

## Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем

Г. С. Бритов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-0452-523X](https://orcid.org/0000-0002-0452-523X), [britovgs@gmail.com](mailto:britovgs@gmail.com)

Л. А. Мироновский<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-3584-7095](https://orcid.org/0000-0003-3584-7095)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** большинство исследований по терминальному диагностированию динамических систем посвящены методам расчета специальных, тестовых сигналов, обеспечивающих естественное движение системы, например, в заданных границах. Такое движение системы осуществляется с помощью рассчитанного терминального управления. Конечное состояние системы позволяет определить диагностический признак. Поэтому необходимо поставить и решить задачу оценки вероятности получения правильного результата диагностирования, определяющей его достоверность и чувствительность к ошибкам движения системы вследствие появления дефекта. **Цель:** разработка методов расчета достоверности и чувствительности диагностического признака терминального диагностирования динамических систем. **Методы:** использована теория чувствительности систем автоматического управления, позволившая построить формулы получения условий обнаружения дефектов, приводящих к ошибкам движения системы в заданных границах. **Результаты:** разработаны методы расчета коэффициентов чувствительности к ошибкам движения динамической системы при различных вариантах дефектов и требуемых исходных данных. Описан процесс оценки терминального диагностирования дискретных динамических систем, отличающийся от известных методов тестового диагностирования тем, что тестовое движение оказывается естественным движением системы в заданных границах. Компьютерное моделирование подтверждает, что полученные формулы оценки процесса диагностирования являются достоверными. Использование предложенных формул требует применения математического пакета MATLAB, так как расчеты основаны на программах-функциях и сценарии исследования достоверности и чувствительности терминального диагностирования. **Практическая значимость:** при принятии решения о наличии дефекта в проверяемом динамическом объекте оператор системы технического диагностирования получает инструмент для оценки достоверности и чувствительности диагностического признака.

**Ключевые слова** – модель движения системы, линейная дискретная система, границы движения, терминальное управление, ошибки движения системы, условия обнаружения дефектов.

**Для цитирования:** Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 29–37. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37  
**For citation:** Britov G. S., Mironovskiy L. A. Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 29–37 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37

### Введение

Достоверность рассматривается в системотехнике с различных точек зрения. Прежде всего, достоверность определяется надежностью передачи, обработки и хранения информации. Она зависит как от интенсивности помех, так и от интенсивности сбоев и отказов. Разрабатываются методы помехоустойчивого кодирования, используемые для передачи данных по каналам связи или хранения их на магнитных носителях [1–3]. Метод избыточных переменных позволяет обнаруживать ошибки при выполнении вычислений на универсальных и специализированных компьютерах [4, 5]. Этот метод используется при моделировании динамических систем [6, 7].

Современная проблема достоверности теперь связана с компьютерной безопасностью [8, 9]. Достоверность здесь рассматривается как временная или постоянная защита информации пользователей, получивших права доступа.

Указанные подходы открыли перспективы оптимизации соотношения таких важных параметров системы, как помехоустойчивость и надежность, а также распределения информационной избыточности при передаче и переработке информации.

Наконец, в технической диагностике достоверности уделяли внимание при локализации дефектов, в частности, с помощью годографов в пространстве диагностических признаков [10, 11]. При функциональном диагностировании динамических систем в качестве диагностических признаков выступают инварианты исследуемой системы. Дефекты приводят к изменению ее параметров. В пространстве инвариантов строятся годографы изменения каждого параметра системы. Исправной системе соответствует номинальная точка, относительно которой решается задача локализации дефекта. С достоверностью локализации дефектов связана возможность не отличить их друг от друга.

Тестовому диагностированию динамических систем, обеспечивающему контроль их технического состояния, посвящены, например, работы [12–15]. Оценка достоверности контроля технического состояния диагностируемой системы при планировании испытаний и анализе их результатов требует выбора показателя достоверности и разработки методик его расчета на основе моделей процесса испытаний. При этом используемый показатель должен быть ориентирован прежде всего на достоверное заключение об исправности системы.

К проблеме достоверности в технике примыкает проблема чувствительности систем к изменению их параметров. Теория чувствительности систем автоматического управления является средством анализа влияния возмущений на динамику системы. Она широко применялась в различных областях, использующих системы управления [16]. Активное обращение к теории чувствительности наблюдается в работах, связанных с моделированием и диагностированием сложных систем [17–19].

Целью статьи является анализ достоверности и чувствительности терминального диагностирования дискретных систем управления. В работах [20, 21] рассмотрены методы расчета терминального управления, которое обеспечивает тестовое движение проверяемой системы в пространстве состояний. Диагностическим признаком является попадание системы в заданную конечную точку движения. Поскольку оно осуществляется при наличии помех, то необходимо исследовать достоверность проверки попадания диагностического признака в поле допуска. Возникают задачи повышения достоверности и чувствительности условий проверки.

### Модель ошибок движения динамической системы в пространстве состояний

Рассмотрим управление линейными дискретными системами, которое целесообразно использовать при организации терминального диагностирования. Рассчитанное управление предполагает движение динамической системы в заданных границах при отсутствии или наличии дефекта. Если дефекта нет, то движение закончится в требуемой точке пространства состояний. В противном случае движение системы будет происходить с ошибками и не закончится в требуемой точке пространства состояний.

Поэтому необходимо определить математическую модель системы, которая должна быть положена в основу анализа принятия решения о результатах диагностирования. Для линейной дискретной системы используем модель движения

в пространстве состояний согласно следующим рекуррентным уравнениям:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t); \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}_k, \\ \mathbf{x}(t) \in R^n, \mathbf{u}(t) \in R^m, \mathbf{w}(t) \in R^n.$$

Обычно вектор  $\mathbf{x}(t)$  недоступен, и осуществляется измерение выходных сигналов системы. Тогда при терминальном диагностировании необходим наблюдатель состояний, который позволяет выполнить оценку вектора состояний и сформировать диагностический признак [22].

Начальный вектор состояний  $\mathbf{x}_0$  может быть установлен при тестировании системы. Конечный вектор состояний  $\mathbf{x}_k$  при числе шагов тестирования  $k$  обеспечивается расчетом терминального управления  $\mathbf{u}(t)$  и обычно принимается равным нулю для того, чтобы упростить получение диагностического признака. Вектор возмущений  $\mathbf{w}(t)$  не будет приводить к серьезному нарушению движения системы, если дефекта нет, и будет сильно нарушать ее движение при появлении дефекта.

Получим уравнения изменения вектора ошибок движения системы  $\mathbf{e}(t)$  в пространстве состояний. Они будут иметь вид

$$\mathbf{e}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}(t) + \mathbf{w}(t), \mathbf{e}(0) = \mathbf{0}.$$

Положим, при отсутствии дефекта вектор возмущений представляет собой белый шум. Тогда уравнения для его математического ожидания и ковариационной матрицы будут следующими:

$$\bar{\mathbf{w}}(t) = \mathbf{0}; \mathbf{K}_w(t) = \sigma^2 \mathbf{E}.$$

Соответственно, при отсутствии дефекта вектор ошибок движения системы будет определяться уравнениями для его математического ожидания и ковариационной матрицы вида

$$\bar{\mathbf{e}}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \bar{\mathbf{e}}(t) + \bar{\mathbf{w}}(t); \mathbf{e}(0) = \mathbf{0}; \\ \mathbf{K}_e(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{K}(t) \cdot \mathbf{A}^T + \sigma^2 \mathbf{E}, \mathbf{K}(0) = \mathbf{0}.$$

Отсюда следует, что математическое ожидание и ковариационная матрица вектора ошибок движения системы будут иметь вид

$$\bar{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{0}; \\ \mathbf{K}_e(t) = \sigma^2 \sum_{i=0}^{t-1} \mathbf{A}^i (\mathbf{A}^T)^i.$$

Диагностическим признаком терминального диагностирования является вектор разности заданного и полученного состояний системы в конечный момент времени. Поэтому, приняв  $\mathbf{x}_k = \mathbf{0}$ ,

получим следующие вероятностные характеристики диагностического признака:

$$\bar{\Delta}(k) = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{K}_{\Delta}(k) = \sigma^2 \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{A}^i (\mathbf{A}^T)^i = \sigma^2 \mathbf{A}_{\Sigma}.$$

Здесь матрица  $\mathbf{A}_{\Sigma}$  представляет собой сумму произведений матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{A}^T$ .

Известно, что рассеивание случайной величины можно определить с помощью числовых характеристик ковариационной матрицы:

- определителя  $|\mathbf{K}_{\Delta}(k)|$ ;
- следа  $Sp(\mathbf{K}_{\Delta}(k))$ ;
- спектрального радиуса  $R(\mathbf{K}_{\Delta}(k))$ ;
- нормы  $\|\mathbf{K}_{\Delta}(k)\|$ .

Норма ковариационной матрицы может быть

- октаэдрической  $\|a\| = \sum_{i=1}^n |a_i|$ ;

- евклидовой  $\|a\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2}$ ;

- кубической  $\|a\| = \max_{1 \leq i \leq n} |a_i|$ .

Построенная модель ошибок движения динамической системы в пространстве состояний используется для анализа достоверности обнаружения дефекта при терминальном диагностировании динамических систем.

### Условия обнаружения дефекта при терминальном диагностировании

Диагностический признак должен быть равным нулю при отсутствии возмущений при движении системы в пространстве состояний. При наличии возмущений математическое ожидание диагностического признака будет равно нулю. Но рассеивание возмущений требует расчета допуска для диагностического признака.

Четыре варианта расчета допуска с использованием матрицы  $\mathbf{A}_{\Sigma}$ , определяющей ковариационную матрицу диагностического признака, следующие:

$$\Delta_{\partial 1} = \sigma \sqrt{|\mathbf{A}_{\Sigma}|};$$

$$\Delta_{\partial 2} = \sigma \sqrt{Tr(\mathbf{A}_{\Sigma})};$$

$$\Delta_{\partial 3} = \sigma \sqrt{R(\mathbf{A}_{\Sigma})};$$

$$\Delta_{\partial 4} = \sigma \sqrt{\|\mathbf{A}_{\Sigma}\|}.$$

Четвертый допуск, в свою очередь, может быть рассчитан тремя способами при использовании трех указанных выше норм матрицы  $\mathbf{A}_{\Sigma}$ .

Положим, в начале тестового движения системы при терминальном диагностировании возник дефект, приведший к сбою, который можно описать  $(n \times k)$ -матрицей  $\mathbf{W}_c = [\mathbf{w}_c, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}]$ , где  $\mathbf{w}_c$  — дополнительное возмущение, которое появляется в начальный момент движения, а для достоверного обнаружения при диагностировании его величина должна зависеть от допуска на диагностический признак. Ошибка движения системы от дефекта при его окончании будет следующей:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{w}_c.$$

Поскольку принято, что  $\mathbf{x}_k = \mathbf{0}$ , то диагностический признак определяется этой величиной ошибки. Следовательно, условие обнаружения сбоя при наличии возмущений движения имеет вид

$$\|\mathbf{w}_c\| > \frac{\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}^{k-1}\|}.$$

Следует отметить, что допусков может быть четыре, видов норм — три. Поэтому должно быть двенадцать вариантов условий обнаружения сбоя.

Достоверное обнаружение сбоя при маловероятном ложном срабатывании

$$\|\mathbf{w}_c\| > \frac{3\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}^{k-1}\|}.$$

Положим, в начале тестового движения системы при терминальном диагностировании возник дефект, приведший к отказу, который можно описать  $(n \times k)$ -матрицей  $\mathbf{W}_o = [\mathbf{w}_o, \mathbf{w}_o, \dots, \mathbf{w}_o]$ , где  $\mathbf{w}_o$  — дополнительное возмущение, которое действует в течение всего времени движения, а для достоверного обнаружения при диагностировании, как и раньше, величина его должна зависеть от допуска на диагностический признак. От дефекта ошибка движения системы по его окончании будет следующей:

$$\mathbf{e}(k) = \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{w}_o = \mathbf{A}_{\Sigma k} \mathbf{w}_o.$$

Условие обнаружения отказа при наличии возмущений движения имеет вид

$$\|\mathbf{w}_o\| > \frac{\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}_{\Sigma k}\|}.$$

Как и раньше, должно быть двенадцать вариантов условий обнаружения отказа.

Достоверное обнаружение отказа при маловероятном ложном срабатывании

$$\|\mathbf{w}_o\| > \frac{3\Delta_{\partial i}}{\|\mathbf{A}_{\Sigma k}\|}.$$

Таким образом, получены условия достоверного обнаружения дефектов при тестовом движении системы в пространстве состояний под действием рассчитанного терминального управления.

**Чувствительность терминального диагностирования**

Основу теории чувствительности составляют методы теории малых возмущений [17]. Выше рассмотрены случайные возмущения, возникающие в процессе движения исследуемой динамической системы в пространстве состояний. Ставится задача анализа влияния этих возмущений на результаты терминального диагностирования.

К фундаментальным понятиям относится функция чувствительности, вычисление которой является самой важной задачей теории чувствительности. Каждая функция чувствительности определяет влияние изменения конкретного параметра исследуемой системы на ее выходной сигнал.

В случае терминального диагностирования при действии возмущений на тестовое движение системы необходимо исследовать чувствительность условий проверки наличия сбоя или отказа, вызванных появлением дефекта.

Условия обнаружения сбоя или отказа содержат параметры, зависящие только от матрицы  $A$

исследуемой системы. Поэтому определим коэффициент чувствительности как отношение нормы возмущения от дефекта к среднеквадратическому отклонению помехи. Количество вариантов расчета коэффициентов чувствительности достаточно велико. Каждая формула определяется следующими параметрами:

- видом дефекта: сбоем, отказом;
- характеристикой ковариационной матрицы: определителем, следом, спектральным радиусом, нормой;
- видом используемой нормы: октаэдрической, евклидовой, кубической.

Коэффициенты чувствительности для обнаружения сбоя приведены в табл. 1.

Коэффициенты чувствительности для обнаружения отказа приведены в табл. 2.

Двенадцать вариантов расчета допусков предполагает необходимость принятия решения для использования их в зависимости от особенностей задачи диагностирования. С вычислительной точки зрения достаточно простыми будут варианты с октаэдрической нормой векторов и со следом ковариационной матрицы. Однако с точки зрения информативности диагностических признаков могут оказаться сложные варианты с евклидовой нормой векторов и спектральным радиусом ковариационной матрицы. Наконец, с инженерной точки зрения полезными могут оказаться варианты с кубической нормой векторов и ковариационной матрицы.

■ Таблица 1. Коэффициенты чувствительности для обнаружения сбоя

■ Table 1. Sensitivity factors for failure detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	$\frac{\sqrt{ A_{\Sigma} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{Tr(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{R(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{\Sigma,ij} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{k-1,ij} }$
Евклидова	$\frac{\sqrt{ A_{\Sigma} }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{Tr(A_{\Sigma})}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{R(A_{\Sigma})}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{\ A_{\Sigma}\ }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{k-1,ij}^2}}$
Кубическая	$\frac{\sqrt{ A_{\Sigma} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j}  a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{Tr(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j}  a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{R(A_{\Sigma})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j}  a_{k-1,ij} }$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j}  a_{\Sigma,ij} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j}  a_{k-1,ij} }$

■ **Таблица 2.** Коэффициенты чувствительности для обнаружения отказа  
 ■ **Table 2.** The sensitivity coefficients for fault detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	$\frac{\sqrt{ \mathbf{A}_\Sigma }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{\Sigma k,ij} }$	$\frac{\sqrt{Tr(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{\Sigma k,ij} }$	$\frac{\sqrt{R(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{\Sigma k,ij} }$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{\Sigma k,ij} }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n  a_{\Sigma k,ij} }$
Евклидова	$\frac{\sqrt{ \mathbf{A}_\Sigma }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{Tr(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{R(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$	$\frac{\sqrt{\ \mathbf{A}_\Sigma\ }}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{\Sigma k,ij}^2}}$
Кубическая	$\frac{\sqrt{ \mathbf{A}_\Sigma }}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$	$\frac{\sqrt{Tr(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$	$\frac{\sqrt{R(\mathbf{A}_\Sigma)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \max_{i,j} (a_{\Sigma k,ij})}$

Расчеты допусков и коэффициентов чувствительности целесообразно выполнить в математическом пакете MATLAB.

### Компьютерное моделирование

Написана программа-сценарий для математического пакета MATLAB, решающая следующие задачи.

- Ввод**  
 системных матриц **A** и **B**;  
 начального состояния;  
 числа шагов;  
 среднеквадратического отклонения возмущений.
- Расчет допуска и коэффициента чувствительности при различных нормах векторов и матриц;**  
 характеристиках ковариационной матрицы возмущений.
- Моделирование процесса диагностирования, включая**  
 вычисление терминального управления, которое минимизирует затрачиваемую энергию;  
 создание случайных помех;  
 назначение требуемой величины ошибки вследствие возникновения сбоя или отказа;  
 построение траектории движения системы от задаваемого начального до нулевого конечного состояний как при отсутствии, так и при наличии дефекта.
- Просмотр результатов**  
 рассчитанного допуска;  
 нормы диагностического признака;  
 коэффициента чувствительности.

Приведем два варианта работы сценария. Вариант 1 предполагает использование октаэдрических норм, определитель ковариационной матрицы, дефект, приводящий к сбою и ошибке 0,1. Вариант 2 предполагает использование евклидовых норм, след ковариационной матрицы, дефект, приводящий к отказу и ошибке 0,2.

#### Вариант 1

Вводим  
 A = 0 1  
 1 0  
 B = 0  
 1  
 xk = 1  
 1  
 k = 10  
 sigma = 0.01  
 Ошибка > 0.015 = 0  
 Допуск на диагностический признак 0.1000  
 Коэффициент чувствительности 5  
 Норма диагностического признака 0.0445  
 Ошибка > 0.015 = 0.1  
 Допуск на диагностический признак 0.1000  
 Коэффициент чувствительности 5  
 Норма диагностического признака 0.1676

#### Вариант 2

Ошибка > 0.067082 = 0.2  
 Допуск на диагностический признак 0.0447  
 Коэффициент чувствительности 2.2361  
 Норма диагностического признака 0.3496  
 Конец

Результаты расчетов в виде пар допусков на диагностический признак и коэффициентов чувствительности для обнаружения сбоя ( $\Delta_{\Sigma} | K_j$ ) приведены в табл. 3.

Результаты расчетов в виде пар допусков на диагностический признак и коэффициентов чув-

■ **Таблица 3.** Пары допусков и коэффициентов чувствительности для обнаружения сбоя

■ **Table 3.** A couple of tolerances and sensitivity coefficients for failure detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	0,1   5	0,04   2,2	0,03   1,52	0,04   2,2
Евклидова	0,1   7,7	0,04   3,16	0,03   2,2	0,0376   2,6
Кубическая	0,1   10	0,04   4,47	0,03   3,16	0,03   3,16

■ **Таблица 4.** Пары допусков и коэффициентов чувствительности для обнаружения отказа

■ **Table 4.** A couple of tolerances and sensitivity coefficients for failure detection

Вид нормы	Коэффициент чувствительности			
	Определитель	След	Спектральный радиус	Норма
Октаэдрическая	0,1   2,5	0,04   1,1	0,03   0,79	0,04   1,1
Евклидова	0,1   5	0,04   2,2	0,03   1,58	0,0376   1,88
Кубическая	0,1   10	0,04   4,47	0,03   3,16	0,03   3,16

ствительности для обнаружения отказа приведены в табл. 4.

Числовые результаты позволяют сделать следующие выводы.

— Для обнаружения дефектов, приводящих к сбоям или отказам, допуски на диагностический признак одинаковы.

— Допуск по определителю матрицы существенным образом отличается от почти одинаковых допусков по следу, спектральному радиусу и норме матрицы.

— Коэффициенты чувствительности при сбоях несколько отличаются от соответствующих коэффициентов при отказах.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предложенных расчетных формул.

## Заключение

Терминальное диагностирование является разновидностью тестового диагностирования динамических систем, обеспечивающей контроль системы в естественном режиме движения ее в заданных границах. При выборе границ движения системы целесообразно задавать нулевые диагностические признаки, которые оказываются достаточно простыми для обнаружения дефектов. Приведенные формулы расчета вероятности правильной проверки диагностических признаков диагностирования, определяющей его достоверность, и коэффициентов чувствительности диагностических признаков относятся к дискретным системам. Предложен определенный

набор вариантов для выбора требуемых формул. Расчетные формулы реализованы в математическом пакете MATLAB. Получаемые числовые значения допусков на диагностический признак и коэффициентов чувствительности, в свою очередь, можно считать достоверными.

Рассмотренное компьютерное моделирование терминального диагностирования нейтральной системы второго порядка в присутствии случайных помех показало, что:

— при отсутствии дефекта полученный диагностический признак почти в два раза меньше рассчитанного допуска;

— при наличии дефекта, приводящего к сбою, полученный диагностический признак почти в два раза больше рассчитанного допуска;

— при наличии дефекта, приводящего к отказу, полученный диагностический признак почти в семь раз больше рассчитанного допуска;

— рассчитанные коэффициенты чувствительности достигают значений 10 и 2,2, показывая, насколько норма возмущения от дефекта должна быть больше среднеквадратического отклонения помехи.

В работах по функциональному диагностированию описан метод, позволяющий не только обнаружить, но и локализовать дефект. Он связан с использованием принципа диагностирования по годографам дефектов. Этот принцип требует специальных расчетов для создания годографов.

## Финансовая поддержка

Работа поддержана грантом РФФИ 17-08-00244.

## Литература

1. Таубин Ф. А. Решетчатые сигнально-кодовые конструкции для каналов с линейными искажениями. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 66–78. doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-66-78
2. Афшер Х., Делич Х. Полярные коды с памятью высшего порядка. *Проблемы передачи информации*, 2018, т. 54, № 4, с. 3–34.
3. Бассалыго Л. А., Зиновьев В. А. Замечание об уравновешенных неполных блок-схемах, почти разрешимых блок-схемах и q-ичных равновесных кодах. *Проблемы передачи информации*, 2017, т. 53, № 1, с. 56–59.
4. Игнатъев М. Б. Когнитивные вычисления на основе лингво-комбинаторного подхода. *Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в III ч. Ч. II. Технические науки*. СПб., ГУАП, 2018, с. 321–324.
5. Игнатъев М. Б., Катермина Т. С. Метод избыточных переменных для контроля и коррекции вычислительных процессов в реальном времени. *Труды СПИИРАН*, 2013, вып. 26, с. 234–252.
6. Игнатъев М. Б., Марлей В. Е., Михайлов В. В., Спесивцев А. В. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб., Политех-пресс, 2018. 501 с.
7. Жирабок А. Н., Овчинников Д. Ю., Филатов А. П., Шумский А. Е., Яценко Н. А. Диагностирование нелинейных динамических систем непараметрическим методом. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2018, № 19, с. 508–515. doi.org/10.17587/mau.19.508-515
8. Хлобыстова А. О., Абрамов М. В., Тулупьев А. П., Золотин А. А. Поиск кратчайшей траектории социоинженерной атаки между парой пользователей в графе с вероятностями переходов. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 6, с. 74–81. doi.org/10.31799/1684-8853-2018-6-74-81
9. Штанько С. В. Ограничение несанкционированного доступа в радиотехнических системах с широкополосной передачей информации. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 57–65. doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-57-65
10. Мальцев Г. Н., Якимов В. Л. Достоверность многоэтапного контроля технического состояния объектов испытаний. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 1, с. 49–57. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.49
11. Копкин Е. В., Бородько Д. Н., Пастухова К. Е. Алгоритм построения квазиоптимальной гибкой программы анализа технического состояния объекта. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 1, с. 31–39. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.31
12. Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н. Анализ кратности ганкелевых сингулярных чисел управляемых систем. *Автоматика и телемеханика*, 2015, № 2, с. 18–33.
13. Ключев В. В., Иванов В. И., Туробов Б. В. Техническая диагностика в промышленности. *Контроль. Диагностика*, 2018, № 6, с. 4–13.
14. Данилевич С. Б., Третьяк В. В. Метрологическое обеспечение достоверности результатов контроля. *Контроль. Диагностика*, 2018, № 7, с. 56–60.
15. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Lukoyanov E. V. Test-based diagnosis of faults in data exchange addressing in computer systems using parallel model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, no. 57(3), pp. 420–433.
16. Солдатенко С. А., Юсупов Р. М. Чувствительность нульмерной климатической модели и ее обратные связи в контексте проблемы управления погодой и климатом Земли. *Труды СПИИРАН*, 2017, № 3, с. 5–31.
17. Соколов Б. В., Бураков В. В., Микони С. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов. *Информация и космос*, 2018, № 3, с. 36–43.
18. Охтилев М. Ю., Ключарев А. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методологические и методические основы создания и применения катастрофоустойчивых информационных систем. *Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. конф., Санкт-Петербург, 1–3 ноября 2017 г.*, СПб., СПОИСУ, 2017, с. 15–16.
19. Аринчев С. В., Рачкин Д. А. Чувствительность внутренних возмущений панельной конструкции, содержащей ротор, к вариациям сосредоточенных масс. *Известия вузов. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 49–56.
20. Бритов Г. С. Терминальное диагностирование дискретных динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 4, с. 18–24. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18
21. Печенин Д. В., Мироновский Л. А. Оптимальное программное импульсное управление линейными объектами. *Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в III ч. Ч. II. Технические науки*. СПб., ГУАП, 2018, с. 374–379.
22. Kolesov N. V., Gruzlikov A. M., Lukoyanov E. V. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty procedia. *Computer Science*, 2017, no. 103, pp. 499–504.

UDC 621.38

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37

**Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems**G. S. Britov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0452-523X, britovgs@gmail.comL. A. Mironovskiy<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3584-7095<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Most studies on terminal diagnostics of dynamic systems are devoted to the description of methods of calculating special test signals providing natural movement of the system, for example, within the given limits. Such a movement is carried out using calculated terminal control. The final state of the system allows you to determine a diagnostic feature. Therefore, it is necessary to set and solve the problem of assessing the probability of obtaining a correct result of diagnosis, which would determine its reliability and sensitivity to errors in the system movement caused by a defect. **Purpose:** Developing methods for calculating the reliability and sensitivity of a diagnostic feature in terminal diagnosis of dynamic systems. **Methods:** Formulas based on the theory of automatic control system sensitivity allowed us to obtain conditions for detecting defects which lead to errors in the system movement within specified boundaries. **Results:** Methods have been developed to calculate dynamic system motion error sensitivity coefficients for various defects and required initial data. The process of evaluating terminal diagnostics of discrete dynamic systems is described. This process differs from the known methods in that the test motion is a natural movement of the system within the specified boundaries. Computer simulation confirms that the obtained formulas of the diagnostics process estimation are accurate. The proposed formulas require the application of MATLAB mathematical package, as the calculation is based on function programs and a scenario for studying reliability and sensitivity of terminal diagnostics. **Practical relevance:** When making a decision about the presence of a defect in a tested dynamic object, the technical diagnostics system operator receives a tool for assessing the reliability and sensitivity of the diagnostic feature.

**Keywords** — system motion model, linear discrete system, border traffic, terminal control, system motion errors, conditions for defect detection.

**For citation:** Britov G. S., Mironovskiy L. A. Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 29–37 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-29-37

**References**

1. Taubin F. A. Trellis-coded modulation for linear distortion channels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 66–78 (In Russian). doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-66-78
2. Afshere H., Delich H. Polar codes with higher order memory. *Problemy peredachi informacii*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 3–34 (In Russian).
3. Bassalygo L. A., Zinoviev V. A. Note on balanced incomplete block schemes, is almost soluble flowcharts and q-ary equilibrium codes. *Problemy peredachi informacii*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 56–59 (In Russian).
4. Ignatiev M. B. Cognitive computing based on the linguo-combinatorial approach. *Nauchnaya sessija GUAP* [Scientific Session of SUAI, vol. II. Technical Science], Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2018, pp. 321–324 (In Russian).
5. Ignatiev M. B., Catermina T. S. The method of redundant variables for control and correction of computational processes in real time. *SPIIRAS Proceedings*, 2013, iss. 26, pp. 234–252 (In Russian).
6. Ignatyev M. B., Marley V. E., Mikhailov V. V., Spesivtsev A. V. *Modelirovanie slabo formalizovannykh sistem na osnove javnyh i nejavnyh jekspertnykh znaniy* [Modelling a poorly formalised system on the basis of public and non-public knowledge]. Saint-Petersburg, Politekh-press Publ., 2018. 501 p. (In Russian).
7. Zhirabok A. N., Ovchinnikov D. Yu., Filatov A. P., Shumsky A. E., Yatsenko N. A. Diagnosis of nonlinear dynamic systems-parametric method. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2018, no. 19, pp. 508–515 (In Russian). doi.org/10.17587/mau.19.508-515
8. Khllobystova A. O., Abramov M. V., Tulupyev A. P., Zolotin A. A. Search for the shortest path of socio-engineering attack between a pair of users in the graph with transition probabilities. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 6, pp. 74–81 (In Russian). doi.org/10.31799/1684-8853-2018-6-74-81
9. Shtanko S. V. Restriction of unauthorized access in radio systems with broadcasting information. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 57–65 (In Russian). doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-57-65
10. Maltsev G. N., Yakimov V. L. Reliability of multi-stage control of technical condition of test objects. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 49–57 (In Russian). doi: 10.15217/issn 1684-8853.2018.1.49
11. Kopkin E. V., Borodko D. N., Pastukhova K. E. Algorithm for constructing a quasi-optimal flexible program for analyzing the technical condition of the object. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 31–39 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2017.1.31
12. Mironovsky L. A., Solovyeva T. N. Analysis of the multiplicity of Hankel singular values of the managed systems. *Automation and Remote Control*, 2015, no. 2, pp. 18–33 (In Russian).
13. Klyuev V. V., Ivanov V. I., Turobov B. V. Technical diagnostics in industry. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 6, pp. 4–13 (In Russian).
14. Danilevich S. B., Tretyak V. V. Metrological assurance of control results reliability. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 7, pp. 56–60 (In Russian).
15. Gruzlikov A. M., Kolesov N. V., Lukoyanov E. V. Test-based diagnosis of faults in data exchange addressing in computer systems using parallel model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, no. 57(3), pp. 420–433.
16. Soldatenko S. A., Yusupov R. M. Sensitivity of the zero-dimensional climate model and its feedbacks in the context of the earth's weather and climate control problem. *SPIIRAS Proceedings*, no. 3, pp. 5–31 (In Russian).
17. Sokolov B. V., Burakov V. V., Mikoni S. V., Yusupov R. M. Methodological and methodical bases of the theory of estimation of quality of models and polymodel complexes. *Informacija i kosmos*, 2018, no. 3, pp. 36–43 (In Russian).
18. Okhtilev M. Yu., Klyucharev A. A., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Metodologicheskie i metodicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya katastrofoustojchivyh informacionnykh system. *Trudy konferentsii "Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost'"* [Proc. conf. "Regional computer science and information security"]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 15–16 (In Russian).



19. Arenuev S. V., Rachkin D. A. Sensitivity of the internal disturbances a panel structure containing the rotor, the variations of lumped masses. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye*, 2015, no. 1, pp. 49–56 (In Russian).
20. Britov G. S. Terminal diagnostics of discrete dynamical systems. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 18–24 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2017.4.18
21. Pechenin D. V., Mironovsky L. A. Optimal software impulse control of linear objects. *Nauchnaya sessiya GUAP* [Scientific Session of SUAI, vol. II. Technical Science], Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2018, pp. 374–379 (In Russian).
22. Kolesov N. V., Gruzlikov A. M., Lukoyanov E. V. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty procedia. *Computer Science*, 2017, no. 103, pp. 499–504.

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно, в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставляемые в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** предоставляются отдельными исходными файлами, подающимися редактованию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, подающихся редактованию, используя векторные программы: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); Adobe Illustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg;

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Правила для авторов».

### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)