

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С АППАРАТНЫМИ И ИНФОРМАЦИОННЫМИ ОТКАЗАМИ КАК КОМПЛЕКСНЫЕ ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ

© 2009 В. С. Марюхненко

Иркутский государственный университет путей сообщения

Предложена на аксиоматической основе комплексная форма представления показателей надёжности восстанавливаемых информационных управляющих систем с аппаратными и информационными отказами. Рассмотрены комплексные формы интенсивности, вероятностей безотказной работы и отказа сложных систем без резервирования и с резервированием замещением.

Отказ, аппаратный отказ, информационный отказ, надёжность, показатели надёжности, вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов, управляющая система.

Введение

На транспорте и в промышленности существует широкий класс объектов, которые требуют высокой эффективности управления. К ним относятся промышленные робототехнические системы, технологические процессы, подвижные космические, водные и наземные объекты. Управление этими объектами реализуется информационными управляющими системами (ИУС), которые отличаются сложностью структуры, разнообразием алгоритмов обработки сигналов, реализованных, как правило, на микропроцессорах, а также множеством прямых и перекрёстных связей между каналами управления и датчиками информации о движении объекта [1–4]. Эффективность управления такими объектами во многом определяется надёжностью ИУС. В [5] приведены различные подходы к классификации отказов, которые, впрочем, основываются, прежде всего, на физическом соответствии изделия требованиям нормативно-технической документации.

Все устройства и системы подвержены *аппаратным* отказам. Причиной аппаратных отказов ИУС является полная потеря работоспособности отдельно взятого её элемента, вызванная необратимым нарушением его физического состояния.

Между тем сложным ИУС присущи нарушения работоспособности, которые не связаны с необратимым нарушением физичес-

кого состояния элементов, входящих в её состав. Такие отказы, как сбои, т. е. кратковременные самовосстанавливающиеся отказы, характерны микропроцессорам, элементам структурным или информационным резервированием с последующим восстановлением функционирования системы [3, 5, 6]. Свойствами сбоев обладают отказы радиотехнических измерителей параметров движения объекта из-за действия помех [8, 9]. Уходы гироскопов, устраняющиеся «списанием» погрешности при их коррекции, нарушения работы радиотехнических, телевизионных и ультразвуковых датчиков ИУС из-за случайного характера пространственно-временных границ рабочих зон интерпретируется как постепенный отказ [7, 10]. Перечисленные отказы имеют одну общую особенность – при их возникновении не требуются организационные или технические меры по их устранению. Эти отказы «самоустраняются». Но в любом случае в ИУС изменяются параметры информационного потока. Постфактум отказы такого вида фиксируются. Поэтому такие отказы необходимо отнести к особому виду отказов. В [4] их называют информационными.

Информационными являются такие отказы, которые приводят к уменьшению количества информации, необходимой для функционирования ИУС согласно требованиям, предъявляемым к системам определённого

вида. Проявление информационных отказов временное, в некоторых случаях неявное и возможно либо в определённых структурных элементах ИУС, либо в известных условиях функционирования. Информационные отказы давно фиксируются в практике эксплуатации ИУС. О них говорится в монографиях и статьях [4, 11, 12, 13].

По-видимому, в [11] впервые обращено внимание на отличие отказов, вызванных ухудшением точности измерений (потерей информативности), от аппаратных отказов. Более развёрнутым является анализ информационных отказов применительно к постепенным отказам в [4]. Однако терминология информационных отказов ещё не является общепринятой. Так в [4, 11] информационными, по сути, называются только постепенные отказы, а в [12] и [13] анализируются как обычные аппаратные отказы (сбои) и постепенные отказы, явно обладающие признаками информационных. В [14] производится оценка остаточной надёжности, исходя из модели, которая изначально содержит множество исходных режимов, причиной которых могут быть, в том числе, и информационные отказы.

Особенности и различие аппаратных и информационных отказов требуют как совместного, так и отдельного их учёта и анализа. Это необходимо для выработки конструктивных и эксплуатационных мер по их предупреждению, а также для обоснования выбора ИУС (или отдельных её элементов) конкретного применения.

При анализе надёжности ИУС с аппаратными и информационными отказами необходим такой математический аппарат, который дал бы возможность в формульных зависимостях (или по их графической интерпретации) одновременно судить как в целом о показателях надёжности ИУС, так и по отдельным составляющим отказов – аппаратным и информационным. Этим условиям соответствует представление показателей надёжности в виде комплексных чисел или функций. Комплексные числа (или комплексные функции времени) в теорию надёжности предлагается ввести на основе следующих аксиом.

Аксиома 1. Если для показателя надёжности $z(t)$ можно получить отдельные функции по аппаратным $z_a(t)$ и по информационным $z_u(t)$ отказам, то комплексная форма этого показателя записывается в виде

$$\hat{z}(t) = v[z_a(t) + jz_u(t)], \quad (1)$$

где j – мнимая единица; v – множитель, необходимый для приведения показателей надёжности к корректным значениям.

Аксиома 2. Если $z_a(t)$ и $z_u(t)$ в показателе надёжности (1) имеют смысл вероятности, то вследствие того, что событие отказа ИУС наступает независимо от его вида – информационного или аппаратного, – для модуля комплексной функции времени (1) справедливы выражения

$$|\hat{z}(t)| \begin{cases} \leq 1 & \text{при } z_a(t) \neq 0, \text{ и } z_u(t) \neq 0; \\ = 0 & \text{при } z_a(t) = 0, \text{ и } z_u(t) \neq 0; \\ = 0 & \text{при } z_a(t) \neq 0, \text{ и } z_u(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Цель статьи. Исследование возможности применения комплексных чисел и комплексных функций времени для анализа показателей надёжности информационных управляющих систем.

1. Интенсивность отказов в комплексном виде

При практическом или теоретическом определении показателей надёжности ИУС экспериментально или расчётным путем, прежде всего определяется интенсивность отказов. Пусть произведено отдельное определение (в общем случае как функций времени) интенсивностей аппаратных и информационных независимых друг от друга отказов. Тогда выражение для обобщающего показателя $\hat{\lambda}(t)$ в комплексном виде, который учитывает интенсивности аппаратных $\lambda_a(t)$ и информационных отказов $\lambda_u(t)$, согласно (1) имеет вид

$$\hat{\lambda}(t) = v_\lambda [\lambda_a(t) + j\lambda_u(t)] = \lambda(t)e^{j\varphi_\lambda(t)}, \quad (3)$$

где коэффициент v_λ выбирается в зависимости от практических потребностей представ-

ления вектора (3); $\lambda(t)$ и $\varphi_\lambda(t)$ – соответственно модуль и аргумент функции $\hat{\lambda}(t)$:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= v_\lambda \sqrt{\lambda_a^2(t) + \lambda_\varepsilon^2(t)} ; \\ \varphi_\lambda(t) &= \text{arctg}[\lambda_\varepsilon(t) / \lambda_a(t)] . \end{aligned} \quad (4)$$

Интенсивность отказов $\hat{\lambda}(t)$ (3) при $v_\lambda=1$ графически можно представить в виде вектора на плоскости, проекция которого на действительную ось – интенсивность аппаратных отказов $\lambda_a(t)$, а проекция на мнимую ось – интенсивность информационных отказов $\lambda_\varepsilon(t)$. В общем случае интенсивности аппаратных и информационных отказов с течением времени эксплуатации изделий изменяются. Поэтому вектор $\hat{\lambda}(t)$ имеет переменные модуль и аргумент. Его годограф описывается в параметрической форме уравнениями $\text{Re}[\hat{\lambda}(t)] = \lambda_a(t)$; $\text{Im}[\hat{\lambda}(t)] = \lambda_\varepsilon(t)$.

Исходя из выражений (3) и (4), сформулируем свойства интенсивности отказов в комплексном виде: а) вектор $\hat{\lambda}(t)$ располагается только в первом квадранте; б) увеличение хотя бы одной из составляющих вектора (3) приводит одновременно к увеличению модуля вектора $\hat{\lambda}(t)$ и к его повороту: при увеличении интенсивности аппаратных отказов $\lambda_a(t)$ по ходу стрелки часов, а при увеличении интенсивности информационных отказов $\lambda_\varepsilon(t)$ против хода стрелки часов; уменьшение $\lambda_a(t)$ и $\lambda_\varepsilon(t)$ действует на вектор $\hat{\lambda}(t)$ противоположным образом.

2. Вероятность безотказной работы в комплексном виде

Определим согласно аксиоме (1) вероятность безотказной работы ИУС в виде комплексной функции времени

$$\hat{p}(t) = v_p [p_a(t) + jp_\varepsilon(t)] = p(t)e^{j\varphi_p(t)} , \quad (5)$$

где нормирующий множитель $v_p = 1/\sqrt{2}$; $p_a(t)$ и $p_\varepsilon(t)$ – соответственно вероятности безотказной работы по аппаратным и информационным отказам:

$$p_a(t) = e^{-\int_0^t \lambda_a(t) dt} , \quad p_\varepsilon(t) = e^{-\int_0^t \lambda_\varepsilon(t) dt} ; \quad (6)$$

$p(t)$ и $\varphi_p(t)$ – модуль и аргумент функции $\hat{p}(t)$:

$$\begin{aligned} p(t) &= |\hat{p}(t)| = v_p \sqrt{p_a^2(t) + p_\varepsilon^2(t)} ; \\ j_p(t) &= \text{arctg}\{e^{-L(t)}\} ; L(t) = \int_0^t [\lambda_\varepsilon(t) - \lambda_a(t)] dt . \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что, если в (5) $t=0$, то модуль $p(0)=1$, и аргумент $\varphi_p(0)=\pi/4$.

Проекциями вектора $\hat{p}(t)$ на действительную и мнимую оси являются соответственно вероятности безотказной работы по аппаратным отказам $p_a(t)$ и по информационным отказам $p_\varepsilon(t)$.

Для экспоненциального закона надёжности, который справедлив на основном этапе эксплуатации ИУС в течение промежутка времени $t \in [t_1; t_2]$:

$$\Lambda(t) = (\lambda_{\varepsilon 0} - \lambda_{a 0})t = \Lambda_0 t . \quad (8)$$

Если $\Lambda_0 > 0$, то вектор $\hat{p}(t)$, $t \in [t_1; t_2]$ с течением времени уменьшается по модулю $1 > p(t) \geq p(t_2)$ и поворачивается по ходу стрелки часов в пределах угла $\varphi_1 < \varphi_p(t) < \varphi_2$, где $\varphi_1 = \text{arctg}[e^{-\Lambda_0 t_1}]$; $\varphi_2 = \text{arctg}[e^{-\Lambda_0 t_2}]$.

Если же $\Lambda_0 < 0$, то вектор $\hat{p}(t)$, $t \in [t_1; t_2]$ с течением времени уменьшается по модулю $1 > p(t) \geq p(t_2)$ и поворачивается против хода стрелки часов в пределах угла $(\pi/2 - \varphi_1) < \varphi_p(t) < (\pi/2 - \varphi_2)$.

Свойства комплексной вероятности безотказной работы ИУС:

а) зависимости от времени модуля $p(t)$ и аргумента $\varphi_p(t)$ вектора $\hat{p}(t)$ непрерывные;

б) вектор $\hat{p}(t)$ находится в первом квадранте;

в) в момент начала эксплуатации модуль $p(0)=1$; аргумент $\varphi_p(0)=\pi/4$;

г) при продолжительной эксплуатации

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [p(t)] = 0 ; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [\varphi_p(t)] = \pi / 2 ;$$

д) с течением времени аргумент векто-

ра $\hat{p}(t)$: при $\lambda_{и0}/\lambda_{а0} > 1$ убывает, а при $\lambda_{и0}/\lambda_{а0} < 1$ возрастает.

3. Вероятность отказа в комплексном виде

Определим вероятность отказа ИУС в виде комплексной функции времени

$$\hat{q}(t) = v_q [q_{\hat{a}}(t) + jq_{\hat{e}}(t)] = q(t)e^{j\varphi_q}, \quad (8)$$

где $v_q = 1/\sqrt{2}$; $q_a(t)$ и $q_{и}(t)$ – соответственно вероятности аппаратных и информационных отказов:

$$q_a(t) = 1 - p_a(t); \quad q_{и}(t) = 1 - p_{и}(t); \quad (9)$$

$q(t)$, $\varphi_q(t)$ – модуль и аргумент вектора.

Преобразуем формулу (8) с учётом (9) к виду

$$\hat{q}(t) = v[q_a(t) + jq_{и}(t)] = vZ_1 - \hat{p}(t) = ve^{j\pi/4} - p(t)e^{j\varphi_p(t)}, \quad (10)$$

где $Z_1 = 1 + j$.

Анализ изменения вектора $\hat{q}(t)$ (10) в предположении справедливости (8) позволяет сформулировать его свойства:

а) зависимости от времени модуля и аргумента вектора $\hat{q}(t)$ непрерывные;

б) вектор $\hat{q}(t)$ находится в первом квадранте, и в момент начала эксплуатации ИУС при $t=0$ является нуль-вектором;

в) модуль вектора $\hat{q}(t)$ с течением времени возрастает и стремится к единице;

г) с течением времени аргумент вектора $\hat{q}(t)$, оставаясь в первом квадранте, при $\lambda_{и0}/\lambda_{а0} > 1$ возрастает, а при $\lambda_{и0}/\lambda_{а0} < 1$ убывает.

Представление основных показателей надёжности ИУС (3), (5), (8) в комплексном виде позволяет построить векторную диаграмму (рис. 1), с помощью которой для текущего момента времени можно наглядно оценить соотношение и значения этих показателей, тенденцию их изменения, а также запас показателей до достижения предельных значений.

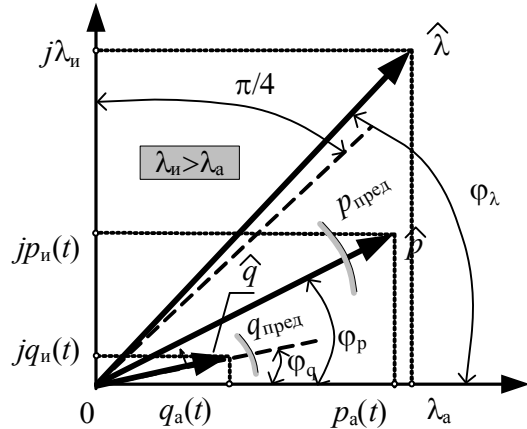


Рис. 1. Векторная диаграмма надёжности ИУС с информационными и аппаратными отказами

4. Показатели надёжности в комплексном виде для сложных ИУС

Система с последовательным включением элементов. Пусть ИУС состоит из n_a элементов, которые имеют только аппаратные отказы, и $n_{и}$ элементов, которые имеют только информационные отказы. Такая система приходит в состояние отказа при отказе хотя бы одного элемента. Поэтому вероятность безотказной работы в комплексном виде соответствует второй аксиоме (2) и определяется как

$$\hat{p}_c(t) = v_p [p_{ac}(t) + jp_{ис}(t)] = p_c(t)e^{j\varphi_c(t)}, \quad (11)$$

где $v_p \neq 1$; вероятности аппаратных и информационных отказов системы

$$p_{ac}(t) = \prod_{k=1}^{n_a} p_{ak}(t); \quad p_{ис}(t) = \prod_{k=1}^{n_{и}} p_{ик}(t). \quad (12)$$

Модуль $p_c(t)$ (11) определяется согласно (7) с учетом формул (12)

$$p_c(t) = v_p \sqrt{\left[\prod_{k=1}^{n_a} p_{ak}(t) \right]^2 + \left[\prod_{k=1}^{n_{и}} p_{ик}(t) \right]^2},$$

а аргумент

$$\varphi_c(t) = \arctg \{ e^{-\Lambda_c(t)} \},$$

где согласно (6)

$$\Lambda_c(t) = \int_0^t \left[\sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ик}(t) - \sum_{k=1}^{n_a} \lambda_{ак}(t) \right] dt.$$

Вероятность отказа системы в комплексном виде определяется аналогично формулам (8) – (10).

Система с резервированием элементов. Система, состоящая из n резервированных элементов, переходит в состояние отказа при отказе всех элементов. Поэтому вероятность отказа в комплексном виде соответствует второй аксиоме (2) и определяется как $\hat{q}_c(t) = \nu[q_{ac}(t) + jq_{ис}(t)]$, где вероятности отказа ИУС из-за аппаратных и информационных отказов равны соответственно

$$q_{ac}(t) = \prod_{k=1}^{n_a} q_{ak}(t); \quad q_{ис}(t) = \prod_{m=1}^{n_i} q_{им}(t). \quad (13)$$

Если предположить, что $\lambda_a \approx const$ и $\lambda_{и} \approx const$, а также при $\lambda_{a0k} \ll 1$ и $\lambda_{и0m} \ll 1$, то

$$q_{ak}(t) = 1 - e^{-\lambda_{a0k}t} \approx \lambda_{a0k}t \quad \text{и} \\ q_{им}(t) = e^{-\lambda_{и0m}t} \approx \lambda_{и0m}t. \quad (14)$$

После подстановки (14) в (13) получаем выражение для вероятности отказа резервированной ИУС

$$\hat{q}_c(t) \approx \nu \left[t^{n_a} \prod_{k=1}^{n_a} \lambda_{ak}(t) + jt^{n_i} \prod_{m=1}^{n_i} \lambda_{им}(t) \right].$$

Следовательно, показатели надёжности сложных ИУС также можно представить в комплексном виде и на этой основе построить векторную диаграмму.

Выводы

Представление основных показателей надёжности ИУС в комплексном виде сочетает сведения и по аппаратным, и по информационным отказам, и одновременно по всем отказам системы. Это представление непротиворечиво. Оно позволяет аналитически или графически (по векторной диаграмме) оценить величины показателей надёжности, тенденции их изменений, а также установить границу допустимого времени эксплуатации ИУС по достижении предельных значений вероятности безотказной работы или веро-

ятности отказа. Аналогично можно представить в комплексном виде и иные, кроме рассмотренных, показатели надёжности информационных управляющих систем.

Библиографический список

1. Марюхненко В. С., Мухопад Ю. Ф. Особенности построения линейных детерминированных информационных автоматических систем управления подвижными объектами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. - № 4 (10). - С. 78–82.
2. Марюхненко В. С. Особенности синтеза информационных автоматических систем управления подвижными объектами при случайных воздействиях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. - № 4(10). - С. 123–128.
3. Мухопад Ю. Ф. Микроэлектронные информационно-управляющие системы: учеб. пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – 404 с.
4. Информационная надёжность, контроль и диагностика навигационных систем / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов. Изд. 2-е, переработанное – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. – 208 с.
5. ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - Введен впервые; введ. 01.07.1990. – М.: Издательство стандартов, 1990. - 64 с.
6. Шаманов В. И. Эксплуатация стареющих систем автоматики и телемеханики // Железнодорожный транспорт. - 1997. - № 12. - С. 20–24.
7. Молчанов А. В., Суминов В. И., Чиркин М. В. Формирование доминирующей погрешности лазерного гироскопа. // Авиакосмическое приборостроение. - 2004. - № 9. - С. 12–19.
8. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. - М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
9. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.
10. Марюхненко В. С. Оценка эффективности навигационного обеспечения подвижных объектов с учетом пространственных искажений и нестационарности рабочих зон

радионавигационных систем // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. - № 2. – С.65–67.

11. Гильбо Е. П., Челпанов И. Б. Обработка сигналов на основе упорядоченного выбора. – М.: Сов.радио, 1975. – 252 с.

12. Мухопад Ю. Ф., Березков Л. О., Скоырский Г. С., Минаев В. И. Микропроцессорные системы контроля БИС ПЗУ. – Иркутск: Улан–Удэ: ИГУ, 1984. – 144 с.

References

1. Maryukhnenko V. S., Mukhopad Yu. F. Special features of constructing linear determinate information automatic systems for controlling mobile objects // Modern technologies. System analysis. Modelling. – Irkutsk, Irkutsk State Communications University, 2005 – No. 4 (10). – pp. 78–82.

2. Maryukhnenko V. S. Special features of synthesis of information automatic systems for controlling mobile objects at random exposures // Modern technologies. System analysis. Modelling. – Irkutsk, Irkutsk State Communications University, 2005. – No. 4 (10). – pp. 123–128.

3. Mukhopad Yu. F. Microelectronic information control systems: teaching aid. – Irkutsk: Irkutsk State Communications University, 2004 – 404 pp.

4. Information reliability, control and diagnostics of navigation systems / S. P. Dmit-riyev, N. V. Kolesov, A. V. Osipov. 2nd edition – Saint Petersburg: State Scientific Centre of Russian Federation, Central Research Institute “Electropribor”, 2004. – 208 pp.

5. GOST (State Standard) 27.002-89. Reliability in engineering. Main concepts. Terms and definitions. – First introduced 01.07.1990. – Moscow: Izdatelstvo standartov, 1990. - 64 pp.

6. Shamanov V. I. Maintenance of ageing automatics and telemetry systems // Zheleznodorozhny transport. – 1997 – No. 12 – pp. 20-24.

7. Moltchanov A. V., Suminov V. I., Tchir-kin

13. Тупысев В. А. Использование винеровских моделей для описания уходов гироскопов и ошибок измерения в задаче оценивания состояния инерциальных навигационных систем // Гироскопия и навигация. – №3. – С. 23–32.

14. Борисов А. А., Карташов Г. Д. Оценивание остаточной надежности на основе модели утраты работоспособности // Электромагнитные волны и электронные системы». – 2006. - № 10. – С. 4-10.

M. V. Formation of laser gyro dominant error // Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. – 2004. – No 9 – pp. 12–19.

8. Tikhonov V. I. Statistical radioenginee-ring. – Moscow: Radio i svyaz (Radio and communication), 1982 – 624 pp.

9. Yarlykov M. S. Statistical theory of radionavigation – Moscow: Radio i svyaz, 1985 – 344 pp.

10. Maryukhnenko V. S. Performance evaluation of mobile object navigation support with regard to spatial distortions and non-stationarity of radionavigation system working areas // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2007, No 2 – pp. 65–67.

11. Gilbo Ye. P., Tchelpanov I. B. Signal processing on the basis of ordered sampling. – Moscow: Sov. radio, 1975. – 252 pp.

12. Mukhopad Yu. F., Berzegov L. O., Sko-syrsky G. S., Minayev V. I. Microprocessor systems of large integrated storage device. – Irkutsk: Ulan-Ude: Irkutsk State Communications University, 1984. – 144 pp.

13. Tupysev V. A. Using Wiener models to describe gyro drifts and measurement errors in the task of evaluating the condition of inertial navigating systems // Gyroscopy and navigation. – No 3 – pp. 23–32.

14. Borisov A. A., Kartashov G. D. Residual reliability evaluation on the basis of a degraded performance model // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2006, No 10 – pp. 4–10.

RELIABILITY INDICATORS OF INFORMATION CONTROL SYSTEMS WITH HARDWARE AND SOFTWARE FAILURES AS COMPLEX TIME FUNCTIONS

© 2009 V. S. Maryukhnenko

Irkutsk State Communications University

A complex form of presenting reliability indicators of non-recoverable information control systems with hardware and software failures is proposed on the axiomatic basis. Complex forms of intensity, probability of survival and failure of complex systems without redundancy and with replacement redundancy are dealt with.

Failure, hardware failure, software failure, reliability, reliability indicators, probability of survival, probability of failure, failure intensity, control system.

Информация об авторе

Марюхненко Виктор Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Автоматика и телемеханика», Иркутский государственный университет путей сообщения; e-mail: maryuhnenko_v@irgups.ru. Область научных интересов: управление, обработка сигналов, радионавигация, системный анализ, надежность сложных систем.

Maryukhnenko Victor Sergeyevitch, candidate of technical science, associate professor of the department “Automatics and telemetry”, Irkutsk State Communications University; e-mail: maryuhnenko_v@irgups.ru. Area of research: control, signal processing, radionavigation, system analysis, reliability of complex systems.