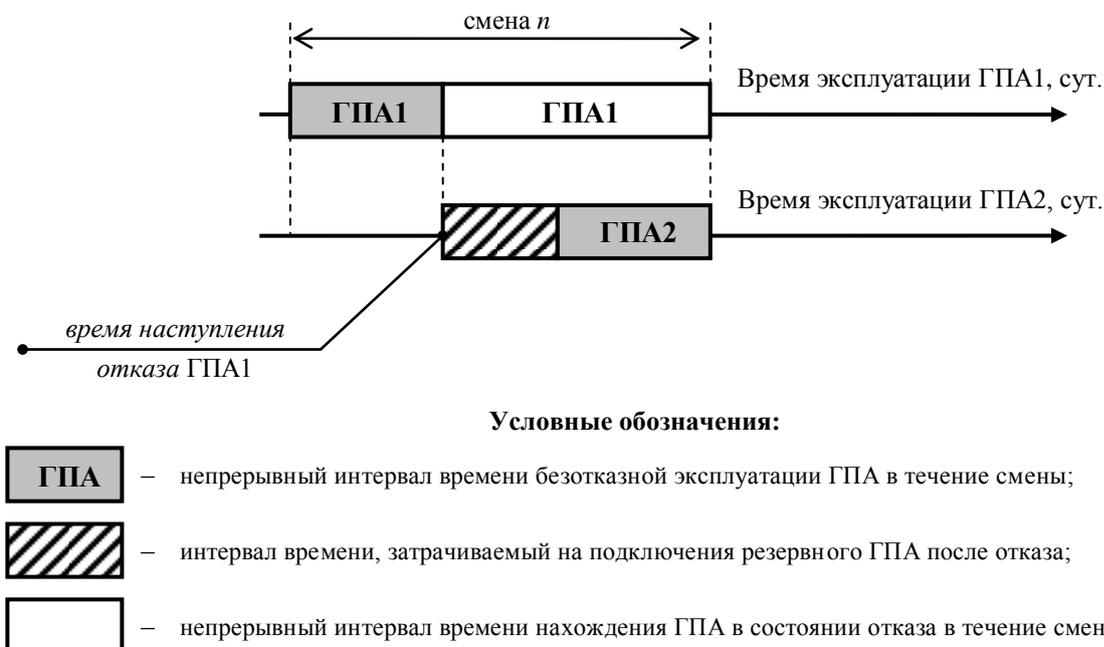


Рис. 2. Эксплуатация ГПА в режиме отказа первого типа

Как видно из ленточного графика, представленного на рисунке 2, в режиме отказа первого типа подключение резерва успевает завершиться в течение одной рабочей смены, т.е. при определении реальной длительности текущей смены время подключения резерва вычитается из ее номинальной длительности.

В *режиме отказа второго типа* отказ наступает во время текущей смены, но подключение резерва не успевает завершиться до конца смены, т.е. завершение подключения происходит уже в следующей смене. Такая ситуация для случая, когда основным является ГПА1, а после его отказа подключается и используется резервный ГПА2, приведена на рисунке 3.

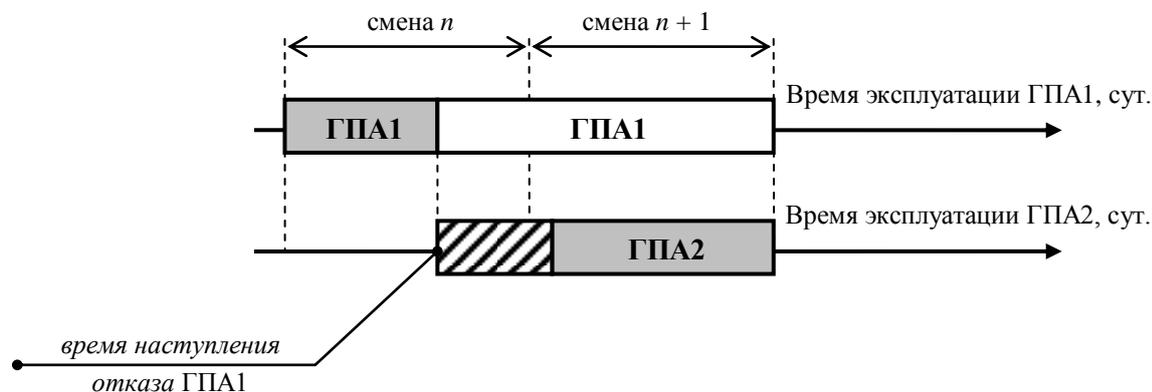


Рис. 3. Эксплуатация ГПА в режиме отказа второго типа

В этом случае для смены n , во время которой наступает отказ, фиксируется реальная длительность непрерывного периода эксплуатации ГПА1, имевшая место на момент наступления отказа, а реальная длительность следующей смены ($n + 1$) определяется вычитанием из номинальной длительности времени завершения подключения резерва.

Рассмотренные решения потребовали детализировать цель оценки рисков функционирования газокompрессорной установки следующим образом: определить вероятности наступления в процессе эксплуатации установки следующих событий:

- простоя установки из-за затрат времени на подключение резерва после наступления отказа;
- отказа каждого ГПА с завершением подключения резерва в течение текущей рабочей смены (отказа первого типа);
- отказа каждого ГПА с завершением подключения резерва в течение следующей рабочей смены (отказа второго типа);
- начала смены с задержкой на время остаточной работы по подключению резерва после отказа ГПА в предыдущей смене.

Для задания начальных условий моделирования были приняты предположения о том, что момент начала моделирования совпадает с запуском ГПА1, а ГПА2 находится в резерве, и оба ГПА имеют на момент начала моделирования нулевое значение времени наработки на отказ. Также приняли, что после ремонта отсчет времени наработки на отказ для ГПА начинается заново, а это время имеет тот же тип распределения и параметры, что и время наработки на отказ нового ГПА. Очевидно, что такое предположение является приближением, однако на момент реализации описываемой версии модели авторы не располагали экспертными данными, которые бы позволили более точно определить характеристики распределения времени наработки на отказ оборудования после одно- и многократного восстановления.

При проведении модельных экспериментов с использованием реализованной в среде GPSS World число прогонов модели выбиралось на несколько порядков больше, чем возможное время реальной эксплуатации газокompрессорного оборудования. Это связано с необходимостью получения представительной выборки случайных величин для получения достоверных оценок вероятностей тех или иных событий в системе путем расчета частоты их наступления [6]. В данной имитационной модели один прогон соответствует одной реализации рабочей смены, поэтому для повышения точности оценок рисков выбиралось очень большое число рабочих смен.

В процессе осуществления модельных экспериментов с использованием реализованной в среде GPSS World модели была обнаружена ошибка моделирования. Начиная с 63237-го прогона модели (эквивалентно моделированию 63237-й рабочей смены с начала эксплуатации установки), в экспериментальной статистике стали фигурировать смены с расчетной модельной длительностью, превышающей 12 часов. Очевидно, что в реальных условиях такая ситуация невозможна. Единственным возможным объяснением этой ошибки является отсутствие учета неизвестного дополнительного времени простоя, которое, не будучи вычтено из номинальной длительности смены, ошибочно увеличивало длительность следующих, что приводило к накоплению суммарной погрешности моделирования в определении длительности смен.

Анализ сложившейся ситуации потребовал выдвижения гипотезы о возможности наступления в системе *отказа третьего типа*, или *двойного отказа*, состоящего в том, что отказ эксплуатируемого ГПА возникает, когда ремонт второго ГПА еще не завершен, т.е. в системе отсутствует резерв, готовый к использованию. В этом случае время простоя складывается из двух интервалов: времени ожидания завершения ремонта и времени, затрачиваемого на подключение резерва. Отсутствие предположений о возможности такого отказа в первоначальной концепции моделирования объясняется тем, что математическое ожидание времени наступления отказа (145,83 сут.) существенно больше математического ожидания времени ремонта (2 сут.). По этой причине эксперты такой режим отказа даже не рассматривали. Однако, как показывает анализ результатов моделирования, такая ситуация возможна, хотя и имеет очевидно низкую вероятность, значение которой можно грубо оценить по первому случаю возникновения ошибки моделирования как $1/63237 = 1,581 \cdot 10^{-5}$.

Необходимость модельной реализации отказа третьего типа потребовало детализации классификации смен режима отказа за счет дополнительного введения следующих типов:

- *смена полного простоя*, имеющая нулевую длительность интервала эксплуатации ГПА, т.е. смена, на момент начала которой ни одного исправного ГПА в системе не было и/или в течение которой завершение подключения какого-либо из ГПА не состоялось (рис. 4);

- *смена неполного простоя*, в течение которой имел место простой, общее время которого составляет сумму длительностей двух интервалов: времени ожидания завершения ремонта одного из двух неисправных ГПА и времени, затрачиваемого на подключение отремонтированного ГПА.

К сменам неполного простоя относятся смены, начавшиеся с двойного отказа, в течение которых был завершен ремонт одного из ГПА и осуществлено его подключение в качестве восстановленного резерва. Также смена такого типа имеет место, если после подключения резервного ГПА его отказ наступа-

ет еще до завершения текущей смены и при неустранимом отказе второго ГПА, т.е. смена, завершающаяся состоянием двойного отказа. Во всех случаях длительность интервала времени эксплуатации оборудования в течение смены неполного простоя вычисляется вычитанием из номинальной длительности суммы времени простоя по обеим причинам (рис. 5, а; 5, б).

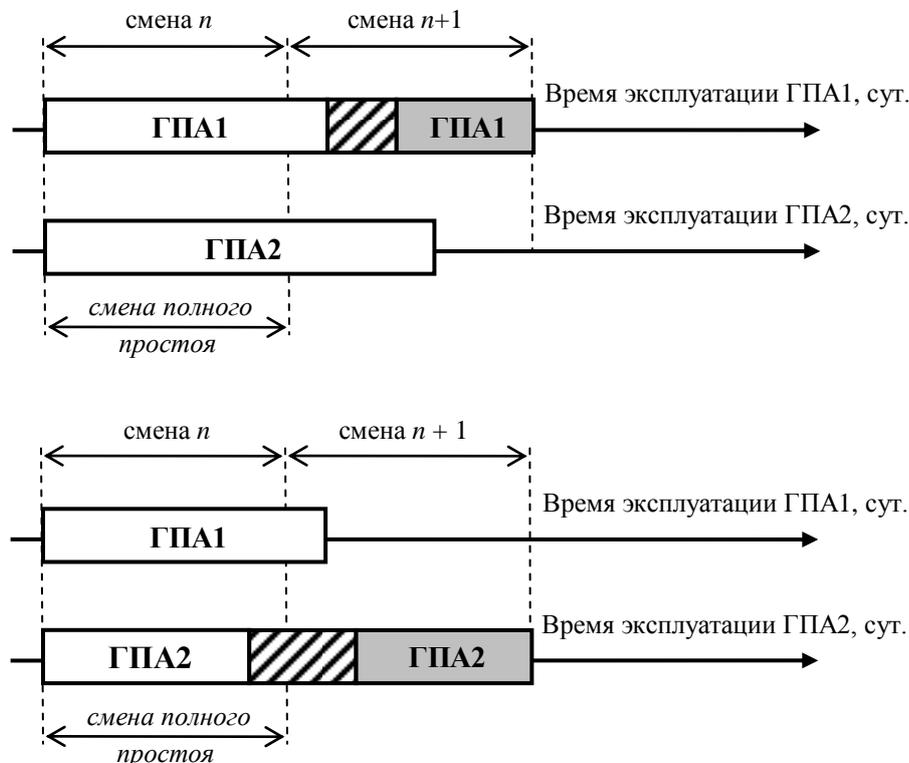


Рис. 4. Возникновение смен полного простоя в процессе эксплуатации ГПА

Оценка рисков по результатам моделирования и выводы. Расчет вероятностей неблагоприятных событий функционирования газокompрессорной установки осуществлялся по формуле: $R = n/N$, где n – число рабочих смен, в течение которых имело место возникновение неблагоприятных событий; N – общее число рабочих смен, равное числу прогонов имитационной модели. Для обеспечения достоверной оценки вероятностей событий, связанных с отказом третьего типа, число прогонов было выбрано равным 410 000. Данное число прогонов обеспечивает возникновение некоторого числа отказов со всеми возможными разновидностями таких событий при приемлемом времени вычислительного эксперимента.

Анализ результатов имитационного моделирования, полученных в GPSS World, показал, что из 410 000 рабочих смен 15 оказались сменами полного отказа. В течение 210 411 смен эксплуатировался ГПА1, из них 209 690 смен оказались сменами нормального режима. В течение 673 смен возникал отказ первого типа, в течение 15 смен – отказ второго типа, в течение 11 смен – отказ третьего типа. В сменах отказа третьего типа в 2-х случаях имела место смена неполного простоя, завершающаяся двойным отказом, а в 9-ти случаях на момент отказа ГПА1 агрегат ГПА2 еще находился в ремонте (смена, начинающаяся с двойного отказа). Еще 22 смены начались с задержкой на время завершения подключения ГПА1 после отказа ГПА2. На момент завершения моделирования ГПА1 был исправен и находился в резерве.

В оставшееся время, т.е. в течение 199 589 смен, эксплуатировался ГПА2, 198 852 из них оказались сменами нормального режима. В течение 670 смен возникал отказ первого типа, в течение 22 смен – отказ второго типа, в течение еще 7 смен – отказ третьего типа, причем все 7 смен отказа третьего типа для ГПА2 начались с двойного отказа. Еще 15 смен начались с задержкой на время завершения подключения ГПА2 после отказа ГПА1. На момент завершения моделирования ГПА2 был исправен и находился в эксплуатации.

Таким образом, общая вероятность простоя газокompрессорной установки из-за затрат времени на подключение резерва после наступления составляет $((673 + 15 + 11) + (670 + 22 + 7))/410000 = 0,00341$, а вероятность возникновения смены полного простоя равна $15/410000 = 0,3658 \cdot 10^{-4}$. Как видно, эта вероятность оказалась больше, нежели предполагалось по результатам предварительной приближенной

оценки, но вместе с тем уточненную величину также можно считать пренебрежимо малой. Следовательно, рекомендовать какие-то специальные меры к уменьшению риска возникновения смен полного простоя нецелесообразно. Расчетные показатели прочих рисков функционирования приведены в таблице.

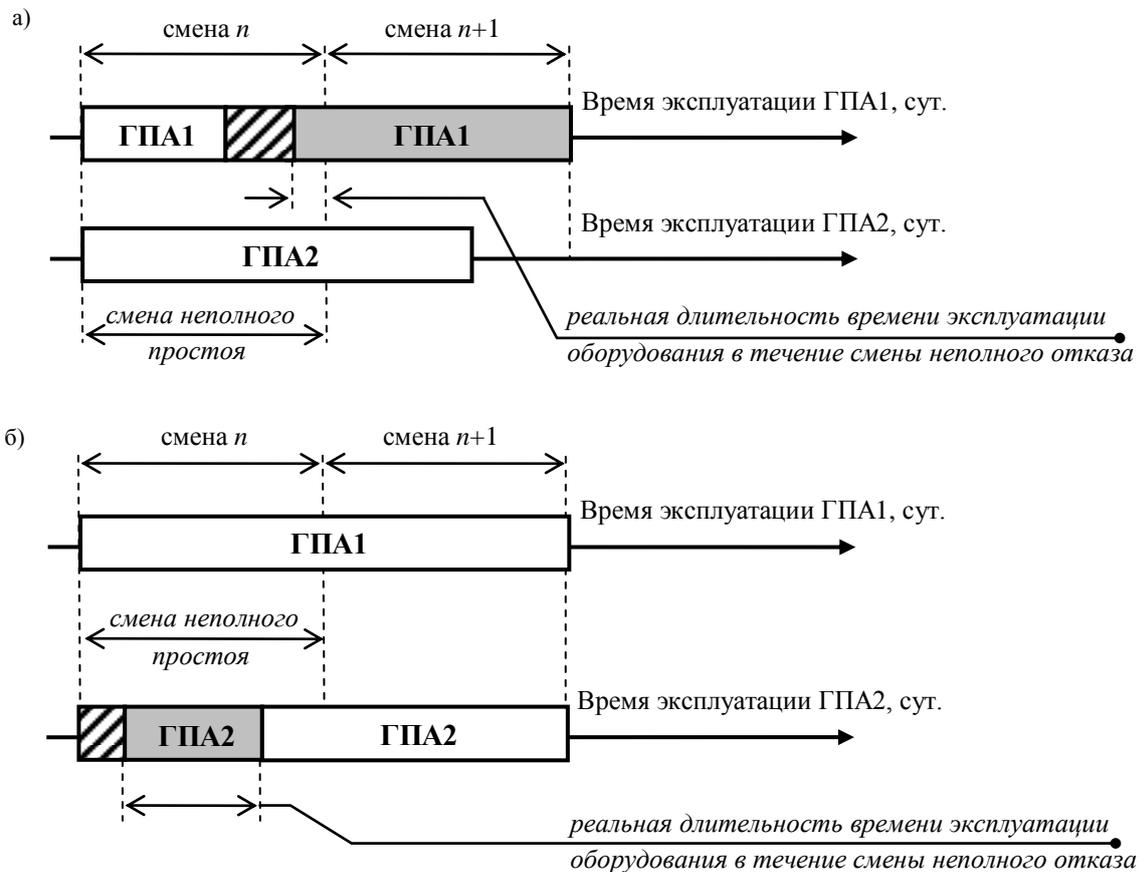


Рис. 5. Возникновение смен неполного простоя в процессе эксплуатации ГПА

Расчет показателей рисков функционирования газокompрессорной установки

Показатель риска	ГПА1	ГПА2
1. Вероятность отказа ГПА в течение рабочей смены	$699/210411 = 0,0033$	$698/199589 = 0,0035$
2. Вероятность отказа ГПА с завершением подключения резерва в течение текущей рабочей смены (отказ первого типа)	$673/210411 = 0,0032$	$670/199589 = 0,0034$
3. Вероятность отказа ГПА с завершением подключения резерва в течение следующей рабочей смены (отказ второго типа)	$15/210411 = 0,712 \cdot 10^{-4}$	$21/199589 = 1,052 \cdot 10^{-4}$
4. Вероятность начала смены с задержкой на время остаточной работы по подключению резерва после отказа ГПА в предыдущей смене	$22/210411 = 1,046 \cdot 10^{-4}$	$15/199589 = 0,752 \cdot 10^{-4}$
5. Вероятность эксплуатации ГПА в течение смены неполного простоя, начинающейся с двойного отказа в режиме отказа третьего типа	$3/210411 = 0,143 \cdot 10^{-4}$	$2/199589 = 0,100 \cdot 10^{-4}$
6. Вероятность эксплуатации ГПА в течение смены неполного простоя, завершающейся двойным отказом в режиме отказа третьего типа	$5/210411 = 0,238 \cdot 10^{-4}$	$5/199589 = 0,250 \cdot 10^{-4}$

Кроме показателей риска, по результатам имитационного моделирования был произведен статистический анализ длительности рабочих смен. Гистограмма распределения реальной длительности рабочих смен, в течение которых случался отказ ГПА или имел место простой из-за затрат времени на подключение резерва, с таблицей частотности попадания значения табулируемого параметра в заданные интервалы, полученная встроенными средствами GPSS World, приведена на рисунке 6.

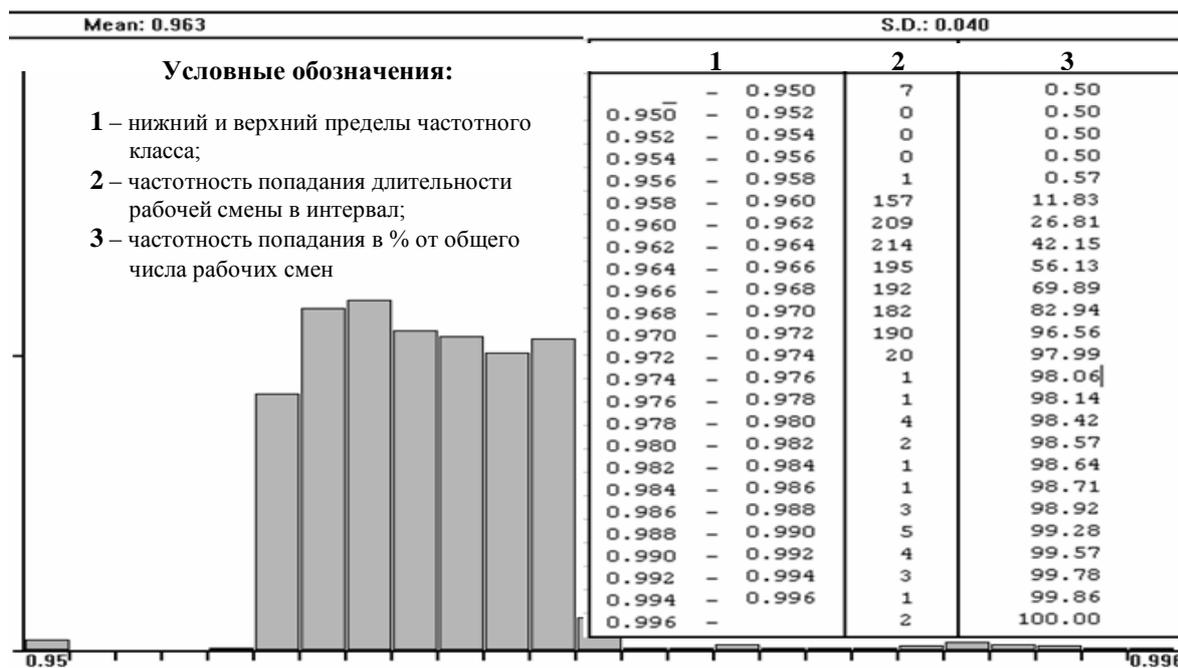


Рис. 6. Гистограмма распределения реальной длительности суммарного времени эксплуатации оборудования в течение рабочих смен режимов отказа

Как видно из таблицы, приведенной на рисунке 6, реальная длительность смены, равная сумме времени безотказной работы оборудования, для пяти смен режимов отказа не превысила 0,95 от номинальной длительности смены (0,5 сут.), что составляет 0,5 % от общего числа смен режимов отказа. Для одной смены это значение попало в интервал от 0,956 до 0,958 номинальной длительности (0,57 – 0,5 = 0,07 % соответственно), для 157 смен – от 0,958 до 0,960 (11,26 %) и т. д. Среднее значение реальной длительности смен режимов отказа оказалось равной 0,963 от номинальной длительности смены (см. значение Mean на рисунке 6), а среднеквадратическое отклонение этой величины – 0,040 (см. значение S.D. на рисунке 6).

Закключение. Идентификация рисков, выполненная методами экспертного анализа и функционального моделирования в терминах IDEF0, а также оценка рисков функционирования газокompрессорной установки с использованием разработанной и реализованной в среде GPSS World имитационной вероятностной модели позволили количественно оценить вероятности наступления в процессе эксплуатации установки всех разновидностей возможных неблагоприятных событий (отказов). Полученные результаты предполагаются к использованию заказчиком данного исследования для проведения экспертного анализа значимости выявленных рисков с учетом негативных последствий, в том числе финансовых потерь, и выработки рекомендаций по управлению рисками, что позволит повысить качество предоставляемых услуг по транспортировке газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов: РД 03-418-01 // Стройконсультант [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (2,5Гб). – М.: Госстрой Рос. Фед., 2002. – 4 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. IDEF0. FIPS Integration Definition for Function Modeling (IDEF0): Federal Information Processing Standards Publication 183, Computer Systems Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1993.
3. Методика и порядок работ по определению, классификации и идентификации процессов. Описание процессов на базе методологии IDEF0TK: метод. рекомендации Респ. Беларусь 4.2-МР-05-2002. – Минск: БелГИСС, 2002. – 45 с.
4. Боев, В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учеб. пособие / В.Д. Боев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.
5. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология описания сети процессов: моногр. / П.С. Серенков, А.Г. Курьян, В.Л. Соломахо. – Минск: БНТУ, 2006. – 484 с.
6. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Минск: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.

Поступила 30.11.2009