

---

---

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ**

---

---

УДК 629.05

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗОВ  
ДУБЛИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ**

© 2019 г. М. Ф. Волобуев

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
“Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, Воронеж, Россия*

*e-mail: volmf81@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2018 г.

После доработки 25.02.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

Эвристическим путем синтезирована структура алгоритма обнаружения отказов дублированных датчиков следящей системы. Методом математического моделирования и перебора по критерию максимума вероятности сохранения работоспособного состояния поведен параметрический синтез алгоритма для системы управления скоростью полета с дублированием датчиков. Разработанный алгоритм обладает универсальностью к типу отказов, которая позволяет обнаруживать все отказы, приводящие к искажению выходных сигналов датчиков.

DOI: 10.1134/S0002338819040152

**Введение.** В настоящее время наблюдается бурный рост объема решаемых с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА) задач. При этом большинство используемых в коммерческих целях БЛА имеет взлетную массу не более 500 кг. Для обеспечения надежности таких БЛА применяют дублирование датчиков следящих систем (резервирование с одним резервным каналом), составляющих основу бортовой системы управления БЛА [1–3]. Примером следящей системы может служить система автоматического управления скоростью полета БЛА, в которой требуемая скорость движения передается с наземного пункта дистанционного управления и заранее неизвестна, а результаты управления оцениваются бортовыми датчиками. Дублирование обладает преимуществами по массогабаритным показателям перед другими видами резервирования, в то же время для обнаружения отказавшего канала необходима дополнительная информация о виде, типе отказа или возможных диапазонах значений выходных сигналов (параметров) каналов в исправном и отказавшем состояниях.

Известны алгоритмы обнаружения отказов в дублированных системах, основанные на контроле выходных сигналов с помощью моделей систем или устройств, контроле по пороговой величине, контроле с использованием тестовых сигналов и нечеткой логики [4–7]. В этих работах алгоритмы обнаружения отказов разработаны для случая, когда на систему действуют отказы одного типа – либо внезапные, такие, как “обрыв цепи” или “короткое замыкание”, либо постепенные. Также не оценены возможности алгоритмов [4–7] по обнаружению такого типа внезапного отказа, как “заклинивание”, которое для ряда систем БЛА может составлять от 10 до 15% от общего числа отказов.

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим следящую систему с дублированием датчиков в условиях воздействия на нее шумов и отказов. Отказы воздействуют только на датчики, при этом одновременный отказ двух датчиков – невозможное событие. До наступления отказов датчики идентичны. В качестве возникающих в системе отказов рассмотрим внезапные отказы типа “короткое замыкание”, “обрыв цепи”, “заклинивание” и постепенные отказы. Устройства обнаружения отказов, реализующие алгоритмы обнаружения, абсолютно надежны. Воздействующий на следящую систему шум и шумы датчиков дельта-коррелированные.

Такая следящая система описывается следующим векторно-матричным дифференциальным уравнением:

$$\dot{X} = A^l X + BU^l, \quad (1.1)$$

где  $X$  – вектор состояния (фазовых координат) системы размерности  $m$ ;  $U^l$  – вектор входных воздействий размерности  $p \leq m$ , представляющий собой сумму входных сигналов следящей системы  $U_{\text{вх}}$  и приведенных к ее входу шумов следящей системы  $\xi_{\text{сс}}$  и шумов датчиков  $\xi_{\text{д1}}, \xi_{\text{д2}}$ ;  $A^l, B$  – стационарные матрицы состояния и входных воздействий системы соответствующей размерности ( $m \times m, m \times p$ );  $l = \overline{1, S}$  – номер состояния системы с учетом решения о наличии в ней отказа.

Полагаем, что в устройствах обнаружения отказов уровень шумов много меньше, чем в датчиках, а инерционность практически отсутствует, тогда вектор измерения (наблюдения) системы  $Z$  размерности  $k \leq m$ , используемый для оценки состояния системы, представим в виде

$$Z = CX, \quad (1.2)$$

где  $C$  – стационарная матрица наблюдения системы размерности  $k \times m$ .

Процесс обнаружения отказов в рассматриваемой системе (1.1) по наблюдениям (1.2) носит случайный характер. При этом принимаемые решения о состоянии датчиков системы (1.1) характеризуются следующими вероятностями:

при отсутствии отказа – вероятностями правильного решения об исправности первого ( $P_{\text{ПРИ1}}$ ) и второго ( $P_{\text{ПРИ2}}$ ) датчиков и ложного решения об отказе первого ( $P_{\text{ЛРО1}}$ ) или второго ( $P_{\text{ЛРО2}}$ ) датчиков;

в случае наличия отказа – вероятностями правильного решения об отказе первого ( $P_{\text{ПРО1}}$ ) или второго ( $P_{\text{ПРО2}}$ ) датчиков, ложного решения об исправности первого ( $P_{\text{ЛРИ1}}$ ) и второго ( $P_{\text{ЛРИ2}}$ ) датчиков, ложного решения об отказе первого датчика ( $P_{\text{ЛРО1}}$ ) при отказе второго или второго датчика ( $P_{\text{ЛРО2}}$ ) при отказе первого.

Случай принятия решения об отказе двух датчиков одновременно не рассматриваем, сохраняя состояние системы неизменным (оба датчика остаются подключенными к системе).

В зависимости от наличия или отсутствия в системе отказа возможен только один из трех исходов: оба датчика исправны; отказал первый датчик, второй датчик исправен; отказал второй датчик, первый датчик исправен. Принимая во внимание эти исходы и решение о наличии или отсутствии отказа, введем следующие состояния системы:

$l = 1$  – отказа в системе нет, принято правильное решение о его отсутствии;

$l = 2$  – отказал один из датчиков, принято правильное решение о его отказе;

$l = 3$  – отказа в системе нет, принято ложное решение об отказе одного из датчиков;

$l = 4$  – отказал один из датчиков, принято ложное решение о его исправности;

$l = 5$  – отказал один из датчиков, принято ложное решение о его исправности и ложное решение об отказе исправного датчика.

В случае состояний  $l = 1$  или  $l = 2$  система сохраняет свою работоспособность, при этом принятое решение не снижает ее надежности. Вероятность этого события равна:

$$P_1 = P_{\text{ПРИ1}}P_{\text{ПРИ2}} + P_{\text{ПРО1}}P_{\text{ПРИ2}} + P_{\text{ПРИ1}}P_{\text{ПРО2}}. \quad (1.3)$$

В случае состояния  $l = 3$  система также сохраняет свою работоспособность, но в результате принятого ложного решения становится нерезервированной. Вероятность этого события равна:

$$P_2 = P_{\text{ЛРО1}}P_{\text{ПРИ2}} + P_{\text{ПРИ1}}P_{\text{ЛРО2}}. \quad (1.4)$$

В случае состояния  $l = 4$  система становится неработоспособной в результате принятия ложного решения об исправности отказавшего датчика. Вероятность этого события равна:

$$P_3 = P_{\text{ЛРИ1}}P_{\text{ПРИ2}} + P_{\text{ПРИ1}}P_{\text{ЛРИ2}}. \quad (1.5)$$

В случае состояния  $l = 5$  система становится неработоспособной в результате принятия ложного решения об исправности отказавшего датчика и ложного решения об отказе исправного датчика. Вероятность такого события равна:

$$P_4 = P_{\text{ЛРИ1}}P_{\text{ЛРО2}} + P_{\text{ЛРО1}}P_{\text{ЛРИ2}}. \quad (1.6)$$

Необходимо разработать алгоритм, максимизирующий вероятность сохранения работоспособного состояния системы  $P_1$  при вероятностях  $P_{\text{ЛРИ}i}, P_{\text{ЛРО}i}, i = \overline{1, 2}$ , не превышающих допустимые значения. Структура алгоритма может быть синтезирована эвристическим путем на основе анализа проведенных ранее исследований [4–7] и закономерностей изменения выходных

сигналов датчиков при наступлении отказа. Параметры  $\Pi$  разрабатываемого алгоритма должны принимать значения  $\Pi_{opt}$ , определяемые как результат решения оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} \Pi_{opt} &= \arg \max_{\Pi \in \mathbb{R}^{dim\Pi}} (P_1(\Pi)), \\ P_{ЛРИi}(\Pi) &\leq P_{ЛРИ}^*, \\ P_{ЛРОi}(\Pi) &\leq P_{ЛРО}^* \quad i = \overline{1, 2}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $\mathbb{R}$  – множество действительных чисел,  $P_{ЛРИ}^*$ ,  $P_{ЛРО}^*$  – допустимые вероятности ложных решений об исправности и отказе датчика соответственно. Наименование оптимизируемых параметров  $\Pi$  и их количество будет представлено в разд. 2.

**2. Алгоритм обнаружения отказов.** В соответствии с постановкой задачи разрабатываемый универсальный алгоритм обнаружения отказов должен обеспечивать максимум вероятности сохранения работоспособного состояния системы. В [5] был разработан алгоритм обнаружения внезапных отказов типа “обрыв цепи” и “короткое замыкание” в дублированной системе, основанный на обнаружении скачкообразного изменения выходного сигнала в одном из каналов (датчиков). В [4] был предложен двухэтапный алгоритм обнаружения постепенных отказов в дублированной системе, где на первом этапе обнаруживался факт отказа, а на втором этапе осуществлялась локализация отказавшего канала с использованием нечеткой логики. Разработанный в [4] алгоритм позволяет с высокой вероятностью обнаруживать постепенные отказы одного из каналов (датчиков) при условии, что скорость нарастания контролируемого выходного сигнала за счет отказа выше, чем скорость его стабилизации следящей системой. В противном случае обнаружить постепенный отказ, измеряя только выходные сигналы исправного и неисправного каналов (датчиков), невозможно, так как они изменяются в противоположные стороны. Однако в случае, когда в системе в качестве выходного сигнала используют среднеарифметическое значение сигналов от двух датчиков, а система обладает инерционностью, наблюдается следующая закономерность. Среднеарифметическое значение выходных сигналов, просуммированное на нескольких шагах наблюдения при величине каждого шага, меньшем времени отработки возмущающего воздействия следящей системой, изменяется в одну сторону с выходным сигналом отказавшего датчика и в противоположную сторону с выходным сигналом исправного датчика. Для обнаружения внезапного отказа типа “заклинивание” недостаточно контролировать выходные сигналы двух датчиков и их среднеарифметическое значение, необходимо контролировать и входной сигнал системы.

Представим разрабатываемый алгоритм в виде двухэтапной процедуры обнаружения отказов по аналогии с разработанным в [4] алгоритмом. При этом число оцениваемых величин возрастает, так как для обнаружения всех рассматриваемых типов отказов необходимо оценивать: текущие значения выходных сигналов первого и второго датчиков; текущее среднеарифметическое значение выходных сигналов двух датчиков; модуль разности выходных сигналов первого и второго датчиков; запомненные значения выходных сигналов первого и второго датчиков и их среднеарифметического значения до момента обнаружения факта отказа; входной сигнал системы  $U_{вх}$ .

Кроме того, последовательность обнаружения отказов должна учитывать специфику их воздействия на следящую систему.

Тогда алгоритм обнаружения отказов в следящей системе будет содержать следующие последовательные шаги.

**Шаг 1.** Обнаружение факта отказа в системе в соответствии с критерием:

$$\begin{aligned} |\pi_1(t) - \pi_2(t)| > \Delta\pi_1 & - \text{принятие решения о наличии отказа,} \\ |\pi_1(t) - \pi_2(t)| \leq \Delta\pi_1 & - \text{принятие решения об отсутствии отказа,} \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $\pi_1$ ,  $\pi_2$  – выходные сигналы первого и второго датчиков,  $\Delta\pi_1$  – пороговое значение модуля разности выходных сигналов датчиков при обнаружении факта отказа.

Шаг 2. После обнаружения факта отказа (2.1) производится обнаружение внезапных отказов типа “короткое замыкание” и “обрыв цепи”, решение о наличии отказа в первом (втором) датчике принимается при выполнении соответствующих условий:

$$\begin{aligned} |\pi_1(t) - \pi_1(t - \Delta t)| > \Delta\pi_2 \quad \vee \quad |\pi_1(t) - \pi_1(t - \Delta t)| \leq \Delta\pi_2, \\ |\pi_2(t) - \pi_2(t - \Delta t)| \leq \Delta\pi_2 \quad \vee \quad |\pi_2(t) - \pi_2(t - \Delta t)| > \Delta\pi_2, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $\pi_1(t - \Delta t)$ ,  $\pi_2(t - \Delta t)$  – запомненные значения выходных сигналов датчиков на предыдущем шаге до момента обнаружения факта отказа,  $\Delta\pi_2$  – пороговое значение модуля приращения выходного сигнала при обнаружении внезапного отказа.

Шаг 3. В случае если обнаружен факт наступления отказа (2.1) и принято решение об отсутствии внезапных отказов типа “короткое замыкание” и “обрыв цепи”, когда условие (2.2) не выполнено, то обнаруживаются постепенные отказы либо внезапные отказы типа “заклинивание”. Для этого на первом этапе по результатам оценки входного сигнала системы  $U_{вх}$  необходимо определить требуемое изменение выходных сигналов датчиков (сигналы не должны изменяться, сигналы должны увеличиваться либо уменьшаться); если сигналы не должны изменяться, то обнаруживается постепенный отказ по результатам сравнения направления изменения контролируемых сигналов в соответствии с критерием, который для первого датчика имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} (\pi_1(t) - \pi_1(t - n_1\Delta t)) < -\Delta\pi_3 \quad \vee \quad (\pi_1(t) - \pi_1(t - n_1\Delta t)) > \Delta\pi_3, \\ (\pi_2(t) - \pi_2(t - n_1\Delta t)) > \Delta\pi_3 \quad \vee \quad (\pi_2(t) - \pi_2(t - n_1\Delta t)) < -\Delta\pi_3, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\sum_{r=0}^n \left( \frac{\pi_1(t - r\Delta t) + \pi_2(t - r\Delta t)}{2} \right) < -\Delta\pi_4 \quad \vee \quad \sum_{r=0}^n \left( \frac{\pi_1(t - r\Delta t) + \pi_2(t - r\Delta t)}{2} \right) > \Delta\pi_4,$$

где  $n_1\Delta t$  – время наблюдения при обнаружении постепенных отказов,  $n_1$  – количество шагов наблюдения для обнаружения постепенных отказов, необходимых для обнаружения отказа;  $r$  – номер шага;  $\Delta\pi_3$  – пороговое значение выходного сигнала, обусловленное возможным отклонением сигнала от его запомненного значения при воздействии шумов и отсутствии отказов;  $\Delta\pi_4$  – пороговое значение выходного сигнала, обусловленное возможным изменением суммы среднеарифметического сигнала датчиков за время наблюдения в условиях воздействия шумов и отсутствия отказов. Критерий для второго датчика получается путем замены индексов выходных сигналов с единицы на двойку и наоборот.

Шаг 4. В случае если выходные сигналы должны изменяться, то решение о наличии внезапного отказа типа “заклинивание” принимается в соответствии с критерием:

$$\begin{aligned} |\pi_1(t - n_2\Delta t) - \pi_1(t)| < \Delta\pi_5 \quad \vee \quad |\pi_1(t - n_2\Delta t) - \pi_1(t)| \geq \Delta\pi_5, \\ |\pi_2(t - n_2\Delta t) - \pi_2(t)| \geq \Delta\pi_5 \quad \vee \quad |\pi_2(t - n_2\Delta t) - \pi_2(t)| < \Delta\pi_5, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $\Delta\pi_5$  – пороговое значение выходного сигнала датчика при обнаружении внезапного отказа типа “заклинивание”,  $n_2$  – количество шагов наблюдения для обнаружения отказа типа “заклинивание”.

Шаг 5. В случае если выходные сигналы датчиков должны изменяться, обнаружен факт отказа (2.1) в системе и принято решение об отсутствии внезапных отказов типа “короткое замыкание” и “обрыв цепи”, выражение (2.2), а также не обнаружен отказ типа “заклинивание” (2.4) за требуемое количество шагов наблюдения  $f \geq n_2$ , тогда определяем наиболее опасное отклонение (+ или –) выходного сигнала датчика от его работоспособного состояния (например, при снижении наиболее опасна ошибка, которая приводит к завышению истинной высоты +) и отключаем датчик с минимальным либо максимальным значением выходного сигнала (например, датчик, показывающий максимальную высоту). После того как входной сигнал системы перестает изменяться, подключаем оба датчика, при этом управление системой производим по среднеарифметическому сигналу, а обнаружение отказов – по последовательности, используемой для обнаружения постепенных отказов.

Соответственно для обнаружения рассмотренных выше типов отказов алгоритм должен содержать пять не зависящих от времени параметров:  $\Pi = (\Delta\pi_1, \dots, \Delta\pi_5)$ , где  $\Delta\pi_1, \dots, \Delta\pi_5$  – пороговые значения выходных сигналов датчиков при обнаружении различных типов отказов. Выбор значений параметров для конкретной системы выполняется путем решения задачи оптими-

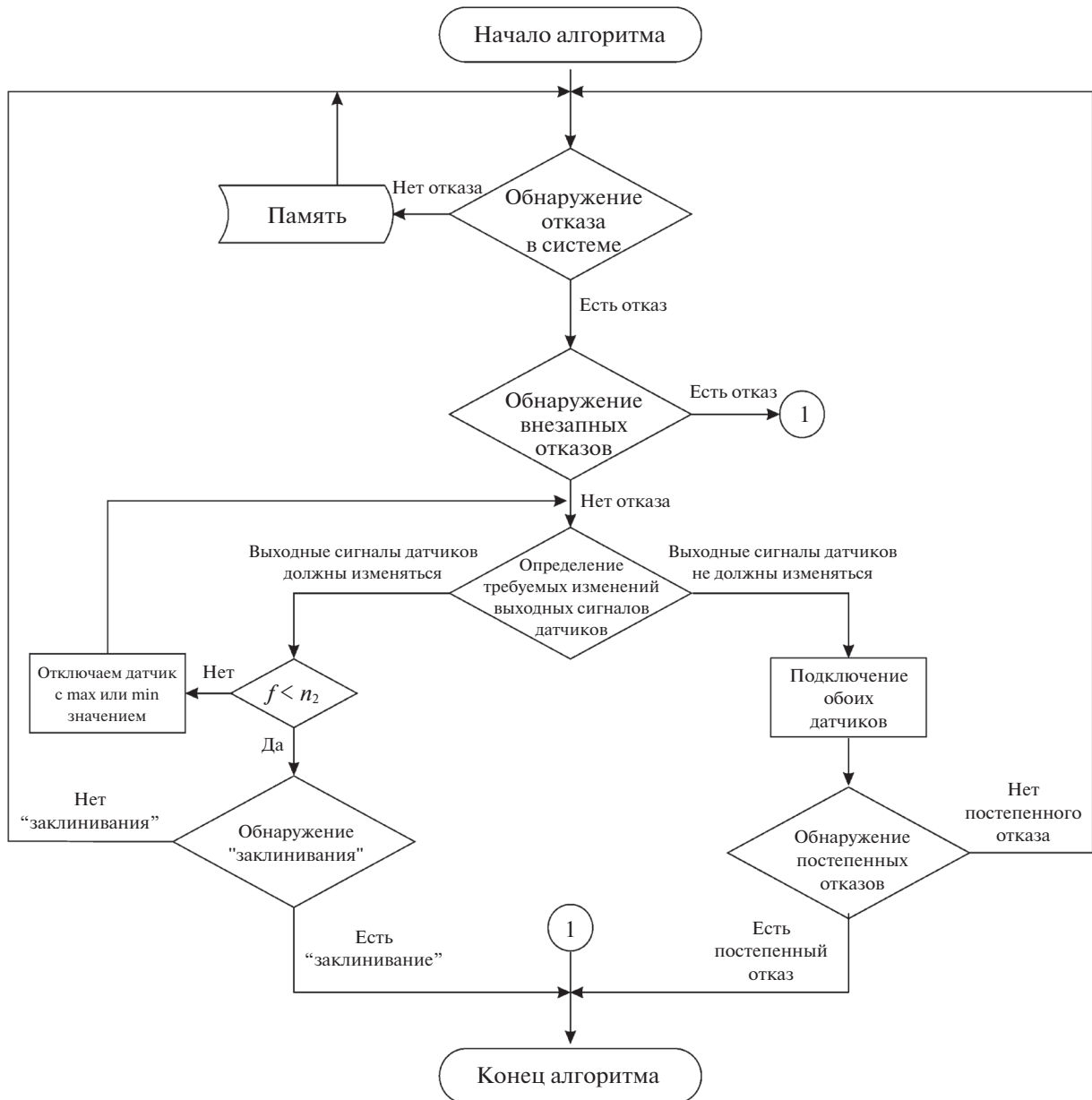


Рис. 1. Структурная схема универсального алгоритма обнаружения отказов

зации (1.7). При этом количество шагов наблюдения  $n_1$  и  $n_2$  необходимо определять из условия, что за время наблюдения  $n_1\Delta t$ ,  $n_2\Delta t$  воздействие постепенных отказов и отказов типа “заклинивания” не приведет к катастрофическим последствиям.

Структурная схема универсального алгоритма обнаружения отказов дублированных датчиков следящей системе представлена на рис. 1.

**3. Пример.** Проведем сравнительную оценку эффективности обнаружения отказов с использованием разработанного алгоритма и алгоритма обнаружения отказов на основе диагностической модели [6] применительно к контуру стабилизации скорости полета БЛА с дублированием датчиков [7–9].

Принцип обнаружения отказов с использованием диагностической модели применительно к рассматриваемой системе заключается в следующем. На вход диагностической модели контура стабилизации скорости подается ее требуемое значение, при этом на выходе формируется теку-

щее значение скорости  $V_M(t)$ , которое сравнивается со значениями  $V_1(t), V_2(t)$  с выходов датчиков. Решение о наличии отказа в первом (втором) датчике принимается при выполнении соответствующих условий:

$$\begin{aligned} |V_1(t) - V_M(t)| &> \Delta\pi_M, \\ |V_2(t) - V_M(t)| &> \Delta\pi_M, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $\Delta\pi_M$  – пороговое значение разности модельного и измеренного датчиком значений скорости.

Будем считать, что параметры модели подобраны идеальным образом, тогда математическая модель типового контура стабилизации скорости без воздействия шумов и отказов полностью соответствует диагностической модели, а порог  $\Delta\pi_M$  равен  $3\sigma_B + 3\sigma_D$ , где  $\sigma_B$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) скорости, обусловленное турбулентностью атмосферы,  $\sigma_D$  – СКО ошибка измерения скорости датчиками. Типовые значения СКО рассматриваемых шумов приведены в [8, 10].

Типовой контур стабилизации скорости БЛА приведен в работе [9]. Путем преобразования структурной схемы контура и с учетом ввода в цепь обратной связи дублированного измерителя скорости получим его представление в виде дифференциального уравнения четвертого порядка, которое в операторной форме имеет вид

$$V_{\text{изм}}(t) = W^1(p)U^1(t), \quad (3.2)$$

где  $V_{\text{изм}}(t)$  – значение скорости с выхода дублированного измерителя;  $W^1(p) = G_1^1(p)/H_4^1(p)$  – операторный коэффициент передачи;  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $U^1(t)$  – эквивалентное входное воздействие, представляющее собой сумму требуемого значения скорости  $V_T$  с шумовой составляющей скорости, обусловленной атмосферной турбулентностью  $\xi_B(t)$  и с приведенными ко входу ошибками измерения скорости каналами дублированного измерителя  $\xi_{\text{изм1}}(t)$ ,  $\xi_{\text{изм2}}(t)$ , тогда эквивалентное входное воздействие имеет вид:

$$U^1(t) = V_T + \xi_B(t) + \frac{\xi_{\text{изм1}} + \xi_{\text{изм2}}}{2}. \quad (3.3)$$

Полиномы первой  $G_1^1(p)$  и четвертой  $H_4^1(p)$  степени оператора  $p$  определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} G_1^1(p) &= g_1 p + g_0, \\ H_4^1(p) &= h_4 p^4 + h_3 p^3 + h_2 p^2 + h_1 p + h_0, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $g_i, i = \overline{0,1}$ ,  $h_j, j = \overline{0,4}$ , – коэффициенты, значения которых определяются передаточными числами и постоянными времени динамических звеньев контура стабилизации скорости; при расчетах приняты следующие значения коэффициентов:  $h_0 = 12.68$ ,  $h_1 = 28.1$ ,  $h_2 = 14.2$ ,  $h_3 = 3.7$ ,  $h_4 = 1$ ,  $g_0 = 3.6$ ,  $g_1 = 0.6$ .

Уравнение (3.2) соответствует случаю, когда каналы дублированного измерителя скорости исправны и принято правильное решение об их исправности ( $l = 1$  в системе (1.1)). Воспользовавшись методикой, изложенной в [11], преобразуем дифференциальное уравнение четвертого порядка (3.2) в систему четырех дифференциальных уравнений первого порядка вида (1.1) относительно переменных состояния  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$  со следующими значениями матриц  $A^1$ ,  $B$ :

$$A^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -h_0 & -h_1 & -h_2 & -h_3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Выходной величиной контура стабилизации является измеренная дублированными датчиками скорость  $V_{\text{изм}}(t)$ , которая выражается через переменные состояния соотношением:

$$V_{\text{изм}}(t) = g_1 x_2 + g_0 x_1. \quad (3.6)$$

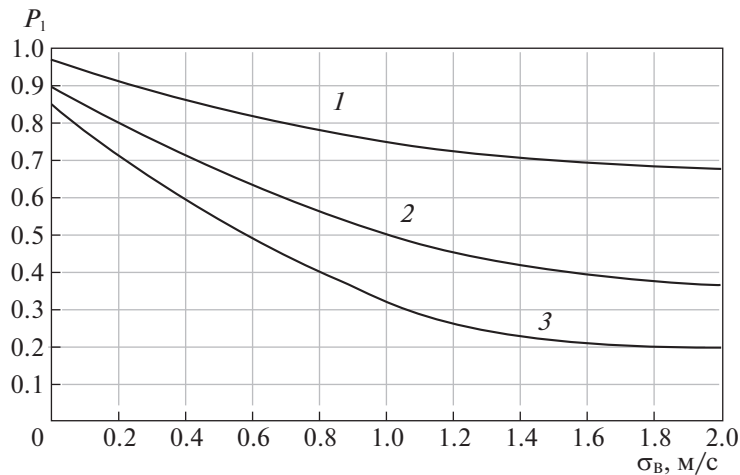


Рис. 2. Зависимости вероятности сохранения работоспособного состояния системы от СКО скорости ветра  $\sigma_B$

В случае, когда состояние системы принимает значения  $l = \overline{3,5}$ , изменяется вся четвертая строка матрицы  $A^l$ , а также изменяется вектор входных воздействий  $U^l$  в зависимости от типа отказа (постепенный или внезапный). Если  $l = 2$ , то изменяется только вектор входных воздействий  $U^l$  за счет изменения шумов датчиков.

Проведем математическое моделирование процесса функционирования контура управления скоростью полета БЛА в условиях воздействия на него шумов и отказов. Рассмотрим внезапные отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением измеренного значения скорости на выходе отказавшего датчика до максимально возможного в системе значения, равного 100 м/с (“короткое замыкание”), или до минимального, равного 0 м/с значения (“обрыв цепи”). Отказ типа “заклинивание” моделируется как внезапная фиксация измеренного значения скорости на выходе отказавшего датчика. Постепенный отказ моделируется в соответствии с характерным для практики случаем [12], когда приращение  $\Delta V(t)$  контролируемого параметра (измеренного значения скорости), обусловленное отказом, изменяется по линейному закону:

$$\Delta V(t) = V_0 + vt, \quad (3.7)$$

где  $v$  – детерминированная скорость изменения контролируемого параметра вследствие постепенного отказа;  $V_0$  – начальное значение ошибки вследствие постепенного отказа, в рассматриваемом случае  $V_0 = 0$ .

Для каждого типа отказа и фиксированных значений шумов проводилось  $10^3$  экспериментов.

Вероятность сохранения системы в работоспособном состоянии  $P_1$  в условиях наступления внезапных отказов типа “обрыв цепи”, “короткое замыкание” и “заклинивание” при обнаружении отказов с использованием как диагностической модели, так и разработанного алгоритма равна 1, а время обнаружения таких отказов при возможностях современных вычислительных систем в обоих случаях сопоставимо.

Диагностическая модель не обнаруживает постепенные отказы, а синтезированный алгоритм позволяет их обнаруживать и обеспечивает вероятность сохранения работоспособного состояния, зависимости которой от параметров шумов  $\sigma_B$ ,  $\sigma_d$  и величины ошибки  $\Delta V$ , обусловленной постепенным отказом, представлены на рис. 2.

Вероятность сохранения работоспособного состояния системы получена в предположении, что СКО скорости ветра  $\sigma_B$  изменяется 0 до 2 м/с, вероятность ложного решения об отказе датчика  $P_{\text{лрo}}^*$  и вероятность ложного решения об исправности датчика  $P_{\text{лрИ}}^*$  фиксированы и равны 0.01, отношение  $\Delta V/\sigma_d = 4$  (кривая 1),  $\Delta V/\sigma_d = 3$  (кривая 2);  $\Delta V/\sigma_d = 2$  (кривая 3); а параметры алгоритма  $\Pi = \Pi_{\text{прИ}}$ .

Как видно из приведенных результатов, алгоритм обнаружения отказов в следящих системах с дублированием датчиков позволяет обнаруживать все типы отказов, т.е. является универсальным по отношению к типу отказов.

**Заключение.** Проведенные исследования позволили разработать универсальный алгоритм обнаружения отказов. Однако на практике для его применения необходимо подстраивать параметры алгоритма  $\Pi = (\Delta\pi_1, \dots, \Delta\pi_5)$  в зависимости от возможных внешних шумов и шумов датчиков.

Следует отметить, что способность разработанного алгоритма определять тип отказа облегчает диагностику и ремонт, а также в ряде случаев позволяет избежать аварий. Например, при возникновении постепенного отказа, который ухудшает характеристики датчика, но не приводит к потере аппарата, этот датчик отключается. В дальнейшем при возникновении в оставшемся датчике внезапного отказа датчик с постепенным отказом может быть подключен, что позволит исключить фатальные последствия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оболенский Ю.Г.* Управление полетом маневренных самолетов. М.: Воениздат, 2007. 480 с.
2. *Колодежный Л.П., Чернодаров А.В.* Надежность и техническая диагностика. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2009. 280 с.
3. *Волобуев М.Ф.* Методы логического резервирования систем управления сложными техническими объектами: теория и практика // Монография. Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2017. 294 с.
4. *Волобуев М.Ф., Скогорев К.К., Шишкин В.Ю.* Обнаружение постепенных отказов в дублированной системе с использованием нечеткой логики // Радиотехника. 2017. № 11. С. 72–77.
5. *Брызгунов А.В., Волобуев М.Ф.* Способ обнаружения внезапных отказов в дублированных системах // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 5. С. 46–53.
6. *Чернодаров А.В.* Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов // Монография. М.: ООО "Научтехлитиздат", 2017. 300 с.
7. *Соколов И.В.* Математическая модель дублированной системы управления высотой полета беспилотного летательного аппарата с постепенными отказами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 11. С. 18–27.
8. *Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И.* Системы автоматического управления летательных аппаратов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. 482 с.
9. *Волобуев М.Ф., Замыслов М.А., Мальцев А.М., Михайленко С.Б.* Математическая модель конура стабилизации скорости полета летательного аппарата с адаптивным управлением пропорционально-дифференцирующим регулятором на основе нечеткой логики // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. № 12. С. 37–45.
10. *Бабич О.А., Доброленский Ю.П., Козлов М.С., Мономахов В.Г., Потапов М.Д.* Авиационные приборы и навигационные системы. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1981. 647 с.
11. *Фролов В.С.* Радиоинерциальные системы наведения. М.: Сов. радио, 1976. 184 с.
12. *Труханов В.М.* Расчет проектной надежности технических систем по постепенным отказам // Контроль. Диагностика. 2015. № 1. С. 70–72.