

УДК 004.052.32

## **Методика автономного функционального контроля технического состояния вычислительных систем гидролокационных комплексов**

**Сотников А. А.<sup>1,\*</sup>, Якупов Ш. З.<sup>1</sup>**

\* [alex\\_sotnikov@mail.ru](mailto:alex_sotnikov@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Статья содержит описание методики автономного контроля технического состояния вычислительных систем гидролокационных комплексов. В основе методики лежит функциональный подход к проверке работоспособности вычислительной системы. В качестве входных данных предложено использование результатов имитационного моделирования гидроакустической обстановки в точке приемной антенны. Теоретически и экспериментально подтверждено увеличение достоверности контроля технического состояния в случае применения разработанной методики по сравнению с допусковым подходом обобщенной методики контроля сложных технических объектов. Наряду с применением в области контроля технического состояния вычислительных систем элементы методики могут активно применяться при отладке бортового программного обеспечения гидролокационных комплексов и разработке перспективных алгоритмов обнаружения подводных объектов.

**Ключевые слова:** вычислительные системы; имитационное моделирование; гидроакустические сигналы; гидролокационные комплексы; контроль функционирования; достоверность контроля; оценка работоспособности

---

### **Введение**

Методология контроля сложных технических объектов подразумевает применение различных методик в зависимости от поставленной перед системой задачи, а способы совершенствования выбранной методики определяются критерием эффективности контроля.

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с контролем технического состояния. Критериями эффективности проверки объектов в этом случае являются полнота и достоверность контроля [1].

Проблематика контроля сложных технических систем при решении подобного рода задач подробно рассмотрена в работах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. На основе анализа вышеуказанных источников можно сформулировать обобщенную методику контроля сложных технических объектов, которая сводится к последовательному решению задач формирования модели оценки

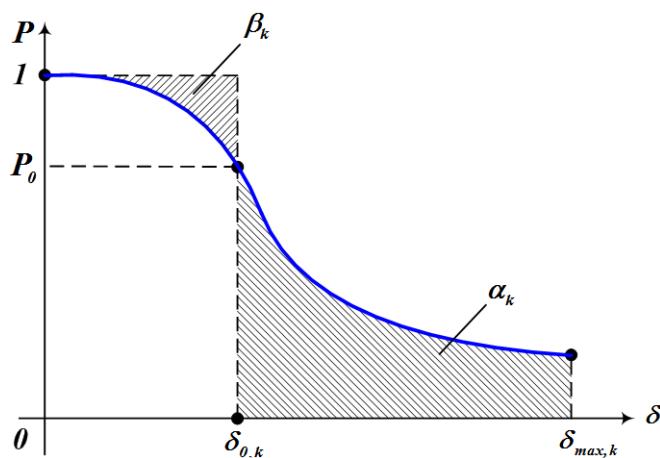
работоспособности объекта контроля, выбора состава контролируемых параметров, определения набора входных воздействий, требуемой точности измерения параметров и допусков.

Формирование модели оценки работоспособности изделия является одним из наиболее важных этапов при разработке методики контроля объекта, так как определяет алгоритм выполнения воздействий на объект контроля с целью получения его параметров и методику анализа полученных результатов для выявления качества изготовления изделия.

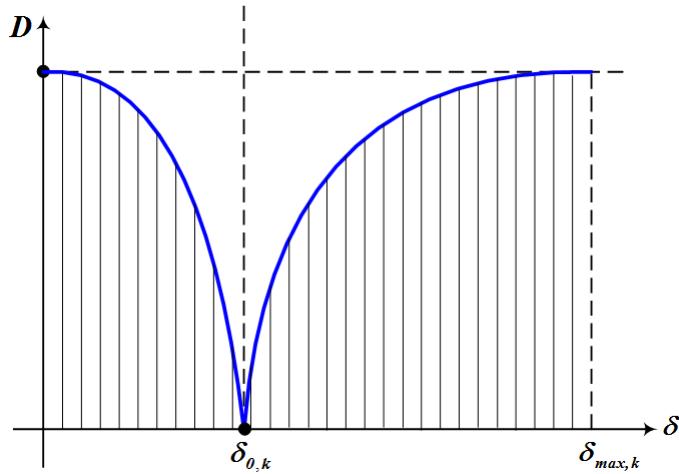
Целью данной статьи является формулировка методики функционального автономного контроля вычислительной системы гидролокационных комплексов, что способствует повышению достоверности контроля и снижению его стоимости по сравнению с дорогостоящими натурными экспериментами. В первой части статьи подробно проанализированы ограничения классического допускового тестового подхода к определению технического состояния вычислительной системы, во второй части научно обосновано отсутствие принципиальных ограничений достоверности при применении новой методики функционального контроля, в третьей части приведены экспериментальные данные, практически подтверждающие полученные научные результаты.

### **1. Анализ ограничений допускового подхода методики контроля сложных технических систем и автономной функциональной отработки вычислительных систем гидролокационных комплексов**

На рис. 1 и 2 представлено графическое изображение функции вероятности безотказной работы контура изделия и достоверности допускового контроля в зависимости от допуска на  $k$ -й параметр  $\delta_k$  [9]. Как видно из рисунков при изменении величины допуска происходит лишь перераспределение риска поставщика  $\alpha_k$  и риска заказчика  $\beta_k$ . Ниже приведены аналитические выражения, описывающие указанные риски.



**Рис. 1.** Функция вероятности безотказной работы изделия в зависимости от допуска на  $k$ -й параметр



**Рис. 2.** Функция достоверности контроля изделия в зависимости от допуска на  $k$ -й параметр

Для параметра  $k$ -го контура риск заказчика  $\beta_k$  определяется выражением

$$\beta_k = \int_0^{\delta_{0k}} (1 - P_k(\delta)) f_k(\delta) d\delta, \quad (1)$$

а риск производителя  $\alpha_k$  определяется выражением

$$\alpha_k = \int_{\delta_{0k}}^{\delta_{max,k}} P_k(\delta) f_k(\delta) d\delta. \quad (2)$$

Тогда с учетом выражений (1) и (2) достоверность контроля по  $k$ -му контуру  $D_k$  примет вид

$$D_k = 1 - (\alpha_k + \beta_k) = 1 - \int_{\delta_{0k}}^{\delta_{max,k}} P_k(\delta) f_k(\delta) d\delta - \int_0^{\delta_{0k}} (1 - P_k(\delta)) f_k(\delta) d\delta. \quad (3)$$

С учетом предположения о независимости контуров и выражения (3) достоверность контроля с применением допускового подхода в целом для изделия определяется выражением

$$D = \prod_{i=k}^N \left( 1 - \int_{\delta_{0k}}^{\delta_{max,k}} P_k(\delta) f_k(\delta) d\delta - \int_0^{\delta_{0k}} (1 - P_k(\delta)) f_k(\delta) d\delta \right), \quad (4)$$

где  $N$  — количество контуров вычислительной системы.

Допущение о независимости контуров значительно упрощает проведение расчетов по оценке качества контроля. На практике функционирование одного контура неизбежно оказывает влияние на работу другого контура, а следовательно, исходя из равенства (4), достоверность контроля системы в случае взаимовлияния контуров системы определяется выражением

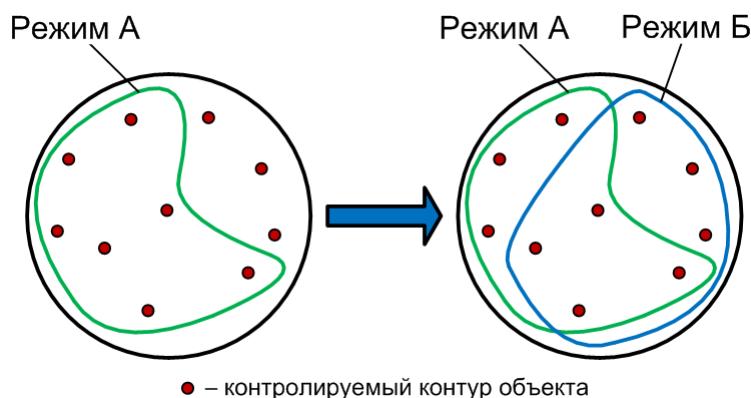
$$D \leq \prod_{i=k}^N \left( 1 - \int_{\delta_{0k}}^{\delta_{max,k}} P_k(\delta) f_k(\delta) d\delta - \int_0^{\delta_{0k}} (1 - P_k(\delta)) f_k(\delta) d\delta \right). \quad (5)$$

В этом случае функциональный подход имеет преимущество по сравнению с тестовым, так как учитывает одновременное функционирование всех контуров объекта контроля в режимах работы штатной циклограммы.

При отработке гидролокационных комплексов формирование внешних и внутренних эксплуатационных воздействий может осуществляться с применением трех способов: математическое моделирование, гидрофизическое моделирование, полигонные испытания.

Технические трудности автономного испытания вычислительных систем, а также высокая стоимость натурных экспериментов и ограниченность применения гидрофизического моделирования, делают метод математического моделирования привлекательным с точки зрения организации функциональной отработки. Возможность непосредственного контроля полного набора параметров, возможность контроля объекта в несовместных при штатной эксплуатации режимах, а также отсутствие ограничений по изменению формируемых воздействий и параметров среды во всем диапазоне способствует тому, что способ математического моделирования позволяет наиболее эффективно выполнять функциональную отработку вычислительных систем гидролокационных комплексов при условии обеспечения необходимого уровня адекватности математического описания эксплуатационных воздействий и параметров среды.

На рис. 3 приведена иллюстрация, наглядно показывающая увеличение достоверности при контроле объекта в несовместных при штатной эксплуатации режимах.



**Рис. 3.** Увеличение достоверности контроля объекта в несовместных при штатной эксплуатации режимах

Как видно из представленного рисунка, при контроле объекта в единственном режиме штатной работы часть контуров остается неохваченной, и достоверность контроля уменьшается в связи с недостатком его полноты. В этом случае теоретическая оценка рисков производителя и заказчика определяется соответственно выражениями

$$\alpha = \prod_{i=1}^m (\alpha_i + D_{0i}) \prod_{i=m+1}^n p_i - \prod_{i=1}^m D_{0i} \prod_{i=m+1}^n p_i, \quad (6)$$

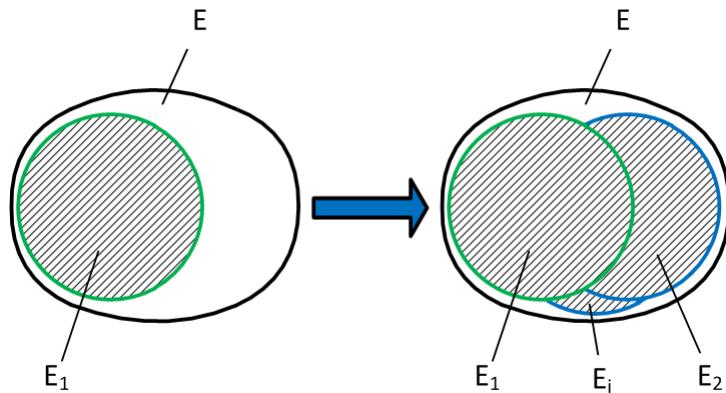
$$\beta = \prod_{i=1}^m (\beta_i + D_{0i}) - \prod_{i=1}^m D_{0i} \prod_{i=m+1}^n p_i, \quad (7)$$

а достоверность контроля с учетом (6) и (7) определяется формулой

$$D = 1 - (\alpha + \beta) = 1 - \prod_{i=1}^m (\alpha_i + D_{0i}) - \prod_{i=1}^m (\beta_i + D_{0i}) + 2 \prod_{i=1}^m D_{0i} \prod_{i=m+1}^n p_i,$$

где  $p_i$  — вероятность безотказной работы  $i$ -го контура системы;  $\alpha_i$  — риск изготовителя для  $i$ -го контура системы;  $\beta_i$  — риск заказчика для  $i$ -го контура системы;  $D_{0i}$  — достоверность канала «работоспособен» для  $i$ -го контура системы;  $m$  — количество контролируемых контуров системы;  $n$  — общее количество контуров системы.

На рис. 4 приведена иллюстрация, наглядно показывающая увеличение полноты контроля объекта с использованием нескольких наборов формируемых воздействий.



**Рис. 4.** Увеличение достоверности контроля объекта в условиях изменения формируемых воздействий и параметров среды

Предположим, что вектор входных воздействий  $X_i$  выявляет множество неисправностей  $E_i$  мощностью  $N_{Ei}$ :

$$\begin{aligned} X_1 &\longrightarrow E_1; & N_{E1} &= |E_1|; \\ X_2 &\longrightarrow E_2; & N_{E2} &= |E_2|; \\ &\dots & &\dots \\ X_i &\longrightarrow E_i; & N_{Ei} &= |E_i|; \\ &\dots \dots \dots \\ X_M &\longrightarrow E_M; & N_{EM} &= |E_M|. \end{aligned}$$

В этом случае общее количество неисправностей, выявляемых с помощью  $M$  векторов входных воздействий и параметров водной среды определяется выражением

$$N_E = \sum_{j=1}^n |E_j| - \sum_{i < j}^n |E_i \cap E_j| + \sum_{i < j < k}^n |E_i \cap E_j \cap E_k| - \dots + (-1)^{n-1} |E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n|.$$

Таким образом, в результате анализа обобщенной методики контроля сложных технических систем и особенностей функциональной отработки применительно к проверке вычислительных систем гидролокационных комплексов выявлены следующие недостатки:

1) проведение тестового контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов не учитывает взаимовлияние между контролируемыми контурами, что приводит к уменьшению достоверности контроля за счет увеличения вероятности невыявленного отказа, что

существенно при проведении контроля составных частей гидролокационного комплекса, к которым предъявляются повышенные требования к надежности;

2) проведение функционального контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов не обладает достаточной гибкостью за счет применения штатного программного обеспечения, что отрицательно отражается на полноте контроля, затрудняет диагностику неисправности. Кроме того, автономный функциональный контроль технически трудно реализуем из-за отсутствия информационных связей с другими составными частями гидролокационных комплексов;

3) допусковый контроль является упрощенным вариантом контроля по общенному показателю, но уступает в достоверности. Для вычислительных систем гидролокационных комплексов довольно сложно грамотно определить математическое выражение для обобщенного показателя, сохранив его физический смысл, так как набор параметров контуров имеет совершенно различную природу.

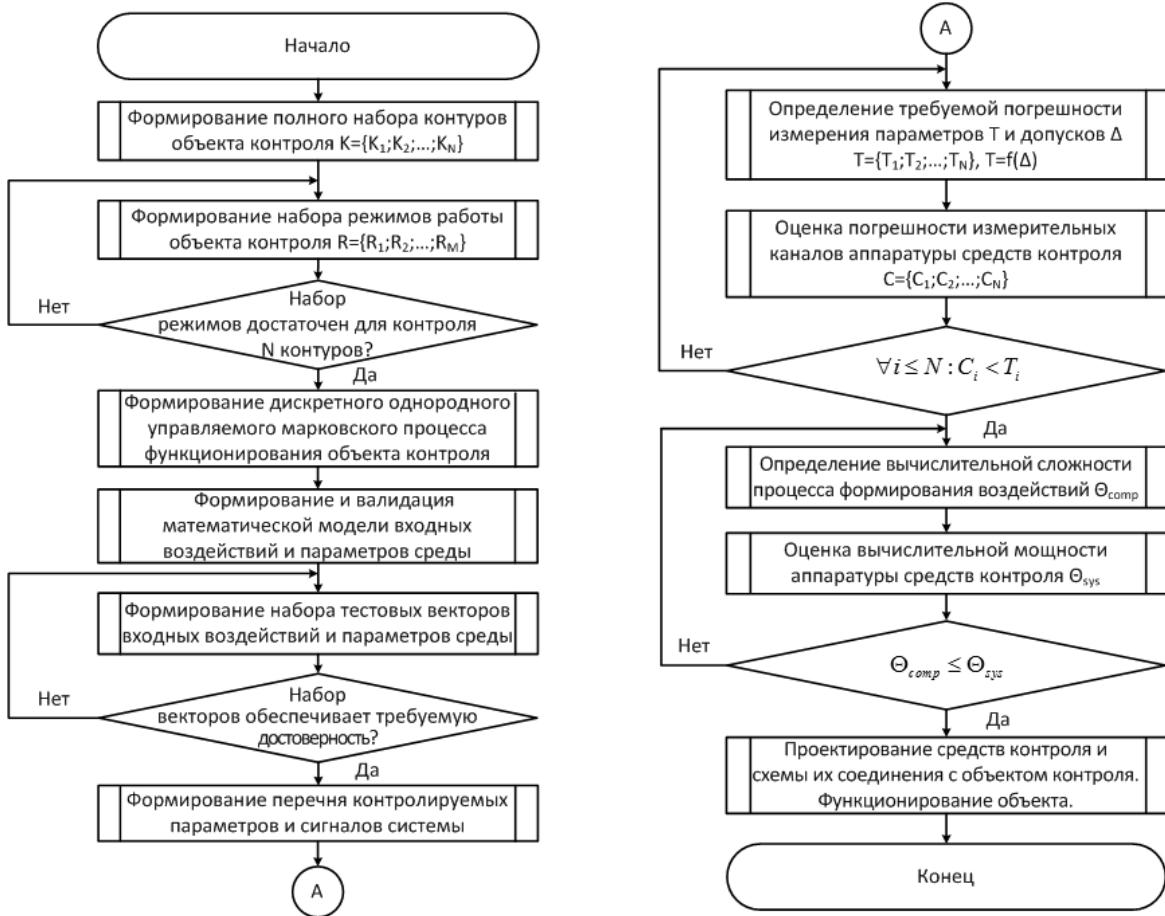
## **2. Разработка методики автономного функционального контроля технического состояния вычислительных систем гидролокационных комплексов**

На основе анализа особенностей функционирования вычислительных машин гидролокационных комплексов применительно к задаче обеспечения их достоверного контроля [10], анализа методики проектирования промышленных средств контроля сложных технических систем сформулирована методика автономного функционального контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов с применением имитационного моделирования внешних факторов — гирдоакустических сигналов.

На рис. 5 представлена схема алгоритма методики автономного имитационного контроля работоспособности вычислительной системы гидролокационного комплекса.

**Формирование полного набора контуров объекта контроля и необходимого набора режимов работы.** Аналогично алгоритму тестового допускового контроля сложных технических систем при имитационном подходе также необходимо определить перечень тестовых контуров объекта  $K_T = \{K_1, K_2, \dots, K_N\}$  и перечень контролируемых параметров  $PK_T = \{PK_1, PK_2, \dots, PK_N\}$ , определяющих техническое состояние соответствующих контуров.

Вычислительные системы гидролокационных комплексов в процессе штатной эксплуатации функционируют в нескольких режимах, и тестирование, основанное на проверках параметров в одном режиме работы, априори не отвечает требованию полноты контроля. Минимально необходимый набор режимов работы вычислительной системы определяется исходя из обеспечения требования участия в функциональном контроле системы каждого из ее контуров. Приоритетными при этом являются «сложные» режимы работы, в которых одновременно и при максимальной нагрузке функционирует несколько контуров объекта контроля.



**Рис. 5.** Схема алгоритма методики автономного имитационного контроля работоспособности вычислительной системы гидролокационного комплекса

В качестве режимов функционирования вычислительной системы гидролокационного комплекса могут быть выбраны «Подготовка к старту», «Приводнение», «Работа с включенным двигателем», «Гидроакустический поиск». Гидроакустический поиск является сложным режимом и может быть определен несколькими состояниями: «Зондирование импульсом с гиперболической частотной модуляцией», «Зондирование тональным импульсом», «Шумопеленгация» и т.д. При этом стимулирующими воздействиями можно считать включение изделия, пуск, включение двигательной установки, включение гидроакустической антенны, выбор режима зондирования, выбор режима режекции помех, возврат в исходное состояние.

Учитывая повышенные требования к отказоустойчивости для вычислительных систем гидролокационных комплексов выбор конкретных режимов и составление циклограммы работы изделия при оценке параметров должен проводиться с учетом результатов анализа технической документации на объект контроля. При этом целесообразно использовать максимально возможное количество внешних источников гидроакустических помех для обеспечения прохождения бортовой программой всех веток алгоритма обработки гидроакустической информации.

Ниже сформулированы минимально необходимые требования к имитируемой гидроакустической обстановке для данного режима контроля в случае контроля вычислительной системы активного гидролокатора:

- наличие отраженного сигнала от объекта, удаленного на максимальное и минимальное расстояния;
- применение граничных значений скорости распространения звуковых волн в водной среде;
- наличие поверхностной реверберации;
- расположение в непосредственной близости от цели помех различных типов.

Для обеспечения максимальной достоверности контроля многопроцессорной вычислительной системы [11] в наиболее «сложном» режиме формирование и подача указанных гидроакустических данных должна производится в реальном масштабе времени для обеспечения адекватной вычислительной нагрузки на процессоры цифровой обработки сигналов.

**Формирование дискретной однородной управляемой марковской модели контроля функционирования объекта и математической модели внешних факторов гидроакустической подсистемы.** На базе штатной циклограммы работы формируется дискретный однородный управляемый марковский процесс в виде ориентированного графа [12] (рис. 6), обеспечивающий проверку параметров всех контуров, в том числе в несовместных при штатной работе режимах контроля.

Граф дополняется вершиной, соответствующей состоянию обнаружения дефекта, и набором ребер, соответствующих событиям возникновения неисправностей в каждом из состояний системы. Для устранения цикличности контроля функционирования объекта граф размыкается путем удаления ребра возврата в исходное состояние.

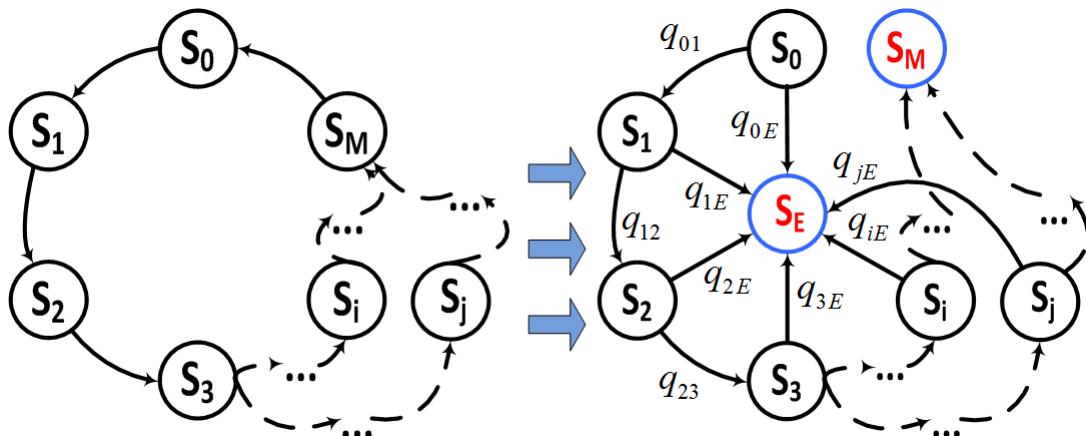


Рис. 6. Граф дискретного однородного управляемого марковского процесса

На основе полученного графа сформулировано условие принадлежности системы  $S$  классу работоспособных систем  $W_S$

$$S \in W_S \iff \forall U_k \in U: S_0 \xrightarrow{n} S_M, \quad nT_d \leq T_{\max}; \quad n, k, M \in \mathbf{N}, \quad (8)$$

где  $T_{\max}$  — максимальное время, необходимое для достижения системой состояния  $S_M$  из состояния  $S_0$ .

Вероятность перехода из состояния  $S_0$  в состояние  $S_N$  за максимально допустимое время  $T_{\max}$  определяется вероятностями  $q_{ij}$ , которые в свою очередь зависят от вектора входных воздействий.

Уравнение для вероятностей состояний  $P_S(U_k)$  для вектора входных факторов из области определения  $U_k \in U$  имеет вид

$$\begin{cases} Q_S(U_k)[I - P_S(U_k, nT_d)] = 0, \\ p_E(U_k) + \sum_{i=0}^M p_i(U_k) = 1, \end{cases} \quad i, k \in N,$$

где  $Q_S(U_k)$  — матрица вероятностей переходов, имеющая вид

$$Q_S(U_k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ q_{0E}(U_k) & 1 - \sum_{i=0}^N q_{0i}(U_k) & q_{10}(U_k) & \dots & q_{0M}(U_k) \\ q_{1E}(U_k) & q_{10}(U_k) & 1 - \sum_{i=0}^N q_{1i}(U_k) & \dots & q_{1M}(U_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Используя математический аппарат марковских процессов и критерий работоспособности системы (8), определено выражение для вероятности оценки вычислительной системы гидролокационного комплекса как работоспособной при использовании единственного набора внешних воздействующих факторов

$$P_k = \sum_{i=1}^M q_{0i}(n_0, n_i, \mathbf{U}_k) q_{iM}(n_i, n_{\max}, \mathbf{U}_k). \quad (9)$$

Соответственно, при увеличении полноты контроля объекта и последовательном применении  $K_S$  векторов значимых внешних факторов имитационной модели вероятность оценки системы как работоспособной определяется выражением

$$P_k = \prod_{k=1}^{K_S} \left( \sum_{i=1}^M q_{0i}(n_0, n_i, \mathbf{U}_k) q_{iM}(n_i, n_{\max}, \mathbf{U}_k) \right). \quad (10)$$

Вероятность работоспособности вычислительной системы соответствует вероятности оценки технического состояния системы как работоспособной при последовательном применении максимального количества  $K_{\max}$  векторов значимых внешних факторов имитационной модели.

На основании полученных в выражениях 9 и 10 вероятностей теоретически определена величина методической достоверности контроля

$$D_M = \frac{1 - \prod_{k=1}^{K_S} \left( \sum_{i=1}^M q_{0i}(n_0, n_i, \mathbf{U}_k) q_{iM}(n_i, n_{\max}, \mathbf{U}_k) \right)}{1 - \prod_{k=1}^{K_{\max}} \left( \sum_{i=1}^M q_{0i}(n_0, n_i, \mathbf{U}_k) q_{iM}(n_i, n_{\max}, \mathbf{U}_k) \right)},$$

где  $K_S$  — количество значимых векторов входных факторов при моделировании;  $K_{\max}$  — максимальное количество значимых векторов входных факторов.

Таким образом, показано, что, если математическая модель входных воздействий адекватна [13], а управляемый марковский процесс соответствует циклограмме штатной работы, то методическая достоверность контроля разработанной методики ограничена набором векторов входных воздействий

$$\lim_{K_S \rightarrow K_{\max}} \frac{1 - \prod_{k=1}^{K_S} \left( \sum_{i=1}^M q_{0i}(n_0, n_i, \mathbf{U}_k) q_{iM}(n_i, n_{\max}, \mathbf{U}_k) \right)}{1 - \prod_{k=1}^{K_{\max}} \left( \sum_{i=1}^M q_{0i}(n_0, n_i, \mathbf{U}_k) q_{iM}(n_i, n_{\max}, \mathbf{U}_k) \right)} = 1.$$

Математическая модель внешних воздействий определяется целевым назначением гидролокационного комплекса, но, как правило, представляет собой аддитивную смесь следующих элементарных гидроакустических сигналов: отраженный сигнал зондирующей посылки, шумы естественного происхождения, реверберационный сигнал.

**Формирование набора векторов внешних факторов подсистемы гидроакустики, перечня контролируемых параметров и стимулирующих сигналов.** Вектор показателей качества вычислительной системы гидролокационного комплекса  $\mathbf{Q}$  является функционалом от выходных сигналов объекта контроля

$$\mathbf{Q} = F(\mathbf{U}).$$

В свою очередь выходные сигналы объекта контроля являются функциями параметров объекта  $\mathbf{P}$  и вектора входных сигналов  $\mathbf{V}$  [14].

$$\mathbf{U} = F(\mathbf{P}, \mathbf{V}).$$

Таким образом, для получения зависимости параметров качества объекта контроля только от параметров объекта необходимо зафиксировать параметры входных сигналов для реализации выбранного режима работы, то есть для реализации каждого теста необходимо определить набор входных данных, формируемых аппаратурой контроля.

Параметры входных сигналов в процессе контроля должны выбираться с учетом требования обеспечения максимальной нагрузки на функциональные устройства системы.

Внешние факторы подсистемы гидроакустики зависят от вектора параметров объекта локации  $\vec{L}$  и вектора параметров внешней среды  $\vec{M}$

$$\vec{L} = \{\alpha, \gamma, D, v\}; \quad \vec{M} = \{A_N, \sigma_N, A_R, \sigma_R\},$$

где  $\alpha$  — азимут объекта локации;  $\gamma$  — угол места объекта локации;  $D$  — дальность до объекта локации;  $v$  — относительная скорость сближения объекта локации и гидролокационного комплекса;  $A_N$  — номинальный уровень амплитуды подводных шумов;  $\sigma_N$  — величина

дисперсии подводных шумов;  $A_R$  — номинальный уровень поверхностной реверберации;  $\sigma_R$  — величина дисперсии для поверхностной реверберации.

Примечание: параметры объекта локации  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $D$ ,  $v$  заданы в системе координат гидролокатора.

В том случае, если для имитации внешних факторов используется два уровня параметров объекта локации

$$\alpha = \{\alpha_{\min}, \alpha_{\max}\}; \quad \gamma = \{\gamma_{\min}, \gamma_{\max}\}; \quad D = \{D_{\min}, D_{\max}\}; \quad v = \{v_{\min}, v_{\max}\}$$

и два уровня параметров внешней среды

$$A_N = \{A_{N\min}, A_{N\max}\}; \quad \sigma_N = \{\sigma_{N\min}, \sigma_{N\max}\};$$

$$A_R = \{A_{R\min}, A_{R\max}\}; \quad \sigma_R = \{\sigma_{R\min}, \sigma_{R\max}\},$$

то количество экспериментов для каждого из уровней параметров составляет  $N_l = 2^{n_p-1}$ , а общее количество прогонов имитационной модели составляет  $N_0 = 2^{n_p}$ , где  $n_p$  — общее количество внешних факторов модели.

**Формирование перечня тестов на каждом режиме. Формирование перечня контролируемых параметров и стимулирующих сигналов.** Для формирования перечня проверок определим два вида тестов:

- активация режима работы;
- контроль параметров объекта.

При активации режима работы формируется стимул  $r_i$ , обеспечивающий переход объекта в  $i$ -й режим работы, и осуществляется контроль выходного сигнала, подтверждающего фактический выход на заданный режим функционирования. Количество тестов данного типа определяется количеством векторов стимулирующих сигналов  $r_i$  в матрице  $R = (r_{01}, r_{12}, \dots, r_{i(i+1)}, \dots, r_{N0})$ , где  $r_{i(i+1)}$  — вектор стимулирующих команд, необходимых для перехода системы из состояния  $i$  в состояние  $(i+1)$ , для  $i = 0, \dots, N$ .

При контроле параметров объекта в  $i$ -м режиме в контрольной аппаратуре формируется вектор входных сигналов  $v_k$ , обеспечивающих выполнение теста в заданном режиме функционирования системы. По результатам анализа вектора выходных сигналов  $u_k$  осуществляется оценка требуемого вектора параметров  $p_k$  в текущем режиме. Количество тестов данного типа определяется количеством элементов контролируемых параметров в матрице  $P = (p_0, p_1, \dots, p_i, \dots, p_N)$ , где  $p_i$  — вектор параметров, контролируемых в  $i$ -м состоянии системы, для  $i = 0, \dots, N$ .

На этапе проектирования контрольно-проверочной аппаратуры и ее программного обеспечения необходимо определить следующие требования:

- допуски на контролируемые параметры;
- погрешность измерения выходных сигналов;
- допуски и погрешность формирования входных и стимулирующих сигналов;
- временные характеристики работы программы контроля.

Требования к погрешности измерения выходных сигналов вычислительных систем гидролокационных комплексов предъявляются аналогично общим требованиям государственной системы измерений [15].

Допуски и погрешности формирования входных и стимулирующих сигналов регламентируются техническими условиями и руководством по эксплуатации объекта контроля.

**Управление вычислительной сложностью математической модели входных воздействий.** Для определения возможности выполнения программы контроля в масштабе реального времени необходимо сопоставить вычислительную сложность математической модели с характеристиками производительности вычислительных средств контроля на временном интервале, соответствующем шагу модельного времени, т.е. необходимо обеспечить выполнение неравенства

$$N_G \sum_{i=1}^{N_D} \left[ \left( 1 + \frac{\alpha_{\max}}{\Delta\alpha_{\max}} \left( \left( \frac{D_{\max} - D_A}{\Delta D_{\max}} \right) + \frac{\arctg(D_A/H)}{\Delta\alpha_{\max}} \right) \right) \vartheta_{\text{sign}} + N_{\text{noise}} \vartheta_{\text{noise}} \right] \leq \frac{T_{\text{sim}}}{K_{\text{comp}}},$$

где  $K_{\text{comp}}$  — коэффициент временной вычислительной сложности конкретной вычислительной системы;  $\Delta\alpha_{\max}$ ,  $\Delta D_{\max}$ ,  $N_{\text{noise}}$ ,  $v_{\max}$ ,  $N_G$ ,  $K_{\text{sign}}$  — параметры управления вычислительной сложностью математической модели;  $T_{\text{sim}}$  — величина шага модельного времени;  $\vartheta_{\text{sign}}$ ,  $\vartheta_{\text{noise}}$  — вычислительные сложности математических моделей отраженного сигнала и узкополосной помехи соответственно (с учетом моделирования преобразований сигнала в приемной антенне).

Параметры управления вычислительной сложностью математической модели можно разделить на две группы. Изменение параметров первой группы будет влиять на степень адекватности моделирования входных воздействий, второй группы — на характеристики моделируемой системы. Существенным фактором при оптимизации вычислительной сложности является применение способов повышения эффективности математического моделирования гидроакустической обстановки [16].

**Проектирование средств контроля и схемы соединения с объектом контроля.** На основе перечня стимулирующих сигналов, входных воздействий и структурной схемы гидролокационного комплекса формируется перечень устройств гидролокационного комплекса, имитация которых необходима средствами контрольной аппаратуры. Имитируемые контрольной аппаратурой устройства могут быть двух типов: составные части гидролокационного комплекса, внешние устройства.

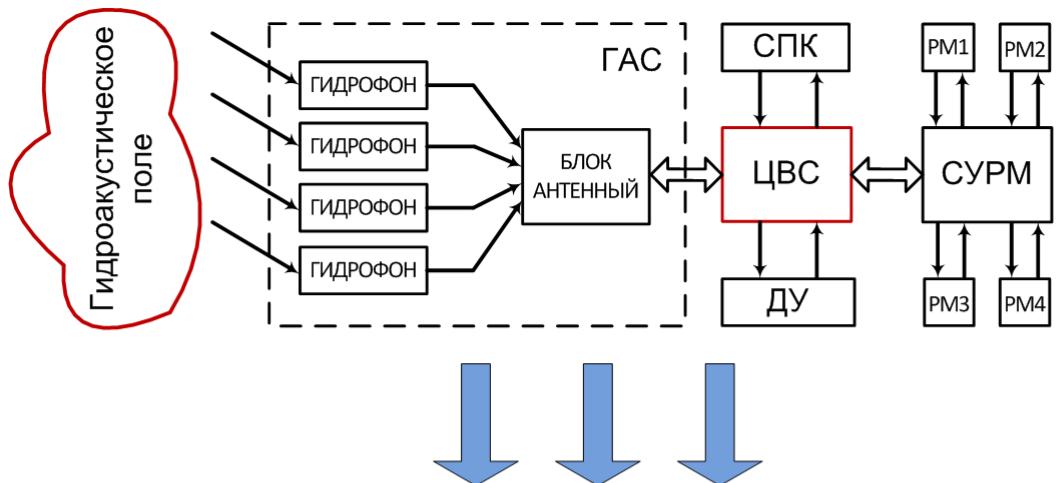
В качестве примера составных частей гидролокационного комплекса можно рассматривать следующие устройства: блок антенный, блок автоматики, рулевые механизмы, датчики глубины и скорости, двигательная установка. Внешние устройства могут применяться для имитации обмена с бортом носителя гидролокационных комплексов для неавтономных систем или в начальных режимах циклограммы для автономных систем.

При разработке информационной схемы на основе перечня имитируемых устройств и перечня входных и выходных сигналов производится восстановление информационных связей

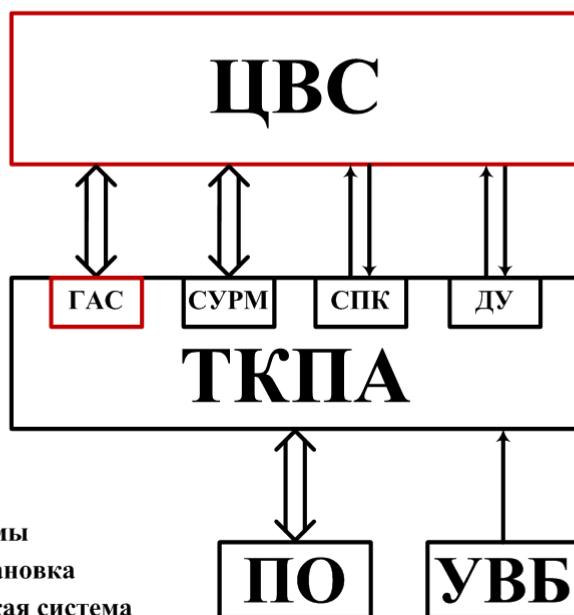
вычислительной системы с другими составными частями гидролокационного комплекса и внешними устройствами, имитация которых осуществляется в технологической контрольно-проверочной аппаратуре.

Адекватное преобразование структурной схемы функционирования объекта (рис. 7), учитывающее полный перечень имитируемых сигналов, их электрическую совместимость и скорость формирования отсчетов данных, является обязательным условием обеспечения

*Структурная схема функционирования в штатном режиме*



*Структурная схема функционирования в режиме имитационного контроля*



- ПО – пульт оператора
- РМ – рулевые механизмы
- ДУ – двигательная установка
- ГАС – гидроакустическая система
- СПК – система подъема комплекса
- ЦВС – цифровая вычислительная система
- УВБ - устройство включения и блокировки
- СУРМ - система управления рулевыми механизмами

**Рис. 7.** Преобразование структурной схемы функционирования вычислительной системы гидролокационных комплексов при переходе из штатного режима работы

высоких показателей достоверности контроля при функционировании в имитационном режиме контроля технического состояния. При проектировании технологической контрольно-проверочной аппаратуры особое внимание необходимо уделить адекватности имитаторов реальным устройствам для обеспечения достоверности контроля.

Определение временных характеристик работы тестирующего программного обеспечения является наиболее важной задачей при проектировании средств технического контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов, так как при имитационном моделировании внешних воздействий необходимо обеспечение синхронизации работы штатной программы вычислительной машины гидролокационного комплекса и технологической программы контроля. При этом моделирование внешних устройств вычислительной системы должно выполняться в режиме реального времени, обеспечивая формирование входных и стимулирующих событий в надлежащем порядке и с определенными временными интервалами.

### **3. Экспериментальные работы**

Экспериментальные работы проведены с использованием комплекта технологической контрольно-проверочной аппаратуры (ТКПА), разработанной и изготовленной НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана с целью проведения контроля технического состояния гидролокационных комплексов и их составных частей.

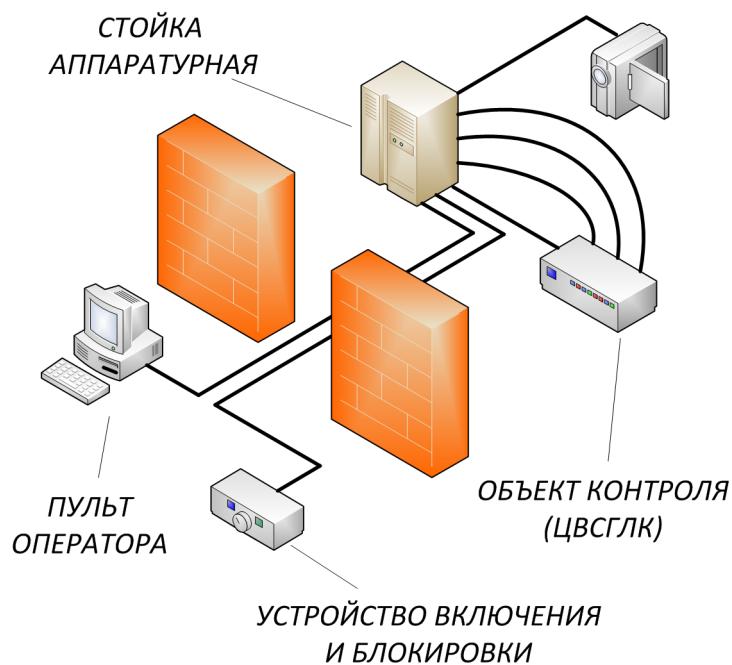
Комплект ТКПА состоит из следующих составных частей:

- пульт оператора на базе ПЭВМ, предназначенный для дистанционного управления процессом контроля и отображения результатов;
- устройство включения и блокировки, предназначенное для дистанционного отключения электропитания объекта контроля в случае возникновения нештатной ситуации;
- стойка аппаратурная на базе несущих конструкций [17], предназначенная для реализации стимулов и команд на объект контроля, в том числе электропитания;
- комплект соединительных кабелей, предназначенный для обеспечения электрического соединения составных частей ТКПА и объекта контроля;
- диск с программным обеспечением и эксплуатационная документация.

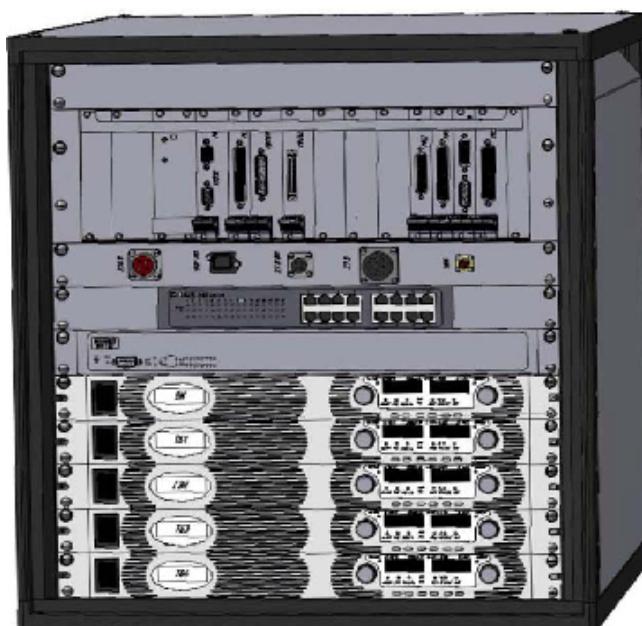
Схема взаимодействия составных частей системы контроля представлена на рис. 8, внешний вид стойки аппаратурной приведен на рис. 9.

Программное обеспечение стойки аппаратурной ТКПА реализовано с использованием объектно-ориентированного подхода [18] и инструментальной среды Code Composer Studio 5.0 на языке C++, а его основными функциями являются управление работой модулей блока командно-измерительного, реализация математической модели гидроакустической обстановки в точке приемной антенны в виде цифрового комплексного сигнала.

Адекватное моделирование гидроакустических сигналов в режиме реального времени является задачей, требующей значительных вычислительных ресурсов. Длительность од-



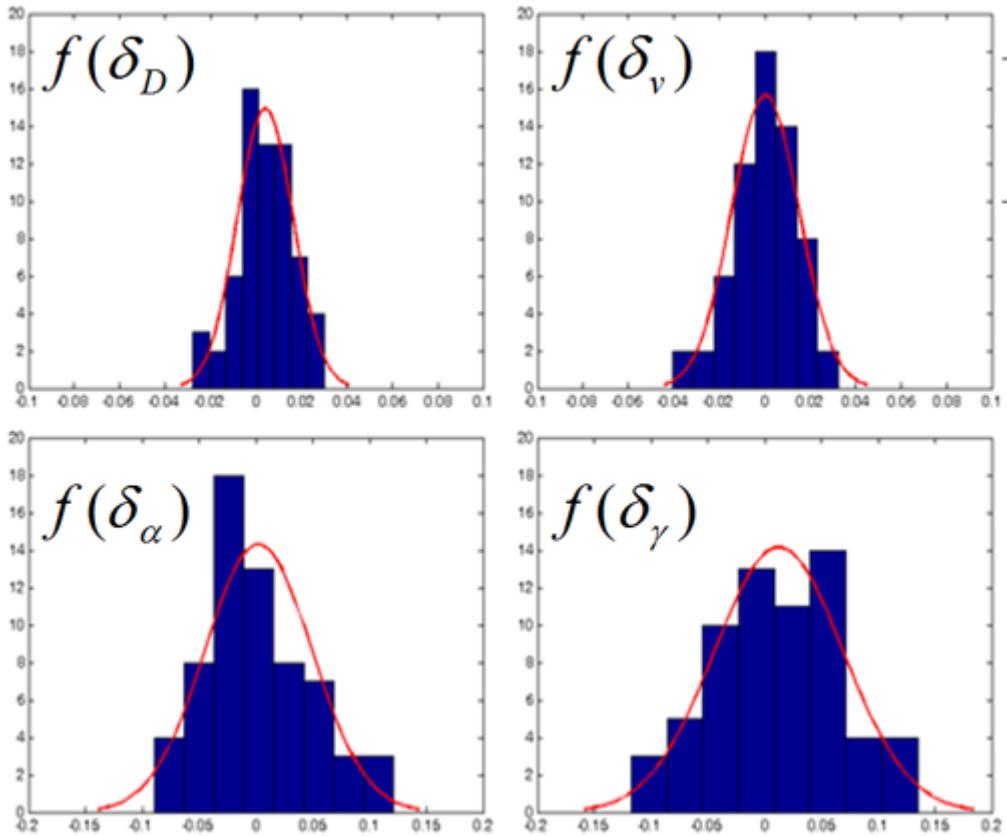
**Рис. 8.** Схема взаимодействия составных частей системы контроля



**Рис. 9.** Внешний вид стойки аппаратурной комплекта ТКПА

ного такта, в течение которого должен быть вычислен один срез данных, включающий до 100 отсчетов в зависимости от количества гидрофонов антенной решетки, в системах обработки гидролокационной информации, как правило, не превышает 100 мкс.

Достоверность методики контроля технического состояния, основанной на имитационном моделировании, существенным образом зависит от адекватности математической модели внешних факторов. Валидация разработанной модели проводилась сопоставлением исходных параметров объекта локации с данными, полученными в результате работы алгоритма обнаружения вычислительной системы [19] (рис. 10).



**Рис. 10.** Валидация математической модели гидроакустической обстановки

Приведенная погрешность  $i$ -го параметра  $\delta_i$  определяется выражением

$$\delta_i = L_i - \frac{L_{i0}}{L_{i\max}},$$

где  $L_i$  — абсолютная фактическая величина  $i$ -го параметра, полученная в результате алгоритмической обработки моделюрованных гидроакустических данных;  $L_{i0}$  — номинальная исходная величина  $i$ -го параметра;  $L_{i\max}$  — максимально возможная допустимая величина  $i$ -го параметра.

В этом случае условием успешной валидации математической модели гидроакустической обстановки является одновременное выполнение нижеприведенных неравенств

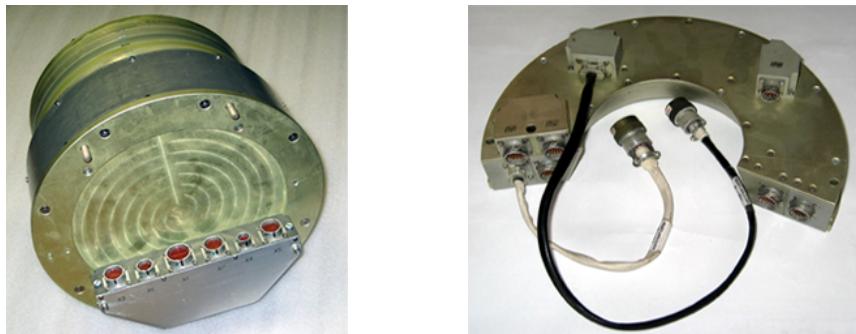
$$\int_{-\delta_{D0}}^{\delta_{D0}} f_D(\delta_D) d\delta_D \geq P_D; \quad \int_{-\delta_{v0}}^{\delta_{v0}} f_v(\delta_v) d\delta_v \geq P_v; \quad (11)$$

$$\int_{-\delta_{\alpha0}}^{\delta_{\alpha0}} f_\alpha(\delta_\alpha) d\delta_\alpha \geq P_\alpha; \quad \int_{-\delta_{\gamma0}}^{\delta_{\gamma0}} f_\gamma(\delta_\gamma) d\delta_\gamma \geq P_\gamma, \quad (12)$$

где  $P_D$ ,  $P_\alpha$ ,  $P_\gamma$ ,  $P_v$  — заданные пороговые вероятности определения дальности, азимута, угла места и скорости объекта локации соответственно.

Объектом контроля при валидации разработанной методики являлась бортовая система управления автономного гидролокационного комплекса, внешний вид которой представлен

на рис. 11. Система разработана и изготовлена коллективом НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках выполнения одной из опытно-конструкторских работ.



**Рис. 11.** Внешний вид блоков бортовой системы управления гидролокационного комплекса

Для определения достоверности разработанной методики автономного контроля работоспособности вычислительных систем гидролокационных комплексов проводилась корректировка штатного бортового программного обеспечения с целью искусственной реализации возникновения сбоев в работе объекта. В частности, выполнялась имитация таких неисправностей как сбой межпроцессорного обмена данными по интерфейсу MCBSP между вычислителями одного уровня иерархии; сбой межпроцессорного обмена данными по интерфейсу HPI между вычислителями смежных уровней иерархии в пределах одного модуля; сбой межпроцессорного обмена данными по интерфейсу HPI между вычислителями смежных модулей; ошибка вычислений адаптивного порога обнаружения цели при зондировании; ошибка вычислений параметров объекта локации и другие.

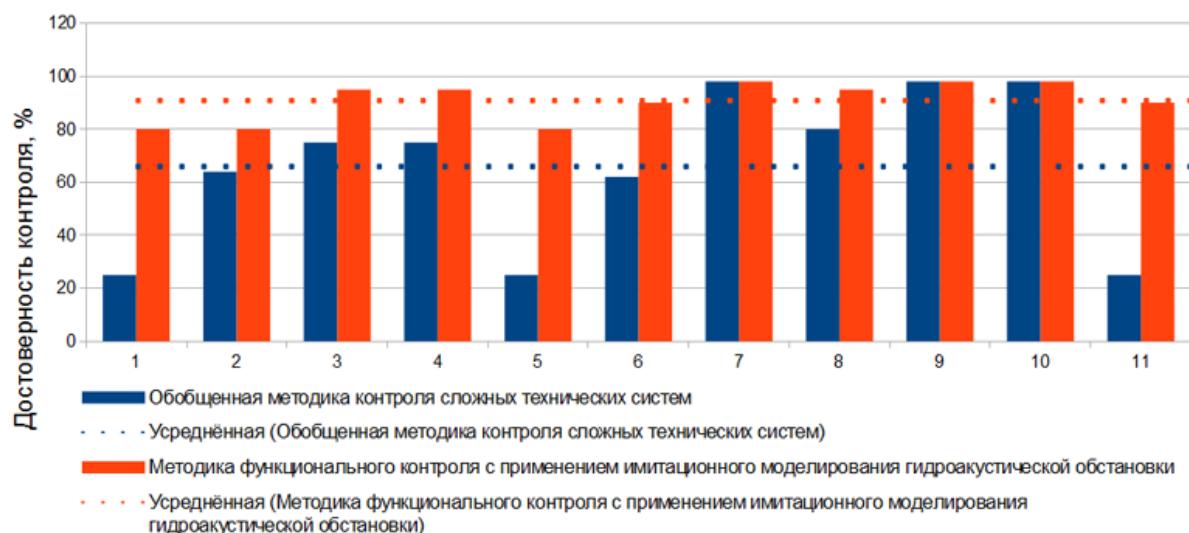
На практике причиной перечисленных неисправностей может являться некорректная работа программного обеспечения, проявляющаяся в случайные моменты времени и связанная с совместной работой различных модулей вычислительной системы, кратковременным сбоем питания, дефектом микросхемы или монтажа печатной платы, а также электромагнитной несовместимостью компонентов системы.

Результаты проведенной проверки по обнаружению неисправностей с использованием разработанной методики, основанной на имитационном моделировании гидроакустической обстановки, подтвердили возможность выявления всех видов вышеперечисленных сбоев, в то время как обобщенная методика контроля сложных технических систем, основанная на тестовых воздействиях и допусковом подходе анализа параметров позволяет выявлять с высокой достоверностью ошибки, приводящие к устойчивому изменению выходных сигналов системы и возникающие, как правило, в случае постоянного отказа линии связи или электрорадиоэлемента.

Сравнительный анализ результатов автономного контроля бортовой системы управления приведен на рис. 12.

Разработанная методика контроля использована при проектировании технологической контрольно-роверочной аппаратуры гидролокационных комплексов и их бортовых систем

## Сравнительный анализ результатов контроля бортовой системы управления



Условный номер неисправности	Тип неисправности	Достоверность контроля, %	
		Обобщенная методика контроля сложных технических систем	Методика функционального контроля с применением имитационного моделирования гидроакустической обстановки
1	Неисправность межпроцессорного взаимодействия в пределах одного модуля	25	80
2	Неисправность межмодульного взаимодействия	64	80
3	Неисправность взаимодействия с внешним ОЗУ	75	95
4	Неисправность взаимодействия с внешним ППЗУ	75	95
5	Программные ошибки вычислительных функций	25	80
6	Программные ошибки управляющих функций	62	90
7	Неисправность формирования внешних сигналов	98	98
8	Неисправность приема потока входных данных	80	95
9	Неисправность приема стимулирующих воздействий	98	98
10	Неисправность регистрации гидроакустической информации	98	98
11	Неисправность регистрации управляющей информации	25	90

Рис. 12. Результаты автономного контроля бортовой системы управления

управления, что позволило повысить достоверность процесса автономного контроля бортовых вычислительных систем в среднем на 25 %, а в составе гидролокационных комплексов на 20 %. Указанные значения увеличения достоверности контроля получены при проведении 64 прогонов контроля функционирования системы управления, что соответствует 2 уровням каждого из 8 внешних факторов имитационной модели гидроакустических воздействий [20].

## Заключение

В работе выполнен анализ методов контроля технического состояния вычислительных систем, в результате которого были выявлены их ограничения в рассматриваемой области применения и предложены способы увеличения достоверности определения работоспособности.

Разработана методика автономного контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов, обеспечивающая увеличение достоверности определения технического состоя-

ния объекта по сравнению с обобщенной методикой проверки сложных технических систем за счет применения имитационного моделирования гидроакустических сигналов в процессе автономной функциональной отработки.

Экспериментальные исследования разработанной методики проведены с использованием автоматизированных средств контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов. Практическое применение разработанной методики подтвердило увеличение методической составляющей достоверности автономной проверки технического состояния вычислительных систем гидролокационных комплексов.

Наряду с применением в области контроля технического состояния вычислительных систем, элементы методики могут активно применяться при отладке бортового программного обеспечения гидролокационных комплексов и разработке перспективных алгоритмов обнаружения подводных объектов.

### **Список литературы**

1. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Основные термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 12 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
3. Блинов И.Н., Гаскаров Д.В., Мозгалевский А.В. Автоматический контроль систем управления. Л.: Энергия, 1968. 152 с.
4. Глухов В.В. Техническое диагностирование динамических систем. М.: Транспорт, 2000. 96 с.
5. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем: учеб. пособие для вузов. Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. 218 с.
6. Дятлов В.А., Кабанов А.Н., Милов Л.Т. Контроль динамических систем. Л.: Энергия, 1978. 88 с.
7. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. М.: Наука, 1979. 432 с.
8. Городецкий В.И., Дмитриев А.К., Марков В.М. и др. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / под ред. Р.М. Юсупова. Л.: Энергия, 1978. 192 с.
9. Зверев Г.Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации. М.: ЛЕНАНД, 2010. 96 с.
10. Сотников А.А., Якупов Ш.З., Романовский А.С. Применение имитационного моделирования для контроля вычислительных систем гидролокационных комплексов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 6. С. 351–364. DOI: [10.7463/0613.0570096](https://doi.org/10.7463/0613.0570096).
11. Андреев А.М., Можаров Г.П., Сюзев В.В. Многопроцессорные вычислительные системы: теоретический анализ, математические модели и применение: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 332 с.

12. Зыков А.А. Основы теории графов. М.: Вузовская книга, 2004. 664 с.
13. Etter P.C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation. New York: Spon Press Taylor and Francis, 2003. 424 p.
14. Иванов Ю.П., Никитин В.Г., Чернов В.Ю. Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов: учеб. пособие. Спб.: ГУАП, 2004. 98 с.
15. МИ 2233-2000. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения. М.: ВНИИМС, 2000.
16. Сотников А.А. Способ повышения эффективности вычислительных комплексов цифрового имитационного моделирования гидроакустической обстановки в реальном масштабе времени // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 2. С. 301–310. DOI: [10.7463/0213.0531784](https://doi.org/10.7463/0213.0531784).
17. ГОСТ Р МЭК 60297-3-101-2006. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Блокные каркасы и связанные с ними вставные блоки. М.: Стандартинформ, 2007. 18 с.
18. Иванова Г.С., Ничушкина Т.Н., Пугачев Е.К. Объектно-ориентированное программирование: учеб. для вузов / под ред. Г.С. Ивановой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 320 с.
19. Waite A.D. SONAR for Practising Engineers. West Sussex, John Wiley and Sons Ltd, 2002. 298 p.
20. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 280 с.

## **The Method of a Standalone Functional Verifying Operability of Sonar Control Systems**

Sotnikov A. A.<sup>1,\*</sup>, Yakupov Sh. Z.<sup>1</sup>

\* [alex\\_sotnikov@mail.ru](mailto:alex_sotnikov@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** computing systems, simulation modeling, hydroacoustic signals, sonar systems, validation of the functioning, the accuracy of the monitoring, evaluation of efficiency

---

This article describes a method of standalone verifying sonar control system, which is based on functional checking of control system operability.

The main features of realized method are a development of the valid mathematic model for simulation of sonar signals at the point of hydroacoustic antenna, a valid representation of the sonar control system modes as a discrete Markov model, providing functional object verification in real time mode.

Some ways are proposed to control computational complexity in case of insufficient computing resources of the simulation equipment, namely the way of model functionality reduction and the way of adequacy reduction.

Experiments were made using testing equipment, which was developed by department of Research Institute of Information Control System at Bauman Moscow State Technical University to verify technical validity of industrial sonar complexes.

On-board software was artificially changed to create malfunctions in functionality of sonar control systems during the verifying process in order to estimate verifying system performances.

The method efficiency was proved by the theory and experiment results in comparison with the basic methodology of verifying technical systems.

This method could be also used in debugging of on-board software of sonar complexes and in development of new promising algorithms of sonar signal processing.

### **References**

1. GOST 19919-74. Kontrol' avtomatizirovannyi tekhnicheskogo sostoianiiia izdelii aviatsionoi tekhniki. Osnovnye terminy i opredeleniiia [State Standard 19919-74. Test automated of technical condition of aviation technique articles. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publishing House, 1974. 12 p. (in Russian).

2. Birger I.A. *Tekhnicheskaiia diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. (in Russian).
3. Blinov I.N, Gaskarov D.V., Mozgalevskii A.V. *Avtomatusheskii kontrol' sistem upravleniya* [Automatic control systems]. Leningrad, Energiia Publ., 1968. 152 p. (in Russian).
4. Glukhov V.V. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie dinamicheskikh system* [Technical diagnostics of dynamic systems]. Moscow, Transport Publ., 2000. 96 p. (in Russian).
5. Gumeniuk V.M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh system* [Reliability and diagnostics of electrical systems]. Vladivostok, FEFU Publ., 2010. 218 p. (in Russian).
6. Diatlov V.A., Kabanov A.N., Milov L.T. *Kontrol' dinamicheskikh system* [Control of dynamic systems]. Leningrad, Energiia Publ., 1978. 88 p. (in Russian).
7. Evlanov L.G. *Kontrol' dinamicheskikh system* [Control of dynamic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 432 p. (in Russian).
8. Gorodetskii V.I., Dmitriev A.K., Markov V.M., et al. *Elementy teorii ispytanii i kontrolia tekhnicheskikh sistem* [Theory of testing and control of engineering systems]. Leningrad, Energija Publ., 1978. 192 p. (in Russian).
9. Zverev G.Ia. *Otsenka nadezhnosti izdeliia v protsesse ekspluatatsii* [Evaluation of reliability of the product during operation]. Moscow, LENAND Publ., 2010. 96 p. (in Russian).
10. Sotnikov A.A., Iakupov Sh.Z., Romanovskii A.S. Controlling computing systems of sonar complexes with the use of simulation modeling. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 6, pp. 351–364. DOI: [10.7463/0613.0570096](https://doi.org/10.7463/0613.0570096) (in Russian).
11. Andreev A.M., Mozharov G.P., Siuzev V.V. *Mnogoprotsessornye vychislitel'nye sistemy: teoreticheskii analiz, matematicheskie modeli i primenenie* [Multiprocessor computing systems: theoretical analysis, mathematical models and application]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 332 p. (in Russian).
12. Zykov A.A. *Osnovy teorii grafov* [Fundamentals of graph theory]. Moscow, Vuzovskaia kniga Publ., 2004. 664 p. (in Russian).
13. Etter P.C. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. New York, Spon Press Taylor and Francis, 2003. 424 p.
14. Ivanov Yu.P., Nikitin V.G., Chernov V.Iu. *Kontrol' i diagnostika izmeritel'no-vychislitel'nykh kompleksov* [Control and diagnostics of measuring and computing complexes]. St. Petersburg, GUAP Publ., 2004. 98 p. (in Russian).
15. MI 2233-2000. GSI. Obespechenie effektivnosti izmerenii pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Osnovnye polozheniya [Measurement procedure 2233-2000. State system for ensuring the uniformity of measurements. Ensuring the effectiveness of the measurement in the management of technological processes. Metrological examination of the technical documentation]. Moscow, VNIIMS Publ., 2000 (in Russian).

16. Sotnikov A.A. Method of improving efficiency of digital simulation systems for modeling a real time hydro-acoustic situation. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 2, pp. 301–310. DOI: [10.7463/0213.0531784](https://doi.org/10.7463/0213.0531784) (in Russian).
17. GOST R MEK 60297-3-101-2006. Konstruktsii nesushchie bazovye radioelektronnykh sredstv. Blochnye karkasy i sviazannye s nimi vstavnye bloki [State Standard of RF 60297-3-101-2006. Mechanical structures for radio-electronic equipment. Subracks and associated plug-in units. Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 18 p. (in Russian).
18. Ivanova G.S., Nichushkina T.N., Pugachev E.K. *Ob'ektno-orientirovannoe programmirovaniye* [Object-oriented programming]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 320 p. (in Russian).
19. Waite A.D. SONAR for Practising Engineers. West Sussex, John Wiley and Sons Ltd, 2002. 298 p.
20. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Imitatcionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 280 p. (in Russian). M.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 280 c.