

*В.М. Попов, к.т.н., доцент, проректор, НУГЗУ,
И.А. Чуб, д.т.н., профессор, нач. каф., НУГЗУ,
М.В. Новожилова, д.ф.-м.н., профессор, ХНУСА*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ОТКАЗОВ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФОНДОВ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Проведено моделирование интенсивности отказов и вероятности безотказной работы основных производственных фондов сетей водоснабжения и водоотведения как объектов повышенной опасности. Показано, что поток отказов является нестационарным без последствия. Развита методика учета случайных и постепенных отказов элементов технической системы.

Ключевые слова: система техногенной безопасности, вероятность отказов системы, постепенные отказы, нестационарный поток отказов.

Постановка проблемы. Решение проблемы сохранения устойчивости региональной социально-экономической системы при наличии угроз техногенных аварий зависит от многих факторов, среди которых своевременность и качество планирования и осуществления комплекса профилактических мероприятий на потенциально опасных объектах (ПОО) или объектах повышенной опасности (ОПО). Кроме того, осуществление планов стратегического развития системы техногенной безопасности (СТБ) региона подразумевает построение прогноза последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) с оценкой степени риска как мультипликативного показателя, учитывающего вероятность аварии и величину возможного ущерба. Очевидно, на вероятность (частоту) возникновения ЧС в результате различного рода отказов оборудования и уровень тяжести последствий значительное влияние оказывает динамика изменения состояния основных фондов региональной производственной системы.

Анализ последних исследований и публикаций. За последние годы появился целый ряд англоязычных публикаций по системному анализу и моделированию техногенных аварий и катастроф [1, 2]. В статье [1] предложен подход к построению трехэтапной концепции анализа устойчивости инженерной инфраструктуры города при наличии различных видов случайных отказов техногенного характера на фоне вероятностного влияния природной катастрофы (урагана). В работе [2] задача обеспечения устойчивости региональной социально-экономической системы в условиях повышенной вероятности реализации угроз техногенных аварий и катастроф рассмотрена в связи с соци-

альным, экономическим и технологическим аспектами. В статье [3, 4] концепция устойчивости социально-экономической системы региона включает определение уровня эффективности СТБ.

Однако в этих и других работах не рассматриваются вопросы влияния состояния основных производственных фондов (ПФ) промышленной системы и инженерной инфраструктуры региона на вероятность возникновения и масштабы последствий возможной техногенной ЧС.

Постановка задачи и ее решение. В соответствии с вышесказанным, целью работы есть моделирование характеристик потока отказов (интенсивности отказов и вероятности безотказной работы) основных ПФ, приводящих к ЧС техногенного характера.

Неравномерность природных условий и специфика производственной базы регионов Украины определяет разнородность видов природной и техногенной опасности для каждой единицы административно-территориального деления. Главными источниками техногенной опасности для Харьковского региона являются промышленные объекты, использующие опасные химические вещества (ОХВ) (на 2013 г. – 93 объекта, около 10% всего количества химических предприятий Украины), а также объекты инженерной инфраструктуры города – системы водоснабжения и водоотведения. Еще одним источником техногенной опасности в регионе являются пожары и взрывы, вызывающие аварии техногенного характера.

Отметим, что состояние производственных фондов $S_{ПФ}$ региона может генерировать дополнительные типы отказов оборудования или способствовать увеличению тяжести последствий техногенной ЧС. Приведем несколько примеров, характеризующих состояние инженерной инфраструктуры г. Харькова. По городу эксплуатируется 2136,6 км водопроводных сетей, более 35% которых полностью выработали амортизационный срок. Еще критичнее ситуация с сетями водоотведения. Из 1620 км. сетей водоотведения более 1300 км (81%) имеют 100%-ый амортизационный износ. Это ведет к увеличению частоты возникновения, масштаба воздействия и времени ликвидации возможной техногенной аварии.

Таким образом, уровень устойчивости производственной системы в целом и отдельного ее элемента в частности зависит от состояния $S_{ПФ}$ основных ПФ элементов системы, свойств СТБ региона, а также от характеристик ОХВ на предприятиях [5].

Рассмотрим первый компонент устойчивости. Состояние $S_{ПФ}$ ПФ технической системы определяется их надежностью.

Проанализируем следующие показатели надежности системы: $P(t)$ – вероятность безотказной работы (эмпирическая функция надежности) и интенсивность отказов $\lambda(t)$ [6]. Показатели $P(t)$, $\lambda(t)$ не являются независимыми:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \quad (1)$$

Статистическая оценка интенсивности отказов $\hat{\lambda}(t)$ имеет вид:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{[N - n(t)]\Delta t} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (2)$$

где $\Delta n(t, t + \Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале наработки $t + \Delta t$; $N(t)$ – работоспособное число объектов на момент наработки t ; Δt – длительность рассматриваемого интервала наработки.

Отметим, что для дальнейшего исследования показатель $\lambda(t)$ является предпочтительным, так как интенсивность отказов более полно характеризует надежность объекта на момент наработки t и представляет частоту отказов, отнесенную к фактически работоспособному числу объектов на этот момент. Это важно иметь в виду при моделировании современного состояния основных ПФ, т.к. как общее количество предприятий N может изменяться.

Так как текущий и капитальный виды ремонта финансируются из отчислений на амортизацию, положим срок нормальной эксплуатации соответствующим сроком амортизации t_A .

В теории надежности доказано [6], что периоду нормальной эксплуатации сложных систем, состоящих из высоконадежных элементов, соответствует стационарный пуассоновский (простейший) поток числа k случайных отказов в течение периода t вида

$$P_k(t) = \frac{(\lambda_{сл} t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Так как реализация вероятности техногенной аварии или катастрофы как случайного отказа относится к числу редких событий (p – мало) на большой выборке (N – велико) ПОО, то принятие гипотезы о распределении моментов наступления аварии по закону Пуассона. При этом параметр $\lambda \approx pN$.

Таким образом, в режиме нормальной эксплуатации (рис. 1) интенсивность отказов $\lambda^{сл}(t) = \lambda^{сл} = \text{const}$ – величина, характеризующая случайные отказы (ошибки персонала, влияние природных условий и др). Отметим, что участок приработки здесь не рассматривается, так как рассматриваемые объекты повышенной опасности и элементы инженерной инфраструктуры имеют длительные периоды функционирования.

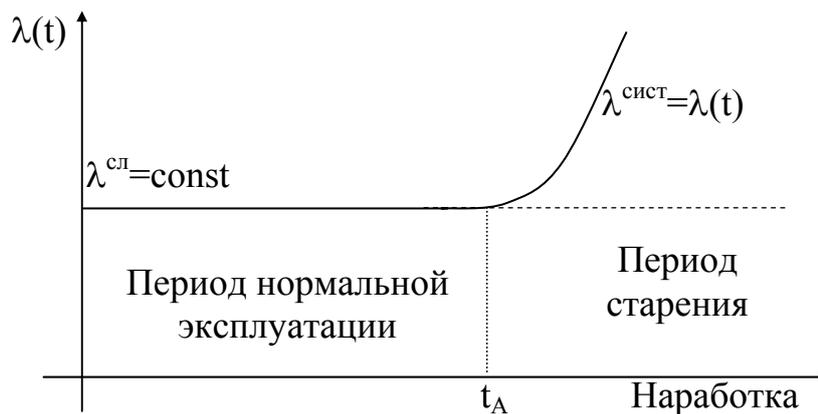


Рис. 1. Характер изменения $\lambda(t)$ интенсивности отказов со временем

Следовательно, длительность времени τ безотказной работы распределена по показательному закону вида $P^{сл}(t) = e^{-\lambda^{сл}t}$.

В современной практике хозяйствования основные фонды ПОО таковы, что условия деятельности производственной системы соответствуют во многом периоду старения. В этих условиях особенное значение приобретают систематические отказы, обусловленные закономерными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений – усталостью, износом.

Анализ имеющихся статистических данных и опыта эксплуатации технических систем показывает, что в период старения объекта интенсивность систематических отказов $\lambda^{сист}(t)$ растет (рис. 1). Иначе говоря, пуассоновский поток отказов становится нестационарным, т.е. перестает быть простейшим:

$$P_k(t, t_H) = \frac{\eta(t, t_H)^k}{k!} e^{-\eta(t, t_H)}, \quad \text{при } \eta = \int_{t_H}^{t_H+t} \lambda(t) dt \quad (4)$$

где η – параметр распределения, t_H – начало интервала наблюдения.

Проверим данное предположение, выдвинув гипотезу о нестационарном характере интенсивности отказов на основе временного ряда повреждений $\tilde{\lambda}_t$ водопроводных сетей г. Харькова в год в течение 27 лет (рис. 2).

Дальнейшие шаги исследования на нестационарность ряда:

1. Построение авторегрессии вида:

$$\tilde{\lambda}_t = \rho \tilde{\lambda}_{t-1} + e_t, \quad (5)$$

где $\tilde{\lambda}_t$ – результирующая зависимая переменная; $\tilde{\lambda}_{t-1}$ – независимая факторная переменная с лагом в один период (в нашем случае в один год); ρ – коэффициент регрессии; e_t – остатки.

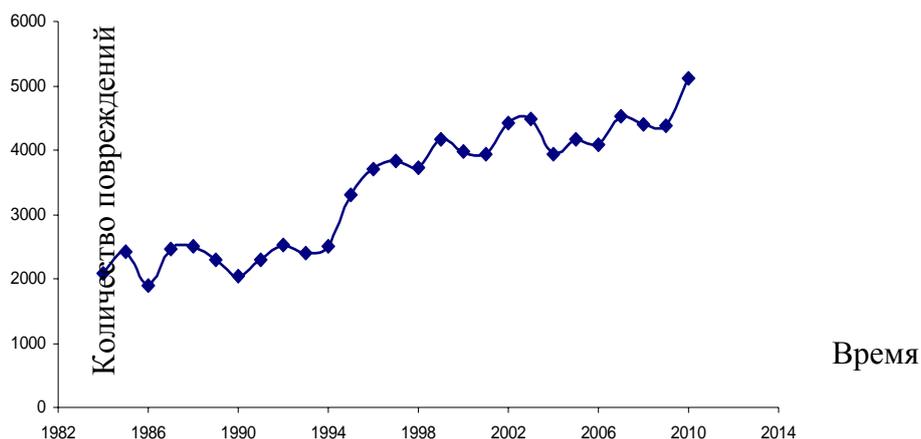


Рис. 2. Число отказов элементов водопроводной сети г. Харькова

2. Построение вспомогательного уравнения вида

$$\tilde{\lambda}_t - \tilde{\lambda}_{t-1} = (\rho - 1) \tilde{\lambda}_{t-1} + e_t, \text{ или } d \tilde{\lambda}_t = \alpha \tilde{\lambda}_{t-1} + e_t. \quad (6)$$

При параметрической идентификации моделей (5), (6) получены следующие коэффициенты регрессии: $\rho = 0,94711$, $\alpha = 0,05289$.

Уравнение авторегрессии 1-го порядка считается нестационарным в том случае, когда коэффициент регрессии $\rho \geq 1$, а, следовательно, волатильность с течением времени может нарастать.

Применим в качестве проверки на стационарность временного ряда интеграционную статистику Дарбина-Уотсона (IDW-статистику), которая для авторегрессии (5) первого порядка имеет вид

$$IDW = \frac{\sum_t (\tilde{\lambda}_t - \tilde{\lambda}_{t-1})^2}{\sum_t (\tilde{\lambda}_t - \bar{\lambda}_{t-1})^2}. \quad (7)$$

Для рассматриваемого ряда данных значение IDW-статистики составляет 0,1265, что говорит о нестационарности этого ряда. Таким образом, в предположении, что $t_n - t_A \geq 0$, а потоки случайных и систематических отказов являются пуассоновскими, выражение для вероятности безотказной работы примет вид:

$$P(t) = P^{сл}(t) P^{сист}(t) = \exp\left(-\left\{\int_0^t \lambda^{сл} dt + \int_{t_n}^{t_n+t} \lambda^{сист}(t) dt\right\}\right). \quad (8)$$

Следовательно, с момента t_A суммарная интенсивность отказов

λ_{t_A} определяется как $\lambda_{t_A}(t) = \lambda^{сл} + \lambda^{сист}(t)$. При этом считаем, что свойство отсутствия последствия в таком потоке сохранено. Тогда можно положить $t_A=0$, что упрощает дальнейшие рассуждения.

Для определения характера изменения $\lambda^{сист}(t)$ предлагаются линейная и квадратичная зависимости интенсивности отказов.

Пусть $\lambda^{сист}(t) = \beta t$, $\beta > 0$, $\beta - \text{const}$. Тогда

$$\int_{t_n}^{t_n+t} \lambda^{сист}(\tau) d\tau = \int_{t_n}^{t_n+t} \beta \tau d\tau = \beta \left(\frac{t^2}{2} + 2t_n t \right). \quad (9)$$

В случае, если $\lambda^{сист}(t) = \beta t^2$,

$$\int_{t_n}^{t_n+t} \beta \tau^2 d\tau = \beta \left(\frac{t^3 + 3t^2 t_n + 3t t_n^2}{3} \right). \quad (10)$$

Выводы. На основе анализа текущего состояния основных ПФ ПОО в работе обоснована необходимость учета фактора их старения и предложен механизм структурной идентификации динамической функции интенсивности постепенных отказов. Определение характеристик динамических показателей надежности производственной системы региона позволяет осуществить имитационное моделирование основных характеристик СТБ региона с целью обоснования параметров программы ее развития на основании учета данных о состоянии ПОО, характеристик опасной нагрузки, ресурсного потенциала СТБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ouyang Min A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems / Min Ouyang // Structural Safety, 2012. – N 36–37. – P. 23-31.
2. Bruneau M. A ramework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities / M. Bruneau Chang S.E., Eguchi R.T. et al // Earth Spectra, 2006. – 19(4). – P. 737-738.
3. Попов В.М. Модель адаптивной системы техногенной безопасности региона / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 6. – С. 248-252.
4. Попов В.М. Показатели эффективности региональной системы техногенной безопасности / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Бело-

русь. – 2014. – № 2(20). – С. 32-41.

5. Попов В.М. Моделирование состояния устойчивости производственной системы / В.М. Попов // Системи обробки інформації. – 2015.– Вип. 6.– С. 204-208.

6. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю. К. Соловьев А. Д. Беляев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

V.M. Popov, I.A. Chub, M.V. Novozhylova

Моделювання характеристик потоку відмов основних виробничих фондів об'єктів підвищеної небезпеки

Проведено моделювання інтенсивності відмов і ймовірності безвідмовної роботи основних виробничих фондів мереж водопостачання та водовідведення як об'єктів підвищеної небезпеки. Показано, що потік відмов є нестационарним без післядії. Розвинений підхід до обліку випадкових і поступових відмов елементів технічної системи.

Ключові слова: система техногенної безпеки, ймовірність відмов системи, поступові відмови, нестационарний потік відмов.

V.M. Popov, I.A. Chub, M.V. Novozhylova

Simulation of flow characteristics bounce main assets of high-risk objects

The simulation failure rate and the probability of failure of the main assets of water supply and sanitation as a major hazard. It is shown that failures are transient flow without aftereffect. We develop an approach for the integration of random and gradual failures of technical systems.

Keywords: technogenic safety system, failure probability, gradual rejection, unsteady flow failures.