

2. Леонтьев М.Ю. Исследование статической нагруженности мощных судовых планетарных редукторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001.

3. Насонов Д.А. Моделирование собственных колебаний циклически симметричных систем на базе конечных элементов со смешанной аппроксимацией перемещений полиномами высших порядков: автореф. дис ... канд. техн. наук. М., 2001.

D.A. Nasonov, M.Yu. Leont'ev

WAYS OF FINITE-ELEMENT ANALYSIS ACCURACY INCREASE OF COMPLEX MECHANICAL SYSTEMS

The review of sources of occurrence of errors in finite element analysis is given. Some equations that allowed to build more exact mathematical model, if have been restrictions on computing resources is given. On an example of modeling of the satellite unit of a planetary gears is shown that verification off mathematical model by experiment is important step.

Key words: finite-element method, dynamics, durability, modeling, accuracy.

Получено 14.07.11

УДК 658.58:681.518.22

М.И. Панченко, асп., (4872) 35-18-87,
panchenko_m87@mail.ru (Россия, Тула, ТулГУ)

МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Представлена методика назначения срока службы трубопроводной арматуры, позволяющая решать оптимизационные задачи по назначению экономически обоснованных плановых ресурсов трубопроводной арматуры, установлению назначенного срока службы трубопроводной арматуры и оптимизации режима ее профилактического обслуживания и восстановления.

Ключевые слова: долговечность, трубопроводная арматура, ресурс, срок службы, вероятностная модель.

В современных условиях, характеризующихся перспективами скорого вступления России в ВТО, развитие экономического потенциала страны возможно только при условии производства высококачественных изделий с повышенными значениями показателей надежности. Именно соблюдение этих условий предопределяет возможность эффективного участия в конкурентной борьбе не только на внутреннем, но и на мировом

рынке. Одним из важнейших показателей надежности технических объектов, в том числе и запорной арматуры для нефте- и газопроводов (трубопроводной арматуры), является долговечность, определяемая сроком службы и ресурсом (рисунок) [1].

Практическое значение проблемы ресурса и срока службы весьма велико. Хотя при современных темпах научно-технического прогресса моральное старение машин происходит быстрее, чем раньше, во многих отраслях, в том числе и в трубопроводном транспорте, фактический ресурс и срок службы еще не достигли оптимальных с экономической точки зрения значений. Увеличение ресурса трубопроводной арматуры приведет к существенной экономии материалов, энергетических и трудовых затрат, которые в настоящее время идут на пополнение парка трубопроводной арматуры и на ее ремонт. Особый интерес представляет проблема прогнозирования индивидуального ресурса и срока службы трубопроводной арматуры по результатам наблюдений за ее состоянием в процессе эксплуатации.

Разработчиком в конструкторской или эксплуатационной документации указывается нормативный (назначенный) срок службы трубопроводной арматуры. Он представляет собой не что иное, как минимально допускаемый срок эксплуатации трубопроводной арматуры, в течение которого она не должна достигать своего предельного состояния.

При этом зачастую достижение трубопроводной арматурой нормативного срока службы не соответствует достижению ею предельного состояния, при котором она должна быть снята с эксплуатации. Чтобы обеспечить уверенную эксплуатацию трубопроводной арматуры в течение установленного срока, она должна иметь некоторый запас прочности, который дает возможность уверенно эксплуатировать трубопроводную арматуру в течение нормативного срока и еще некоторое время после окончания этого срока. Практика показывает, что технические объекты снимаются с эксплуатации и списываются при достижении нормативного срока службы не более, чем в 10 % случаев, т. е. средний срок службы примерно 90 % технических объектов превышает нормативный срок службы.

Данные обстоятельства обуславливают актуальность задачи обеспечения наибольшего соответствия нормативного (назначенного) срока службы трубопроводной арматуры, устанавливаемого разработчиком в конструкторской или эксплуатационной документации, фактическому с целью установления времени снятия трубопроводной арматуры с эксплуатации и списания оптимального как по условиям долговечности работы ее конструктивных элементов, так и по времени вывода ее из эксплуатации вследствие морального старения.

В качестве меры долговечности трубопроводной арматуры следует рассматривать продолжительность эксплуатации трубопроводной арматуры до наступления необходимости его утилизации, обусловленной тем, что проведение ремонтов невозможно по принципиальным конструктивным соображениям (изделие неремонтопригодное) или вследствие того, что степень износа делает такие ремонты физически невозможными или экономически неоправданными. Величина ресурса и срок службы трубопроводной арматуры определяются условиями эксплуатации, принятой системой технического обслуживания, запасами прочности конструкций, заложенными при проектировании, а также соответствием изделий в пределах установленных значений показателей долговечности требованиям по безопасности, экономичности и эффективности. Решающим фактором, определяющим срок службы трубопроводной арматуры, является принятая система технического обслуживания и ремонта.

При назначении срока службы необходимо учитывать то, что в настоящее время показатели долговечности имеют двойное значение. Во-первых, это техническая характеристика трубопроводной арматуры, которая характеризует время возможного наступления предельного технического состояния изделия. Во-вторых, показатели долговечности являются юридическими и экономическими характеристиками, в пределах которых соответствующими законодательными документами определена ответственность как изготовителя, так и эксплуатирующей организации. Этими двумя обстоятельствами следует руководствоваться при определении необходимых подходов при решении задач по оценке показателей долговечности расчетными методами.

В качестве показателей долговечности следует применять следующие показатели: назначенный срок службы; назначенный срок хранения в отапливаемом и неотапливаемом помещении, под навесом, на открытой площадке; назначенные дальности транспортирования автомобильным, железнодорожным и др. транспортом; назначенный ресурс по наработке и ряд других видов, обусловленных особенностями эксплуатации конкретного типа трубопроводной арматуры. Для всех типов трубопроводной арматуры, рекомендуется устанавливать несколько показателей долговечности, минимум – два: назначенный срок службы и назначенный ресурс по наработке. Целью установления назначенных показателей является обеспечение принудительного заблаговременного прекращения эксплуатации трубопроводной арматуры, исходя из требований безопасности. По истечении назначенных ресурсов по каждому типу трубопроводной арматуры следует проводить оценку их технического состояния и принимать решение о порядке дальнейшей эксплуатации, необходимости проведения соответствующего вида ремонта или списании трубопроводной арматуры.

Обобщенным интегральным показателем долговечности трубопроводной арматуры является назначенный срок службы, в течение которого

трубопроводная арматура должна сохранять работоспособность в пределах установленного назначенного ресурса по наработке, назначенных сроков хранения, назначенных дальностей и видов транспортирования и т. д. Принятие в качестве интегрального показателя долговечности назначенного срока службы обусловлено тем обстоятельством, что в течение этого срока другие назначенные показатели могут быть сознательно не доведены до своего предельного значения.

Согласно ГОСТ 27.002–89 [2] ресурсом называют суммарную наработку объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Нарботка – это продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может измеряться в различных единицах в зависимости от типа объекта и выполняемой им работы. Нарботка трубопроводной арматуры измеряется числом выполненных циклов «открыто-закрыто» и временем, в течение которого через трубопроводную арматуру проходит рабочая среда. Связь между наработкой и рабочим временем в общем случае неоднозначна, поэтому были рассмотрены различные частные случаи такой связи, при представлении рабочего процесса трубопроводной арматуры альтернирующим процессом, марковским альтернирующим процессом, циклическим полумарковским процессом и полумарковским процессом со случайными переходами [3]. Так как в общем случае при описании рабочего процесса трубопроводной арматуры простых аналитических решений получить не удалось, для разработки вероятностной модели долговечности трубопроводной арматуры был использован метод статистического моделирования, предполагающий многократное моделирование на ЭВМ случайного процесса $q(t)$, где $q(t)$ – интенсивность эксплуатации трубопроводной арматуры в момент времени t , то есть $q(t)$ – это число единиц наработки за единицу рабочего времени. Для каждой j -й реализации процесса $q_j(t)$ вычисляется наработка за время

$$T - G_j(T) = \int_0^T q_j(t) dt.$$

В результате получается выборка возможных значений наработки $G(T)$, то есть $G_1, G_2, \dots, G_M$, где M – число реализаций процесса $q(t)$. Статистическая обработка полученной выборки позволяет оценить все необходимые показатели наработки $G(T)$ как случайной величины по следующим зависимостям:

$$\bar{G}(T) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M G_j - \text{средняя наработка};$$

$$D_G(T) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M G_j^2 - (\bar{G}(T))^2 - \text{дисперсия наработки};$$

$\sigma_G(T) = \sqrt{D_G(T)}$ – среднее квадратичное отклонение наработки;

$K_G = \frac{\sigma_G(T)}{\bar{G}(T)}$ – коэффициент вариации наработки.

Гамма-процентная наработка G_γ определяется следующим образом. Если $G^{(1)}, G^{(2)}, \dots, G^{(M)}$ – упорядоченная по возрастанию выборка реализаций $G(T)$, то $G_\gamma \approx G^{(k)}$, где $k = \left(\frac{\gamma}{100} - 1 \right) \cdot M$, округленное до целого значения.

Моделирование переходов между состояниями трубопроводной арматуры выполняется следующим образом. Если процесс находится в состоянии i , то очередное состояние j наступит после окончания времени пребывания T_i с вероятностью P_{ij} . Для этого разыгрывается дискретная случайная величина j , которая принимает это значение с вероятностью P_{ij} .

Случайная величина j – индекс следующего состояния, принимает значения $0, 1, 2, \dots, N$ с вероятностями $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{iN}$. При этом выполняется условие нормировки вероятностей, то есть $p_{i0} + p_{i1} + \dots + p_{iN} = 1$. Невозможность перехода из i в i обеспечивается тем, что $p_{ii} = 0$. То же самое относится и к тем состояниям j , для которых $p_{ij} = 0$.

Особенность статистического моделирования состоит в том, что при этом моделируется действие фактора случайности в рабочем процессе трубопроводной арматуры. Например, в полумарковском процессе случайны времена пребывания процесса в своих состояниях и случайны переходы между состояниями.

Разработаны два варианта вероятностной модели рабочего процесса трубопроводной арматуры – для расчета наработки за заданное время и для расчета затрат времени на заданную наработку и произведена оценка точности расчетов с использованием разработанной модели. Например, для случая определения средней наработки $\bar{G}(t)$ в качестве меры ошибки ис-

пользуется квадратичное отклонение оценки $\bar{G}(t) - \sigma = \frac{\sqrt{D_{G(t)}}}{M}$, а в качестве меры относительной ошибки расчета принят коэффициент вариации оценки

$$\bar{G}(t) - \delta = \frac{\sigma}{\bar{G}(t)} = \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{\sqrt{D_{G(t)}}}{\bar{G}(t)}.$$

Из этой формулы видно, что чтобы уменьшить ошибку расчета в 2 раза, число реализаций процесса M следует увеличить в 4 раза. Соответст-

венно, чтобы уменьшить ошибку расчета в 10 раз (на порядок), число реализаций следует увеличить в 100 раз (на 2 порядка). Такая медленная сходимость характерна для метода статистического моделирования, в чем заключается его недостаток. Однако указанный недостаток компенсируется все возрастающим быстродействием современных ЭВМ.

Связи между наработкой (сроком выполнения наработки) и ресурсом (сроком службы) раскрыты на основе представления рабочего процесса трубопроводной арматуры полумарковским процессом со случайными переходами, как наиболее адекватно отражающим основные особенности реального рабочего процесса. Срок службы трубопроводной арматуры в рамках данной модели рабочего процесса – это время $T(g)$ до наступления момента, когда критерий предельного состояния за время t $X(t)$ достигнет максимально (минимально) допустимого уровня L или наработка $G(t)$ достигнет уровня $g = G_{\text{пр}}$, т. е. $X(T_{\text{пр}}) = L$ и $T_{\text{пр}} = T(G_{\text{пр}})$, а ресурс – наработка до предельного состояния $R = G_{\text{пр}} = G(T_{\text{пр}}) = L / \bar{h}$. При этом предполагается, что ресурс является фиксированной величиной. В этом случае разброс значений сроков службы является следствием случайных колебаний интенсивности наработки $q(t)$. Но определенный таким образом ресурс может иметь различное значение для других однотипных объектов из-за их различного качества, различных условий эксплуатации, различных режимов технического обслуживания, различной квалификации персонала, различных климатических условий и из-за других заранее не известных факторов. В этих условиях может применяться некоторый назначенный ресурс, который называется *плановым ресурсом* и после выработки которого проводится контроль состояния объекта и принимается решение о восстановлении или замене объекта исходя из экономической целесообразности.

При статистическом моделировании фактор разброса ресурсов объектов учитывается следующим образом. Генерируется в соответствии с плотностью распределения ресурсов $\varphi(r)$, оцениваемой по опытным данным, массив M реализаций ресурса $R_1, \dots, R_M$. Далее для каждой реализации R_i рассчитывается срок службы. В результате получается выборка M сроков службы $T_1, \dots, T_M$. В дальнейшем по этой выборке оцениваются все необходимые числовые характеристики срока службы.

В качестве критерия оптимальности при определении планового ресурса трубопроводной арматуры используются удельные затраты, то есть средние затраты, приходящиеся на единицу наработки,

$$\Theta = \frac{P_o \cdot \Xi_o + P_{\text{п}} \cdot \Xi_{\text{п}}}{G_{\text{п}}},$$

где P_{Π} – вероятность безотказной работы в течение плановой наработки, Θ_{Π} – затраты за период работы трубопроводной арматуры с момента регламентированного ТО (ремонта) до следующего регламентированного ТО (ремонта), P_0 – вероятность наступления предельного состояния до достижения плановой наработки, Θ_0 – затраты на восстановление по отказу. Удельные затраты зависят от плановой наработки g_{Π} так, что при увеличении g_{Π} они достигают минимума при $g_{\Pi} = g_{\Pi}^*$ и далее растут до величины $\Theta_0/\bar{G}$ при $g_{\Pi} \rightarrow \infty$, что соответствует восстановлению только по отказу.

Для определения оптимального (минимального) значения удельных затрат используется уравнение, решаемое численно,

$$\Theta^* = (\Theta_0 - \Theta_{\Pi}) \cdot \lambda(g_{\Pi}^*),$$

где $\lambda(g_{\Pi}) = \frac{f(g_{\Pi})}{P(g_{\Pi})}$ – интенсивность отказов объекта.

Разработана методика сбора статистической информации о расходовании ресурса трубопроводной арматуры и определения параметров вероятностной модели рабочего процесса трубопроводной арматуры по опытным данным для случаев его представления альтернирующим, марковским альтернирующим или полумарковским процессом. Рассмотрены различные типы статистической информации о рабочем процессе трубопроводной арматуры: «простой–работа–наработка», когда о рабочем процессе фиксируется длина каждого интервала простоя, последующего интервала работы и наработка за этот интервал; «период–наработка», когда фиксируется наработка за один и тот же плановый период; «состояние–время пребывания–наработка», когда фиксируются последовательно в рабочем времени состояния объекта, время пребывания в каждом состоянии и наработка за время пребывания в этом состоянии; «состояние–накопленное время пребывания–накопленная наработка», когда фиксируются накопленные времена пребывания в состояниях и накопленные наработки для всех состояний.

В результате обработки статистической информации о рабочем процессе трубопроводной арматуры при представлении его альтернирующим и марковским альтернирующим процессом определяются средние длительности интервалов простоя и работы, их дисперсии и коэффициенты вариации, средняя длительность цикла «простой–работа» и ее дисперсия, средняя наработка за цикл «простой–работа» и ее дисперсия и коэффициент вариации, средняя интенсивность наработки в рабочем состоянии и ее дисперсия, коэффициент корреляции между средней длительностью интервала работы и средней интенсивностью наработки в рабочем состоянии.

В результате обработки статистической информации о рабочем

процессе трубопроводной арматуры при представлении его полумарковским процессом определяются среднее значение и дисперсия времени пребывания в каждом состоянии, интенсивности наработки по состояниям, вероятности состояний, вероятности переходов между состояниями, средняя интенсивность наработки объекта за время наблюдений.

Разработан алгоритм определения функции распределения случайных величин, используемых в вероятностной модели рабочего процесса трубопроводной арматуры, по опытным данным. При этом исследуются пять распределений: показательное, гамма, Вейбулла, нормальное и логарифмически нормальное. При определении близости теоретического распределения к статистическому, построенному по данным выборки, используется критерий Пирсона.

Разработана методика назначения срока службы трубопроводной арматуры, позволяющая решать оптимизационные задачи по назначению экономически обоснованных плановых ресурсов трубопроводной арматуры, установлению нормативного (назначенного) срока службы трубопроводной арматуры, оптимизации режима профилактического обслуживания и восстановления трубопроводной арматуры. При этом связь календарного времени t с наработкой g предложено описывать отношением $t = (g/q) \cdot K_{\text{см}}$, где $K_{\text{см}}$ – коэффициент сменности, q – интенсивность наработки по рабочему времени. Поэтому при регламентированном техническом обслуживании (ремонте) средний срок службы трубопроводной арматуры определяется по зависимости $\bar{T}_{\text{п}} = (\bar{G}_{\text{п}}/q) \cdot K_{\text{см}}$, а плановый срок службы $t_{\text{п}} = (g_{\text{п}}/q) \cdot K_{\text{см}}$ определяется однозначно через плановый ресурс.

Если наработка измеряется рабочим временем (не временем работы), то есть $g = t$, то плановый срок службы $t_{\text{п}} = g_{\text{п}} \cdot K_{\text{см}}$, где $g_{\text{п}}$ – плановая наработка в единицах рабочего времени.

Соответственно определяются и другие показатели процесса профилактического восстановления. Удельные затраты определяются как средние затраты на восстановление объекта, приходящиеся на единицу рабочего времени. Функция надежности $P(g)$ определяется вероятностью безотказной работы в течении g единиц рабочего времени. Средняя календарная наработка между отказами определяется по зависимости $\bar{T}_{\text{по}} = \bar{G}_{\text{по}} \cdot K_{\text{см}}$, где $\bar{G}_{\text{по}}$ – средняя наработка между отказами, измеряемая в единицах рабочего времени. Среднее календарное время на одно восстановление (по отказу или регламентированное), то есть средний срок службы до восстановления, определяется по формуле $\bar{T}_{\text{п}} = \bar{G} \cdot K_{\text{см}}$, где $\bar{G}$ – средняя наработка в единицах рабочего времени на одно восстановление.

Если наработка измеряется календарным временем, то есть $g = t'$, то при оптимизации планового срока службы $t'_{\text{п}}$, в качестве критерия оп-

тимальности используются удельные затраты на восстановление по отношению к единице календарного времени. Функция надежности $P(t') = P(g)$, означает в данном случае вероятность безотказной работы в течение календарного времени t' . Соответственно, оптимальный плановый срок службы до восстановления, определяется по зависимости $t_{\text{п}}^* = g_{\text{п}}^*$, где $g_{\text{п}}^*$ – оптимальный плановый ресурс. Средний оптимальный срок службы до восстановления определяется по следующей формуле $\bar{T}_{\text{п}}^* = \bar{G}_{\text{п}}^*$, где $\bar{G}_{\text{п}}^*$ – средняя наработка до восстановления.

Разработана система информационной поддержки оптимизации срока службы трубопроводной арматуры. С ее помощью на основе исходных данных (средний ресурс, коэффициент вариации ресурса, вероятность гарантии срока службы, число состояний объекта, вероятности состояний, интенсивности наработки по состояниям, число реализаций процесса, средний интервал простоя) рассчитываются различные характеристики срока службы как случайной величины: средняя интенсивность наработки, коэффициент использования (обобщенный), средний срок службы, коэффициент вариации срока службы, срок службы, гарантированный на 90 %, срок службы, гарантированный на 50 %, минимальный срок службы, а также формируется таблица для построения гистограммы распределения срока службы.

Разработана система информационной поддержки статистической обработки выборки опытных данных. С помощью данной системы рассчитываются: вариационный ряд, максимум и минимум выборки, размах, статистические медиана, среднее, квадратичное отклонение и коэффициент вариации наработки на отказ. Также строятся гистограмма в координатах «номер интервала – статистическая вероятность» и статистическая функция распределения $F^*(t)$. Производится оценка параметров распределения времени пребывания для предполагаемых пяти законов распределения по методу моментов и определяется мера расхождения между статистической функцией распределения исследуемой случайной величины и теоретическими функциями распределения с оцененными выше параметрами по критерию. Из полученных данных о степени расхождения опытных данных с вариантами теоретических распределений выбирается тот вариант, для которого мера расхождения минимальна, и выводятся характеристики оптимального распределения. При этом рассчитывается так же вероятность ошибки первого рода, то есть вероятность того, что принятая гипотеза о законе распределения ошибочна. Представленная программа позволяет так же определить величину допустимого значения меры расхождения, чтобы ошибка отклонения верной гипотезы не превышала заданного пользователем уровня значимости.

Разработана система информационной поддержки оптимизации назначенного ресурса трубопроводной арматуры, позволяющая оптимизировать плановый ресурс трубопроводной арматуры и рассчитывать показатели процесса ее регламентированного технического обслуживания (ремонта). С ее помощью на основе исходных данных (средний ресурс, коэффициент вариации ресурса, затраты на восстановление по отказу, затраты на регламентированное ТО и ремонт) рассчитываются оптимальный плановый ресурс трубопроводной арматуры и показатели оптимального режима регламентированного ТО (ремонта): удельные затраты, доля восстановлений по отказу, доля профилактических восстановлений, наработка на восстановление, коэффициент использования ресурса, наработка между отказами.

Представленная методика назначения срока службы трубопроводной арматуры используется в ОАО «Тяжпромарматура» для решения следующих оптимизационных задач: назначение экономически обоснованных плановых ресурсов трубопроводной арматуры, установление нормативного (назначенного) срока службы трубопроводной арматуры, оптимизация режима профилактического обслуживания и восстановления трубопроводной арматуры и др.

Список литературы

1. Карелин И.Н. Управление качеством элементов газонефтяных трубопроводов. М.: Нефть и газ, 2003. 324 с.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 29 с.
3. Панченко М.И. Вероятностная модель долговечности трубопроводной арматуры // Изв. ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. 2011.

M.I. Panchenko

METHOD OF VALVE'S DURABILITY APPRAISAL

The method of valve durability appraisal which allows solving optimization problem of appraisal valve's economically sound scheduled resource, determination of valve's specified lifetime and optimization of its preventive maintenance and recovery mode is represented.

Key words: durability, valve, resource, lifetime, probabilistic model.

Получено 14.07.11