

УДК 519.85

В.М. Попов

Національний університет громадянської захисти України, Харків

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

*Проведено моделювання впливу стану виробничих фондів на ймовірність виникнення та інтенсивність аварій, викликаних випадковими отказами різних типів. Осуществлен анализ концепции устойчивости региональной производственной системы, рассмотренной в зависимости от состояния производственных фондов системы и эффективности функционирования системы техногенной безопасности. Предложен подход к учету случайных и постепенных отказов элементов технической системы. Рассмотрены выражения для вероятности безотказной работы при линейной и квадратичной зависимости интенсивности отказов от времени.*

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

### Введение

В современных исторических условиях перспективы дальнейшего развития общества, повышения уровня инвестиционной привлекательности территории, обеспечения уровня жизни населения зависят от способности территориальной (как государственной, так и региональной) социально-экономической системы функционировать в условиях воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. В специальной и научной литературе такое свойство системы называют устойчивостью (*resiliency*) [1].

Важной гранью этой проблемы является обеспечение заданного уровня устойчивости региональной социально-экономической системы при наличии угрозы реализации техногенных аварий и катастроф.

Однако задача усложняется отсутствием четких механизмов оценки устойчивости региональной системы, преимущественно статический характер существующих методик оценивания, пренебрежением динамикой развития региональной социально-экономической системы/

Эффективность управления безопасностью и устойчивостью функционирования системы зависит от многих факторов. Первостепенное значение имеют глубина и точность прогноза последствий опасных ситуаций с оценкой степени риска, а также своевременность и качество планирования и осуществления комплекса профилактических и защитных мероприятий, соответствующих состоянию основных производственных фондов и количеству опасных веществ на том или ином потенциально опасном объекте (ПОО) или объекте повышенной опасности (ОПО) [2]. В контексте осуществления этапов стратегического планирования важным является создание инструментальных средств оценки динамических характеристик развития региональной производственной системы.

**Анализ предыдущих исследований.** В течение последних 10 лет появилось значительное число англоязычных публикаций по системному анализу и моделированию техногенных и социальных катастроф [3 – 7]. Это во многом было вызвано необходимостью осознания причин и последствий техногенной катастрофы в Нью-Орлеане (США), 2005 г., когда основной причиной затопления 80% городской территории стал прорыв напорного фронта защитной дамбы города, построенной еще до второй мировой войны. Разрушения были таковы, что 30% населения Нью-Орлеана навсегда покинуло город.

В статье [5] рассмотрена трехэтапная технология анализа устойчивости инженерной инфраструктуры города при наличии различных видов случайных отказов, а также с учетом вероятностного влияния такого вида природной катастрофы как ураган. В статье [6] предложен набор количественных мер устойчивости технических и организационных систем в четырех взаимосвязанных измерениях: техническом, организационном, социальном, экономическом, причем понятие устойчивости в данном контексте включает 4 свойства: прочность, избыточность, достаточность ресурсов, скорость.

Задача обеспечения техногенной устойчивости региональной социально-экономической системы в условиях повышенной вероятности реализации угроз техногенных аварий и катастроф объективно подлежит системному рассмотрению в неразрывной связи с социальным, экономическим и технологическим аспектами [8]. Однако в специальной литературе до сих пор ведется содержательная терминологическая дискуссия, а в понятие устойчивости вкладывается тот или иной смысл в зависимости от направленности исследования [5, 9].

В статье [10] концепция устойчивости региональной социально-экономической системы рассматривается через призму эффективности системы

техногенной безопасности. Однако в этих и других работах практически не уделено внимания влиянию состояния основных производственных фондов промышленной системы и инженерной инфраструктуры региона на вероятность возникновения и масштабы последствий возможной техногенной аварии.

**Целью** данной статьи является моделирование влияния состояния производственных фондов на вероятность возникновения и интенсивность (величина ущерба) аварий, вызванных случайными отказами различных типов.

### Изложение основного материала

Неравномерность природных условий и специфика производственной базы регионов Украины определяет разнородность видов природной и техногенной опасности для каждой единицы административно-территориального деления. Выделим основные типы  $R = \{r_1, \dots, r_N\}$  техногенной опасности для Харьковского региона. На основе анализа материалов [11] можно сделать вывод, что основную техногенную опасность в Харьковской области представляют объекты химической промышленности, или промышленные объекты, использующие опасные химические вещества (на 2013 г. – 93 объекта, около 10% всего количества химических предприятий Украины). Другим важным источником техногенной опасности являются объекты инженерной инфраструктуры города. Среди систем жизнеобеспечения города необходимо выделить систему водоотведения – достаточно вспомнить аварию на Диканевских очистных сооружениях, ставшую одной из самых крупных аварий на очистных сооружениях в мире. Последствия этой аварии устранились более 10 лет.

Еще одним серьезным источником техногенной опасности в регионе являются пожары и взрывы, вызывающие аварии техногенного характера.

Под устойчивостью производственной или инфраструктурной системы региона, следуя [4], будем понимать способность системы оказывать сопротивление (предотвращать и противостоять) любым возможным опасностям, поглощать начальный урон и восстанавливать нормальный режим работы.

Другими словами, под устойчивостью технологической (технической) системы понимается возможность сохранения ее работоспособности, точнее, производительности, при чрезвычайной ситуации (ЧС).

Для количественного определения устойчивости может быть использован специальный показатель – коэффициент устойчивости:

$$K_y = W_{\text{соxp}} / W_0, \quad (1)$$

где  $W_{\text{соxp}}$  – прогнозируемые сохраняющиеся производственные мощности после воздействия поражающих факторов чрезвычайной ситуации без учета либо с учетом потерь в результате утраты внешних связей (поставок необходимых ресурсов);  $W_0$  – про-

изводственные мощности до воздействия поражающих факторов чрезвычайной ситуации.

Однако в данном определении не принимается во внимание важный аспект времени восстановления производственной системы до предаварийного уровня.

Отметим еще два важных фактора внутренней среды региональной социально-экономической системы.

Во-первых, при системном подходе к обеспечению устойчивости регионального производственного комплекса необходимо учитывать, что функции сопротивления (предотвращения и противостояния) негативным воздействиям возможной техногенной аварии во многом присущи системе техногенной безопасности региона (СТБ), поэтому эффективность работы СТБ  $F_{\text{повс}}$  – в повседневном режиме функционирования и  $F_{\text{чс}}$  – режиме чрезвычайной ситуации выступают параметрами устойчивости производственной системы региона. Очевидно, функционалы  $F_{\text{повс}}$   $F_{\text{чс}}$  являются векторными, однако в качестве обобщенного критерия можно принять нормированную величину ресурсного обеспечения деятельности СТБ.

Во-вторых, в контексте решения проблемы обеспечения устойчивости региональной производственной системы необходимо принимать во внимание состояние производственных фондов  $S_{\text{ПФ}}$  региона. Это состояние может генерировать дополнительные типы отказов оборудования или способствовать увеличению тяжести последствий вероятной техногенной аварии. Приведем лишь один пример. Как известно, в Украине накоплен значительный фонд строительных металлических конструкций: производственные здания, сооружения различного назначения: мосты, подстанции, дамбы и т.д. На 2013 год 12 – 17 % существующего металлофонда находилось на грани выхода из строя [11], следствием чего является частичная или полная потеря характеристик прочности, снижение несущей способности конструкций, повышение вероятности обрушения при воздействии поражающих факторов ЧС и масштаба обрушения конструкций, что ведет к увеличению частоты возникновения и времени ликвидации возможной техногенной аварии.

Таким образом, уровень  $R$  устойчивости производственной системы в целом и отдельного ее элемента в частности зависит от состояния  $S_{\text{ПФ}}$  основных фондов элементов системы, свойств региональной СТБ, а также от характеристик опасных веществ, находящихся на предприятиях.

В данной статье основное внимание уделено первому компоненту устойчивости. Состояние основных производственных фондов как технической системы определяется ее надежностью. Обычно определяются следующие показатели надежности технической системы: плотность  $f(t)$  распределения отказов системы – оценка частоты отказов,  $P(t)$  – вероятность безотказной работы – эмпирическая функция надежности, средняя наработка до отказа

$T_0=M(T)$ , интенсивность отказов  $\lambda(t)$  [8],  $Q(t)$  – оценка вероятности отказа,  $t$  – момент периода наработки объекта до отказа. Примем в качестве оценки состояния  $S_{ПФ}$  вероятность  $P(t)$  безотказной работы. Положим также, что вероятность возникновения в регионе двух или более однотипных аварий одновременно практически равна нулю (что подтверждается статистическими данными). Тогда концепция трехэтапной структуры анализа устойчивости технической системы, предложенная в [5], может быть модифицирована следующим образом.

Первый этап рассматриваемой структуры относится к периоду нормального функционирования производственной системы, так называемому периоду предотвращения техногенной аварии или катастрофы. Длительность  $t_0$  первого периода зависит (прямо пропорционально) от эффективности  $F_{повс}$  функционирования СТБ региона в повседневном режиме (профилактика), оценки состояния  $S_{ПФ}$  (рис. 1).

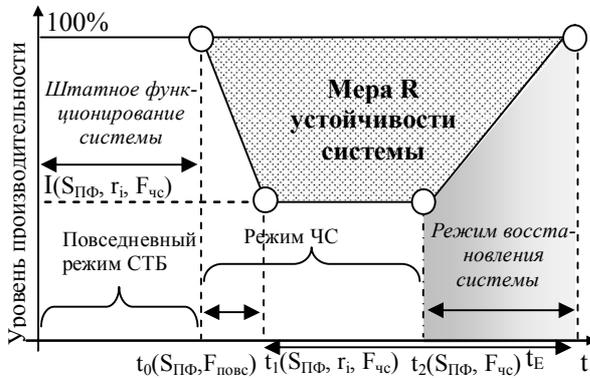


Рис. 1. Анализ устойчивости производственной региональной системы

Таким образом, показатели  $F_{повс}$  и  $S_{ПФ}$  выступают как параметры.

Длительность  $(t_1(S_{ПФ}, G_b, F_{чс}) - t_0(S_{ПФ}, F_{повс}))$  второго периода (распространение опасности) прямо пропорционально зависит от вида  $G_b$  реализованной опасности и оценки  $S_{ПФ}$ , в то же время обратно пропорциональна эффективности  $F_{чс}$  выполнения системой техногенной безопасности региона функций режима чрезвычайной ситуации.

Наконец, длительность  $(t_E - t_2)$  третьего периода есть длительность ликвидации последствий техногенной аварии или катастрофы, так называемый период оценки размеров ущерба и восстановления производительности системы до доаварийного или более высокого уровня (пример – Диканевские очистные сооружения). Данный период также характеризуется участием сил и средств СТБ региона, участвующих в работах по ликвидации в соответствии с регламентом.

Наряду с вероятностью  $P(t)$  безотказной работы рассмотрим еще один важный показатель надежности – интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Статистическая оценка интенсивности отказов  $\hat{\lambda}(t)$  определяется по формуле

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

где  $\Delta n(t, t + \Delta t)$  – число объектов, отказавших в интервале наработки  $t + \Delta t$  к произведению к фактически работоспособного числа объектов  $N(t)$  на момент наработки  $t$  на длительность рассматриваемого интервала наработки  $\Delta t$ .

Отметим, что для целей дальнейшего исследования данный показатель –  $\lambda(t)$  – является предпочтительным, так как, во-первых, интенсивность отказов более полно характеризует надежность объекта на момент наработки  $t$ , так как представляет частоту отказов, отнесенную к фактически работоспособному числу объектов на этот момент. Это важно иметь в виду при моделировании современного состояния основных производственных фондов, так как общее количество предприятий  $N$  изменяется в связи с закрытием предприятий и по другим причинам (банкротство и т.д.).

Во-вторых, показатели надежности  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$  (и другие) не являются независимыми, т.е. зная выражение для одного из них, если необходимо, можно однозначно определить другой. Так,

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

Используем далее следующую терминологию.

Под техническим ресурсом системы будем понимать наработку объекта от начала его эксплуатации до наступления предельного состояния после всех видов ремонтов. Так как текущий и капитальный виды ремонта финансируются из отчислений на амортизацию, положим срок нормальной эксплуатации соответствующим сроком амортизации  $t_A$ . Здесь предельное состояние – состояние объекта, при котором его применение по своему функциональному назначению недопустимо или нецелесообразно, что прекращение использования объекта по следующим причинам: при неустранимом нарушении безопасности; при неустранимом отклонении величин заданных параметров; при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов. Будем считать, что в зависимости от стоимости (величины затрат различных ресурсов) восстановления объекта в случае неработоспособности объект может быть отнесен к категории восстанавливаемых или невосстанавливаемых. Во втором случае предельное состояние является последней фазой жизненного цикла объекта.

В теории надежности доказано [12], что периоду нормальной эксплуатации сложных систем, состоящих из высоконадежных элементов, соответствует стационарный пуассоновский (простейший) поток числа  $k$  случайных отказов в течение периода  $t$  вида

$$P_k(t) = e^{-\lambda t} \cdot (\lambda^{cl} t)^k / k!. \quad (3)$$

Так как реализация вероятности техногенной аварии или катастрофы как случайного отказа относится к числу редких событий ( $p$  – мало) на большой

выборке ( $N$  – велико) потенциально опасных объектов, то принятие гипотезы о распределении моментов наступления аварии по закону Пуассона, представляющего предельный случай биномиального распределения, обосновано. При этом параметр  $\lambda \approx pN$ .

Таким образом, в режиме нормальной эксплуатации (рис. 2) интенсивность отказов  $\lambda^{cl}(t) = \lambda^{cl} = const$  – 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.

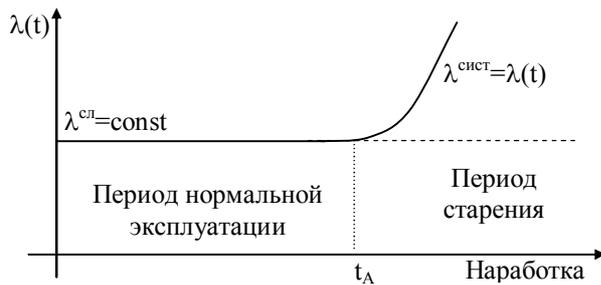


Рис. 2. Характер изменения  $\lambda(t)$  интенсивности отказов со временем

Следовательно, длительность времени  $\tau$  безотказной работы распределена по показательному закону вида  $P^{cl}(t) = e^{-\lambda^{cl}t}$ . При этом все множество отказов можно разбить на подклассы  $q^h$ ,  $h=1,2,\dots,N$  по степени тяжести последствий.

В современной практике хозяйствования основные фонды ПОО таковы, что условия деятельности производственной системы соответствует во многом периоду старения. В этих условиях особенное значение приобретают систематические отказы, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение.

Анализ имеющихся статистических данных и опыта эксплуатации технических систем показывает, что в период старения объекта интенсивность систематических отказов  $\lambda^{sist}(t)$  растет (рис. 2). Другими словами, пуассоновский поток отказов становится нестационарным, т.е. перестает быть простейшим:

$$P_k(t, t_H) = \frac{\eta(t, t_H)^k}{k!} e^{-\eta(t, t_H)}, \quad (4)$$

где параметр распределения  $\eta = \int_{t_H}^{t_H+t} \lambda(t) dt$ ,  $t_H$  – начало интервала наблюдения.

Однако, важное свойство отсутствия последствия в таком потоке сохранено.

Пусть  $a$  – событие, определяющее работоспособное состояние системы с точки зрения реализации случайных отказов ( $a$  – отсутствие отказов),  $b$  –

работоспособное состояние системы с точки зрения систематических отказов. Считая случайные и систематические отказы независимыми событиями, можно предположить, что система работоспособна, когда имеют место событие  $a$  и событие  $b$ . Этому условию соответствует логическая функция вида:  $F = a \wedge b$ . Заменяя события  $a, b$  вероятностями их реализации, получим  $P(t) = P_a(t)P_b(b)$ .

В предположении, что  $t_H - t_A \geq 0$ , а также принимая, что потоки случайных и систематических отказов являются пуассоновскими, выражение для вероятности безотказной работы примет вид:

$$P(t) = P^{cl}(t)P^{sist}(t) = \exp \left\{ - \left[ \int_0^t \lambda^{cl} dt + \int_{t_H}^{t_H+t} \lambda^{sist}(t) dt \right] \right\}. \quad (7)$$

Таким образом, с момента  $t_A$  суммарная интенсивность отказов  $\lambda_{t_A}$  определяется как

$$\lambda_{t_A}(t) = \lambda^{cl} + \lambda^{sist}(t).$$

Для определения характера изменения  $\lambda^{sist}(t)$  рассмотрим два вида зависимости интенсивности отказов от времени – линейную и квадратичную.

Пусть  $\lambda^{sist}(t) = \alpha(t - t_A)$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\alpha - const$ . Тогда

$$\int_{t_H}^{t_H+t} \lambda^{sist}(\tau) d\tau = \int_{t_H}^{t_H+t} \alpha(\tau - t_A) d\tau = \alpha(\tau^2 - t_A \tau) \Big|_{t_H}^{t_H+t} = \alpha \left\{ \frac{t^2}{2} + t(2t_H - t_A) \right\}. \quad (8)$$

В случае, если  $\lambda^{sist}(t) = \alpha(t - t_A)^2$ . Тогда

$$\int_{t_H}^{t_H+t} \alpha(\tau - t_A)^2 d\tau = \alpha \left( \frac{\tau^3}{3} - \frac{t_A \tau^2}{2} + t_A^2 \tau \right) \Big|_{t_H}^{t_H+t} = \alpha \left( \frac{t^3 + 3t^2 t_H + 3t t_H^2}{3} - \frac{t_A t(2t_H + t)}{2} + t_A^2 t \right). \quad (9)$$

Рассматриваемый пуассоновский поток является нестационарным, однако свойство отсутствия последствия в нем сохранено.

Очевидно, длительная эксплуатация ПОО, и как следствие, старение основных производственных фондов приводит не только к появлению систематических отказов, но и к изменению тяжести случайных отказов. Возникает так называемый синергетический эффект. Такие виды случайных отказов, как непредусмотренные перегрузки, внезапные отключения энергоресурсов, ошибки персонала, сбои автоматизированной (автоматической) системы управления и др., на фоне накопления технической системой усталости вызывают повышенный уровень воздействия на окружающую среду и человека.

Отметим также, что тяжесть отказов влияет также на состояние системы техногенной безопасности региона, включая как состояние ее ресурсного потенциала, так и уровень организационного управления системой.

Линейная зависимость интенсивности отказов от времени может служить приближением при  $t_n \gg t_A$ , т.е. при асимптотическом поведении функции, что согласуется с результатами исследований других авторов, которые указывают на то, что момент наступления постепенного отказа зачастую имеет распределение, близкое к нормальному [12]. При этом можно считать, что функция распределения времени безотказной работы является суперпозицией показательного и гауссовского распределений, где показательное распределение соответствует внезапным отказам, а гауссовское – постепенным отказам, которые вызываются старением. Тогда  $\alpha$  в (8) имеет смысл величины, обратной параметру  $\sigma$  среднеквадратического отклонения нормально распределенной случайной величины.

### Выводы и направления дальнейших исследований

Устойчивость региональной социально-экономической системы региона в целом есть возрастающая функция устойчивости региональной производственной системы. На основе анализа текущего состояния основных производственных фондов ПОО в работе обоснована необходимость учета фактора их старения и предложен механизм структурной идентификации динамической функции интенсивности постепенных отказов технической системы. Определение характеристик динамических показателей надежности производственной системы региона – важный этап формирования миссии программы развития системы техногенной безопасности на основании учета данных о состоянии ПОО, характеристик опасной нагрузки, ресурсного потенциала системы техногенной безопасности.

В дальнейших исследованиях будет рассмотрен механизм параметрической идентификации динамических показателей надежности основных производственных фондов потенциально опасных объектов, в том числе элементов инженерной инфраструктуры региона.

### МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ СТІЙКОСТІ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ

В.М. Попов

Проведено моделювання впливу стану виробничих фондів на ймовірність виникнення та інтенсивність аварій, викликаних випадковими відмовами різних типів. Здійснено аналіз концепції стійкості регіональної виробничої системи, яку розглянуто в залежності від стану виробничих фондів системи і ефективності функціонування системи техногенної безпеки. Запропоновано підхід до врахування випадкових та поступових відмов елементів технічної системи. Розглянуто вирази для ймовірності безвідмовної роботи, якщо залежність інтенсивності відмов від часу є лінійною або квадратичною.

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

### RESILIENCY STATE MODELING OF PRODUCTION SYSTEM

V.M. Popov

The paper proposes model of the impact of the state of productive assets on the probability of occurrence and intensity of accidents caused by random failures of various types. The analysis of the regional production system concept of resiliency has been considered depending on the system productive assets and the efficiency of the technological safety system. An approach to the integration of random and phasing failures of elements of the technical system has been proposed. The expressions for the probability of failure-free operation for linear and quadratic form of dynamic dependence of the intensity of failures have been proposed.

**Keywords:** stability of the system, phasing, the probability of failure, failure of steady flow, the system of technogenic safety.

### Список литературы

1. Haines Y.Y. On the definition of resilience in systems / Y.Y. Haines // *Risk Anal.* – 2009. – № 29(4). – P. 498-501.
2. Методика ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів. Наказ № 98 МНС України від 23.02.2006.
3. National infrastructure protection plan, partnering to enhance protection and resiliency, US Department of Homeland Security, 2009. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/NIPP\\_Plan.pdf](http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/NIPP_Plan.pdf).
4. Vugrin E.D. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems / E.D. Vugrin, D.E. Warren, M.A. Ehlen, R.C. Camphouse // *Sustainable and resilient critical infrastructure systems: simulation, modeling, and intelligent engineering.* – Berlin: Springer-Verlag, 2010. – 420 p.
5. Ouyang Min. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems / Min Ouyang L. Duecas-Osorio, Xing Min // *Structural Safety*, 2012. – № 36. – 37. – P. 23-31.
6. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities / M. Bruneau, S.E. Chang, R.T. Eguchi et al // *Earth Spectra.* – 2006. – 19(4). – P. 737-738.
7. Duecas-Osorio L. Cascading failures in complex infrastructure systems/ L. Duecas-Osorio, S.M. Vemuru // *Struct. Safety*, 2009. – № 31. – P. 157-167.
8. Воробьев Ю.Л. Управление риском и устойчивое развитие. Человеческое измерение / Ю.Л. Воробьев, Г.Г. Малинецкий, Н.А. Махутов // *Общественные науки и современность.* – 2000. – №6. – С. 150-162.
9. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems / C.S. Holling // *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1973. – № 4. – P 1-23.
10. Попов В.М. Модель адаптивной системы техногенной безопасности региона / В.М. Попов, М.В. Новожилова // *Системи обробки інформації.* – X.: XV ПС, 2012. – Вип. 6(104). – С. 248-252.
11. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2013 році. – К.: “Чорнобиль-інтерінформ”, 2014. – 236 с.
12. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Соловьев, А.Д. Беляев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

Поступила в редколлегию 6.01.2015

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Н.Д. Сизова, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков.