

УДК 004.422.5:[002+51]-047.58

## ИНФОРМАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ

А.Г. ДАВЫДОВСКИЙ, М. ЕЛ-ГРЕЙД, К.Д. ЯШИН, В.С. ОСИПОВИЧ, Л.П. ПИЛИНЕВИЧ,  
Ю.А. ГЕДРАНОВИЧ, Е.В. ТОМАШЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 27 ноября 2012*

Разработаны информационная и математическая модели оценки риска снижения надежности профессиональной деятельности операторского персонала опасных производств. Предложен метод математического прогнозирования риска снижения надежности операторов.

*Ключевые слова:* оператор, надежность, риск, прогнозирование, информационная модель, математическая модель.

### Введение

Проблема обеспечения безаварийного функционирования энерготранспортных предприятий, тесно связана с решением задач по прогнозированию риска снижения надежности профессиональной деятельности операторского персонала этих предприятий [1, 2]. Определены профессионально важные психо-физиологические характеристики (ПХ) оператора опасного производства и разработан программный комплекс для мониторинга параметров этих характеристик оператора [2, 3]. Актуальной является разработка программного комплекса, позволяющего осуществить оценку риска снижения надежности оператора опасного производства, а также прогнозирование снижения надежности этого оператора. В свою очередь для создания программного комплекса необходимо разработать математическую модель оценки риска снижения надежности. Для построения математической модели необходимо разработать информационную модель изменения надежности оператора.

В связи с этим, целью работы была разработка информационной и математической моделей риска изменения надежности профессиональной деятельности оператора на основе анализа изменений психофизиологических характеристик специалиста.

### Информационная модель надежности деятельности оператора

За рабочую гипотезу принимаем положение о том, что риск снижения надежности оператора (СНО) пропорционален вероятности нарушения функционального состояния оператора, определяемого на основании мониторинга его психофизиологических характеристик. На основании этой гипотезы разработана информационная модель изменения надежности профессиональной деятельности оператора (рис. 1). Модель учитывает детерминированность функционального состояния оператора индивидуальными ПХ [4]. Исходным является оптимальное рабочее состояние оператора, которое характеризуется высокой устойчивостью ПХ и отсутствием каких-либо признаков утомления человека.

Установим четыре основных состояния надежности оператора. Первое из них – состояние допустимой надежности оператора. В данном состоянии оператор находится в условиях обычного дежурства. При этом вероятность риска СНО не превышает некоторого предельно допустимого значения ( $lim - P$ ) <  $lim$ . Данное состояние характеризуется высокой надежностью

деятельности оператора, его ПХ находятся в пределах нормы. Первое состояние характерно для операторского персонала, когда вработывание уже произошло, а количество ошибок, совершаемых оператором, практически равно нулю.

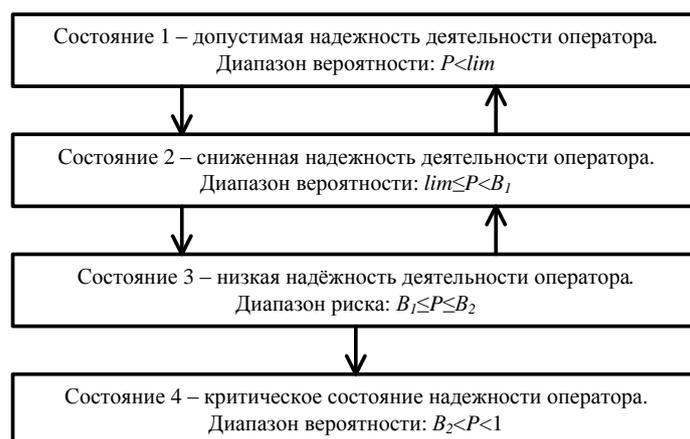


Рис. 1. Информационная модель изменения надежности деятельности операторов опасных производств

Второе состояние – сниженная надежность оператора. При возрастании информационных, эмоциональных, физических нагрузок и в связи с развитием центрального (умственного) и периферического (физического) утомления оператор переходит в состояние снижения надежности своей деятельности. При этом вероятность риска СНО находится в пределах  $\lim \leq P < B_1$ . Показатели ПХ находятся на границах нормы, что объясняется нарастанием симптомов утомления, повышением частоты совершения ошибочных действий оператора. Восстановление работоспособности и надежности оператора возможно после отдыха, после чего возможен возврат в состояние допустимого риска.

Третье состояние – низкая надежность оператора. Это состояние характеризуется высокой вероятностью риска СНО ( $B_1 \leq P \leq B_2$ ), выходом ряда ПХ за пределы диапазонов нормы и появлением риска аварийных ситуаций. Это состояние объясняется продолжительной работой и усугублением центрального и периферического утомления. При пребывании оператора в третьем состоянии целесообразно специальное обследование, медицинская и профессиональная экспертиза. После отдыха возможно улучшение функционального состояния специалиста.

Четвертое состояние – критическое состояние надежности оператора. Здесь характерно значительное и интенсивное снижение профессиональной надежности оператора, частые ошибочные действия и риск возникновения аварийных ситуаций. При этом диапазон вероятности СНО  $B_2 < P < 1$ . В данном состоянии необходимо прекратить профессиональную деятельность оператора. Целесообразны реабилитационные мероприятия.

Значения  $\lim$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  определяются экспериментальным путем на основе наблюдений и с учетом характера деятельности оператора.

Очевидно, что допустимая степень надежности профессиональной деятельности оператора (рис. 1) достигается только в случае, если показатели его ПХ находятся в пределах нормы. При этом надежность профессиональной деятельности оператора снижается, если показатель хотя бы одного из ПХ меньше минимального или превышает максимальное значение диапазона нормы.

### Математическая модель оценки риска снижения надежности деятельности оператора

На основе представленной выше рабочей гипотезы предлагается математическая модель оценки нарушения функционального состояния оператора. Модель основана на нашем допущении, что изменение риска СНО относительно изменения вероятности нарушения функционального состояния оператора  $dR/dP$  прямо пропорционально (коэффициент пропорциональности 1) произведению этой величины вероятности  $P$  и риска снижения надежности  $R$ :

$$\frac{dR}{dP} = P \cdot R. \quad (1)$$

После дифференцирования уравнения (1) в разделяющихся переменных и полагая, что  $dP=d(P+P_o)$ , где  $P_o$  и  $P$  – соответственно, исходное и текущее значения вероятности нарушения функционального состояния оператора:

$$\frac{dR}{R} = P \bullet d(P + P_o). \quad (2)$$

Последующее интегрирование (2) приводит к уравнению (3):

$$\ln R = \frac{P^2}{2} + P_o \bullet P + C_1, \quad (3)$$

где  $C_1$  – постоянная величина интегрирования, характеризующая степень ошибки эмпирических измерений психофизиологических показателей функционального состояния оператора (определяется экспериментально). Последующее потенцирование уравнения (3) позволяет перейти к уравнению (4) для количественной оценки риска СНО в зависимости от вероятности нарушения функционального состояния оператора:

$$R = \exp\left(\frac{P^2}{2}\right) \bullet \exp(P_o P) \bullet \exp(C_1). \quad (4)$$

Уравнения (1) и (4) позволяют связать риск снижения надежности профессиональной деятельности оператора с вероятностью нарушения его функционального состояния, которое, в свою очередь, характеризуется индивидуальным набором ПХ.

Введем специальный дискриминант количественной оценки вероятности нарушения функционального состояния оператора  $D_i$ , где  $i$  – количество исследованных ПХ оператора. Дискриминант  $D_i$  позволяет соотнести изменения каждого из количественно измеряемых показателей ПХ ( $x_i$ ) по отношению к минимуму ( $x_{\min}$ ) и максимуму ( $x_{\max}$ ) соответствующего диапазона нормы (последние определяются экспериментальным путем):

$$D_i = \frac{(x_i - x_{\min})(x_i - x_{\max})}{x_{\min} x_{\max}}. \quad (5)$$

При этом  $D_i$  является удобным маркером для оценки риска снижения надежности профессиональной деятельности операторов. Если величина ПХ находится в пределах определенной нормы ( $x_{\min} < x_i < x_{\max}$ ), то  $D_i < 0$  и вероятность СНО довольно низка. Если величина ПХ выходит за пределы определенной нормы ( $x_i < x_{\min}$ , или  $x_i > x_{\max}$ ), то  $D_i > 0$  и вероятность СНО возрастает по мере увеличения  $D_i(x_i)$ .

Удельное изменение вероятности снижения надежности оператора  $P(D_i)$  относительно параметров  $D_i$  можно записать в виде:

$$\frac{dP(D_i)}{dD_i} = P(D_i)[1 - P(D_i)]. \quad (6)$$

После интегрирования уравнения (6) получаем логистическую функцию [5], задаваемую уравнением (7):

$$P(D_i) = \frac{e^{D_i}}{1 + e^{D_i}}. \quad (7)$$

На основе уравнения (7) можно оценить интегральную вероятность нарушения функционального состояния оператора с учетом измеренных ПХ [3] в любой момент времени  $t_j$  периода профессиональной деятельности:

$$P(t_j) = \prod_{i=1}^n P(D_i). \quad (8)$$

Далее, с использованием выражения (4), может быть рассчитан риск снижения надежности оператора  $R_j$ , где  $j$  – порядковый номер исследования риска СНО, которое выполнено в

$j$ -ый момент времени с использованием интегральных показателей вероятности нарушения функционального состояния оператора  $P(t_j)$ :

$$R_j(D_i, t_j) = P_0(D_0, t_0) e^{\left( \frac{P^2(D_i, t_j)}{2} \right)}, \quad (9)$$

где  $P_0(D_0, t_0)$  – вероятность нарушения функционального состояния оператора, рассчитанная в начальный период времени исследований (первичные измерения ПХ).

С помощью уравнения (9) может быть рассчитан средневзвешенный показатель риска СНО  $\langle R \rangle$  для любого момента времени профессиональной деятельности:

$$\langle R \rangle = \sum R_j w_j, \quad (10)$$

где  $R_j$  – риск СНО в  $j$ -м исследовании в период мониторинга функционального состояния оператора, а  $w_j$  – его удельно-весовой показатель. Последний определяется экспериментальным путем: более ранние исследования ПХ имеют низкие  $w_j$ , более поздние – имеют высокие  $w_j$ . Старые измерения ПХ учитываются, но их вес постепенно уменьшается по сравнению с более поздними измерениями ПХ.

Зная риск СНО в каждый из моментов времени  $t_j$ , можно прогнозировать ожидаемый риск ( $R_{\text{прогноз}}$ ) через определенный период времени от настоящего момента. Назовем это прогнозом на заданную «глубину прогнозирования». Мгновенное изменение прогнозируемого риска пропорционально средневзвешенному риску  $\langle R \rangle$  на всем периоде профессиональной деятельности оператора  $T$  и «глубине прогнозирования»  $t$ . При этом коэффициент пропорциональности равен единице. Поэтому получим:

$$\frac{d(R_{\text{прогноз}} - \langle R \rangle)}{dt} = \left( \frac{T+t}{T} \right) (R_{\text{прогноз}} - \langle R \rangle), \quad (11)$$

где  $\langle R \rangle$  – величина средневзвешенного риска СНО,  $T$  – полный период времени всех предшествующих мониторингов функционального состояния оператора,  $n$  – «глубина прогнозирования» риска СНО.

После дифференцирования уравнения (11) в разделяющихся переменных:

$$\frac{d(R_{\text{прогноз}} - \langle R \rangle)}{(R_{\text{прогноз}} - \langle R \rangle)} = \left( \frac{T+t}{T} \right) dt. \quad (12)$$

Последующее интегрирование (12) позволяет получить уравнение (13):

$$\ln(R_{\text{прогноз}} - \langle R \rangle) = \left( t + \frac{t^2}{2T} \right) + C_2. \quad (13)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, характеризующая величину ошибок в расчетах риска.

Последующее потенцирование выражения (13) позволяет получить уравнение (14) для расчета величины риска на задаваемую «глубину прогнозирования»:

$$R_{\text{прогноз}} = \exp \langle R \rangle \cdot \exp \left( t + \frac{t^2}{2T} \right) \cdot \exp(C_2). \quad (14)$$

Таким образом, величина прогнозируемого риска СНО непосредственно зависит от величины средневзвешенного риска СНО и «глубины прогнозирования»  $t$ . Очевидно, что увеличение «глубины прогнозирования»  $t$  на фоне небольшой продолжительности предшествующих наблюдений  $T$  приведет к увеличению ошибки прогнозируемой величины риска. Анализ выражения (12) показывает, что при  $t \rightarrow 0$  и  $C_2 \rightarrow 0$  уровень прогнозируемого риска СНО равен:

$$R_{\text{прогноз}} = \exp \langle R \rangle \cdot \exp \left( \frac{1}{2T} \right). \quad (15)$$

На рис. 2 представлена поэтапная схема прогнозирования риска СНО. Начальным этапом является исследование комплекса индивидуальных ПХ специалиста.

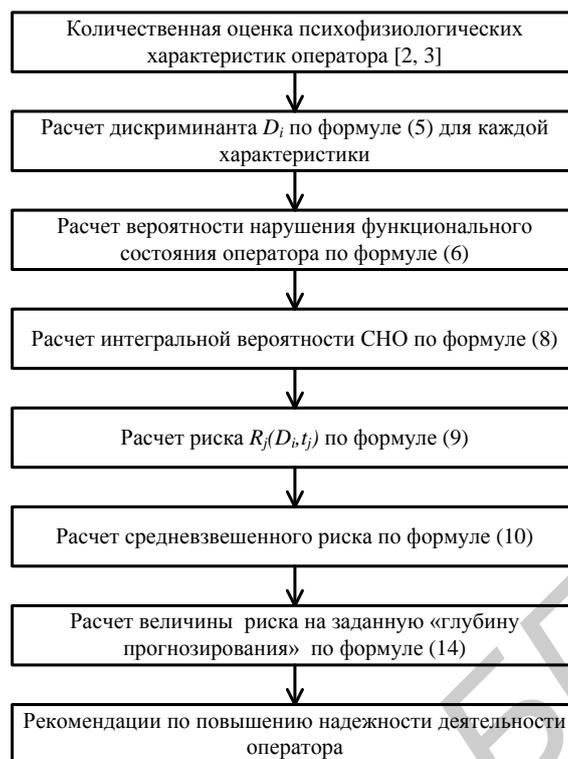


Рис. 2. Схема прогнозирования риска снижения надежности профессиональной деятельности оператора

На основе полученных диагностических данных, характеризующих функциональное состояние оператора, можно рассчитать дискриминант  $D_i$  по каждому из ПХ, а также оценить вероятность нарушения функционального состояния оператора  $P(D_i)$ . С помощью выражения (8) можно рассчитать вероятность нарушения функционального состояния оператора с учетом показателей всех ПХ для момента  $j$ -го исследования функционального состояния оператора. Теперь с помощью выражения (9) можно рассчитать величину риска СНО  $R(t_j)$  для каждого момента времени  $t_j$  ( $R_1, R_2, R_3, \dots, R_j$ ). Это позволяет оценить средневзвешенный риск  $\langle R \rangle$ . С помощью величины средневзвешенного риска может быть осуществлена оценка величины прогнозируемого риска СНО по формуле (14). На заключительном этапе прогнозирования риска СНО необходимо выработать персональные рекомендации по повышению надежности профессиональной деятельности оператора сложного технологического процесса.

Представленная на рис. 2 схема может быть использована для разработки математического и программного обеспечения мероприятий профессионального отбора кандидатов на должность оператора, а также мониторинга и прогнозирования надежности операторов систем управления опасными технологическими процессами. Предлагаемый метод прогнозирования риска может быть использован для повышения надежности и оптимизации деятельности операторского персонала опасных производств. Данный метод принципиально отличается от всех ранее известных способов оценки надежности операторов технических систем [1–4].

### Заключение

Разработана математическая модель, связывающая психофизиологические характеристики с риском снижения надежности деятельности оператора на заданной «глубине прогнозирования». Модель предназначена для разработки программного комплекса, который, в свою очередь, позволит осуществлять профотбор, оценивать текущую и прогнозную надежность деятельности оператора, а также проводить медицинские эксперименты с целью поиска связи между психофизиологическими характеристиками и различными заболеваниями человека.

## INFORMATIONAL AND MATHEMATICAL SIMULATION OF THE OPERATOR PROFESSIONAL RELIABILITY

A.G. DAVIDOVSKY, M. EL-GREYD, K.D. YASHIN, V.S. OSIPOVICH, L.P. PILINEVICH,  
Yu.A. HEDRANOVYCH, E.V. TOMASHEVICH

### Abstract

Information and mathematical models for risk assessment of reduced reliability professional personnel carrier hazardous industries are developed. A method of mathematical prognosis risk of reduced reliability of operators are proposed.

### Список литературы

1. Душков Б.А., Ломов Б.Ф., Смирнов Б.А. Хрестоматия по инженерной психологии. М., 1991.
2. Ел-Грейд М., Егоров В.В., Давыдовский А.Г. и др. // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 6. С. 12–17.
3. Ел-Грейд М., Яшин К.Д., Егоров В.В. // Докл. БГУИР. 2011. №8. С. 95–98.
4. Savic S. // The Scientific Journal Facta Universitatis. Series: Working and Living Environmental Protection. 1998. Vol. 1, № 3. P. 33–40.
5. Kingsland S.E. Modeling nature. Chikago, 1995.