

Остапюк И.И.

ООО «ИК «Машэкспорт», Киев

Математическое моделирование обслуживания элементов с сосредоточенными параметрами линейной части магистральных газопроводов

Рассмотрены вопросы оптимизации обслуживания сосредоточенных объектов (крановых узлов, переходов) на линейной части магистральных газопроводов. Разработана математическая модель оценки эффективности и выбора индивидуальных стратегий контрольно-восстановительных мероприятий сосредоточенных объектов линейной части.

Ключевые слова: магистральный газопровод, контрольно-восстановительные мероприятия, математическая модель.

Розглянуто питання оптимізації обслуговування зосереджених об'єктів (кранових вузлів, переходів) на лінійній частині магистральних газопроводів. Розроблено математичну модель оцінки ефективності та вибору індивідуальних стратегій контрольно-відновлювальних заходів зосереджених об'єктів лінійної частини.

Ключові слова: магистральний газопровід, контрольно-відновлювальні заходи, математична модель.

Необходимость отдельного рассмотрения процесса обслуживания элементов линейной части вызвана некоторыми обстоятельствами. Во-первых, сосредоточенные объекты представляют собой, как правило, технически более сложные устройства (и более дорогие), чем просто участок трубы. Во-вторых, для обеспечения их функционирования необходимо наличие тех или иных вспомогательных сооружений, систем, элементов. В-третьих, для сосредоточенных объектов линейной части характерны так называемые скрытые отказы (отказы срабатывания, функциональные отказы). Сосредоточенные объекты линейной части имеют специфику в технологии и порядке проведения восстановительных, контрольных и профилактических работ [1].

В связи с этим представляет интерес задача выбора индивидуальных стратегий контрольно-восстановительных мероприятий на элементах линейной части, оценки эффективности контрольно-восстановительных мероприятий в рамках выбранной стратегии и совместного планирования режима обслуживания линейной части и сосредоточенных объектов с целью достижения оптимальных (с точки зрения народно-хозяйственной эффективности) результатов.

С учетом схемы отказов элементов линейной части предлагаются две альтернативные стратегии обслуживания сосредоточенных объектов, которые наиболее полно описывают процесс эксплуатации магистральных газопроводов

в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и реальной практики производства.

Стратегия контрольно-восстановительных мероприятий сосредоточенных объектов линейной части характеризуется совокупностью состояний объектов обслуживания и их структурно-логическими связями.

Первая стратегия (I) контрольно-восстановительных мероприятий сосредоточенных объектов линейной части, которая называется «контроль — профилактика — ремонт», формируется следующим образом: на сосредоточенных объектах линейной части магистральных газопроводов осуществляется строго периодический контроль состояния объектов с периодом δ , соединенный с профилактическими работами общей стоимостью $Z_{\text{проф}}$; если на момент контроля объект отказал, то выполняется восстановительный ремонт в необходимом объеме стоимостью $Z_{\text{от}}$.

Как предположение принимаем абсолютную вероятность обнаружения отказов (скрытых). После каждого ремонта объект представляется вполне восстановленным. Будем учитывать, что ущерб прямо пропорционален длительности существования отказа от момента появления до момента обнаружения с удельным ущербом q . Степенная функция, описывающая процесс эволюции состояний сосредоточенных объектов линейной части в ходе обслуживания по данной стратегии, выглядит так [2]: $X(t) = \{E_1, E_2, E_3,$

$E_4, E_5\}$, где E_1 — исправное состояние объекта; E_2 — контроль состояния объекта; E_3 — отказ (или равноценное состояние); E_4 — восстановительный ремонт; E_5 — профилактика.

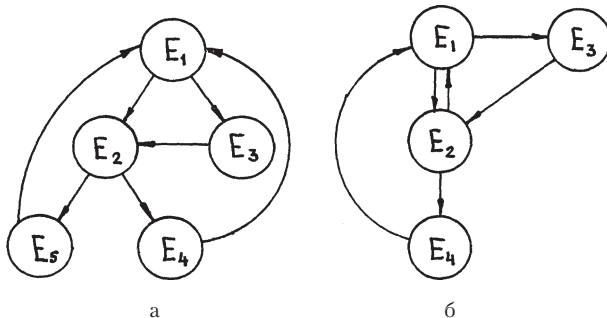
Граф переходов состояний сосредоточенных объектов линейной части в ходе контрольно-восстановительных мероприятий по стратегии «контроль — профилактика — ремонт» представлен на рисунке, а.

В случае, когда нет необходимости в выполнении каких-либо дополнительных профилактических работ, целесообразно следовать второй стратегии (II) «контроль — ремонт», которая формулируется следующим образом [3]: проводятся строго периодические проверки состояния сосредоточенных объектов линейной части магистральных газопроводов стоимостью $Z_{пр}$ и вероятностью P ; если элемент трудоспособный (или признан по результатам проверки), то не проводятся никаких воздействий (до следующей проверки); если элемент признан таким, что отказал, проводится соответствующий ремонт стоимостью $Z_{рем}$. Если наличие отказа в течение времени с момента его появления до момента выявления в ходе проверки связано с какими-либо потерями, необходимо учитывать ущерб от пребывания объекта в состоянии отказа.

Процесс эволюции элемента в ходе контрольно-восстановительных мероприятий по второй стратегии определяется следующими состояниями: $X(t) = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$, где E_1 — исправное состояние объекта; E_2 — контроль состояния объекта; E_3 — отказ (или равноценное состояние); E_4 — восстановительный ремонт.

Граф переходов (рисунок, б) отражает основные состояния элементов линейной части в ходе контрольно-восстановительных мероприятий.

В качестве показателя для оценки эффективности мероприятий по контролю и восстановлению сосредоточенных объектов линейной



Графы переходов состояния элементов линейной части магистральных газопроводов в ходе контрольно-восстановительных мероприятий в стратегиях: а — «контроль — профилактика — ремонт»; б — «контроль — ремонт».

части принимаем средние суммарные удельные затраты \bar{Z}_{Σ} .

В рамках сформированной стратегии (расчетной схемы контрольно-восстановительных мероприятий) «контроль — профилактика — ремонт» (I) показатель \bar{Z}_{Σ}^I как функция от периодичности профилактических проверок δ определяется следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{\Sigma}^I(\delta) &= [Z_{\text{проф}} \bar{F}(\delta) + Z_{\text{от}} F(\delta) + \\ &+ q \int_0^{\delta} (\delta - t) dF(t)] / \delta = \\ &= [Z_{\text{проф}} + (Z_{\text{от}} - Z_{\text{проф}}) F(\delta) + \\ &+ q \int_0^{\delta} F(t) dt] / \delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Z_{\text{проф}}$ — средние затраты на профилактические работы на элементах линейной части; $\bar{F}(\delta)$ — функция надежности (вероятность безотказной работы объекта), $\bar{F}(\delta) = 1 - F(\delta)$; $Z_{\text{от}}$ — средние затраты на восстановительные работы при ликвидации отказов и адекватных им состояний; q — удельный средний ущерб от нахождения элемента в состоянии отказа; δ — периодичность контрольных проверок — профилактики.

Из-за расширения нами понятия отказа элемента (сосредоточенного объекта) линейной части введением в расчетную схему скрытых и функциональных отказов значения функции надежности $\bar{F}(\delta)$ существенно отличаются от показателей безотказности, рассмотренных ранее. С учетом принятого предположения о простейшем потоке появления повреждений на объектах линейной части функция распределения случайной наработки на отказ имеет вид:

$$F(t) = 1 - e^{-bt}, \quad (2)$$

где b — интенсивность потока отказов (всех типов) на сосредоточенных объектах линейной части.

С учетом (2) величина $\bar{Z}_{\Sigma}^I(\delta)$ определяется так:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{\Sigma}^I(\delta) &= q - q/b\delta + e^{-b\delta} [Z_{\text{от}} - \\ &- Z_{\text{проф}} + q/b] / \delta = \\ &= q + e^{-b\delta} (Z_{\text{от}} - Z_{\text{проф}}) / \delta - \\ &- q(1 - e^{-b\delta})/b\delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Планирование контрольно-восстановительных мероприятий проводится в условиях сложившейся структуры системы технического обслуживания и ремонта, известных показаний безотказности и ремонтпригодности обслуживаемых объектов [5]. С учетом этого задача повышения эффективности контрольно-восстано-

вительных мероприятий сводится к оптимальному планированию режима функционирования ремонтно-эксплуатационных подразделений. Режим функционирования в данном случае определяется периодичностью (графика) контрольно-восстановительных мероприятий на сосредоточенных объектах линейной части.

Таким образом, определение оптимальной периодичности контрольно-восстановительных мероприятий δ^* сводится к стандартной экстремальной задаче, решение которой соответствует минимальному значению сложившейся в (3) функции цели \bar{Z}_Σ при условии

$$(d/d\delta) \bar{Z}_\Sigma(\delta) = 0. \quad (4)$$

Анализируя (3), легко понять, что оптимальная периодичность контрольно-восстановительных мероприятий в рамках стратегии «контроль – профилактика – ремонт» находится как решение уравнения

$$Z_{\text{проф}} + (Z_{\text{от}} - Z_{\text{проф}} - q\delta^*) F(\delta^*) + q \int_0^{\delta^*} F(t) dt = (Z_{\text{от}} - Z_{\text{проф}}) f(\delta^*), \quad (5)$$

где $f(t) = dF(t)/dt$.

$$Z = \sum_{K=0}^{\infty} \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dF(t) [Z_{\text{рем}} + [Z_{\text{пр}} + (K+1) + q[(K+1)\delta - t]] + [Z_{\text{пр}}(K+2) + q[(K+2)\delta - t]](1-P)P + [Z_{\text{пр}}(K+3) + q[(K+3)\delta - t]](1-P)^2 P + \dots] = \sum_{K=0}^{\infty} \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dF(t) [Z_{\text{рем}} + \sum_{r=1}^{\infty} [Z_{\text{пр}}(K+r) + q[(K+r)\delta - t]] \times (1-P)^{r-1} P] = Z_{\text{рем}} + (Z_{\text{пр}} + q\delta) / P + (Z_{\text{пр}} + q\delta) \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) - q\mu_1, \quad (8)$$

(здесь $\mu_1 = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dt$).

$$t_{\text{cp}} = \sum_{K=0}^{\infty} \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dF(t) [\delta(K+1)P + \delta(K+2) \times (1-P)P + \delta(K+3)(1-P)^2 P + \dots] = \sum_{K=0}^{\infty} \int_{K\delta}^{(K+1)\delta} dF(t) \left(K\delta + \frac{\delta}{P} \right) = \frac{\delta}{P} + \delta \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta). \quad (9)$$

$$\bar{Z}_\Sigma^I(\delta) = \frac{P Z_{\text{рем}} + Z_{\text{пр}} + q\delta + P(Z_{\text{пр}} + q\delta) \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) - Pq\mu_1}{\delta \left[1 + P \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) \right]} = \frac{P(Z_{\text{рем}} - q\mu_1) + (Z_{\text{пр}} + q\delta) \left[1 + P \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) \right]}{\delta \left[1 + P \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) \right]}. \quad (10)$$

Принимая $\bar{F}(t) = e^{-bt}$, получим

$$\sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) = \sum_{K=1}^{\infty} e^{-bK\delta} = \frac{1}{1 - e^{-b\delta}} - 1 = \frac{e^{-b\delta}}{1 - e^{-b\delta}}, \quad (11) \quad 1 + P \sum_{K=1}^{\infty} \bar{F}(K\delta) = 1 + \frac{P e^{-b\delta}}{1 - e^{-b\delta}} = \frac{1 - (1-P)e^{-b\delta}}{1 - e^{-b\delta}}. \quad (12)$$

Величина M_1 принимает вид $\mu_1 = b^{-1}$.

С учетом (10)–(12) превращаем выражение (9) и получим

$$\bar{Z}_\Sigma^{II}(\delta) = \{P(Z_{\text{рем}} - q/b) + (Z_{\text{пр}} + q\delta)[1 - (1-P)e^{-b\delta}]/(1 - e^{-b\delta})\} / \{\delta[1 - (1-P) \times e^{-b\delta}]/(1 - e^{-b\delta})\} = (P/\delta)(Z_{\text{рем}} - q/b) \times (1 - e^{-b\delta}) / [1 - (1-P)e^{-b\delta}] + Z_{\text{пр}} / \delta + q. \quad (13)$$

Причем значение функции цели в точке экстремума составляет

$$\bar{Z}_\Sigma^I(\delta^*) = (Z_{\text{от}} - Z_{\text{проф}}) \times f(\delta^*) + q F(\delta^*). \quad (6)$$

Аналогичным образом рассмотрим порядок формирования показателя эффективности контрольно-восстановительных мероприятий на сосредоточенных объектах линейной части магистральных газопроводов при стратегии (II) «контроль – ремонт». Средние удельные затраты на эксплуатацию сосредоточенных объектов по второй стратегии составляют

$$\bar{Z}_\Sigma^{II}(\delta) = Z/t_{\text{cp}}, \quad (7)$$

где Z – суммарные затраты на проведение восстановительных ремонтов по результатам периодических проверок; t_{cp} – средняя периодичность проведения ремонтно-восстановительных работ; Z и t_{cp} определяются из (8) и (9).

Объединив (8) и (9), получаем в общем виде выражение (10) для средних удельных затрат на контрольно-восстановительные мероприятия по второй стратегии обслуживания сосредоточенных объектов линейной части.

Оптимальная периодичность контрольно-восстановительных мероприятий δ^* (режим функционирования) также определяется из условия

$$(d/d\delta) \bar{Z}_\Sigma(\delta) = 0. \quad (14)$$

Особый интерес представляет задача контрольно-восстановительных мероприятий на сосредоточенных элементах и собственно линейной части магистрального газопровода. Решение этой задачи отражены при совместном рассмотрении математической модели с оценки эффективности контрольно-восстановительных мероприятий линейной части и предложенных моделей сосредоточенных объектов.

Выводы

Практика эксплуатации линейной части магистральных газопроводов свидетельствует о том, что объем и характер работ по обслуживанию и ремонту собственно линейной части и отдельных элементов (крановые узлы, воздушные переходы, подземные переходы шоссе и железных дорог, конденсатосборники и др.) существенно различаются. Это проявляется в суровых требованиях контроля, в большем количестве профилактических и регулировочных работ. Предложенные математические модели контрольно-восстановительных мероприятий на объектах линейной части магистральных газопроводов (и линейно протяженных, и сосредоточенных) позволяют перейти к решению частных задач по повышению эффективности обслуживания газотранспортных систем. На этом этапе можно синтезировать оптимальные организационно-технические решения при различных критериях оптимальности и других ограничениях.

Условные обозначения

$X(t)$ – степенная функция, описывающая процесс эволюции состояний сосредоточенных объектов линейной части в ходе обслуживания

E_1, E_2, \dots, E_n	– определенное состояние сосредоточенных объектов линейной части в ходе обслуживания
\bar{Z}_Σ	– средние суммарные удельные затраты, грн/сут
δ	– периодичность профилактических проверок, сут
$\bar{F}(\delta)$	– функция надежности (вероятность безотказной работы объекта)
$Z_{\text{проф}}$	– средние затраты на профилактические работы на элементах линейной части, грн
$Z_{\text{от}}$	– средние затраты на восстановительные работы при ликвидации отказов и адекватных им состояний, грн
Q	– удельный средний ущерб от нахождения элемента в состоянии отказа, грн/сут
V	– интенсивность потока отказов (всех типов) на сосредоточенных объектах линейной части, 1/сут
δ^*	– оптимальной периодичности контрольно-восстановительных мероприятий, сут
Z	– суммарные затраты на проведение восстановительных ремонтов по результатам периодических проверок, грн
$t_{\text{ср}}$	– средняя периодичность проведения ремонтно-восстановительных работ, 1/сут
K	– капитальные вложения, грн
P	– вероятность обнаружения повреждений по результатам проверки
$Z_{\text{пр}}$	– расходы на контрольные мероприятия (периодическое патрулирование), грн
$Z_{\text{рем}}$	– расходы на проведение аварийно-восстановительных работ, грн
t	– время, сут

Список литературы

1. Васильев Г.Г., Шибнев А.В., Яковлев Е.И. Вопросы планирования организации ремонта газопроводов. — М. : ВНИИЭГАЗпром, 1989. — 59 с.
2. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. — М. : Радио и связь, 1988. — 392 с.
3. Райбман Н.С., Чадаев В.Н. Построение моделей процессов производства. — М. : Энергия, 1976. — 374 с.
4. Грудзь В.Я., Тымкив Д.Ф., Яковлев Е.И. Обслуживание газотранспортных систем. — Киев : УМК ВО, 1991. — 160 с.
5. Бразилович Е.Ю., Каштанов И.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. — М. : Сов. радио, 1971. — 631 с.

Поступила в редакцию 19.10.12

Ostapuyuk I.I.

JSC «IC» Masheksport», Kiev

Mathematical Simulation of Lumped Elements Service of Main Gas Pipelines Linear Part

The questions of lumped elements service optimization (valve units, junctions) on linear part of main gas pipeline are conducted. The mathematical model for efficiency evaluation and individual strategies selection of control and restoration procedures for linear part lumped elements is developed.

Key words: main gas pipeline, control and restoration procedures, mathematical model.

Received October 19, 2012