УДК 681.5

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А. Е. Городецкий,
доктор техн. наук, профессор
В. Г. Курбанов,
канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
И. Л. Тарасова,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник
Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Предложена имитационная модель, которая на основе комбинации логико-вероятностного и логико-лингвистического моделирования позволяет прогнозировать аварийные ситуации в энергетических установках большой единичной мощности.

Ключевые слова *— имитационное моделирование, логико-вероятностные переменные, логико-лингвистические переменные, функция принадлежности, вероятность безотказной работы, база данных.*

Введение

При оценке функционирования оборудования ГЭС и возможных неисправностей принято руководствоваться СТО 17330282.27.140.001-2006 «Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций» и СТО 17330282.27.140.0019-2008 «Генераторы. Условия поставки. Нормы и требования». Какихлибо автоматизированных систем оценки возможных аварийных ситуаций путем анализа текущего состояния гидроагрегатов и показаний приборов не предусмотрено. Однако создание систем, способных подсказывать операторам возможные развития аварийных ситуаций и рекомендовать возможные действия для сохранения живучести, весьма актуально [1–4]. При этом необходимо решить проблемы моделирования аварийных ситуаций и быстрого анализа большого объема количественной и качественной информации в условиях неполной определенности, связанные с тем, что чем сложнее система, тем труднее дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении [5]. Такая ситуация определяется термином «принцип несовместимости» [6]. Следствие из этого принципа кратко можно выразить так: «Чем глубже мы анализируем реальную задачу, тем неопределеннее становится ее решение». Именно в этом смысле точного количественного анализа поведения сложных систем для практического исследования реальных задач, по-видимому, недостаточно. Поэтому при отсутствии принципиальной возможности получить четкую модель системы в целом или каких-либо ее частей целесообразно строить нечеткие модели [7–9].

Необходимость использовать такой подход может быть оправдана следующими обстоятельствами:

— при решении некоторых проблем не нужна точная оценка параметров объектов и явлений;

— по утверждению Л. Заде, с ростом сложности системы постепенно падает способность человека делать точные и в то же время значащие утверждения относительно ее поведения, так как существует порог, за которым точность и значимость становятся взаимоисключающими характеристиками.

В нечетких задачах моделирования логические переменные, как аргументы логических функций, обычно характеризуются набором атрибутных данных, среди которых наиболее используемые: вероятность логической переменной, являющейся в данном случае случайным событием; интервал значений переменной, которому присваивается имя данной логической переменной; функция принадлежности, характеризующая степень принадлежности текущей логической переменной к заданному интервалу [7].

Правила вычисления вероятностей описываются в разделах теории вероятности [10], вычисления интервалов изучаются в интервальной математике [11], а вычисление функций принадлежности — в теории лингвистических переменных [12]. Однако при вычислении атрибутов логических функций по известным атрибутам аргументов, за исключением простейших функций (И, ИЛИ, НЕ), возникают определенные сложности и неоднозначности. В данной статье рассматриваются принципы моделирования развития аварийных ситуаций при функционировании гидроагрегатов и возможные пути решения проблемы вычисления вероятностей и функций принадлежности логических переменных, соответствующих наступлению предаварийных и аварийных ситуаций.

Принципы моделирования

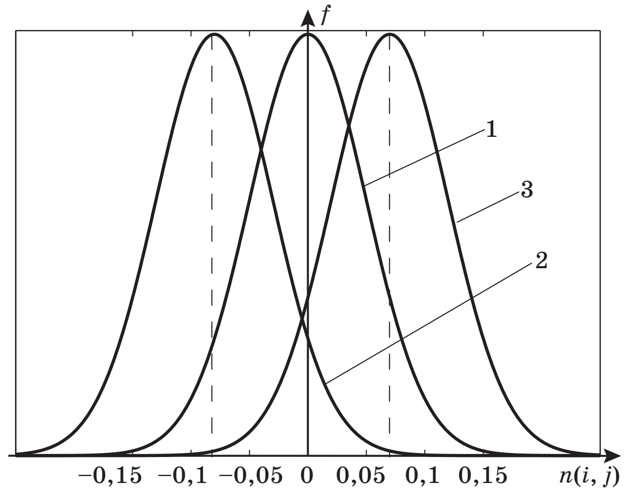
Моделируя развитие аварийных ситуаций, можно применять методы, основанные на представлении логических функций, описывающих те или иные аварийные и предаварийные ситуации, как упорядоченные множества. При этом можно использовать комбинаторные (не символьные) приемы их преобразования или такие методы, когда для упорядочивания множеств строится декартово произведение, элементы которого лексикографически упорядочены. Тогда нет необходимости записывать явно все его члены, а достаточно знать, как вычислить любой из них. Поэтому благодаря арифметическим свойствам получаемых систем логических уравнений, которые они проявляют при их представлении в виде алгебраических структур по модулю 2, т. е. в алгебре Жегалкина, оказывается возможным сведение логических задач к «арифметическим» или подобным арифметическим. Это в общем случае позволяет представлять логические системы как линейные структуры, уравнения которых не содержат конъюнктивных элементов, а для анализа и синтеза их структурных свойств использовать математический аппарат векторно-матричной алгебры [7].

В рассматриваемой модели на первом шаге имитируются отклонения $n(i, j)$ j-х параметров i-х блоков оборудования с помощью генератора случайных чисел с нормальным законом распределения с математическим ожиданием $m(i) = m_0 = 0$ (нулевое отклонение) и среднеквадратическим отклонением $\sigma_i = \sigma_0 = 0{,}05$ (5 % отклонения), запускаемого для каждого $n(i, j)$ (рис. 1).

По полученным значениям $n(i, j)$ можно определить для следующего шага эволюции новые значения математического ожидания

$$m(i) = m(i) + \sum_{i}^{A(i,j)} \frac{n(i,j)}{A(i,j)}, \qquad (1)$$

где $A(i, j)$ — количество j-х контролируемых параметров для каждого i-го оборудования.

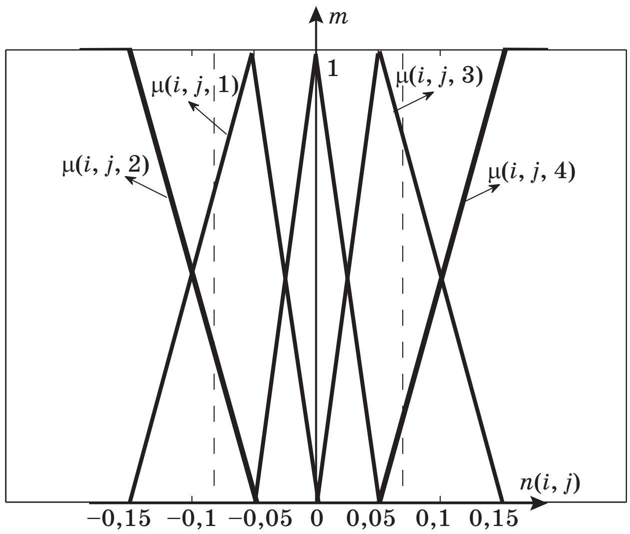


■ *Рис. 1.* Нормальный закон распределения: *1* — исходная кривая распределения ($m(i) = 0$); *2*, *3* — кривые распределения после моделирования ($m(i)$ — расчетное)

Для фаззификации имитируемых параметров, т. е. для получения логических величин $x(i, j, k)$ и соответствующих им функций принадлежности $\mu(i, j, k)$, где k — индикатор отклонения ($k = 1$ — «параметр ниже нормы»; $k = 2$ — «параметр значительно ниже нормы»; $k = 3$ — «параметр выше нормы»; $k = 4$ — «параметр значительно выше нормы») вначале необходимо установить опасную границу $b(i)$. Далее можно воспользоваться следующими правилами получения $\mu(i, j, k)$ (рис. 2).

1. Если $n(i, j) \le -b\sigma_0$, то
$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 1$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

2. Если $-b\sigma_0 < n(i, j) \le -0{,}5b\sigma_0$, то
$\mu(i, j, 1) = (n(i, j) + b\sigma_0)/0{,}5b\sigma_0$, $\mu(i, j, 2) = -(n(i, j) + 0{,}5b\sigma_0)/0{,}5b\sigma_0$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.



■ *Рис. 2.* Фаззификация

3. Если $-0,5b\sigma_0 < n(i, j) \le 0$, то
$\mu(i, j, 1) = -n(i, j)/0,5b\sigma_0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

4. Если $0 < n(i, j) \le 0,5b\sigma_0$, то
$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = n(i, j)/0,5b\sigma_0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

5. Если $0,5\, b\sigma_0 < n(i, j) \le b\sigma_0$, то
$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = -(n(i, j) - b\sigma_0)/0,5b\sigma_0$, $\mu(i, j, 4) = (n(i, j) - 0,5b\sigma_0)/0,5b\sigma_0$.

6. Если $n(i, j) > b\sigma_0$, то
$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 1$.

Кроме того, при моделировании нужно вычислять вероятности отказа $P_о(i)$ i-х блоков, задавшись предельно допустимым значением контролируемого параметра $n_d(i, j)$. При этом:

1) если $m(i) \le 0$, то $y(i) = (-n_d(i, j) - m(i))/\sigma(i)$ и $P_о(i) = \Phi(y(i))$;

2) если $m(i) \ge 0$, то $y(i) = (n_d(i, j) - m(i))/\sigma(i)$ и $P_о(i) = 1 - \Phi(y(i))$, где $\Phi(y(i))$ выбирается по табл. 1 приложения из работы [13] по значению $y(i)$.

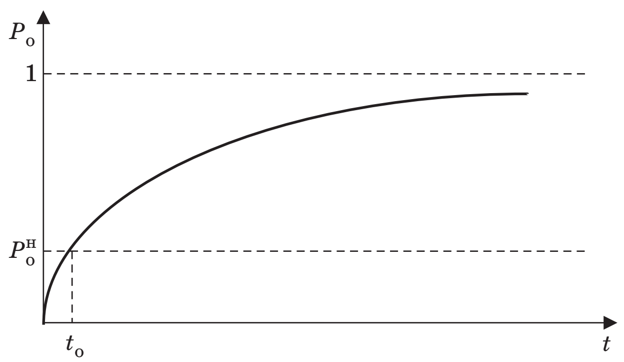
В процессе моделирования этапов эволюции (деградации) оборудования происходит сдвиг математического ожидания $m(i)$ в соответствии с уравнением (1). Поэтому может наступить такой момент, когда $-n_d(i, j) < m(i) \le -0,5n_d(i, j)$ либо $0,5n_d(i, j) \le m(i) < n_d(i, j)$. Это означает, что i-й блок находится в предаварийном, опасном состоянии, время наступления которого можно вычислить:

$$t_{па}(i) = (-1/\alpha_0(i)\ln(1 - P_о(i)),$$

где $\alpha_0(i)$ — показатель надежности i-го блока, вычисляемый по экспоненциальному закону убывания вероятности безотказной работы $P_{бо}(t) = 1 - P_о(t)$ (рис. 3, где $P_о^н$ — заданная вероятность отказа при заданном времени $t_о$ наработки на отказ) с течением времени t и заданных значениях $b(i)$ и $t_о$ по формуле

$$\alpha_0(i) = (-1/t_о(i))\ln(\Phi(y(i)), \tag{2}$$

где $\Phi(y(i))$ определяется по таблице [13] при $|y(i)| = n_d(i, j) = b(i)$.



■ *Рис. 3.* Вероятность отказа

При дальнейшем моделировании этапов эволюции (деградации) оборудования может наступить такой момент, что $m(i) < -n_d(i, j)$ либо $n_d(i, j) < m(i)$. Это означает, что i-й блок находится в аварийном состоянии, и для него можно аналогично вычислить время наступления данного состояния:

$$t_а(i) = (-1/a_о(i)\ln(1 - P_о(i)). \tag{3}$$

Прогнозирование времени $t_а(i)$ наступления аварийной ситуации очень важно для своевременного ремонта или замены оборудования в процессе его эксплуатации.

Описание алгоритма компьютерного моделирования

Введем следующие обозначения:

$x(i, j, k)$ — аварийное событие i-го объекта по j-му контролируемому параметру с индикатором отклонения k;

$\alpha_0(i)$ — исходный показатель надежности i-го оборудования;

$t_о(i)$ — время наработки на отказ i-го оборудования;

$t(i)$ — время работы i-го оборудования;

$P_{бо}^н(i)$ — вероятность безотказной работы i-го оборудования;

$P_о^н(i)$ — вероятность отказа нового i-го оборудования;

$P_о(i)$ — вероятность отказа i-го оборудования в процессе моделирования;

N — количество анализируемых объектов (оборудования);

$A(i, j)$ — количество j-х контролируемых параметров для каждого i-го оборудования;

V — конечное число изменений состояния системы (эволюций);

$m(i)$ — математическое ожидание контролируемых параметров i-го оборудования;

$\sigma(i)$ — среднеквадратическое отклонение контролируемых параметров i-го оборудования;

$b(i)$ — опасная граница выхода оборудования из строя;

$n_d(i, j)$ — предельно допустимое отклонение контролируемого j-го параметра i-го оборудования.

Шаги алгоритма.

1. Задание начальных условий.

Для всех i, j, k $t_о(i) = t_о = 27\,000$, $P_о^н(i) = P_о^н = 0,004$, $t = 0$, $m(i, j) = m_0$, $m_0 = 0$, $P_{бо}^н(i) = P_{бо}^н = 0,996$, $n_d(i, j) = b = 0,15$, где $i \in [1, N]$, $j \in [1, A(i, j)]$, $k \in [1, 4]$; начальные значения счетчиков: $v = 0$, $q = 0$.

Значения m_0, V, σ_0 задаются экспертами — специалистами по оборудованию.

Значения N, $A(i, j)$ задаются оператором ГЭС либо берутся из базы данных (БД) (таблицы) или задаются экспертами — специалистами по оборудованию.

Кроме того, оператор ГЭС может изменять значения $t_о$, $P_о$ для всех i, j, k.

Величины $t_о = 27\,000$ ч и $P^{н}_{бо} = 0{,}996$ взяты из СТО 17330282.27.140.0019-2008 «Генераторы. Условия поставки. Нормы и требования».

2. Вычисление α_0 и b.

По таблице [13] определяем $\Phi(y(i))$ при $|y(i)| = n_d(i, j) = b$;

α_0 вычисляем по формуле (2);

$\sigma_0 = \sigma(i, j) = n_d(i, j)/3$.

Записываем в БД α_0 и σ_0.

3. Вычисление математического ожидания $m(i)$ для i-го объекта.

Запускаем $A(i, j)$ раз генератор случайных чисел $x(i)$, распределенных по нормальному закону с математическим ожиданием $M(x) = m(i)$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_x = \sigma_0$ в соответствии с формулой

$$x(i) = M(x) + \sigma_x\left(\sum_{i=1}^{m}\xi_i - 6\right),$$

где ξ_i — случайное число, генерируемое генератором случайных чисел с равномерным распределением в интервале от 0 до 1, $m = 12$.

Получаем случайные числа $x(i) = n(i, j)$ с нормальным распределением для каждого j-го контролируемого параметра i-го объекта и вычисляем математическое ожидание по формуле (1).

4. Определяем величину $\mu(i, j, k)$ и заполняем ее в БД для каждого i-го объекта по j-му контролируемому параметру с индикатором отклонения k по следующим правилам.

Если $n(i, j) \le -b(i)\sigma_0$, то

$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 1$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

Если $-b(i)\sigma_0 < n(i, j) \le -0{,}5b(i)\sigma_0$, то

$\mu(i, j, 1) = (n(i, j) + b(i)\sigma_0)/0{,}5b(i)\sigma_0$, $\mu(i, j, 2) = -(n(i, j) + 0{,}5b(i)\sigma_0)/0{,}5b(i)\sigma_0$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

Если $-0{,}5b(i)\sigma_0 < n(i, j) \le 0$, то

$\mu(i, j, 1) = -n(i, j)/0{,}5b(i)\sigma_0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

Если $0 < n(i, j) \le 0{,}5b(i)\sigma_0$, то

$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = n(i, j)/0{,}5b(i)\sigma_0$, $\mu(i, j, 4) = 0$.

Если $0{,}5\,b(i)\sigma_0 < n(i, j) \le b(i)\sigma_0$, то

$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = -(n(i, j) - b(i)\sigma_0)/0{,}5b(i)\sigma_0$, $\mu(i, j, 4) = (n(i, j) - 0{,}5b(i)\sigma_0)/0{,}5b(i)\sigma_0$.

Если $n(i, j) > b(i)\sigma_0$, то

$\mu(i, j, 1) = 0$, $\mu(i, j, 2) = 0$, $\mu(i, j, 3) = 0$, $\mu(i, j, 4) = 1$.

5. Вычисляем вероятность отказа $P_о$ для i-го объекта:

— если $m(i) \le 0$, то $y(i) = (-n_d(i, j) - m(i))/\sigma(i)$ и $P_о(i) = \Phi(y(i))$, где $\Phi(y(i))$ выбирается по таблице [13] по значению $y(i)$;

— если $m(i) \ge 0$, то $y(i) = (n_d(i, j) - m(i))/\sigma(i)$ и $P_о(i) = 1 - \Phi(y(i))$, где $\Phi(y(i))$ выбирается по таблице [13] по значению $y(i)$.

6. Вычисляем и записываем в БД время наступления аварийной ситуации $t_а$ i-го объекта, если $m(i) < -0{,}15$ или $m(i) > 0{,}15$, по формуле (3) и выдаем сообщение «аварийное состояние по i-му оборудованию».

7. Вычисляем и записываем в БД время наступления опасной ситуации t_v i-го объекта, если $-0{,}15 < m(i) \le -0{,}05$ или $0{,}05 \le m(i) < 0{,}15$, по формуле $t_v(i) = (-1/\alpha_0)\ln(1 - P_о(i))$ и выдаем сообщение «опасное состояние по i-му оборудованию».

8. Увеличиваем значение счетчика q: $q = q + 1$:

— если $q \le N$, переходим к п. 3;

— если $q > N$, переходим к п. 9 и печатаем БД.

9. Увеличиваем счетчик v: $v = v + 1$:

— если $v \le V$, то $q = 1$ и возвращение к шагу 3;

— если $v > V$, то остановка процесса эволюции.

Пример моделирования

По результатам моделирования эволюции (деградации) исследуемого оборудования ГЭС заполняется БД (таблица). Надо отметить, что $\mu(i, j, k)$ может использоваться по запросу оператора для вычисления значения j-го параметра i-го оборудования одним из методов дефаззификации [7].

Блоки оборудования, отказы которых моделировались:

— рабочие колеса поворотно-лопастных гидротурбин ($i = 1$);

— маслоприемник рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины ($i = 2$);

— направляющий аппарат гидротурбины ($i = 3$);

— крышка гидротурбины ($i = 4$);

— металлические элементы проточной части гидротурбины ($i = 5$);

— аварийные, аварийно-ремонтные затворы, сороудерживающие решетки гидротурбинного блока ($i = 6$);

■ Фрагмент заполненной БД

i	$\alpha(i)$	$P_о(i)$	$m(i)$	k	$\Phi(y(i))$	$y(i)$	$t_v(i)$	j	Сообщение
11	$2{,}15 \cdot 10^{-7}$		0,03	3				1	
11	$2{,}15 \cdot 10^{-7}$	0,0228	0,05	3	0,9772	2	1072	2	Опасное состояние щеточно-контактного аппарата
11	$2{,}15 \cdot 10^{-7}$	0,0548	0,07	3	0,9452	1,6	2621	3	Опасное состояние щеточно-контактного аппарата
11	$2{,}15 \cdot 10^{-7}$	0,1587	0,1	3	0,8413	1	8037	4	Опасное состояние щеточно-контактного аппарата

— обмотка статора ($i = 7$);
— стальные конструкции статора ($i = 8$);
— стальные конструкции ротора ($i = 9$);
— обмотка возбуждения и демпферная система ($i = 10$);
— щеточно-контактный аппарат ($i = 11$);
— подпятники гидрогенераторов ($i = 12$);
— направляющие подшипники ($i = 13$);
— валы гидроагрегата ($i = 14$);
— система автоматического регулирования гидротурбин ($i = 15$);
— система технического водоснабжения ($i = 16$);
— система охлаждения и вентиляции ($i = 17$);
— система смазки ($i = 18$);
— система перевода гидроагрегатов в режим синхронного компенсатора ($i = 19$);
— система торможения гидроагрегата ($i = 20$).

Заключение

Предложено имитационное моделирование развития аварийных ситуаций в энергетических установках, основанное на использовании комбинации логико-вероятностного и логико-лингвистического описания развития и анализа аварийных ситуаций. Такое моделирование позволяет анализировать и прогнозировать аварийные ситуации для большинства гидроэнергетических агрегатов большой единичной мощности с учетом влияния основных технических и эксплуатационных показателей, вводимых операторами в БД перед началом сеанса работы. При этом учитываются «Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций и влияние основных технических и эксплуатационных показателей» в соответствии с требованиями СТО 17330282.27.140.001-2006 и СТО 17330282.27.140.0019-2008 «Генераторы. Условия поставки. Нормы и требования».

Модель развития аварийных ситуаций в энергетических установках реализована в виде компьютерной программы. Достоверность прогноза и адекватность модели составляют от 70 до 85 %, зависят от точности задаваемых исходных параметров и могут быть повышены при коррекции модели по результатам апробации на характерных примерах.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 16.515.12.5002.

Литература

1. **Кавалеров Б. В., Казанцев В. П., Шмидт И. А.** Компьютерные и полунатурные испытания средств управления энергетических газотурбинных установок // Информационно-управляющие системы. 2011. № 4. С. 34–41.
2. **Поршнев С. В., Соломаха И. В.** О возможности повышения качества многомерных математических моделей технологической информации, собираемой на тепловых электрических станциях // Информационно-управляющие системы. 2011. № 2. С. 29–36.
3. **Миленин А. А., Шишлаков В. Ф.** Система автоматического управления ГЭС малой мощности методом частотного регулирования // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 25–29.
4. **Шмидт И. А., Кавалеров Б. В., Один К. А., Шигапов А. А.** Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 25–31.
5. **Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л.** Экспертная система анализа и прогнозирования аварийных ситуаций в энергетических установках // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 59–63.
6. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets // Inform. Contr. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
7. **Городецкий А. Е., Тарасова И. Л.** Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 336 с.
8. **Чернов В. Г.** Нечеткие деревья решений (нечеткие позиционные игры) // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 8–14.
9. **Суконщиков А. А., Яковлев С. А.** Обобщенная модель системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 9–14.
10. **Феллер В.** Введение в теорию вероятностей и ее приложения. — М.: Мир. Т. 1. 1964. 500 с.; Т. 2. 1967. 752 с.
11. **Алефельд Г., Херцбергер Ю.** Введение в интервальные вычисления. — М.: Мир, 1987. — 360 с.
12. **Заде Л. А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 168 с.
13. **Венцель Е. С.** Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.