

Математичні моделі й методи в системах автоматизованого управління, проектування та наукових дослідженнях

УДК 004.942:519.876.2

Н.А. Астафьев, аспирант,
О.А. Дмитриева, д-р техн. наук, проф.,
Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск
dmitrieva.donntu@gmail.com

Моделирование комплексной оценки безаварийной эксплуатации объекта повышенной опасности

Работа посвящена вопросам разработки и обоснования модели прогнозирования сроков безаварийной эксплуатации объектов повышенной опасности (ОПО) различных производств на основе анализа групп факторов. При построении комплексной оценки работоспособности ОПО в течение нормативного периода эксплуатации во внимание принимаются такие обобщенные показатели, как условия эксплуатации, используемый материал и степень восстановления. На основе предложенного подхода построена математическая модель, использующая полученные зависимости для прогнозирования срока, по окончании которого возможен отказ объекта повышенной опасности с вероятностью, не превышающей заданную.

Ключевые слова: математическая модель, объект повышенной опасности, безаварийная эксплуатация, прогнозирование, факторный анализ.

Введение

Наблюдаемая в настоящее время тенденция увеличения числа отказов [1] при эксплуатации объектов повышенной опасности, обусловлена, в первую очередь, изношенностью основных фондов, удорожанием ремонтов и увеличением объемов ремонтных работ [2]. В то же время отказы при эксплуатации ОПО приводят не только к серьезным экологическим и экономическим последствиям, но и к человеческим жертвам [3], и, как это не прискорбно, число таких отказов, по мнению специалистов [1, 4], будет только расти. Также необходимо признать, что демонтаж таких объектов по исчерпанию временного ресурса, нужно отнести к непопулярным мерам, так как при этом возникает необходимость в огромных финансовых вложениях, на время замены составляющих отмечаются длительные простои или значительное снижение эффективности функционирования системы в целом. Вместе с тем, анализ опыта использования ОПО показывает, что значительная их часть обладает еще достаточно большим запасом надежности на момент окончания нормативного срока эксплуатации [5], и при наличии обоснованных рекомендаций, срок эксплуатации объектов

повышенной опасности может быть значительно увеличен.

Целью данной статьи является разработка и обоснование модели прогнозирования сроков безаварийной эксплуатации объекта повышенной опасности на основании комплексной оценки индивидуального остаточного ресурса.

Для проведения объективного оценочного прогноза срока безаварийной эксплуатации выбираются самые напряженные конечные системы (элементы) ОПО, параметры (температурный режим, давление, марка стали, толщина металла и т.д.) которых будут одинаковыми. После этого предельный срок безаварийной эксплуатации всего ОПО определяется по минимальному сроку эксплуатации элементов на основе полученного прогноза.

Параметры, влияющие на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструктивных элементов ОПО, должны быть в совокупности учтены при оценке его работоспособности. Комплексную оценку работоспособности ОПО в течение нормативного периода эксплуатации необходимо проводить на основании расчета сроков безотказной работы всех элементов с учетом условий эксплуатации (статических и динамических воздействий на систему), используемого материала (вид, износостойкость материала под воздействием

внешних и производственных факторов, развитие дефектов изготовления и эксплуатации) и степени восстановления (при ремонтах и обслуживании). Из этого следует, что объем информации при прогнозировании будет значительным и прогнозная математическая модель будет весьма громоздкой для вычислений. Трудности будут наблюдаться уже при 6 и более параметрах [6], а полученная модель не сможет дать простое и наглядное описание существующих связей между параметрами. Необходимо сжать информацию до минимальных размеров, при которых еще возможно установить связь между параметрами. Для этого предполагается использование факторного анализа, который подразумевает, что измеряемые параметры лишь косвенно характеризуют процесс перехода элементов ОПО в аварийное состояние. Необходимо рассматривать не сами параметры, характеризующие состояние объекта прогноза, а факторы, объединяющие и группирующие вокруг себя некоторое количество параметров.

Разработка модели расчета срока безаварийной эксплуатации ОПО.

Для прогнозирования аварийной ситуации (D) задается некоторая точка отсчета t_0 . Это может быть момент изготовления (пуск в эксплуатацию) ОПО, момент окончания последнего капитального ремонта, момент последней аварийной ситуации. Этот фактор влияет на прогноз, так как зависит от множества параметров. Например, изменение технологических параметров после очередной аварии, модернизация процесса во время капремонта, замена дефектного участка ОПО, который в обычных условиях закономерно оказывал бы влияние длительность временного интервала от t_0 до наступления D. Также необходимо использовать сведения об эксплуатации аналогичного оборудования. Этот фактор не всегда возможно применить по причине того, что некоторые ОПО уникальны. Чем больше распространен тот или иной тип ОПО, тем выше вероятность успеха в прогнозе.

Остаточный ресурс $\sum X_1(t)$ - это группа факторов, которые зависят от качества материалов, из которых изготовлены элементы, параметров эксплуатации ОПО, качества рабочей среды и скорости ухудшения эксплуатационных характеристик. Человеческий фактор $\sum X_2(t)$ - это группа факторов, которые зависят от производственной культуры на предприятии, а также трудовой дисциплины (беспрекословное соблюдение всех норм в области охраны труда и промышленной безопасности). Схематически математическая модель исследуемой подсистемы представлена на рис. 1.

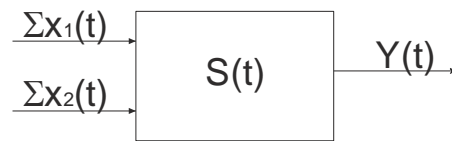


Рисунок 1 – Архитектура системы прогноза

При этом подсистема $S(t)$ принимает два потока аргументов $\sum X_1(t)$ и $\sum X_2(t)$, соответствующих влиянию факторов на систему, на выходе формируется результат расчета $Y(t)$, указывающий на предельный срок эксплуатации.

Структуру остаточного ресурса можно представить в виде следующих параметров:

$$\sum X_1(t) = \{\delta_c(t); \delta(t)_e; \delta_d(t); \delta_r(t); \delta_o(t); \delta_m(t); \delta_e(t)\}, (1)$$

где

$\delta_c(t)$ – параметр физического износа материала элемента ОПО (коррозионный и эрозионный износ, вынос за счет химического разрушения (взаимодействие с рабочей средой));

$\delta_r(t)$ – параметр развития эксплуатационных дефектов с заданной вероятностью их возникновения (рассчитывается на основании опыта эксплуатации исследуемого ОПО или аналогичных объектов);

$\delta_d(t)$ – параметр развития дефектов изготовления во время эксплуатации с заданной вероятностью их возникновения (рассчитывается на основании опыта эксплуатации исследуемого ОПО или аналогичных объектов);

$\delta_o(t)$ – параметр, учитывающий влияние ремонтов ОПО (наличие ремонтов и модернизации, замена элементов, своевременность ремонтов, полнота ремонтов);

$\delta_e(t)$ – параметр, учитывающий влияние периодического технического обслуживания ОПО (наличие обслуживания, своевременность обслуживания, полнота обслуживания);

$\delta_m(t)$ – параметр, учитывающий влияние материала элементов ОПО на срок безаварийной эксплуатации (марка, пределы прочности и текучести, относительное растяжение, коррозионная стойкость и другие параметры, которые зависят от условий эксплуатации объекта);

$\delta_e(t)$ – параметр, учитывающий влияние эксплуатационных параметров ОПО на срок безаварийной эксплуатации (уровень вибрации, цикличность, параметры рабочей среды и их изменения относительно проектных величин и другие параметры).

Приведенное множество параметров значительно усложняет математическую модель и требует упрощения. Применяя факторный анализ для упрощения, можно сгруппировать параметры,

влияющие на накопление дефектов в материале ОПО. В итоге получим три фактора: фактор эксплуатационных нагрузок $\gamma_e(t)$, фактор материала объекта $\gamma_m(t)$ и фактор восстановления $\gamma_r(t)$

$$\gamma_e(t) = \{\delta_e(t)\}, \quad (2)$$

$$\gamma_m(t) = \{\delta_c(t); \delta_t(t); \delta_a(t); \delta_m(t)\}, \quad (3)$$

$$\gamma_r(t) = \{\delta_r(t); \delta_o(t)\}. \quad (4)$$

Зависимость (1) при этом преобразуется в следующий вид:

$$\sum X_1(t) = \{\gamma_e(t); \gamma_m(t); \gamma_r(t)\}. \quad (5)$$

Остаточный ресурс $\sum X_1(t)$ представляется в виде системы (рис. 2), которая испытывает воздействия трех факторов – эксплуатационных нагрузок, материала объекта и восстановления. При этом на стадии проектирования все элементы системы взаимосвязаны (износ материала зависит от обслуживания и эксплуатации, объемы и сроки обслуживания рассчитываются в зависимости от состояния материала и параметров эксплуатации, параметры эксплуатации определяются характеристиками материала и его ремонтпригодностью). После определенной наработки эта структура становится устоявшейся, и каждый из трех параметров влияет только на срок безаварийной эксплуатации.

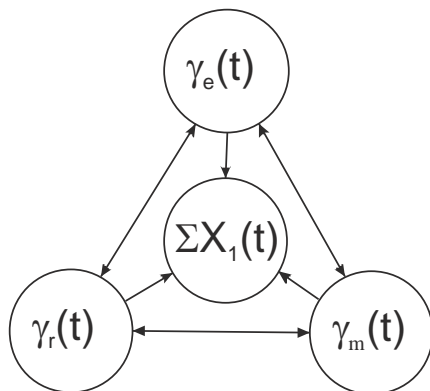


Рисунок 2 – Структура остаточного ресурса

Следовательно, показатели (составляющую) модели, характеризующие остаточный ресурс $Y_{X1}(t_D)$, можно представить в следующем виде:

$$Y_{X1}(t_D) = \prod_{i=1}^n R_i \{\gamma_e(t); \gamma_m(t); \gamma_r(t); p_1\}, \quad (6)$$

где

t_D – время наступления ситуации D, когда происходит аварийная ситуация на ОПО;

i – номер элемента в составе ОПО;

n – количество элементов, из которых состоит ОПО;

$R(i)$ – вероятность безотказной работы (ВБР) i -ого элемента конструкции;

p_1 – вероятность аварийной ситуации ОПО, заложенная в проекте или определенная по нормативным значениям.

Человеческий фактор относится к слабопрогнозируемым параметрам. Можно применить статистику для определения усредненного влияния его на аварийные ситуации с некоторой вероятностью успеха, но полностью предсказать поведение персонала в той или иной ситуации невозможно. Поэтому предположим, что он напрямую связан с травматизмом на производстве, на котором эксплуатируется ОПО. Т. е. показатель среднего уровня травматизма в цехе, в котором установлен объект, на предприятии-владельце, а также на предприятиях (цехах), выполняющих обслуживание и ремонт ОПО. Величина травматизма без учета хронических заболеваний показывает производственную культуру предприятия, а также уровень выполнения работниками требований охраны труда и промышленной безопасности. К последнему относится и эксплуатация ОПО. Структуру человеческого фактора модели можно представить в виде:

$$\sum X_2(t) = \{\gamma_z(t); \gamma_{cz}(t); \gamma_p(t)\}, \quad (7)$$

где

$\gamma_z(t)$ – коэффициент травматизма на предприятии;

$\gamma_{cz}(t)$ – коэффициент травматизма в цехе;

$\gamma_p(t)$ – коэффициент травматизма на предприятиях-подрядчиках, выполняющих ремонт оборудования ОПО.

Следовательно, показатели (составляющую) модели, характеризующие человеческий фактор $Y_{X2}(t_D)$, можно представить в следующем виде:

$$Y_{X2}(t_D) = \prod_{i=1}^n R_i \left\{ \gamma_z(t); \gamma_{cz}(t); \prod_{j=1}^m \gamma_{rj}(t); p_1 \right\}, \quad (8)$$

где m – количество предприятий-подрядчиков (ремонтных цехов), выполняющих ремонт и обслуживание ОПО.

Сбор информации производится по агрегатным журналам, ремонтной документации и протоколам неразрушающего контроля элементов ОПО. Также информация о травматизме на предприятии берется из актов и отчетности по производственному травматизму.

Обоснование адекватности модели оценивания сроков безаварийной эксплуатации объекта повышенной опасности

Для обоснования адекватности представленной модели необходимо перевести систему (рис. 2) в состояние, когда влияние факторов перестает быть значимым, т.е. когда ОПО отработал допустимый по проекту срок. В этом случае в материале объекта все допустимые эксплуатационные дефекты и дефекты монтажа достигли своего равновесного состояния, а те, которые пересекли граничную линию (недопустимые), были достаточно давно устранены (дефекты, возникающие во время ремонтов, также приняли равновесное состояние). Также величина эксплуатационных параметров системы не вызывает внутренних недопустимых напряжений в использованном согласно проекту материале. Капитальные ремонты были проведены достаточно давно, чтобы образовались новые дефекты монтажа, а регламентные ремонты проводятся в полном соответствии с инструкциями. Т.е. система приводится к условно идеальному состоянию эксплуатации.

Если принять, что параметры эксплуатации постоянны (величина и количество циклов, рабочие параметры среды в пределах проектных величин, уровень вибрации не зависит от количества и скорости накопления дефектов и является постоянной величиной). Также можно допустить, что обслуживание ОПО соответствует проекту, а ремонты особо не влияют на основной материал объекта, то срок безаварийной работы будет зависеть только от скорости физического износа (старения) материала. Тогда (6) можно преобразовать к виду

$$Y_{X1}(t_D) = \prod_{i=1}^n R_i\{\gamma_m(t); p_1\}. \quad (9)$$

Согласно (3) на фактор материала объекта $\gamma_m(t)$ оказывают влияние 4 параметра. Параметр развития эксплуатационных дефектов $\delta_c(t)$ и параметр, который учитывает влияние материала элементов ОПО на срок безаварийной эксплуатации $\delta_m(t)$, закладываются в проекте (в нашем случае это вероятность аварийной ситуации ОПО). При нормальных условиях эксплуатации и выполнении всех проектных решений при изготовлении и монтаже объекта эти параметры можно нивелировать. Так же можно

поступить и с параметром развития дефектов изготовления во время эксплуатации $\delta_a(t)$, так как условно принято, что изготовление и монтаж соответствовали проекту, а, значит, требованиям нормативно-технической документации на сварку, разделку и другие необходимые операции при изготовлении и монтаже. Тем более, что большинство ОПО перед вводом в эксплуатацию подвергаются неразрушающему контролю в объеме от 50 до 100%. Любой выявленный дефект, который больше определенного лимита, устраняется, а остальные берутся на периодический контроль.

В итоге можно получить, что с заданной вероятностью, заложенной в проекте или в нормативно-технической документации, при выполнении всех проектных решений во время изготовления и монтажа ОПО фактор материала объекта $\gamma_m(t)$ преобразуется в зависимость

$$\gamma_m(t) = \{\delta_c(t)\}, \quad (10)$$

а (9) можно записать как

$$Y_{X1}(t_D) = \prod_{i=1}^n R_i\{\delta_c; p_1\}. \quad (11)$$

Человеческий фактор - это крайне непредсказуемый параметр, который можно рассчитывать в общей перспективе, но нельзя спрогнозировать с достаточно высокой вероятностью. Это «черный лебедь» [7], так как нет инструмента, позволяющего предсказывать аномалии в поведении человека, а, следовательно, и ход событий, связанных с персоналом, обслуживающим ОПО. В модели этот фактор используется только как уточняющий параметр, а не основной. Соответственно, приняв, что производственная дисциплина на предприятии, на котором эксплуатируется объект, соответствует нормам правил и инструкций, можно отнести его к p_1 , указанной в проектной документации.

Получим, что вероятность остаточного ресурса $Y_{X1}(t_D)$ будет зависеть только от скорости износа материала элементов ОПО, что в настоящее время в основном используется при прогнозировании срока безаварийной эксплуатации.

Из вышесказанного следует, что выбранная модель в идеальных условиях обеспечивает получение статистической оценки среднего остаточного ресурса элементов объекта.

Выводы

Разработанная модель - это попытка унифицировать методики определения срока безаварийной эксплуатации ОПО, по которым в настоящее время однозначности не существует.

Под каждый конкретный объект исследования авторы выбирают определенную модель либо на основе экспериментальных данных, либо на основе положительных результатов эксплуатации подобного оборудования. Сама модель учитывает многие факторы, влияющие на безаварийную эксплуатацию объектов повышенной опасности.

При обеспечении всех проектных решений монтажа и ремонтов исследуемого объекта, выполнении норм промышленной безопасности и других нормативов, разработанная модель

позволяет получить статистической оценку среднего остаточного ресурса элементов объекта, которая может быть использована при прогнозировании сроков безаварийной эксплуатации. Это свидетельствует о правильности выбранных факторов и, в дальнейшем, позволит сократить временные затраты на прогнозирование срока безаварийной эксплуатации любого объекта повышенной опасности.

Список использованной литературы

1. Шишкина Н.А. Анализ аварий зданий и сооружений / Н.А. Шишкина // Наука и Безопасность. – 2014. – № 4 (13). – С.34-42.
2. Самигуллин Г.Х. Определение остаточного ресурса производственных зданий и сооружений нефтеперерабатывающих предприятий / Г.Х. Самигуллин, М.М. Султанов // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 2. – С.167-175.
3. Алексеева Е.Л. Изучение закономерностей физического износа несущих конструкций зданий энергетической и химической отраслей / Е.Л. Алексеева, А.Ю. Хлесткин // Наука и Безопасность. – 2014. – № 4 (13). – С.43-47.
4. Сведения об аварийности и травматизме стран СНГ [Электронный ресурс] – Межгосударственный совет по промышленной безопасности. – Режим доступа: http://www.mspbsng.org/stat_accident/2014 (2013, 2012, 2011, 2010, 2009)
5. Диагностика технических устройств / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014 – 615 с.
6. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций: уч. пособ. / А.Я. Недосека; под редакцией Б.Е. Патона. – К.: Издательство методической литературы и наглядных пособий ТК-78. – 1996 – 294 с.
7. Нассим Николас Талеб Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости / Нассим Николас Талеб. – М.: «КоЛибри». – 2015. – 528 с.

Надійшла до редакції 15.03.2016

М.А. АСТАФ'ЄВ, О.А. ДМИТРИЄВА

Донецький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ БЕЗАВАРІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТА ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Робота присвячена питанням розробки та обґрунтування моделі прогнозування термінів безаварійної експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН) різних виробництв на основі аналізу груп факторів. При побудові комплексної оцінки працездатності ОПН протягом нормативного періоду експлуатації до уваги беруться такі узагальнені показники як умови експлуатації, матеріал, що використовується, і ступінь відновлення. На основі запропонованого методу надалі планується розробка математичної моделі, що використовує отримані залежності для прогнозування терміну, по закінченню якого можлива відмова об'єкта підвищеної небезпеки з імовірністю, що не перевищує задану.

Ключові слова: математична модель, об'єкт підвищеної небезпеки, безаварійна експлуатація, прогнозування, факторний аналіз.

M.A. ASTAFIEV, O.A. DMITRIEVA

Donetsk National Technical University

MODELING OF COMPLEX ESTIMATION OF ACCIDENT-FREE OPERATION OF HIGH-RISK OBJECTS

The research work is devoted to the development and validation of predictive models timing of trouble-free operation of high-risk objects (HRO) of different industries on the basis of analysis of groups of factors. When building a comprehensive health evaluation HRO within the regulatory period of operation we take into account such generalized factors as operating conditions, material used and the degree of recovery. On the basis of the proposed method in the future we plan to develop a mathematical model using data about dependence to predict the lifetime, after which the failure of high-risk object is possible with a probability that does not exceed a given one.

Keywords: mathematical model, high-risk object, trouble-free operation, forecasting, factor analysis.