

УДК 004.052.2

С. В. ГЕРОН, А. И. ФРИД

ГОЛОСОВАНИЕ В N-КРАТНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Приводится анализ эффективности работы наиболее известных методов голосования в N-кратно резервированных системах, в том числе, программных. Предложены новые методы голосования с использованием нечеткой логики и нейронных сетей. Проведен сравнительный анализ предложенных и известных методов голосования. Определены области наиболее эффективного применения каждого из них. *Отказоустойчивость; резервирование; голосование*

Меж двух равно манящих яств
свободный в их выборе к зубам бы
не поднес ни одного и умер бы
голодный . . .

Данте Алигьери.
Божественная комедия.

Не стоит лишь надеяться на то, что можно принять безошибочное решение, наоборот, следует заранее примириться с тем, что всякое решение сомнительно, ибо это в порядке вещей, что, избегнув одной неприятности, попадешь в другую. Однако в том и состоит мудрость, чтобы, взвесив все возможные неприятности, наименьшее зло почесть за благо.

Никколо Макиавелли

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что отказоустойчивость любой системы достигается путем введения избыточности, которая используется при отказах элементов системы. После диагностирования и локализации отказа происходит реконфигурация системы путем подключения резерва. Решение о реконфигурации принимается специальной схемой принятия решений. Отдельный класс отказоустойчивых систем образуют N-кратно резервированные системы, в которых используются N систем/программ, выполняющих одну и ту же задачу. Особенно часто такой способ обеспечения отказоустойчивости (а также высокой точности вычислений) используется в вычислительных системах с высокой степенью ответственности (космические системы, системы управления атомными станциями, летательными аппаратами различного назначения и т. п.). В условиях использования аппаратуры в среде с повышенной интенсивностью помех (косми-

ческое пространство, применение противником помехогенерирующего оружия, условия повышенных физических нагрузок во время взлета космического аппарата и т. п.) применяются жесткие требования к устойчивости оборудования к помехам и сбоям. Требуется маскирование кратковременных неисправностей и исключение их влияния на качество и точность конечного результата вычислений.

При использовании N-кратного резервирования в системе присутствует N функционально идентичных элементов, задача голосования заключается в том, чтобы на основе N решений выбрать или вычислить такое, чтобы результат голосования был максимально приближен к идеальному значению конечного результата вычислений. В идеальном случае выходные данные таких систем должны быть одинаковы, однако вследствие действия на системы различных дестабилизирующих факторов, а также отказов, решения, вырабатываемые ими, в общем случае различны. При этом задача выбора решения, ближайшего к истинному, становится нетривиальной. Существует множество способов и устройств принятия решений в N-кратно резервированных системах (голосования), например [1–3], однако, каждый имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее известными методами являются: вычисление среднего значения, вычисление взвешенного среднего значения, выбор медианы, выбор 2-из-N, вычисление взвешенного по предыстории среднего значения, разбиение на множества эквивалентности, разбиение на множества эквивалентности с использованием нечеткой логики и др.

Существуют N-кратно резервированные вычислительные системы, конечный результат вычислений которых принадлежит мно-

жеству малой мощности возможных значений (условно, менее тысячи возможных значений). Примером таких систем могут служить системы принятия решений типа «да/нет», системы с малыми требованиями к точности конечного результата (например, измерение температуры окружающей среды в диапазоне от -50 до $+50$ градусов с точностью до 1 градуса и т. д.). Для таких систем существуют, эффективно действуют и применяются несколько широко известных классических методов голосования [1]. Гораздо более сложной является задача голосования для N -кратно резервированных вычислительных систем, конечный результат вычислений которых принадлежит множеству большой мощности возможных значений (условно, более десяти тысяч возможных значений; разделение вычислительных систем на системы с малым и большим множеством значений конечного результата не является четким и их границы размыты). Примером могут служить вычислительные системы с высокими требованиями к точности вычислений конечного результата (например, измерение температуры окружающей среды в диапазоне от -50 до $+50$ градусов с точностью до нескольких знаков после запятой или высокоточное измерение угла движения космического аппарата и т. д.). Далее рассматриваются вычислительные системы с большим множеством значений конечного результата.

В данной работе исследуется возможность применения систем искусственного интеллекта к задаче голосования, а именно, с использованием нечеткой логики и нейронных сетей. Исследование проводилось с помощью математического моделирования. В качестве критерия эффективности работы схемы голосования использована вероятность принятия правильного решения на выходе N -кратно резервированной системы в условиях действия помех и отказов отдельных подсистем. Численно она оценивалась как отношение количества успешных голосований к общему количеству экспериментов. Все эксперименты проводились для $N = 5$.

2. АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ИЗВЕСТНЫХ СПОСОБОВ ГОЛОСОВАНИЯ

G. Latif-Shabgahi, J. M. Bass и S. Bennett предложили способ голосования [2], в котором для каждого решения с помощью некоторой величины допуска определяют его эквивалентность с остальными решениями: если $|x_i - x_j| \leq \varepsilon$, где ε — величина допуска,

то i -е и j -е решения считают эквивалентными; для каждого элемента i вводят параметр достоверности S_i , который увеличивают на 1 при таком исходе голосования, когда i -е решение окажется эквивалентным хотя бы $(N - 1)/2$ остальным решениям, затем для каждого решения вычисляют вес как квадрат параметра достоверности, поделенного на общее количество голосований: $w_i = (\frac{1}{n}S_i)^2$, где w_i — вес i -го решения, n — общее количество голосований за заранее выбранный интервал времени T , затем вычисляют результат голосования как отношение суммы произведений весов решений на их величины к сумме весов

решений $y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \times x_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$, где N — количество элементов, x_i — решение i -го элемента, y — результат голосования.

Недостатком этого способа является использование допуска ε , оптимальный выбор величины которого является крайне сложной задачей в силу критического влияния этого параметра на эффективность голосования и изменения оптимальной величины этого параметра в зависимости от условий эксплуатации, что снижает вероятность принятия правильного решения.

Распространенный способ голосования, предложенный R. V. Broen [3], заключается в том, что для каждого из N решений элементов определяют вес решения на основе евклидова расстояния до остальных решений и нормализующего параметра, выбираемого при проектировании в зависимости от конкретного приложения:

$$w_i = \frac{1}{1 + \prod_{j=1, j \neq i}^N \frac{(x_i - x_j)^2}{\beta^2}}$$

x_i — решение i -го элемента, β — нормализующий параметр, w_i — вес i -го решения; затем вычисляют результат голосования как отношение суммы произведений весов решений на их величины к сумме весов решений

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \times x_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

y — результат голосования.

Недостатком этого способа является игнорирование предыстории голосования и использование нормализующего параметра, оп-

тимальная величина которого зависит от конкретных условий и среды применения способа, что снижает вероятность принятия правильного решения.

3. СПОСОБ ГОЛОСОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ НЕЧЕТКУЮ ЛОГИКУ И ПРЕДЫСТОРИЮ ГОЛОСОВАНИЯ

В одном из рассмотренных выше способов голосования используется информация о предыстории голосования, в другом – о взаимном расположении N решений. Нами предлагается объединить оба вида информации об N решениях, одновременно исключив использование заранее задаваемых параметров ε и β [4, 5].

В рассмотренных выше способах голосования критичным является выбор оптимального значения параметров (ε, β) при получении информации о взаимном расположении N решений. Данная задача является сложной и трудноформализуемой. Для решения подобных задач традиционно предлагается использовать средства искусственного интеллекта, в частности, нечеткой логики [6].

Нечеткое множество состоит из элементов, которые, в отличие от элементов четкого множества, характеризуются степенью принадлежности этому множеству. Степень принадлежности – это число в интервале $[0, 1]$. Функция принадлежности нечеткому множеству \tilde{X}_i $\mu_{\tilde{X}_i}(x)$ принимает значения от 0 до 1 и представляет собой степень принадлежности некоторого числа x множеству \tilde{X}_i . Таким образом, чем выше значение $\mu_{\tilde{X}_i}(x)$, тем выше степень принадлежности числа x множеству \tilde{X}_i . Логично, чтобы степень принадлежности числа x множеству уменьшалась с удалением числа x от центра множества x_i к границам множества $x_i \pm \varepsilon/2$. Для этого подходит треугольная функция принадлежности. Таким образом, функция принадлежности числа x множеству \tilde{X}_i определяется:

$$\mu_{\tilde{X}_i}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - x|}{\varepsilon/2} & \text{при } x_i - \frac{\varepsilon}{2} < x < x_i + \frac{\varepsilon}{2}, \\ 0 & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

Чтобы получить отношения, которые отражали бы степень близости двух решений x_i и x_j , в [7] предложена мера равенства двух результатов, представленная формулой

$$S(\tilde{X}_i, \tilde{X}_j) = \frac{\int_x (\min \{ \mu_{\tilde{X}_i}(x), \mu_{\tilde{X}_j}(x) \}) dx}{\max \{ \int_x \mu_{\tilde{X}_i}(x) dx, \int_x \mu_{\tilde{X}_j}(x) dx \}}.$$

Для двух решений x_i и x_j с треугольными функциями принадлежности, у которых основания треугольника одинаковы и равны ε , имеем

$$S_{ij} = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_i - x_j|}{\varepsilon}\right)^2 & \text{если } |x_i - x_j| \leq \varepsilon, \\ 0 & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

В качестве величины основания треугольных функций принадлежности предлагается использовать величину разности между максимальным и минимальным решениями, тогда

$$S_{ij} = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_i - x_j|}{x_{\max} - x_{\min}}\right)^2, & x_{\max} - x_{\min} \neq 0 \\ 1, & x_{\max} - x_{\min} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где x_i – решение i -го элемента.

Каждому элементу $j = 1 \dots N$ для учета предыстории голосования поставим в соответствие параметр K_j , изначально равный 1. Для каждой пары элементов рассчитывают меру равенства S_{ij} ($i, j = 1 \dots N; i \neq j$) по формуле (1). Каждому элементу ставят в соответствие параметр Sum_i – суммарная мера равенства, определяемый как сумма произведений параметра K_j ($j = 1 \dots N; j \neq i$) остальных элементов на меру равенства с ними S_{ij} , $\text{Sum}_i = \sum_{j=1}^N (S_{ij} \times K_j)$; результатом голосования считают решение с максимальной суммарной мерой равенства $x_{i_{\text{рез-та}}}$. Затем для каждого элемента соответствующий ему параметр K_j , учитывающий предысторию голосования, увеличивают на меру равенства данного элемента с элементом, решение которого было выбрано в качестве результата голосования: $K_j = K_j + S_{j i_{\text{рез-та}}}$, где $S_{j i_{\text{рез-та}}}$ – мера равенства между j -м элементом и элементом, решение которого было выбрано в качестве результата голосования.

Рассмотрим пример. Пусть имеется 5-кратно резервированная система. Предположим, что на некоторые входные данные получены следующие результаты работы пяти элементов: $x_1 = 0,1551$; $x_2 = 0,1566$; $x_3 = 0,1564$; $x_4 = 0,1553$; $x_5 = 0,1557$. Вначале рассчитываются меры равенства между элементами:

$$x_{\max} - x_{\min} = 0,1566 - 0,1551 = 0,0015.$$

$$S_{12} = \left(1 - \frac{|x_1 - x_2|}{0,0015}\right)^2 = \left(1 - \frac{|0,1551 - 0,1566|}{0,0015}\right)^2 = 0;$$

$$\begin{aligned}
S_{13} &= 0,017777; & S_{14} &= 0,751111; \\
S_{15} &= 0,36; & S_{23} &= 0,751111; \\
S_{24} &= 0,017777; & S_{25} &= 0,16; \\
S_{34} &= 0,071111; & S_{35} &= 0,284444; \\
S_{45} &= 0,537777.
\end{aligned}$$

Затем рассчитывается суммарная мера равенства для каждого элемента. Изначально $K_j = 1$ для всех j

$$\begin{aligned}
\text{Sum}_1 &= \sum_{j=1}^N (S_{1j} \times K_j) = (S_{11} \times K_1) + \\
&+ (S_{12} \times K_2) + (S_{13} \times K_3) + \\
&+ (S_{14} \times K_4) + (S_{15} \times K_5) = \\
&= (1 \times 1) + (0 \times 1) + (0,017777 \times 1) + \\
&+ (0,751111 \times 1) + (0,36 \times 1) = 2,128888; \\
\text{Sum}_2 &= 1,928881; & \text{Sum}_3 &= 2,124443; \\
\text{Sum}_4 &= 2,377776; & \text{Sum}_5 &= 2,342221.
\end{aligned}$$

Наибольшая суммарная мера равенства у четвертой переменной: $\text{Sum}_4 = 2,377776$, $i_{\text{рез-та}} = 4$. Ответом является значение $x_4 = 0,1553$.

Переопределяем параметры, учитывая предысторию, $K_j = K_j + S_{ji_{\text{рез-та}}}$: $K_1 = K_1 + S_{14} = 1 + 0,751111 = 1,751111$;

$$\begin{aligned}
K_2 &= 1,017777; & K_3 &= 1,071111; \\
K_4 &= 2; & K_5 &= 1,537777.
\end{aligned}$$

Предположим, что на последующие входные данные получены следующие результаты работы пяти элементов: $x_1 = -10,1551$; $x_2 = 2,1553$; $x_3 = 0,6564$; $x_4 = 0,3566$; $x_5 = 0,1557$. Такое распределение результатов после решения на первом шаге может быть, в частности, получено при одновременном сбое первого и второго элементов. Рассчитываем меры равенства между элементами:

$$x_{\max} - x_{\min} = 2,1553 - (-10,1551) = 12,3104;$$

$$\begin{aligned}
S_{12} &= \left(1 - \frac{|x_1 - x_2|}{x_{\max} - x_{\min}}\right)^2 = \\
&= \left(1 - \frac{|-10,1551 - 2,1553|}{12,3104}\right)^2 = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{13} &= 0,014825; & S_{14} &= 0,021348; \\
S_{15} &= 0,026384; & S_{23} &= 0,771307; \\
S_{24} &= 0,729124; & S_{25} &= 0,701520; \\
S_{34} &= 0,951886; & S_{35} &= 0,920308; \\
S_{45} &= 0,967627.
\end{aligned}$$

Рассчитываем суммарную меру равенства первого элемента

$$\text{Sum}_1 = \sum_{j=1}^N S_{1j} \times K_j = 1,842343 \quad (N = 5).$$

Аналогично

$$\begin{aligned}
\text{Sum}_2 &= 4,380961; & \text{Sum}_3 &= 5,201090; \\
\text{Sum}_4 &= 5,287038; & \text{Sum}_5 &= 5,218975.
\end{aligned}$$

Наибольшая суммарная мера равенства у четвертой переменной:

$\text{Sum}_4 = 5,287038$, $i_{\text{рез-та}} = 4$. Ответом является значение $x_4 = 0,3566$. Переопределяем параметры $K_j = K_j + S_{ji_{\text{рез-та}}}$:

$$\begin{aligned}
K_1 &= K_1 + S_{14} = \\
&= 1,751111 + 0,021348 = 1,772459; \\
K_2 &= 1,746901; & K_3 &= 2,022997; \\
K_4 &= 3; & K_5 &= 2,505404 \quad \text{и т. д.}
\end{aligned}$$

Следует отметить, что выбор начального значения коэффициента $K_j \neq 0$ не оказывает влияния на конечный результат. При увеличении числа шагов значения этих коэффициентов непрерывно увеличиваются, поэтому необходимо их периодически приводить относительно минимального значения.

4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА ГОЛОСОВАНИЯ

На рис. 1 представлена средняя вероятность получения правильного конечного результата вычисления системы за 1000000 единиц времени в условиях помех в зависимости от среднеквадратичного отклонения неправильных решений при заданном среднеквадратичном отклонении правильных решений, равном $0,3\varepsilon$. В качестве идеального решения моделировалась функция $1000 \sin(t)$, где t — время. Действие помех при моделировании учитывалось достаточно низкой вероятностью правильного решения каждого элемента — $0,75$. Для определения правильности голосования выбран допуск $\varepsilon = 1$, в пределах которого результат голосования считался правильным. Каждую единицу времени для каждого элемента по нормальному закону распределения генерировалось с вероятностью $0,75$ правильное решение в пределах допуска, а неправильное решение генерировалось с вероятностью $0,25$ по нормальному закону распределения за пределами допуска. Распределение некорректных результатов

характеризуется величиной $СКО_{некорр}$. На рис. 2 представлена ситуация работы системы в условиях помех при отказе одного элемента из пяти (один элемент всегда генерирует неправильное решение). На рис. 3 представлена ситуация работы системы в условиях помех при отказе двух элементов из пяти (два элемента всегда генерируют неправильное решение).

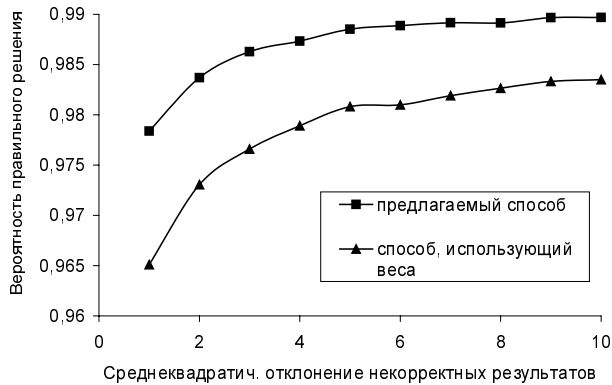


Рис. 1. Эффективность работы 5-кратно резервированной системы в условиях помех

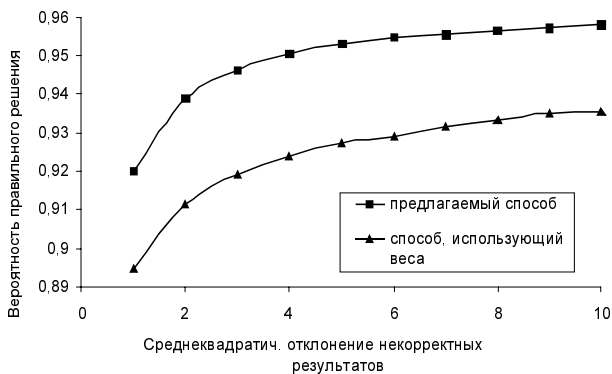


Рис. 2. Эффективность работы 5-кратно резервированной системы в условиях помех при отказе одного элемента

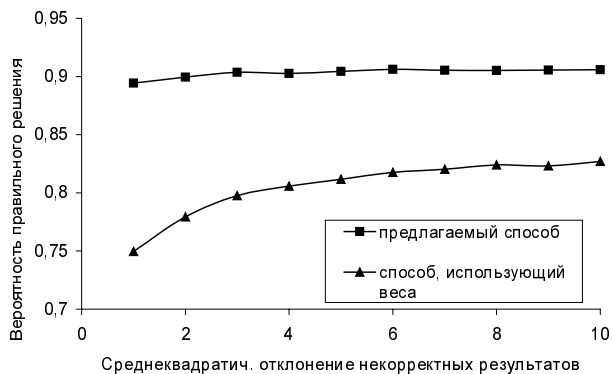


Рис. 3. Эффективность работы 5-кратно резервированной системы в условиях помех при отказе двух элементов

Как показали результаты моделирования, предложенный способ голосования в N -

кратно резервированной системе ($N = 5$) показал более высокую эффективность при отказах элементов системы по сравнению с известным методом голосования, использующим весовые коэффициенты для расчета среднего значения. Эффективность метода проверена в условиях сильного действия помех, что учитывалось низкой вероятностью правильного решения каждым элементом системы. Использование нечеткой логики для вычисления меры равенства между решениями элементов системы позволяет избавиться от необходимости выбора величины допуска, а использование предыстории голосования позволяет учитывать состояние каждого из резервных элементов в отдельности.

5. СПОСОБ ГОЛОСОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ НЕЙРОННУЮ СЕТЬ

Нейронные сети позволяют с любой наперед заданной точностью вычислять произвольную непрерывную функцию $f(x_1, \dots, x_N)$. Это доказывается в ряде теорем о возможности получить любую непрерывную функцию N переменных с помощью операций сложения, умножения и суперпозиции из непрерывных функций одного переменного [8]. Поскольку голосование, по сути, является функцией от N переменных, то можно предположить, что возможно сконструировать нейронную сеть и обучить ее таким образом, чтобы она, как минимум, не уступала существующим методам голосования. Нейронные сети могут быть выбраны и в силу того, что они обладают необходимой гибкостью, точностью и способностью находить зависимость между большим количеством входных и выходных величин.

Среди множества разновидностей нейронных сетей была выбрана сеть Элмана, так как она удовлетворяет ряду основных требований к способу голосования, таких как: наличие обратной связи, выходные данные представляемые в виде чисел, что повышает точность голосования, простота структуры нейронной сети Элмана. Нейронная сеть Элмана относится к рекуррентным сетям и способна хранить информацию о предыдущих состояниях входных сигналов, что и требуется для эффективного голосования в течение продолжительного времени.

Путем экспериментального подбора структуры сети Элмана (рис. 4) была выбрана сеть со следующими характеристиками [9, 10]: входных сигналов $N - 1 = 4$, нулевой

слой содержит 4 псевдонейрона, т. е. заменен на матрицу весовых коэффициентов, первый слой 30 нейронов с тангенциальной активационной функцией и 1050 синапсов, второй слой $N = 5$ нейронов с сигмоидальной активационной функцией и 155 синапсов. Следует отметить, что структура нейронной сети Элмана, т. е. число нейронов в первом и выходном слое, выбрана именно с расчетом на 5-кратно резервированную систему. При другой кратности резерва должна быть использована другая структура сети, т. е. число нейронов в сети прямо пропорционально числу резервных элементов, но изменение кратности резерва не приводит к изменению алгоритма работы сети.

На вход нейронной сети подается евклидово расстояние между результатами работы 5 элементов. Помимо евклидова расстояния между результатами в нейронную сеть вводится информация о взаимном расположении результатов. Для этого, перед расчетом евклидова расстояния, результаты работы 5-и элементов сортируются по возрастанию: $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4 \leq x_5$. Для 5-кратно резервированной системы в нейронную сеть подается 4 входных сигнала: евклидово расстояние между результатами работы 5 элементов: $In_1 = |x_1 - x_2|$, $In_2 = |x_2 - x_3|$, $In_3 = |x_3 - x_4|$, $In_4 = |x_4 - x_5|$, входной вектор нормализуется по формуле: $I_i = \frac{In_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 In_i}}$.

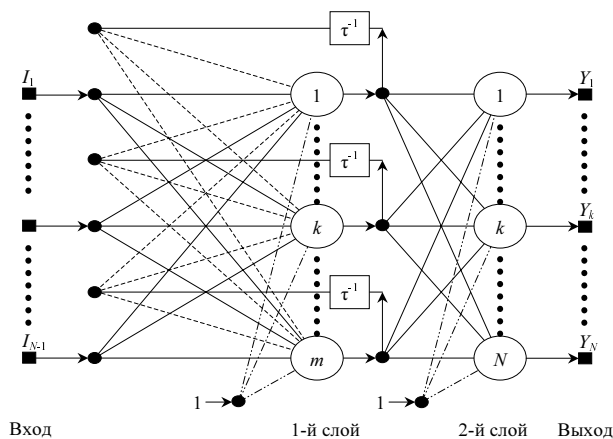


Рис. 4. Структурная схема сети Элмана

Выходной слой содержит 5 нейронов, выход каждого из которых пропорционален достоверности результата соответствующего элемента. Результатом голосования считается результат того элемента, выходной сигнал соответствующего нейрона которого наибольший.

Наличие обратной связи τ^{-1} в структуре сети позволяет хранить информацию о предыдущих состояниях входных сигналов и использовать ее при дальнейшем голосовании.

6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОННОГО ГОЛОСОВАНИЯ

Исследовалась эффективность работы способов голосования при отказах элементов в 5-кратно резервированной системе. На рис. 5 представлена средняя вероятность получения правильного конечного результата вычисления системы за 1000000 единиц времени в условиях помех в зависимости от среднеквадратичного отклонения неправильных решений при заданном среднеквадратичном отклонении правильных решений, равном $0,3\epsilon$. Условия эксперимента при исследовании эффективности использования нейронной сети в качестве схемы голосования те же, что и при исследовании схемы с нечеткой логикой. На рис. 6 представлена ситуация работы системы в условиях помех при отказе одного элемента из пяти (один элемент всегда генерирует неправильное решение). На рис. 7 представлена ситуация работы системы в условиях помех при отказе двух элементов из пяти (два элемента всегда генерируют неправильное решение).

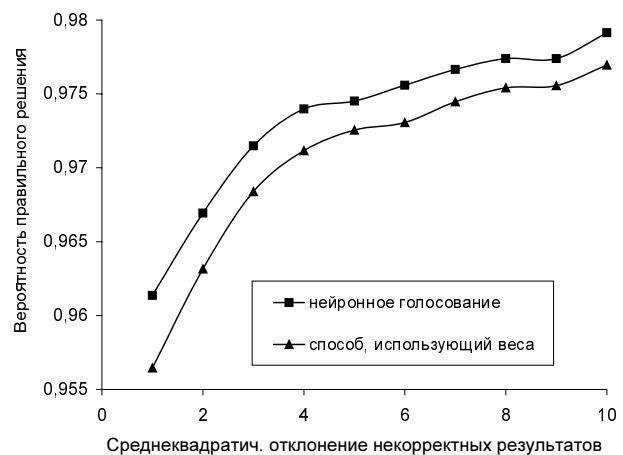


Рис. 5. Эффективность работы 5-кратно резервированной системы в условиях помех

Как показали результаты моделирования, нейронное голосование в N -кратно резервированной системе ($N=5$) показало более высокую эффективность при отказах элементов системы по сравнению с известным методом голосования, использующим весовые коэффициенты для расчета среднего значения. Эффективность голосования проверена в условиях сильного действия помех, что

учитывалось низкой вероятностью правильного решения каждым элементом системы. Использование рекуррентной нейронной сети позволяет нейронному методу голосования хранить информацию о предыдущих состояниях входных сигналов и использовать ее при дальнейшем голосовании, что повышает эффективность данного метода при продолжительной работе N -кратно резервированной системы.

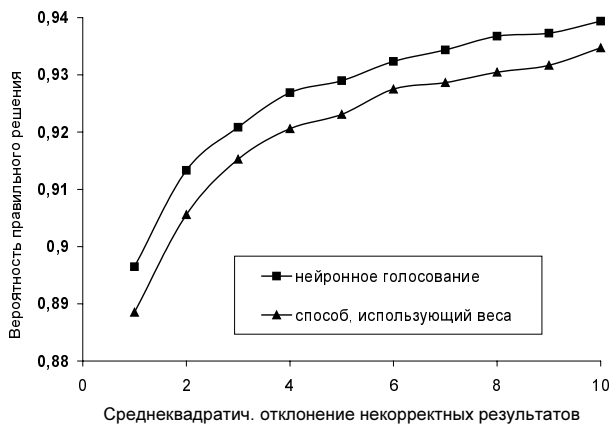


Рис. 6. Эффективность работы 5-кратно резервированной системы в условиях помех при отказе одного элемента

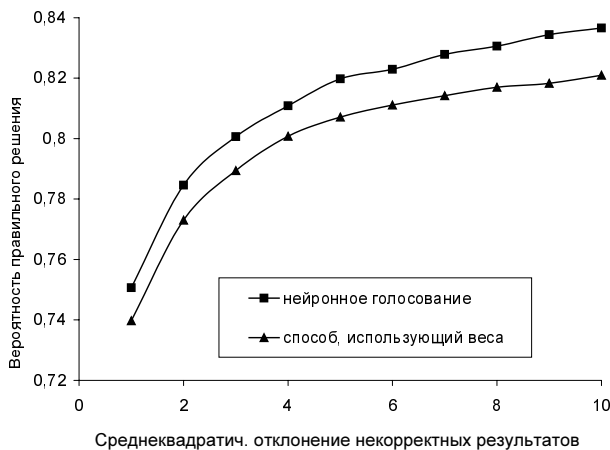


Рис. 7. Эффективность работы 5-кратно резервированной системы в условиях помех при отказе двух элементов

7. ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ГОЛОСОВАНИЯ

Сравнение различных методов голосования показывает, что преимущества каждого из них определяются в зависимости от величины $СКО_{некор.}$. На рис. 8 показаны области значений $СКО_{некор.}$, в которых целесообразно применение того или иного метода. Из рис. 8 следует, что, если устройство голосования используется при небольших параметрических

отказах, то целесообразно применение метода «вычисление среднего значения», если принимать решение в условиях значительных параметрических отказов, то наиболее эффективен метод «выбор медианы», если обеспечивать отказоустойчивость при возникновении полных отказов (обрыв, короткое замыкание или физическое устранение одного или более вычислителей), то предпочтение следует отдать нечеткому, нейросетевому, «вычисление взвешенного среднего значения» или «2-из- N » методам голосования.

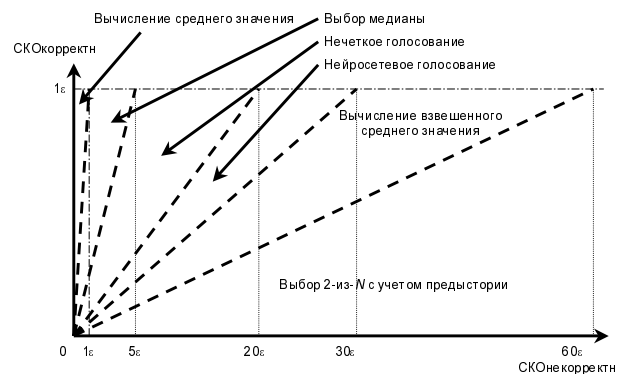


Рис. 8. Области эффективного применения различных методов голосования

Следует отметить, что системы голосования, используемые для обеспечения отказоустойчивости, выполняют роль системы контроля работоспособности всей вычислительной системы, поэтому требования к встроенным системам контроля каждого вычислителя могут быть снижены. Однако, если каждый вычислитель имеет встроенную систему контроля, то эффективность нечеткого и нейросетевых методов может быть повышена за счет использования дополнительной (хотя и неполной) информации о состоянии каждого компонента системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Torres-Pomales, W.** Software Fault Tolerance: A Tutorial / W. Torres-Pomales : NASA/TM-2000-210616; L-18034; NAS 1.15:210616, 20001001. NASA Center for AeroSpace Information (CASI), 2000. 66 p.
2. **Latif-Shabgahi, G.** History-based weighted average voter: A novel software voting algorithm for fault-tolerant computer systems / G. Latif-Shabgahi, J. M. Bass, S. Bennett // Proc. of the PDP2001: 9th Euromicro Workshop on Parallel and Distributed Processing. Mantova, 2001.
3. **Broen, R. B.** New voters for redundant systems / R. B. Broen // ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control. 1975. March. P. 41–45.

4. **Герон, С. В.** Нечеткий выбор при N-кратном программировании // С. В. Герон, А. И. Фрид // Искусственный интеллект в XXI веке : сб. стат. II всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2004. С. 70–72.
5. **Geron, S. V.** Analysis of voters based on fuzzy logic and neural networks in n-version development / S. V. Geron, A. I. Frid // Proc. of the 7th Int. Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2005). Ufa : US-ATU, 2005. Vol. 2. P. 191–196.
6. **Круглов, В. В.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. Физматлит, 2001. 224 с.
7. **Hsu, H. M.** Aggregation of fuzzy opinions under group decision making / H. M. Hsu, C. T. Chen // Fuzzy Sets and Systems. 1996. V. 79. P. 279–285.
8. **Горбань, А. Н.** Нейроинформатика / А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кирдин. Новосибирск : Наука. Сиб. предп. РАН, 1998. 296 с.
9. **Герон, С. В.** Применение нейронных сетей к голосованию в N-кратно резервированных системах / С. В. Герон, А. И. Фрид // Нейроинформатика-2006 : сб. науч. тр. VIII всерос. науч.-техн. конф. М.:МИФИ, 2006. Ч. 1. С. 73–80.
10. **Geron, S. V.** Neural voter in redundant sys-

tems / S. V. Geron, A. I. Frid // Proc. of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2006). Karlsruhe, Germany, 2006. Vol. 1. P. 97–102.

ОБ АВТОРАХ



Герон Сергей Валентинович, аспирант каф. вычисл. техники и защиты инф. Дипл. магистр техн. и технол. по информатике и выч. технике (УГАТУ, 2005). Готовит дис. в обл. применения искус. интеллекта для повышения надежности выч. машин и систем.



Фрид Аркадий Исаакович, проф. каф. вычисл. техники и защиты инф. Дипл. инж.-электром. (УАИ, 1968). Д-р техн. наук по управ. в техн. системах (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. управ. сложн. сист. в условиях неопределенности.