

Научная статья

УДК 681.586

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-8-12>

Метод текущей идентификации линейной динамической измерительной системы на основе предварительного нелинейного преобразования входного сигнала

Геннадий Иванович Козырев^{1✉}, Юрий Анатольевич Клейменов², Валентин Дмитриевич Усиков³

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, gen-kozyrev@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9491-8100>

^{2, 3} Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Московская обл., Россия

²ura19572006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7093-0260>

³usikov_1989@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2759-0752>

Аннотация. Рассмотрена задача текущей идентификации линейной динамической измерительной системы при неизвестном входном сигнале в условиях воздействия на параметры системы различных дестабилизирующих факторов. Решение этой задачи позволит уменьшить погрешность измерительных систем в динамическом режиме измерений. При идентификации вводится дополнительный канал преобразования измеряемой величины в пространственной области, оператор которого удовлетворяет условию некоммутативности с оператором исследуемой системы. Задача текущей идентификации решена для линейной динамической характеристики основного канала измерительной системы первого порядка. Для исключения некорректных операций дифференцирования выходных сигналов структурно-избыточной измерительной системы в процессе текущей идентификации использован метод модулирующих функций. Представлены зависимости среднего квадратического отклонения приведённой погрешности оценки входной величины от количества измерений при идентификации для различных уровней среднего квадратического отклонения шума измерений, приведённого к шкале входного сигнала, а также от частоты дискретизации выходных сигналов структурно-избыточной измерительной системы. Значение частоты дискретизации обуславливает объём выборки наблюдения, формируемой при цифровой обработке значений выходных сигналов системы в вычислительном устройстве. Показано, что наибольшая точность идентификации достигается при квадратичном преобразовании входного сигнала в дополнительном канале структурно-избыточной измерительной системы, а выбор не слишком высокой частоты дискретизации её выходных сигналов повышает устойчивость алгоритма идентификации. При этом зависимость среднего квадратического отклонения приведённой погрешности оценки входной величины от частоты дискретизации выходных сигналов структурно-избыточной измерительной системы имеет минимум. Результаты исследований могут быть использованы для повышения точности измерительных систем в динамическом режиме измерений, а также для метрологического самоконтроля интеллектуальных измерительных систем.

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы, идентификация, предварительное функциональное преобразование, динамическая измерительная система, модулирующая функция

Для цитирования: Козырев Г. И., Клейменов Ю. А., Усиков В. Д. Метод текущей идентификации линейной динамической измерительной системы на основе предварительного нелинейного преобразования входного сигнала // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 8–12. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-8-12>

Method for identification of linear dynamic measuring system based on preliminary nonlinear transformation of the input signal

Gennady I. Kozyrev^{1✉}, Jurij A. Klejmenov², Valentin D. Usikov³

¹ A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia, gen-kozyrev@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9491-8100>

^{2, 3} Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Mytishchi, Moscow region, Russia

²ura19572006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7093-0260>

³usikov_1989@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2759-0752>

Abstract. The problem of the current identification of a linear dynamic measuring system with an unknown input signal under the influence of various destabilizing factors on the parameters of the system is considered. During identification, an additional channel is introduced for transforming the measured quantity in the spatial domain, the operator of which satisfies the condition of non-commutativity with the operator of the system under study. The solution to the problem of current identification is given for the linear dynamic characteristics of the main channel of the first-order measuring system. The method of modulating functions was used to exclude incorrect operations

of differentiating the output signals of the structurally redundant measuring system in the process of current identification. Dependencies of the root mean square deviation of the given error of the input value estimation due the number of measurements at identification for different levels of the root mean square deviation of the measurement noise reduced to the input signal scale, as well as on the sampling frequency of the output signals of the structurally redundant measuring system with which the observation sample is formed during digital processing of the system output signal values in the computing device are presented. It is shown that the greatest identification accuracy is achieved with a quadratic transformation of the input signal in an additional channel of a structurally redundant measuring system, and the choice of a not too high sampling frequency of its output signals increases the stability of the identification algorithm. In this case, the dependence of the root mean square deviation of the reduced error in estimating the input value on the sampling frequency of the output signals of the structurally redundant measuring system has a minimum. The research results can be used to improve the accuracy of measuring systems in a dynamic measurement mode, as well as for metrological self-control of intelligent measuring systems.

Keywords: destabilizing factors, identification, preliminary functional transformation, dynamic measuring system, modulating function

Введение. Традиционно постановка задачи идентификации заключается в построении модели объекта по результатам измерений его входных и выходных сигналов [1–3]. Однако на практике довольно часто возникают ситуации, когда невозможно или нечем измерить входной сигнал исследуемого объекта, например измерительной аппаратуры различного рода: встроенных измерительных систем (ИС), первичных измерительных преобразователей (датчиков), средств телеизмерений для ракетно-космической техники и т. п. [4–6]. Кроме того, в процессе эксплуатации параметры ИС изменяются с течением времени и под действием различного рода дестабилизирующих факторов, причём в наибольшей степени подобному влиянию подвержены первичные элементы тракта измерительного преобразования – датчиковая аппаратура [2, 3]. Отклонения параметров измерителей от их номинальных значений приводят к существенным погрешностям оценки неизвестного входного сигнала, что, в свою очередь, вызывает необходимость в текущей (в процессе эксплуатации) идентификации ИС. Создаётся положение, когда для идентификации параметров ИС необходимо знание входного сигнала, а для восстановления входного сигнала измерителя требуется знание его характеристик.

Таким образом, возникает задача идентификации динамических систем на основе наблюдения только за их выходными переменными. Следует также отметить, что для большинства измерительных задач текущие параметры ИС должны вычисляться без предпосылок о стационарности входного и выходного сигналов этих измерителей (как случайных процессов) и, следовательно, без предварительного оценивания корреляционных и взаимных корреляционных функций сигналов с целью последующего их использования в задачах идентификации. Подход на основе такого оценивания в процедурах текущей идентификации параметров ИС невозможен даже формально из-за неизвестности входного сигнала.

В [7] изложен метод вспомогательных систем для идентификации динамических объектов при неизвестном входном воздействии, в основе которого лежит использование априорной информации о характеристиках некоторой нестационарной или нелинейной вспомогательной системы для уточнения нестабильных параметров динамического объекта. Недостатками метода являются, во-первых, необходимость подачи входного сигнала на исследуемый объект и одновременно на последовательное соединение вспомогательной

системы и динамического объекта с идентичными исследуемому объекту характеристиками, во-вторых, требование нечувствительности параметров вспомогательной системы к воздействию дестабилизирующих факторов, что, как правило, невозможно реализовать на практике, особенно для первичного преобразования неэлектрической величины.

Цель настоящей работы – разработать метод идентификации, основанный, как и метод вспомогательных систем, на введении структурной избыточности в исследуемый объект, но свободный от указанных недостатков.

Метод идентификации. Рассмотрим динамическую структурно-избыточную ИС (СИИС) (рис. 1), оператор основного канала F_1 которой является линейным, а оператор дополнительного канала F_2 – нелинейным согласно условию некоммутируемости

$$(F_1 F_2 - F_2 F_1)x(t) \neq 0. \quad (1)$$

Как доказано в [8], неравенство (1) является необходимым и достаточным условием идентифицируемости динамических СИИС при неизвестном входном сигнале. Согласно рис. 1, параметры операторов F_1 , F_2 подвержены влиянию дестабилизирующих факторов $\xi(t)$. Задача состоит в том, чтобы при неизвестном входном сигнале $x(t)$ по наблюдаемым выходным сигналам $y_1(t)$, $y_2(t)$ оценить параметры оператора F_1 и (при необходимости) оператора F_2 с учётом того, что параметры обоих операторов являются нестабильными.

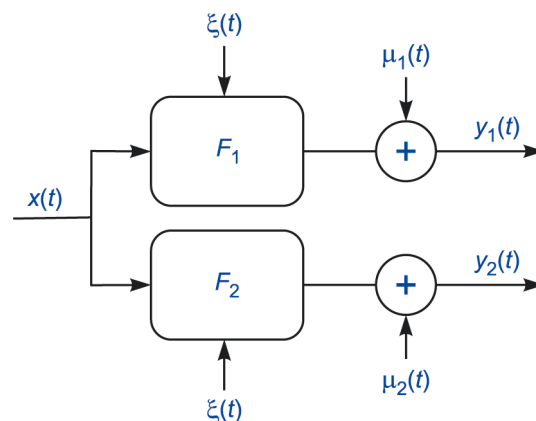


Рис. 1. Схема динамической СИИС

Fig. 1. Scheme of structurally redundant dynamic measuring system

Воздействие одного и того же входного сигнала $x(t)$ на основной и дополнительный каналы СИИС приводит к тому, что её выходные сигналы $y_1(t)$, $y_2(t)$ связаны между собой, в чём и проявляется избыточность этой динамической системы [9, 10]. Это позволяет представить динамическую СИИС (см. рис. 1) в виде эквивалентной динамической системы с оператором $F=F_2F^{-1}$, наблюдаемыми сигналами $y_1(t)$, $y_2(t)$ и свести задачу к стандартной задаче идентификации:

$$y_2(t) = F_2x(t) = F_2F^{-1}y_1(t) = Fy_1(t).$$

Рассмотрим линейную динамическую СИИС, преобразовательный тракт основного канала которой описывается выражением

$$b(\xi)\dot{y}_1(t) + y_1(t) = x(t), \quad (2)$$

где $\dot{y}_1(t)$ – первая производная сигнала $y_1(t)$ по времени t .

Здесь текущий параметр $b(\xi)$ зависит от совокупности дестабилизирующих факторов $\xi(t)$, т. е. является нестабильным. Параметр $b(\xi)$ можно выразить через его номинальное значение $b_{\text{ном}}$:

$$b(\xi) = b_{\text{ном}} + \Delta b(\xi),$$

где $\Delta b(\xi)$ – динамическая составляющая суммарной погрешности СИИС.

Модель дополнительного канала СИИС с учётом нелинейного преобразования L входного сигнала $x(t)$ имеет вид

$$b(\xi)\dot{y}_2(t) + y_2(t) = Lx(t). \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (2) и (3) при нелинейном операторе L позволяет получить общее уравнение идентификации с исключением неизвестного входного сигнала $x(t)$:

$$L[b(\xi)\dot{y}_1(t) + y_1(t)] = b(\xi)\dot{y}_2(t) + y_2(t). \quad (4)$$

Нахождение текущего параметра $b(\xi)$ из выражения (4) связано с дифференцированием зашумлённых выходных сигналов СИИС $y_1(t)$, $y_2(t)$, что является некорректной процедурой

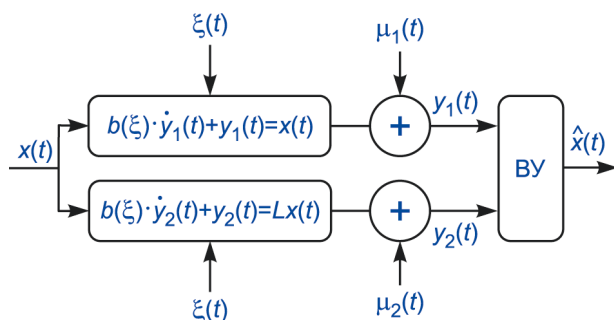


Рис. 2. Упрощённая схема линейной динамической СИИС первого порядка; ВУ – вычислительное устройство

Fig. 2. Simplified diagram of a linear dynamic structurally redundant first order measuring system; CD – computing device

и приводит к большим погрешностям решения задачи идентификации [11]. Для исключения операций дифференцирования сигналов $y_1(t)$, $y_2(t)$, а также влияния краевых условий на интервале наблюдения применим метод модулирующих функций [12]. Для этого умножим скалярно обе части уравнения (4) на некоторую n раз дифференцируемую в промежутке $[0; T_H]$ модулирующую функцию $\varphi(t)$ с краевыми условиями $\varphi^{(j)}(0) = \varphi^{(j)}(T_H) = 0$, $j = 0, n-1$. Здесь n – порядок дифференциального уравнения, описывающего модель преобразовательного тракта основного канала СИИС; T_H – интервал наблюдения (идентификации).

После интегрирования по частям с учётом краевых условий для модулирующей функции $\varphi(t)$ и нулевых начальных условий для основного и дополнительного каналов СИИС уравнение идентификации при описании модели основного канала с помощью дифференциального уравнения n -го порядка примет вид [13]:

$$\sum_{j=1}^n b_j(-1)^j [\langle y_1, \Phi^{(j)} \rangle - \langle y_2, \varphi^{(j)} \rangle] = \langle y_2, \varphi \rangle - \langle y_1, \Phi \rangle, \quad (5)$$

где b_j – неизвестные параметры СИИС; $\Phi(t) = L[\varphi(t)] = \varphi^2(t)$ – преобразованная модулирующая функция; $\langle p, q \rangle = \int_0^{T_H} p(t)q(t)dt$ – скалярное произведение функций $p(t)$, $q(t)$.

При описании модели основного канала СИИС выражением (2), которое является дифференциальным уравнением первого порядка ($n=1$), после раскрытия скалярного произведения в формуле (5) преобразованное уравнение идентификации запишем как [14]:

$$b(\xi) \left[\int_0^{T_H} y_2(t)\dot{\varphi}(t)dt - \int_0^{T_H} y_1(t)\dot{\Phi}(t)dt \right] = \int_0^{T_H} y_2(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_H} y_1(t)\Phi(t)dt. \quad (6)$$

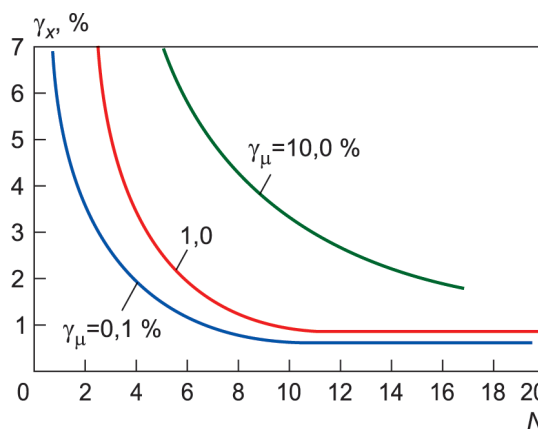


Рис. 3. Зависимость СКО приведённой погрешности γ_x измерений от количества измерений N при различных СКО приведённой погрешности γ_μ шума измерений

Fig. 3. Dependence of the root-mean-square error γ_x of measurements on the number of measurements N at different root-mean-square reduced values γ_μ of the measurement noise

В данном случае в качестве модулирующей функции можно использовать гармоническую функцию вида $\varphi(t) = \sin(2\pi t/T_H)$, $0 \leq t \leq T_H$.

Из выражения (6) найдём параметр $b(\xi)$:

$$\hat{b}(\xi) = \frac{\int_0^{T_H} y_2(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_H} y_1(t)\Phi(t)dt}{\int_0^{T_H} y_2(t)\dot{\varphi}(t)dt - \int_0^{T_H} y_1(t)\dot{\Phi}(t)dt}. \quad (7)$$

Пример применения метода. Условием идентификации СИИС, описываемой выражениями (2), (3) и представленной в упрощённом виде на рис. 2, с учётом неизвестности входного сигнала $x(t)$ является неравенство нулю знаменателя выражения (7).

Зашумлённость выходных сигналов $y_1(t)$, $y_2(t)$ приводит к некорректности задачи идентификации, и для повышения устойчивости её решения необходимо принимать специальные меры. По итогам моделирования для получения устойчивых решений уравнения (7) при нахождении параметра $b(\xi)$ и уравнения (2) при оценке входной величины $x(t)$ достаточно сглаживания выходных сигналов с использованием модулирующих функций и метода наименьших квадратов соответственно. Результаты исследования точностных характеристик предложенного метода текущей идентификации СИИС приведены на рис. 3, 4.

На рис. 3 представлены зависимости среднего квадратического отклонения (СКО) σ_x приведённой к шкале L_x входного сигнала $x(t)$ погрешности $\gamma_x = \sigma_x/L_x$ оценки $x(t)$ по уравнению (2) от количества измерений N при различных уровнях СКО σ_μ приведённой к шкале входного сигнала погрешности $\gamma_\mu = \sigma_\mu/L_x$ шума измерений $\mu(t)$. С увеличением N погрешность γ_μ уменьшается за счёт увеличения интервала сглаживания выходного шума измерений.

На рис. 4 представлена зависимость СКО приведённой погрешности γ_x от частоты дискретизации F_d выходных сигналов $y_1(t)$, $y_2(t)$ СИИС. По значению F_d формируется выборка наблюдения объёмом N при цифровой обработке значений выходных сигналов системы в вычислительном устройстве. Характер зависимости объясняется тем, что при увеличении частоты F_d значения $y_1(t)$, $y_2(t)$ стремятся к значениям предыдущих отсчётов $y_1(t_{i-1})$, $y_2(t_{i-1})$, что приводит к неустойчивости алгоритма оценивания параметра b и к увеличению погрешности измерений. При значительном уменьшении частоты дискретизации погрешность измерений также увеличивается за счёт «срезания» верхних частот рабочего диапазона полезного сигнала $x(t)$. Поэтому зависимость $\gamma_x = \gamma_x(F_d)$ имеет минимум. Таким образом, выбор не слишком большой частоты дискретизации выходных сигналов динамической СИИС повышает устойчивость алгоритма идентификации.

Результаты моделирования показали, что наибольшая точность идентификации достигается при квадратичном преобразовании в дополнительном канале СИИС. С ростом нелинейности в дополнительном канале сходимость итерационного процесса оценивания нестабильных параметров СИИС повышается, но точность идентификации уменьшается за

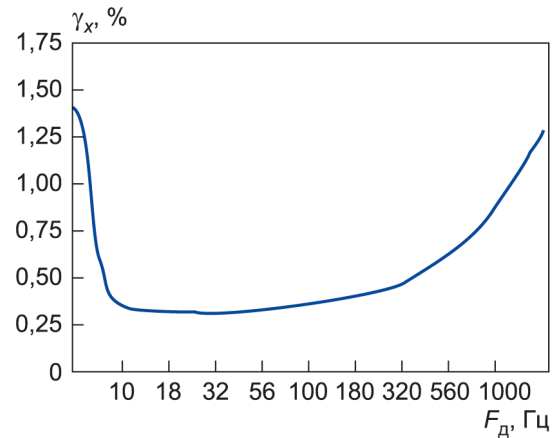


Рис. 4. Зависимость СКО приведённой погрешности измерений γ_x от частоты дискретизации F_d

Fig. 4. Dependence of the mean square measurement error γ_x on the sampling frequency F_d

счёт увеличения нелинейным звеном погрешностей дифференцирования функции, заданной дискретными отсчётами. Если требуемая точность измерений ниже точности, получаемой при квадратичном преобразовании, то можно уменьшить вычислительные затраты на идентификацию, включив в дополнительный канал СИИС элементы с большей степенью нелинейности.

При использовании в качестве модели основного канала СИИС более общего выражения, например $b(\xi)\dot{y}_1(t) + y_1(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t)$, нелинейное предварительное преобразование входного сигнала $x(t)$ в дополнительном измерительном канале также позволяет выполнить текущую идентификацию нестабильных параметров $b(\xi)$, $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ при неизвестном входном сигнале. Текущая идентификация включает объединённые процедуры обработки выходных сигналов СИИС $y_1(t)$, $y_2(t)$ с помощью формулы (7) и алгоритма, описанного в статье [15], и поиск уточнённого значения $x(t)$ по выражению

$$\hat{x}(t) = \{\hat{a}_1(\xi)[\hat{b}(\xi)\dot{y}_1(t) + y_1(t) - \hat{a}_0(\xi)]\}^{-1}. \quad (8)$$

Выражение (8) можно использовать для метрологического диагностического самоконтроля интеллектуальных СИИС при измерениях в статическом и динамическом режимах в зависимости от динамики изменения входного сигнала.

Заключение. Анализ полученных результатов показывает, что введение в динамическую измерительную систему дополнительного измерительного канала с предварительным нелинейным преобразованием входного сигнала и использование метода модулирующих функций для исключения некорректных операций дифференцирования выходных сигналов СИИС в процессе её текущей идентификации позволяет повысить точность измерительных систем в динамическом режиме измерений, а также реализовать метрологический самоконтроль интеллектуальных измерительных систем.

Список источников

1. Льюнг Л. Идентификация систем: теория для пользователя: Пер. с англ. А. С. Манделя, А. В. Назина / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. 136 с.
3. Карабутов Н. Н. Структурная идентификация систем: Анализ динамических структур. М.: МГИУ, 2008. 160 с.
4. Багдат'ев Е. Е., Чернышов Ю. Н. Датчиковая аппаратура информационно-измерительных систем. М.: Московский государственный университет леса, 2008. 64 с.
5. Телеметрия: учебник / Под общей редакцией А. И. Лоскутова. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. 343 с.
6. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс / Под общей редакцией Г. И. Козырева. СПб.: Наука и Техника, 2007. 672 с.
7. Белорусец В. Б. Метод вспомогательных систем для идентификации динамических объектов при неизвестном входном сигнале // Автоматика и телемеханика. 1981. № 8. С. 76–82.
8. Белорусец В. Б., Ефимчик М. Идентификация линейных стационарных систем при неизвестном входном воздействии. В кн. Статистические проблемы управления. Вильнюс: Изд-во Института математики и кибернетики АН Литовской ССР, 1979. Вып. 41. С. 49–56.
9. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Критерии избыточности динамических систем // Известия АН СССР. Серия Техническая кибернетика. 1980. № 1. С. 149–155.
10. Кирьянов К. Г. Идентификация динамических информационных характеристик многоканальных систем на основе оптимальной дискретизации данных // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, 30 января – 2 февраля 2012. С. 252–265.
11. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Книга по Требованию, 2012. 228 с.
12. Шумафов М. М., Цей Р. Метод модулирующих функций и его применение при решении обратных задач // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4. Естественно-математические и технические науки. 2008. № 9.
13. Козырев Г. И. Методы идентификации средств телеизмерений в условиях воздействия неопределённых дестабилизирующих факторов. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1996. 90 с.
14. А. с. СССР № 1674200 / Каленик С. Т., Козырев Г. И., Обрученков В. П. Телеметрическое устройство.
15. Козырев Г. И., Назаров А. В., Солдатенков В. С., Усиков В. Д. Синтез интеллектуальных датчиков на основе введения

минимальной структурной избыточности // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 22–27.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-22-27>

References

1. Ljung L., *System Identification. Theory for the User*, 2nd ed., PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999, 609 p.
2. Diligenskaja A. N., *Identification of control objects*, Samara, Samara State Technical University, 2009. 136 p. (In Russ.)
3. Karabutov N. N., *Structural identification of systems: Analysis of dynamic structures*, Moscow, MGIU, 2008, 160 p. (In Russ.)
4. Bagdat'ev E. E., Chernyshov Yu. N., *Sensor equipment of information measuring systems*, Moscow, Moscow State Forest University, 2008, 64 p. (In Russ.)
5. Loskutov A. I., Bjankin A. A., Kozyrev G. I., *Telemetry*, St. Petersburg, A. F. Mozhaisky VKA, 2017, 343 p. (In Russ.)
6. Nazarov A. V., Kozyrev G. I., Shitov I. V., *Modern telemetry in theory and practice*, St. Petersburg, Nauka i tehnologiya Publ., 2007, 672 p. (In Russ.)
7. Belorusec V. B., Auxiliary systems method for identifying dynamic objects with an unknown input signal, *Avtomatika i telemekhanika*, 1981, no. 8, pp. 76–82. (In Russ.)
8. Belorusec V. B., Efimchik M., Identification of linear stationary systems with an unknown input action, in *Statistical problems of management*, Vilnius, Institut matematiki i kibernetiki AN Litovskoj SSR Publ., 1979, iss. 41, pp. 49–56. (In Russ.)
9. Britov G. S., Mironovskij L. A., Redundancy Criteria for Dynamical Systems, *Proceedings of the USSR Academy of Sciences, Technical Cybernetics*, 1980, pp. 149–155. (In Russ.)
10. Kir'janov K. G., Identification of dynamic information characteristics of multichannel systems based on optimal data sampling, *Proceedings of the IX International Conference "Systems Identification and Control Problems"*, Moscow, Institute for Management Problems V. A. Trapeznikov RAS, 2012, pp. 252–265. (In Russ.)
11. Tihonov A. N., Goncharskij A. V., Stepanov V. V., Jagola A. G., *Numerical methods for solving ill-posed problems*, Moscow, Kniga po Trebovaniju Publ., 2012, 228 p. (In Russ.)
12. Shumafov M. M., Cej R., Metod modulirujushhih funkcij i ego primenenie pri reshenii obratnyh zadach, *Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4: Estestvenno-matematicheskie i tehicheskie nauki*, 2008, no. 9.
13. Kozyrev G. I., *Methods for the identification of telemetry devices under the influence of uncertain destabilizing factors*, St. Petersburg, A. F. Mozhaisky VKA Publ., 1996, 90 p. (In Russ.)
14. USSR copyright certificate No. 1674200. Telemetry device, Kalenik S. T., Kozyrev G. I., Obruchenkov V. P.
15. Kozyrev G. I., Nazarov A. V., Soldatenko V. S., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 63, no. 11, pp. 870–876.
<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01871-y>

Статья поступила в редакцию 15.09.2021; одобрена после рецензирования 27.09.2021; принята к публикации 10.10.2021.
 The article was submitted 15.09.2021; approved after reviewing 27.09.2021; accepted for publication 10.10.2021.