

## Определение вероятности обеспечения номинального режима работы магистрального продуктопровода с учетом процесса старения перекачивающих агрегатов

**Анатолий В. Карманов**, кафедра «Автоматизация производственных процессов» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия, e-mail: abkar2007@yandex.ru

**Дмитрий А. Росляков**, ОАО «АК «Транснефтепродукт», Москва, Россия, e-mail: karter.diman@yandex.ru

**Антон С. Телюк**, кафедра «Автоматизация производственных процессов» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия



Анатолий В.  
Карманов



Дмитрий А.  
Росляков



Антон С. Телюк

**Резюме. Цель.** В статье приводится метод и формула для расчета вероятности обеспечения номинального режима работы магистрального продуктопровода (МП) – далее по тексту функции готовности МП – с учетом процесса старения насосных агрегатов при нормативной периодической стратегии их обслуживания. Эта функция готовности определяется в следующих предположениях: 1. МП состоит из двух основных частей: пассивная часть – высоконадёжная линейная часть; активная – насосные станции, реализующих номинальный режим перекачки продукта. МП может содержать в своём составе любое конечное число насосных станций. 2. Каждая насосная станция включает в себя систему магистральных насосных агрегатов (МНА) – активных элементов станции, контрольно-измерительные приборы и автоматику, трубопроводную и запорную арматуру и иное необходимое технологическое оборудование. Система МНА является той частью насосных станций, которая обеспечивает номинальный режим перекачки нефтепродукта и, как правило, состоит из четырёх однородных МНА. 3. Трубопроводная обвязка системы МНА такова, что позволяет вывести каждый рабочий агрегат в резерв, а на его место поставить любой резервный агрегат. 4. Необходимый номинальный режим работы МП определяется гидравлическими и экономическими расчетами, в результате которых указывается необходимый режим работы каждой насосной станции. При этом для каждой станции указывается количество МНА, которые должны находиться в рабочем состоянии, а оставшиеся МНА либо в ненагруженном резерве, либо в восстановительном ремонте, обусловленном нормативной периодической стратегией обслуживания. Таким образом, номинальный режим работы МП обеспечивается соответствующими номинальными режимами насосных станций, которые, в части перекачивающих агрегатов на станциях, определяются числом работающих МНА. Анализ статистического материала по отказам насосных агрегатов, обслуживаемых по нормативной периодической стратегии, позволяет выявить интенсивности отказов агрегатов на каждом последовательном интервале времени между капитальными ремонтами. В частности, интенсивности отказов возрастают на рассматриваемых интервалах, что указывает на процесс старения агрегатов по мере их эксплуатации. Далее приводится метод расчета функции готовности для любой перекачивающей станции, входящей в состав МП. При этом выписываются начальные условия и дифференциальные уравнения для нахождения функции готовности по каждой системе МНА на насосных станциях, полученные с использованием схемы «гибели и размножения». Основные результаты расчетов на каждом из трёх последовательных интервалов между капитальными ремонтами приводятся в виде графиков, из которых видно влияние процесса старения агрегатов на значения функции готовности системы МНА на насосной станции: значения производных от функции готовности последовательно уменьшаются для соответствующих времён, отсчитываемых от начала проведения каждого очередного капитального ремонта. Приводится также выражение для расчета функции готовности МП, имеющего в своём составе несколько насосных станций. Результаты расчета указанной функции готовности могут служить обоснованием для модернизации нормативной периодической стратегии с целью увеличения не только вероятности обеспечения номинального режима работы МП, но и иных технико-экономических показателей функционирования систем МНА, в частности, показателей энергосбережения. Например, указывается, что некоторые виды неперiodических стратегий обслуживания МНА, построенные на основе нормативной стратегии, могут значительно увеличить значения указанных показателей.

**Ключевые слова:** магистральный продуктопровод, насосный агрегат, надежность, процесс старения, функция готовности, вероятность обеспечения номинального режима работы.

**Формат цитирования:** Карманов А.В., Росляков Д.А., Телюк А.С. Определение вероятности обеспечения номинального режима работы магистрального продуктопровода с учетом процесса старения перекачивающих агрегатов // Надежность. 2016, №2. С. 39-42. DOI: 10.21683/1729-2640-2016-16-2-39-42

## 1. Введение

Магистральный продуктопровод (МП) представляет собой сложную, развивающуюся техническую систему, предназначенную для бесперебойной и плановой поставки нефтепродукта потребителям в течение всего времени эксплуатации продуктопровода. МП состоит из двух основных частей: пассивной – трубопроводной линейной части – и активной части, включающей насосные станции, реализующие номинальный режим перекачки продукта.

Каждая насосная станция включает в себя систему магистральных насосных агрегатов (система МНА) – активных элементов станции, контрольно-измерительные приборы и автоматику, трубопроводную и запорную арматуру и иное необходимое технологическое оборудование. Система МНА является основной активной частью насосных станций, обеспечивающей номинальный режим перекачки нефтепродукта, и состоит из  $n$  однородных МНА с соответствующей трубопроводной обвязкой, где  $n$ , как правило, равно 4. Трубопроводная обвязка системы МНА такова, что позволяет вывести каждый рабочий агрегат в резерв, а на его место поставить любой резервный агрегат. Необходимый номинальный режим работы МП определяется гидравлическими и экономическими расчетами, в результате которых указывается необходимый режим работы каждой насосной станции. При этом для каждой  $v$ -ой станции указывается количество  $m_v$  МНА, которые должны находиться в рабочем состоянии, а остальные  $(n - m_v)$  МНА – либо в ненагруженном резерве, либо в восстановительном ремонте, где  $v = 1, \dots, N$ ,  $N$  – количество насосных станций в составе МП. Таким образом, номинальный режим работы МП обеспечивается соответствующими режимами насосных станций и этот режим работы МП, в части работающих агрегатов на станциях, определяется следующим набором параметров:

$$(m_1, \dots, m_N). \quad (1)$$

Каждый МНА представляет собой совокупность двух основных сопряженных частей:

1) магистральный насос (МН); 2) электродвигатель (ЭД), являющийся приводом МН. МН и ЭД являются стареющим оборудованием [1, 2], характеризующимся в период эксплуатации износом своих составляющих частей и накоплением повреждений, где термин «повреждение» понимается [2] как «событие, заключающееся в нарушении исправного состояния при сохранении работоспособности». Старение МНА проявляется как в ухудшении показателей надежности МНА, так и в ухудшении его технико-экономических характеристик [3].

Для предотвращения негативных проявлений случайного процесса старения агрегату периодически проводится техническое обслуживание. Техническое

обслуживание МНА включает в себя 1) диагностический контроль и технические осмотры, а также 2) различные виды планово-предупредительных ремонтов (ППР). Это обслуживание осуществляется в соответствии с некоторым заранее утвержденным правилом – стратегией ППР. Понятно, что протекание процесса старения МНА существенно зависит от вида и содержания стратегии ППР. Все виды ремонтов, входящих в состав стратегии ППР, во многом, но не полностью устраняют негативные проявления процесса старения МНА. Поэтому представляет практический и научный интерес метод расчета вероятности  $k(m_1, \dots, m_N, t)$  обеспечения в каждый момент времени  $t$  номинального режима работы МП в условиях старения МНА. При этом считаем, что режим работы МП характеризуется набором (1).

В настоящей работе приводится один аналитический метод расчета вероятности  $k(m_1, \dots, m_N, t)$ , которую в дальнейшем будем называть функцией готовности МП.

## 2. Влияние процесса старения на интенсивность отказов МНА, обслуживаемого по периодической стратегии ППР

Периодическую стратегию  $s$  ППР МНА можно представить в следующем виде:  $s = (s_{\text{МН}}, s_{\text{ЭД}})$ , где  $s_{\text{МН}}$  – стратегия ППР магистрального насоса (МН),  $s_{\text{ЭД}}$  – стратегия ППР электродвигателя (ЭД). При этом ППР для МН и ЭД по стратегиям соответственно  $s_{\text{МН}}$  и  $s_{\text{ЭД}}$  проводятся согласованно во времени, т.е. при проведении, например, текущего ремонта для МН проводится аналогичный вид ремонта для ЭД и т.д. Каждая составляющая  $s_{\text{МН}}, s_{\text{ЭД}}$  стратегии  $s$  определяет периодичность (цикличность) проведения диагностического контроля, текущих, средних и капитальных ремонтов, а также определяет события, при которых незамедлительно проводится аварийный восстановительный ремонт (АВР), и некоторые иные характеристики обслуживания соответствующего оборудования МНА. Например, в неё могут включаться предельные времена всех видов ремонтов, иногда указывается назначенный срок службы, по истечению которого оборудование подлежит списанию, или события, при возникновении которых оборудование переводится в резерв (из резерва) и иные необходимые сведения. Формальные записи стандартных периодических (циклических) стратегий  $s_{\text{МН}}, s_{\text{ЭД}}$ , применяемых в настоящее время при обслуживании МН и ЭД, приводятся в работах [4, 5] и имеют следующий вид:

$$s_{\text{МН}} = \{\theta_{\text{кр}}, n_{\text{кр}}, n_{\text{ср}}, n_{\text{тр}}^{\text{МН}}, n_{\text{дк}}, C_{\text{кр}}^{\text{МН}}, C_{\text{ср}}^{\text{МН}}, C_{\text{тр}}^{\text{МН}}, C_{\text{авр}}^{\text{МН}}\},$$

$$s_{\text{ЭД}} = \{\theta_{\text{кр}}, n_{\text{кр}}, n_{\text{тр}}^{\text{ЭД}}, C_{\text{кр}}^{\text{ЭД}}, C_{\text{тр}}^{\text{ЭД}}, C_{\text{авр}}^{\text{ЭД}}\},$$

где  $\theta_{кр}$  – цикл капитального ремонта (КР), который равен периоду времени между соседними капитальными ремонтами, определяемому по наработке МНА,  $n_{кр}$  – число циклов капитального ремонта,  $n_{ср}$  – число циклов среднего ремонта (СР) «внутри» цикла КР,  $n_{тр}^{мн}$  – число циклов текущего ремонта (ТР) МН «внутри» цикла СР,  $n_{дк}^{мн}$  – число циклов диагностического контроля МН «внутри» цикла ТР,  $n_{тр}^{эд}$  – число циклов текущего ремонта ЭД «внутри» цикла КР,  $C_{кр}^{мн}$ ,  $C_{ср}^{мн}$ ,  $C_{тр}^{мн}$ ,  $C_{авр}^{мн}$ ,  $C_{кр}^{эд}$ ,  $C_{тр}^{эд}$ ,  $C_{авр}^{эд}$  – правила и объемы работ, осуществляемых при каждом виде ремонта соответственно МН и ЭД. В частности,  $C_{авр}^{(i)}$  – правило проведения аварийно-восстановительного ремонта, в правиле  $C_{авр}^{(i)}$  указываются состав работ, осуществляемых при возникновении аварийного останова МН, и иные необходимые сведения, например, нормативы проведения АВР. Иногда в стратегии  $s = (s_{мн}, s_{эд})$  указываются следующие нормативные показатели: 1) календарное время  $t_{п}$  до списания МНА; 2) предельное время  $\theta_{п}$  по наработке МНА до его списания.

Например, основные параметры стратегии  $s$  могут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} \theta_{кр} &= 6 \cdot 10^4 \text{ час}, n_{кр} = 2, n_{ср} = 4, n_{тр}^{мн} = 1, \\ n_{тр}^{эд} &= 10, \theta_{п} = 3 \cdot \theta_{кр}, t_{п} = 2 \cdot \theta_{п}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом календарный период времени  $t_{кр}$  от начала эксплуатации МНА до его ближайшего капитального ремонта или между соседними капитальными ремонтами равен  $2 \cdot \theta_{кр}$ .

Статистический анализ влияния процесса старения на характеристики надежности МН и ЭД проведен в работах [4, 5]. В частности, там приводятся таблицы значений интенсивностей отказов МН и ЭД для каждого интервала времени между соседними восстановительными ремонтами, проводимыми в соответствии со стратегией  $s$ . Из этих таблиц следует, что за счет процесса старения средняя интенсивность отказа МНА  $\lambda_i$  на каждом интервале  $J_i = [(i-1) \cdot t_{кр}, i \cdot t_{кр}]$ , где  $i = 1, 2, 3$ , монотонно увеличивается. При этом величины  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  имеют следующие значения:

$$\lambda_1 = 3,51 \cdot 10^{-5}, \lambda_2 = 1,41 \cdot 10^{-4}, \lambda_3 = 6,50 \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

где размерность приведённых величин – 1/час.

Ниже приводится модификация известной математической модели, представленной в [6], для расчета функции готовности  $k_v(t)$  системы МНА на  $v$ -ой насосной станции с учетом старения перекачивающих

агрегатов, которые обслуживаются по периодической стратегии  $s$  с параметрами, определяемыми выражениями (2).

### 3. Определение функций готовности насосной станции и МП

В работе [6] приводится и обосновывается математическая модель расчета функции готовности  $k(t)$  системы МНА одной перекачивающей станции, где  $k(t)$  представляет собой вероятность нахождения системы из четырех идентичных МНА в момент времени  $t$  в состоянии, когда два и более МНА находятся в работоспособном состоянии. При этом считается, что на периоде  $[0, t_{п}]$  эксплуатации МНА стратегия  $s$  фиксирована и МНА не стареет, т.е. его интенсивность отказов остается постоянной на всем периоде эксплуатации. Эта математическая модель представляет собой однородный Марковский процесс, который имеет  $n+1$  состояний, где  $n = 4$ , и задается графом схемы гибели и размножения [7].

В нашем случае календарный период  $[0, t_{п}]$  эксплуатации МНА для каждой  $v$ -ой насосной станции представляется суммой трех последовательных интервалов  $J_i = [(i-1) \cdot t_{кр}, i \cdot t_{кр}]$ , на которых интенсивности отказов  $\lambda^{(i)}$  МНА различны, где  $i = 1, 2, 3$ ; при этом число агрегатов, находящихся в работоспособном состоянии на каждой  $v$ -ой насосной станции, должно быть не меньше  $m_v$  для того, чтобы обеспечить номинальный режим работы МП. Если учесть указанные особенности, то Марковский процесс, приведенный в [6], становится неоднородным процессом  $\eta_v(t)$ , ( $t \in [0, t_{п}]$ ,  $v = 1, \dots, N$ ), который определяется на каждом интервале  $J_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  однородным Марковским процессом  $\zeta_v^{(i)}(x)$ , где  $x \in [0, t_{кр}]$ . Процесс  $\zeta_v^{(i)}(x)$  задается графом схемы гибели и размножения, приведенным на рисунке 1.

На рисунке 1 каждый  $j$ -ый узел графа соответствует состоянию системы МНА, в котором  $j$  штук МНА находятся в неработоспособном состоянии,  $j = 0, 1, \dots, n$ . При этом  $\mu$  – интенсивность восстановления МНА при наличии одной ремонтной бригады,  $\lambda_i$  – интенсивность отказов МНА в интервале  $J_i$ ,  $b_j \cdot \lambda_i$  – интенсивность перехода из состояния ( $j$ ) в состояние ( $j+1$ ) системы МНА, где  $b_j = m_v$ , если  $j = 0, 1, \dots, n - m_v$ , и  $b_j = m_v - k$ , если  $j = n - m_v + k$ ,  $k = 1, \dots, m_v - 1$ .

Компоненты вектора  $a^{(i)} = [a_0^{(i)}(0), \dots, a_n^{(i)}(0)]$  начального распределения процесса  $\zeta_v^{(i)}(x)$  определяются следующим выражением:

$$a_0^{(i)}(0) = p_0^{(i)}(0, v) = 1, a_j^{(i)}(0) = p_j^{(i)}(0, v) = 0, \quad (4)$$

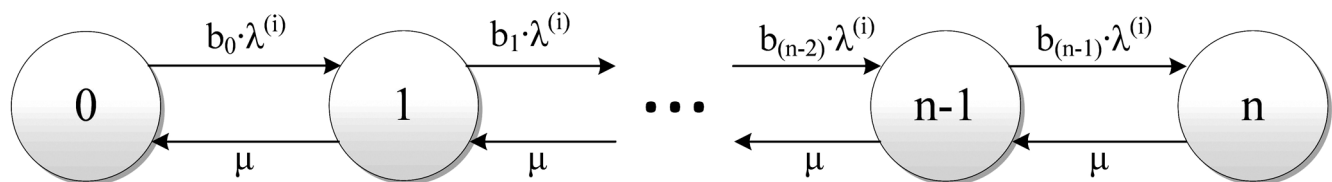


Рис. 1. Граф схемы гибели и размножения для процесса  $\zeta_v^{(i)}(x)$



где  $i = 1, 2, 3, j = 0, 1, \dots, n, p_j^{(i)}(x, v)$  – вероятность нахождения процесса  $\zeta_v^{(i)}(x)$  в состоянии  $j$  в момент времени  $x \in [0, t_{кр}], v = 1, \dots, N$ .

Для любого  $t \in [0, t_n)$  существует такой интервал  $J_i = [(i-1) \cdot t_{кр}, i \cdot t_{кр}]$ , что  $t \in J_i$ , где  $i = 1, 2, 3$ . Тогда  $t$  можно представить в виде:  $t = (i-1) \cdot t_{кр} + x, x \in [0, t_{кр})$ . При этом вероятность

$$\mathbf{P}^{(i)}(x, v) = p_0^{(i)}(x, v) + p_1^{(i)}(x, v) + \dots + p_{n-mv}^{(i)}(x, v), \quad (5)$$

представляет собой функцию готовности  $k_v(t)$  системы МНА  $v$ -ой насосной станции, т.е. справедливо равенство:

$$k_v(t) = k_v((i-1) \cdot t_{кр} + x) = \mathbf{P}^{(i)}(x, v). \quad (6)$$

Для каждого  $i = 1, 2, 3$  вероятности  $p_j^{(i)}(x, v)$  определяются решением следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dp_0^{(i)}(x, v)/dt &= -b_0 \cdot \lambda^{(i)} \cdot p_0^{(i)}(x, v) + \mu \cdot p_1^{(i)}(x, v), \\ dp_j^{(i)}(x, v)/dt &= \mu \cdot p_{j+1}^{(i)}(x, v) - (b_j \cdot \lambda^{(i)} + \mu) \cdot p_j^{(i)}(x, v) + \\ &+ b_{j-1} \cdot \lambda^{(i)} \cdot p_{j-1}^{(i)}(x, v), j = 1, \dots, n-1, \\ dp_n^{(i)}(x, v)/dt &= b_{n-1} \cdot \lambda^{(i)} \cdot p_{n-1}^{(i)}(x, v) - \mu \cdot p_n^{(i)}(x, v). \end{aligned} \quad (7)$$

Начальным условием для системы (7) является вектор начального распределения, компоненты которого определяются выражением (4).

Пусть на некоторой  $v$ -ой насосной станции  $m_v = 2$  и  $n = 4$ , где  $v \in (1, \dots, N)$ . Тогда расчет функции готовности  $k_v(t)$  на интервале времени  $[0, t_n)$  с исходными данными, определенными в выражениях (2), (3) и с  $\mu = 0,5 \cdot 10^{-2}$  (1/час), даёт результат, представленный на рисунке 2.

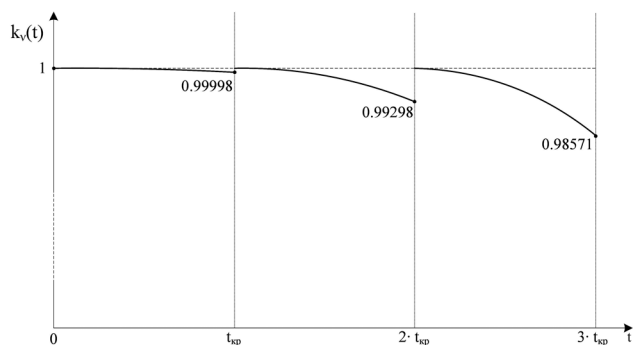


Рис. 2. График  $k_v(t)$  на интервале времени  $[0, t_n)$

Функция готовности  $k(m_1, \dots, m_N, t)$  МП, номинальный режим которого задаётся совокупностью (1), определяется (при условии статистически независимой работы насосных станций) выражением:

$$k(m_1, \dots, m_N, t) = k_1(t) \cdot k_2(t) \cdot \dots \cdot k_N(t). \quad (8)$$

#### 4. Заключение

Функция готовности  $k_v(t)$  системы МНА каждой  $v$ -ой насосной станции, где  $v = 1, \dots, N$ , входящей в состав МП, является на каждом  $i$ -ом интервале  $J_i$ , где  $i = 1, 2, 3$ ,

монотонно убывающей по времени функцией. Соответственно на каждом интервале  $J_i$  убывающей функцией является  $k(m_1, \dots, m_N, t)$  – вероятность обеспечения номинального режима работы всего МП, включающего в себя  $N$  насосных станций. При этом для любого  $v \in (1, \dots, N)$  убывание функции  $k_v(t)$  усиливается на интервале эксплуатации  $J_{i+1}$  по отношению к интервалу  $J_i$ , где  $i = 1, 2$ , что обусловливается процессом старения (накоплением нарушений) магистральных насосных агрегатов, обслуживаемых по периодической стратегии ППР. В частности, это обстоятельство может указывать на то, что непериодические стратегии ППР, нивелирующие эффект старения, могут быть эффективней ныне используемых периодических (циклических) стратегий.

#### Библиографический список

- Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. М.: Стандарты, 1990.
- Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. М.: Радио и связь, 1988.
- Карманов А.В., Росляков Д.А. Оценка основных эксплуатационных показателей надежности насосных агрегатов магистральных нефтепродуктопроводов. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, № 12, 2015, С.41- 45.
- Карманов А.В., Ларионов С.В., Росляков Д.А. Определение эксплуатационных характеристик надежности электродвигателей в составе магистральных насосных агрегатов по случайным цензурированным выборкам. НТЖ Технология нефти и газа, № 4, 2015, С. 60-65.
- Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов. М.: Изд-во Нефть и газ, 2000.
- Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.

#### Сведения об авторах

**Анатолий В. Карманов** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина.

Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 65, корпус 1, тел. + (915) 366-51-18,  
e-mail: abkar2007@yandex.ru

**Дмитрий А. Росляков** – главный специалист отдела эксплуатации ОАО «АК «Транснефтепродукт».

Россия, 115184, г. Москва, Вишняковский переулок, дом 2/36, строение 1, тел. +7 (909) 937-50-64,  
e-mail: karter.diman@yandex.ru

**Антон С. Телюк** – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Автоматизация производственных процессов» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина.

Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 65, корпус 1