

Методика оценивания эффективности мероприятий безопасности потенциально опасных объектов методом структурного анализа функции опасного состояния

Майструк А.А., д.т.н. проф. Майструк А.В., к.т.н. проф. Резчиков Е.А.
Московский государственный индустриальный университет «МГИУ»
(495) 620-37-19, maisav2981958@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются математические методы оценивания эффективности мероприятий безопасности потенциально опасных объектов при решении многопараметрических задач оптимизации. Разработанная методика включает систему показателей, позволяющих автоматизировать процессы принятия решений путем количественной оценки эффективности планируемых мероприятий как с точки зрения предупреждения происшествий, так и стоимостных показателей, что значительно снижает сложность решения многомерных задач оптимизации итерационными методами.

Ключевые слова: потенциально опасные объекты, сложные технические системы, мероприятия безопасности, эффективность, оптимизация программ обеспечения безопасности, риск.

В большинстве задач оптимизации, представляющих практический интерес, целевая функция (ЦФ) как функция опасного состояния (ФОС) зависит от множества параметров, непосредственно влияющих на безопасность эксплуатации потенциально опасных объектов (ПОО). Для решения подобных задач необходимы специальные численные методы многомерной оптимизации, основанные на целенаправленном поиске оптимальных решений [4]. Однако на практике часто возникают ситуации, связанные с тем, что лицу, принимающему решения (ЛПР), необходимо оперативно провести оценку эффективности отдельных мероприятий безопасности с целью обоснования комплекса первоочередных направлений деятельности по обеспечению требуемого уровня безопасности производственных объектов. Для этого ЛПР необходимо иметь некоторые показатели, имеющие достаточно ясный физический смысл, и адекватно отражающие сущность оцениваемого явления (процесса), и позволяющие проводить ранжирование множества организационно-технических мероприятий с учетом имеющейся исходной информации.

Рассмотрим сущность научно-методических подходов к оцениванию эффективности мероприятий обеспечения безопасности потенциально опасных производственных объектов методом структурного анализа функции опасности сложной технической системы. Идея предлагаемых подходов заключается в адаптации показателей эффективности за счет более глубокого изучения свойств объекта (ситуации) и увеличения объемов (уточнения) исходной информации, т.е. поэтапного снятия существующей неопределенности [4, 5].

Математическая модель ПОО в виде логической функции опасного состояния (ФОС) и полученная на ее основе вероятностная функция происшествия (ВФП) позволяют непосредственно оценить степень влияния каждой исходной предпосылки на общую вероятность происшествия. При этом каждая предпосылка отражает состояние элементов структурной схемы безопасности (происшествия) и является одним из параметров многопараметрической вероятностной функции происшествия.

Ранжирование каждой из предпосылок с точки зрения степени их влияния на общий показатель вероятности возникновения происшествия дает возможность решать такие эксплуатационные задачи, как оптимизация программ поиска неисправностей, разработка стратегии оптимального резервирования элементов, влияющих на безопасность ПОО, распределение требований по показателям безопасности, оптимизация программ обучения, распределение ресурсов безопасности и т.п.

Для определения значимости элементов сложных систем в работах [1, 2, 3] приведено

описание формально-топологического и функционально-топологического методов, которые применимы в условиях отсутствия исходных данных по вероятностям их отказов.

Первый метод основан на исследовании графа системы и матрицы непосредственных путей, которая является основой для определения структурной значимости элемента системы – величины его ранга ($Ranq_i$). Смысл ранга по структуре отражает число связей данного элемента с другими элементами:

$$Ranq_i = \frac{A_i + A_i^2}{\sum_{i=1}^m (A_i + A_i^2)}, \quad (1)$$

где: A_i, A_i^2 - суммы строк матрицы непосредственных путей, имеющей единицы в главной диагонали, и той же матрицы, возведенной в квадрат, соответственно.

Второй метод основан на анализе структурной схемы системы, изучении принципов ее функционирования и построении графа, отражающего возможное доминирование элементов в системе и матрицы доминирования. Значение функционально-структурного ранга элемента вычисляется по формуле:

$$Ranq_i = \frac{B_i + B_i^2}{\sum_{i=1}^m (B_i + B_i^2)}, \quad (2)$$

где: B_i, B_i^2 - суммы строк матрицы смежности и той же матрицы, возведенной в квадрат, соответственно.

Однако эти методы имеют свои недостатки, например, неизвестно, как следует оценивать элементы, обладающие нулевым рангом (по первому методу), нет единого мнения о степени взаимного влияния элементов (по второму методу). Поэтому в работе [1] предложен еще один подход, не зависящий от вероятностей и построенный на базе понятия булевой разности и использования логико-вероятностного метода исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем (ССС).

«Вес» элемента x_i в системе, состоящей из m элементов, вычисляется как отношение веса булевой разности по аргументу x_i к числу всех наборов m -мерного логического пространства:

$$g_{xi} = \frac{G\{\Delta_{xi}y(x_1, \dots, x_m)\}}{2^m}, \quad (3)$$

где: $G\{\Delta_{xi}y(x_1, \dots, x_m)\}$ - «вес» булевой разности ФАЛ по аргументу x_i , представляющей собой число наборов, на которых $\Delta_{xi}y(x_1, \dots, x_m)$ принимает значение, равное единице.

Если исследуемая функция представлена в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме (ОДНФ), то вес логической функции определяется по формуле:

$$g_{y(x_1, \dots, x_m)} = \sum_{f=1}^k 2^{m-r_f} \cdot (2^m)^{-1} = \sum_{f=1}^k 2^{-r_f}, \quad (4)$$

где: k – число ортогональных конъюнкций в логической функции;

m - число аргументов функции; r_f - ранг элементарной ортогональной конъюнкции.

После преобразований окончательная формула для вычисления «веса» элемента x_i в системе (структурной схеме) имеет вид:

$$g_{xi} = \sum_{f=1}^k 2^{-(r_f-1)} - \sum_{j=1}^l 2^{-(r_j-1)}, \quad (5)$$

где: k, r_f - число и ранг ортогональных конъюнкций, содержащих аргумент x_i ; l, r_j - число и ранг ортогональных конъюнкций, в которых содержится отрицание аргумента x_i' .

В настоящее время большинство известных методов оценки величины влияния отдельных элементов (параметров) на эффективность функционирования сложных систем строится на вычислении частных производных [1, 2, 4]. Так, для характеристики скорости изменения функции многих переменных $f(q_1, q_2, \dots, q_m)$ относительно одной из переменных, например q_i , при фиксированных значениях остальных независимых переменных используется частная производная $\frac{\partial f}{\partial q_i}$, $i = 1, 2, \dots, m$. Направление, в котором скорость возрастания функции многих переменных наибольшая, будет определяться вектором, называемым градиентом.

Исходя из вышеизложенного структурный вес предпосылки к происшествию (ПП), являющийся одним из параметров ЦФ, представляет собой частную производную ВФП по вероятности исследуемой предпосылки, рассчитанную при условии, что $q_m = 0,5$, $m \neq i$:

$$h_{li} = \left. \frac{\partial Q_1}{\partial q_{li}} \right|_{q_1=\dots=q_m=0,5}, \quad (6)$$

где: $Q_1 = f(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_m)$ - вероятность возникновения 1-го происшествия.

Полученное аналитическое выражение (6) позволяет в условиях ограниченных исходных данных определить направления обеспечения безопасности эксплуатации (ОБЭ) ПОО и наиболее пригодные, с точки зрения эффективности, управляемые параметры.

Однако описанный выше подход хорош только как средство предварительного анализа, т.е. выявления перечня параметров, приемлемых для управления безопасностью эксплуатации ПОО. Это связано с тем, что при его реализации определяется лишь структурная составляющая той или иной предпосылки происшествия и не учитывается составляющая, обусловленная степенью возможности ее реализации, т.е. непосредственного вклада в вероятность возникновения 1-го вида происшествия. Поэтому при наличии статистических данных о вероятностях возникновения ПП, для обоснования оптимальных методов ОБЭ ПОО результатов структурного анализа становится недостаточно, и для исследования чувствительности показателя эффективности к различным параметрам предлагается использовать так называемые коэффициенты чувствительности и влияния [4].

Коэффициент чувствительности ВФП к параметрам безопасности представляет собой частную производную исследуемого показателя (т.е. вероятности возникновения происшествия) по соответствующему параметру, характеризующему ПП:

$$h_{li} = \frac{\partial Q_1}{\partial q_{li}}. \quad (7)$$

Коэффициент влияния мероприятий безопасности i-го вида – произведение коэффициента чувствительности на диапазон возможных изменений параметра, характеризующего предпосылки происшествия (диапазон возможных управлений):

$$h_{li}^{\Delta} = h_{li} \cdot \Delta Q_{li}^{\max}(X_i) = \frac{\partial Q_1}{\partial q_{li}} \cdot \Delta Q_{li}^{\max}(X_i), \quad (8)$$

где: $\Delta Q_{li}^{\max} = Q_{li}^{\max}(X_i) - Q_{li}^0$ – максимально возможное (технически реализуемое) снижение вероятности возникновения i -ой ПП в результате выполнения X_i мероприятия безопасности.

В тех ситуациях, когда для устранения ПП может выполняться несколько мероприятий, диапазон возможных изменений параметра вычисляется по формуле:

$$\Delta Q_{li}^{\max} = \max_{i \in I} \{Q_{li}^{\max}(X_i) - Q_{li}^0\}, \quad (9)$$

где: I - соответствующее множество мероприятий безопасности.

Расчет коэффициентов чувствительности h_{li} ВФП при эксплуатации ПОО к их причинам и коэффициентов влияния h_{li}^Δ этих причин на вероятности возникновения происшествия выполняется по формулам (7) - (9) соответственно, и не представляет собой никаких вычислительных трудностей. При этом с точки зрения наглядности и однозначности понимания физического смысла эффективности МБ X_i их выполнение подразумевает снижение исходной вероятности возникновения предпосылки к происшествию, что, как следствие, приводит к общему снижению вероятности происшествия Q_1^0 на некоторую величину $\Delta Q_1(X_i)$ (см. рисунок 1). Справедливость данного утверждения определяется тем, что структурные функции ПОО, являются монотонными функциями своих аргументов, так как для любых наборов $(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_m)$ и $(q'_1, q'_2, \dots, q'_i, \dots, q'_m)$, при которых $q_i \leq q'_i$, имеет место соотношение $f(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_m) \leq f(q'_1, q'_2, \dots, q'_i, \dots, q'_m)$.

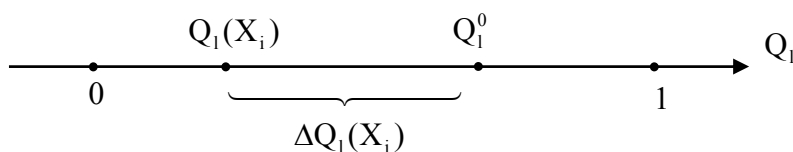


Рисунок 1 – Графическая интерпретация эффективности мероприятий безопасности

Графическая интерпретация чувствительности частных коэффициентов (h_{li} , h_{li}^Δ) к эффективности мероприятий безопасности представлена на рисунках 2 и 3 в виде графиков повышения безопасности потенциально опасных объектов.

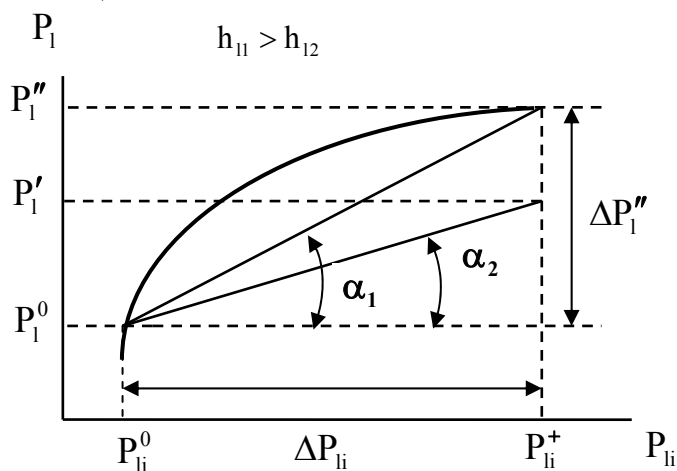


Рисунок 2 – График изменения коэффициента чувствительности ВФП при выполнении мероприятий безопасности различной эффективности

На рисунках 2 и 3 приняты следующие обозначения: P_{li}^0 - начальный уровень безопасности ПОО; ΔP_{li} - эффективность мероприятий безопасности, с точки зрения предупреждения конкретных ПП; $\Delta P_1'$, $\Delta P_1''$ - достигнутый уровень безопасности ПОО при реализации МБ.

Адекватность представленных интерпретаций подтверждается путем доказательства равенства: $\Delta P_1(X_i) \equiv -\Delta Q_1(X_i)$.

Доказательство. В результате несложных преобразований, выполненных с учетом того, что $P + Q = 1$, получим:

$$P_1^0 + \Delta P_{1i}(X_i) = P_1^0 - [P_1(X) - P_1^0] = (1 - Q_1^0) + [(1 - Q_1(X_i)) - (1 - Q_1^0)] = 1 - Q_1^0 + [1 - Q_1(X_i) - 1 + Q_1^0] = 1 - Q_1^0 - Q_1(X_i) + Q_1^0 = 1 - Q_1(X_i). \quad (10)$$

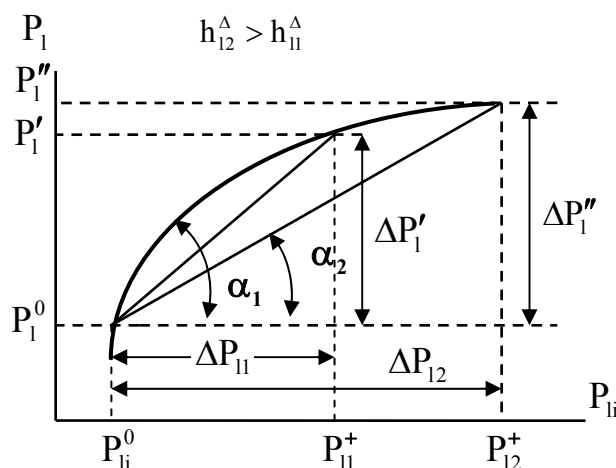


Рисунок 3 – График изменения коэффициента влияния при выполнении мероприятий безопасности различной эффективности i -го вида

Следовательно, $P_1^0 + \Delta P_{1i}(X_i) = 1 - (Q_1^0 - \Delta Q_1(X_i))$, $P_1^0 = 1 - Q_1^0$ и с учетом зависимости $Q_1(X_i) = Q_1^0 - \Delta Q_1(X_i)$ получим равенство:

$$P_1^0 + \Delta P_1(X_i) = 1 - Q_1^0 + \Delta Q_1(X_i) \Rightarrow \Delta P_1(X_i) = \Delta Q_1(X_i), \quad (11)$$

При этом с учетом того, что $Q_1^0 > Q_1(X_i)$ (рисунок 1) и $\Delta Q_1(X_i) = Q_1(X_i) - Q_1^0$, получим выражение $\Delta P_1(X_i) = -\Delta Q_1(X_i)$, что и требовалось доказать.

Однако необходимо отметить, что некоторые виды предпосылок могут стать причиной различных видов происшествий. В этом случае для оценки эффективности МБ с точки зрения предупреждения различных происшествий предлагается использовать аддитивный показатель эффективности, представляющий собой суммарный коэффициент влияния мероприятий безопасности на БЭ ПОО, графическая интерпретация которого представлена на рисунке 4.

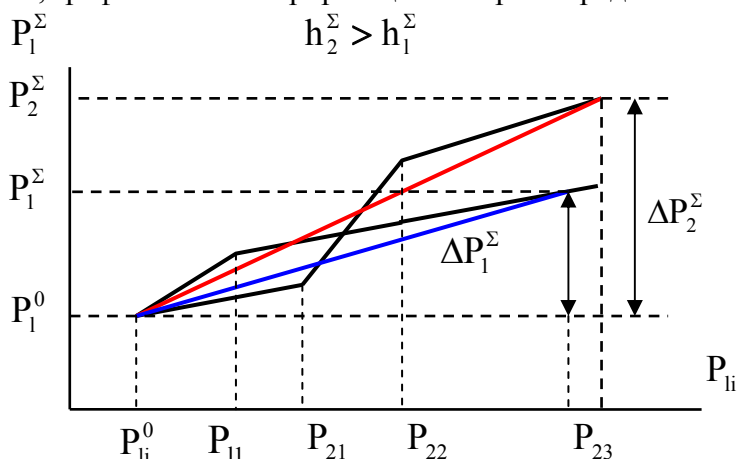


Рисунок 4 – График изменения суммарного коэффициента влияния мероприятий безопасности

На рисунке 4 показано, как невысокая эффективность i -го мероприятия безопасности, с точки зрения предупреждения происшествия 1-го вида в целом может быть компенсирована

его высокой эффективностью для предупреждения происшествия другого вида, и наоборот.

Суммарный коэффициент влияния мероприятий безопасности на БЭ ПОО учитывает влияние одной предпосылки на возникновение всего множества возможных происшествий и имеет следующий вид:

$$h_i^\Sigma = \sum_{l=1}^L h_{li}^\Delta = \sum_{l=1}^L \frac{\partial Q_l}{\partial Q_{li}} \cdot \Delta Q_{li}^{\max}(X_i), \quad (12)$$

где: L - множество возможных видов происшествий, в результате возникновения i -ой предпосылки к происшествиям.

Анализ соотношения (13) показывает, что в нем не учтена степень опасности различных видов происшествий (например, величина ущерба). Для устранения данного недостатка необходимо разработать показатель, который бы позволил сравнивать потенциально возможные происшествия в процессе эксплуатации ПОО с точки зрения опасности, т.е. тяжести последствий.

Известно, что наиболее объективными характеристиками происшествия являются вероятность его возникновения Q_1 и возможный при этом ущерб C_1^Y . С учетом этого значимость l -го происшествия целесообразно определять через показатель риска:

$$R_l = Q_l \cdot C_l^Y. \quad (13)$$

Очевидно, что чем выше риск, тем выше влияние данного происшествия на БЭ ПОО, а следовательно, и выше значимость мероприятий безопасности по их предупреждению. Однако, как правило, довольно сложно определить ущерб, нанесенный человеку или его здоровью, элементам ПО или окружающей среде.

В этом случае представляется целесообразным учитывать риск возникновения происшествия другим способом. Например, очевидно, что степень ущерба опосредованно может быть охарактеризована величиной допустимой вероятности возникновения происшествия $Q_1^{\text{доп}}$. Смысл величины $Q_1^{\text{доп}}$ состоит в том, что она делит интервал от 0 до 1 на два интервала. Первый – это интервал допустимых значений $[0; Q_1^{\text{доп}}]$, а второй – это интервал недопустимых значений $[Q_1^{\text{доп}}; 1]$. Следовательно, ширина интервала недопустимых значений может рассматриваться в качестве опосредованной оценки риска возникновения происшествия. Введя в рассмотрение коэффициент риска при возникновении происшествия и положив его равным ширине интервала недопустимых значений вероятности происшествия, т.е. $k_1^R = 1 - Q_1^{\text{доп}}$, получим показатель эффективности МБ с учетом коэффициентов риска при возникновении происшествия l -го типа, графическая интерпретация которого представлена на рисунке 5.

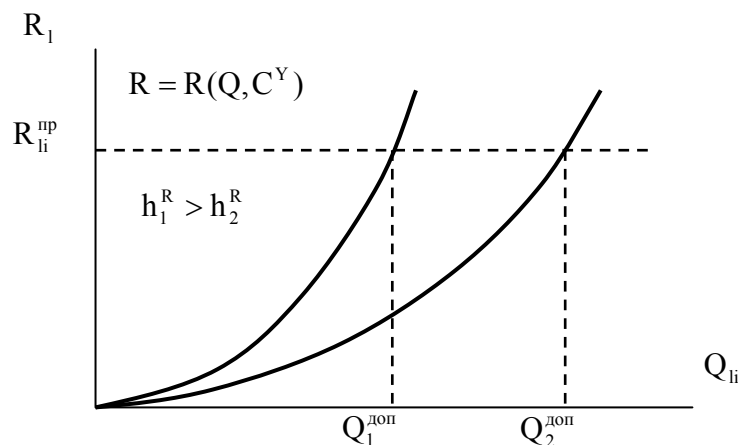


Рисунок 5 – Графическая интерпретация коэффициента эффективности мероприятий безопасности с учетом риска возникновения происшествий

Коэффициент эффективности мероприятий безопасности с учетом коэффициентов риска возникновения происшествия 1-го типа позволяет учитывать не только значимость отдельных предпосылок на вероятностную функцию происшествия, но и влияние происшествия с точки зрения его опасности (риска) при эксплуатации ПОО и вычисляется по формуле

$$h_i^R = \sum_{l=1}^L k_l^R \cdot h_{li}^\Delta = \sum_{l=1}^L k_l^R \cdot \frac{\partial Q_l}{\partial Q_{li}} \cdot \Delta Q_{li}^{\max}(X_i), \quad (14)$$

где: $k_l^R = 1 - Q_l^{\text{доп}}$ - коэффициент риска 1-го происшествия.

Таким образом, представленный показатель лишен недостатка соотношения (12), так как рассчитанные с его помощью коэффициенты эффективности мероприятий безопасности учитывают не только значимость предпосылок с точки зрения возникновения конкретного происшествия, но и значимость (опасность) происшествия при комплексной оценке безопасности эксплуатации ПОО.

Следует отметить, что на практике возможны несколько вариантов влияния одних и тех же причин (предпосылок) на происшествия. В том случае если рассматриваемая предпосылка является причиной двух и более условно (относительно данного события) независимых происшествий, то для определения коэффициента эффективности МБ используется (14). В тех ситуациях, когда предпосылка является причиной одного происшествия, которое, в свою очередь, является причиной другого, с более серьезными последствиями (в смысле ущерба), то представляется целесообразным коэффициент эффективности h_i^R мероприятия безопасности определять с помощью соотношения:

$$h_i^R = \max_{l \in L_i} \left\{ k_l^R \cdot h_{li}^\Delta \right\} = \max_{l \in L_i} \left\{ k_l^R \cdot \frac{\partial Q_l}{\partial Q_{li}} \cdot \Delta Q_{li}^{\max}(X_i) \right\}, \quad (15)$$

где: L_i - множество происшествий, связанных причинно-следственными связями с i -ой ПП.

Важным этапом анализа эффективности планируемых мероприятий безопасности является их экономическая оценка как с точки зрения предотвращенного риска, так и стоимостных затрат на их реализацию. С этой целью вводится коэффициент эффективности мероприятий безопасности с учетом стоимостных показателей.

Коэффициент эффективности мероприятий безопасности с учетом стоимостных показателей позволяет ранжировать мероприятия безопасности не только с учетом стоимостных затрат на их реализацию, но и с учетом упрежденного риска (т.е. с точки зрения снижения риска как потенциального ущерба от происшествий) и вычисляется по формуле:

$$h_{li}^C = \frac{\sum_{l=1}^L \Delta R_l(X_i)}{C^{\text{мб}}(X_i) + \sum_{l=1}^L \Delta R_l(X_i)}, \quad (16)$$

где: $\Delta R_l(X) = R_l^0 - R_l(X_i)$ - доля предотвращенного риска при выполнении i -го МБ.

Заключительным этапом анализа является ранжирование мероприятий безопасности с точки зрения их эффективности по предотвращению происшествий. На первом месте должны быть мероприятия, имеющие максимальную эффективность, а далее по мере ее убывания - $\{X_i'\} = \{X_1 \succ X_3 \succ X_m \succ \dots \succ X_2\}$.

Таким образом, разработанный научно-методический аппарат представляет собой методику оценивания эффективности мероприятий безопасности потенциально опасных объектов методом структурного анализа функции опасного состояния. Применение методики позволяет автоматизировать процессы принятия решений, путем ранжирования мероприятий безопасности с точки зрения эффективности, что значительно снижает сложность решения многопа-

раметрических задач оптимизации программ ОБЭ ПОО итерационными методами, например, методами направленного перебора или методами последовательных приближений.

Литература

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
2. Катулев А.Н., Северцев Н.А. Исследование операций: принципы принятия решений и обеспечение безопасности. – М.: Физико-математическая литература, 2000. – 320 с.
3. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г.Б.Петухов, В.И.Якунин. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
4. Майструк А.В. Управление безопасностью эксплуатации сложных технических систем: Математические методы и практика их применения. Монография. - М.:ВА РВСН, 2007. – 256 с.
5. Майструк А.А., Майструк А.В. Научно-методические подходы к оценке эффективности мероприятий обеспечения безопасности эксплуатации сложных технических систем. Сборник научных трудов. - М.: ВА РВСН, 2010. – 378 с.

Особенности моделирования программы обучения специалистов предприятий с учетом требований безопасности производственных процессов

д.т.н. проф. Майструк А.В., Боркин В.С.
Московский государственный индустриальный университет (МГИУ)
(495) 620-37-19, maisav2981958@mail.ru

Аннотация. В статье на основе анализа производственного травматизма показана актуальность проблемы совершенствования системы подготовки специалистов предприятий с учетом требований безопасности. Рассмотрены некоторые особенности формализации программ обучения специалистов предприятий автомобильной промышленности в виде эргатических систем. Сформулирована задача оптимизации программ обучения специалистов предприятий и представлена ее математическая модель.

Ключевые слова: охрана труда; производственный травматизм; программа обучения специалистов; человеко-машинные системы; потенциально опасные операции.

Формирующаяся на современном этапе система экономических отношений в России отличается высокой степенью самостоятельности работодателей в решении большинства вопросов и в выборе приоритетов инвестирования средств. Передача государством основных функций и прав собственникам средств производства привела к существенному изменению характера и ответственности их как за организацию, так и последствия профессиональной деятельности в области обеспечения безопасности производственных процессов.

Расследования крупных аварий и катастроф, произошедших за последние десятилетия, и изучение основных причин производственного травматизма в очередной раз обратили внимание ученых на проблему человеческого фактора и заставили с иной точки зрения взглянуть на процессы обучения специалистов, связанных с эксплуатацией опасных производственных объектов. Это обусловлено тем, что только в Московском региональном отделении Фонда социального страхования РФ страховые выплаты получили в 2009 году – 17474 человека, из них 1242 – по потере кормильца. Сумма единовременных страховых выплат составила более 19839,9 тыс. рублей, ежемесячных страховых выплат – 1455006,2 тыс. рублей. По листкам нетрудоспособности в связи с несчастными случаями (НС) на производстве и профессиональными заболеваниями было выплачено 215205,4 тыс. рублей. На медицинскую,