

Труды МАИ. 2023. № 132
Trudy MAI, 2023, no. 132

Научная статья
УДК 542.08, 528.088
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176850>

КОНТРОЛЬ ИСПРАВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (КОМПЛЕКСОВ) ПОЛИГОНОВ ПО ЦЕНТРАМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ

Сергей Герасимович Гумаров¹, Алексей Юрьевич Гетманцев²[✉]

¹Федеральное казенное учреждение «Войсковая часть 15650»,
Ахтубинск, Астраханская область, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

¹gumarovserg@rambler.ru

²tomamens@mail.ru[✉]

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы определения исправности радиоэлектронных станций технических систем (комплексов) испытательного полигона (испытательной организации) (далее – ТСКП). Рассматривается пример определения нормированных точностных характеристик оптических станций внешнетраекторных измерений на основании высокоточных данных о положении астрономических тел. Предложена методология решения выявленных проблем, заключающаяся в определении невязок, применении способа объединения различных генеральных совокупностей полученных результатов высокоточных измерений, опирающаяся на сравнение центров распределений генеральных совокупностей по каждому измерительному каналу. Применяется допущение о нормальном законе

распределения невязок между различными генеральными совокупностями. Приведен математический аппарат, позволяющий определить достоверность полученных результатов. Делается предположение о наличии выраженных и существенных факторов, влияющих на погрешность каждого из каналов измерения. Обращается внимание на важность периодического проведения аттестации для принятия обоснованного решения о возможности достоверного и высокоточного проведения внешнетраекторных измерений на испытательном полигоне. С увеличением степени информативности и автоматизации управления технические средства (комплексы) испытательного полигона становятся высокоинтеллектуальными роботизированными измерительными средствами, контроль исправности и работоспособности которых проводится как в процессе их текущей деятельности (непрерывный контроль), так и при проведении специальных поверочных мероприятий – периодической плановой аттестации средств измерений. Приведены ссылки на государственные стандарты, методические рекомендации и основную литературу по рассматриваемой тематике.

Ключевые слова: нормируемые метрологические характеристики, центры распределения, средняя квадратическая погрешность

Для цитирования: Гумаров С.Г., Гетманцев А.Ю. Контроль исправности технических систем (комплексов) полигонов по центрам распределения погрешности // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176850>

Original article

CONTROL OF SERVICEABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS (COMPLEXES) OF POLYGONS BY ERROR DISTRIBUTION CENTERS

Sergey G. Gumarov¹, Alexey Yu. Getmantsev²✉

¹Federal State Institution "Military Unit 15650",

Akhtubinsk, Astrakhan region, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,

Moscow, Russia

¹gumarovserg@rambler.ru

²tomamens@mail.ru✉

Abstract. The article deals with the problems of the serviceability determining of radio–electronic stations of technical systems (complexes) of the test site (testing organization) (hereinafter - TSKP). An example of the normalized accuracy characteristics determining of optical stations of external vector measurements based on high-precision data on the of astronomical position bodies is being considered. The authors proposed a methodology for solving the identified problems, consistin in determining the discrepancies, applying a method for combining various general aggregates of the obtained results of high-precision measurements, based on a comparison of the distribution centers of general aggregates for each measuring channel. The normal law of the of residuals distribution between different general aggregates assumption is applied. The article presents a mathematical apparatus applied to determine the reliability of the obtained results. The assumption is being made on the presence of expressed and significant factors affecting the error of each of the

measurement channels. Attention is being drawn to the periodic certification importance for making an informed decision on the possibility of reliable and high-precision external measurements at the test site. With the degree of informativity and automation of control increase, technical means (complexes) of the test site become highly intelligent robotic measuring means, which serviceability and operability control is being performed both in the course of their current activities (continuous monitoring) and during special verification measures such as periodic scheduled certification of measuring instruments. References to the State Standards, methodological recommendations and the main literature on the subject under consideration are adduced.

Keywords: normalized metrological characteristics, distribution centers, mean square error

For citation: Gumarov S.G., Getmantsev A.Yu. Control of serviceability of technical systems (complexes) of polygons by error distribution centers. *Trudy MAI*, 2023, no. 132.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176850>

Качество и достоверность получаемой измерительной информации о параметрах образцов авиационной техники и вооружения в процессе летных испытаний существенно зависит от фактического состояния технических средств (комплексов) полигонов – оптических и радиолокационных станций внешнетраекторных измерений (далее – станций ТСКП) [1-3].

Современные станции ТСКП являются высокоавтоматизированными и дистанционно-управляемыми информационно-измерительными средствами внешнетраекторных измерений, осуществляющими независимый и объективный

контроль за летательными аппаратами и их системами в процессе испытаний [4]. ТСКП имеют базовые функции автосопровождения цели и автоматического наведения на заданную точку, таким образом, они де-факто являются роботизированными средствами измерений на авиационных и ракетных полигонах, и степень автономности ТСКП увеличивается с каждым годом [5].

Для определения исправности станций ТСКП периодически проводят аттестацию [6-7], в процессе которой определяют нормированные точностные характеристики, подтверждают их соответствие требованиям нормативно-технической документации и устанавливают пригодность станций ТСКП к эксплуатации [6, 8].

В соответствии с методиками аттестации различных станций ТСКП невязки между измеренными значениями угла места или азимута и эталонными направлениями на объект измерения [9] определяются по формуле:

$$\Delta = a_{\text{изм}} - a_{\text{эт}}. \quad (1)$$

Полученные невязки измеряемых параметров объединяют, считая их принадлежащими одной генеральной совокупности и, используя методы математической статистики [10], определяют нормируемые характеристики станций ТСКП.

Однако на практике полученные невязки различных значений угла места (азимута) могут принадлежать разным генеральным совокупностям и иметь различные центры распределения [11-12], что может быть связано с изменением качественного состояния станции ТСКП во время проведения аттестации по

разнообразным причинам [13-14]:

повышения (понижения) температуры окружающей среды с течением времени;

нестабильности питающего напряжения;

погрешности оцифровки угла азимута или угла места;

нестабильности (нерегулярности) рефракционной ошибки;

вследствие упругой деформации, люфтов и т.д.

Для проверки данной гипотезы и определения качественного состояния станции ТСКП предлагается производить сравнения центров распределения, полученных в результате вычисления невязок на различных углах места и азимутах.

В качестве центра распределения определяется математическое ожидание случайной величины [10-11]. В качестве эталонных направлений принимаются направления на звезды из «Астрономического ежегодника» [15] в диапазонах по углу места от 10 до 30 градусов, от 30 до 60 градусов и от 60 до 90 градусов. Таким образом, получаются 3 независимые выборки объемом n_1 , n_2 и n_3 из генеральных совокупностей X , Y и Z , генеральные дисперсии $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ которых известны - предельная погрешность станций ТСКП задана значением средним квадратическим отклонением (средней квадратической погрешностью) [10]. Математические ожидания в этом предположении должны быть равны

$$M(X) = M(Y) = M(Z). \quad (2)$$

Средние $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ имеют нормальный закон распределения с параметрами $[M(X), \frac{\sigma_x^2}{n_1}]$, $[M(Y), \frac{\sigma_y^2}{n_2}]$, и $[M(Z), \frac{\sigma_z^2}{n_3}]$. Выборки принимаются независимыми, следовательно,

средние \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} также независимы, и случайные величины, определяющие разность между средними \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} , также имеют нормальное распределение [10].

В соответствии с [9] погрешность измерения разности между средними \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} определяется по формулам:

$$\begin{aligned}z_1 &= \bar{X} - \bar{Y}, \\z_2 &= \bar{Y} - \bar{Z}, \\z_3 &= \bar{X} - \bar{Z}.\end{aligned}\tag{3}$$

Исходя из принятых условий и указанных формул, нормированные разности между средними \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned}z_1 &= \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_1} + \frac{\sigma_y^2}{n_2}}}, \\z_2 &= \frac{\bar{Y} - \bar{Z}}{\sqrt{\frac{\sigma_y^2}{n_2} + \frac{\sigma_z^2}{n_3}}}, \\z_3 &= \frac{\bar{X} - \bar{Z}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_1} + \frac{\sigma_z^2}{n_3}}},\end{aligned}\tag{4}$$

которые также подчиняются нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной единице.

В идеальном случае полученные значения разностей z_1, z_2, z_3 между средними \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} должны стремиться к нулевому значению. Но, как показывает опыт проведения аттестации станций ТСКП, средние значения невязок могут отличаться друг от друга. При значительном отличии средних результатов невязок необходимо определить причину данного расхождения: либо расхождение средних значений

невязок вызвано случайными ошибками проведения эксперимента, либо – какими-то неизвестными закономерностями [16-24].

Для решения поставленной задачи определяется [10-12] доверительная вероятность p , используя которую по таблице значения интеграла вероятности по нормальному закону распределения (по функции Лапласа) находится статистика z_p , разделяющая множество z на два непересекающихся подмножества, определяющих область допустимых значений z , и область, содержащую критические значения z .

Область допустимых значений z содержит значения, которые удовлетворяют условию, что $|z| \leq z_p$. В случае, если $|z| > z_p$, то значение z принадлежит области критических значений. Таким образом, для выбранной вероятности $p = 1 - a$ область критических значений статистик z для определенных в экспериментах выборок определяется следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_1} + \frac{\sigma_y^2}{n_2}}} &> z_p, \\ \frac{\bar{Y} - \bar{Z}}{\sqrt{\frac{\sigma_y^2}{n_2} + \frac{\sigma_z^2}{n_3}}} &> z_p, \\ \frac{\bar{X} - \bar{Z}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_1} + \frac{\sigma_z^2}{n_3}}} &> z_p. \end{aligned} \tag{5}$$

Вероятность a должна выбираться из тех соображений, что события, которым при данных условиях исследования она отвечает, считаются практически невозможными (например, $a = 10^{-6}$).

Если вычисленные значения статистик z не превышают критические значения

статистики z_p , то с принятой вероятностью p можно считать расхождение средних значений невязок случайным. Если вычисленные значения статистик z превышают критические значения статистики z_p , то с принятой вероятностью p можно считать расхождение средних значений невязок неслучайным, то есть значимым. Следовательно, существуют какие-то значимые факторы, влияющие на техническое состояние станций ТСКП, что вызывает необходимость проведения тщательного исследования для обнаружения этих влияющих факторов и разработку рекомендаций по уменьшению их влияния [16-24].

Основные неслучайные влияющие факторы выбираются из моделей погрешности канала азимута и угла места станций ТСКП [1]:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{ОСТИ} &= \Delta\alpha_{ОР} + \Delta\alpha_{Г} + \Delta\alpha_{К} + \Delta\alpha_{НП} + \Delta\alpha_{цк}, \\ \Delta\gamma_{ОСТИ} &= \Delta\gamma_{ОР} + \Delta\gamma_{Г} + \Delta\gamma_{цк},\end{aligned}\tag{6}$$

где $\Delta\alpha_{ОР}, \Delta\gamma_{ОР}$ – погрешность ориентирования;

$\Delta\alpha_{Г}, \Delta\gamma_{Г}$ – погрешность горизонтирования;

$\Delta\alpha_{цк}, \Delta\gamma_{цк}$ – погрешность наведения;

$\Delta\alpha_{К}$ – коллимационная погрешность;

$\Delta\alpha_{НП}$ – погрешность неперпендикулярности осей,

и модели зависимостей азимута и угла места:

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_{изм} - tg\gamma_{изм} + \Delta\alpha_{Г} \sin \alpha_{изм} \cdot tg\gamma_{изм} + \Delta\alpha_{К} \sec \gamma_{изм}, \\ \gamma &= \gamma_{изм} - \Delta\gamma_{Г} \cos \alpha_{изм},\end{aligned}\tag{7}$$

Где $\alpha_{изм}, \gamma_{изм}$ – измеренные значения азимута и угла места соответственно.

Систематические (неслучайные) составляющие погрешности могут быть устранены путем введения соответствующих поправок [1].

Данную методику можно использовать не только при проведении аттестации станций ТСКП, но и использовать измерительные данные, полученные при проведении подготовки станций к летному эксперименту в соответствии с руководствами по эксплуатации. Используя полученные материалы о техническом состоянии станций технических систем (комплексов) испытательного полигона (испытательной организации), рекомендуется регистрировать и учитывать тренд изменения технического состояния для планирования профилактических или ремонтных работ по восстановлению исправности станций ТСКП. Обязательно следует учитывать то обстоятельство, что при заданном уровне значимости α (выбранная вероятность) контролируется только ошибка первого рода (риск исполнителя) и нельзя сделать вывод о степени риска совершения ошибки второго рода (риск заказчика).

Источники литературы

1. Чернуха В.Н., Новокшенов Ю.В., Пляскота С.И. Основы испытаний авиационной техники. Часть 2. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1994. – 334 с.
2. Знаменский К.Н. Проблемы технического диагностирования и мониторинга // Автоматика. Связь. Информатика. 2018. № 6. С. 18-20.
3. Додонов А.Г., Путятин В.Г. Радиотехнические средства внешнетраекторных измерений // Математические машины и системы. 2018. № 1. С. 3-30.

4. Полищук С.В., Захаров А.Н. Предложения по созданию системы технических средств объективного контроля морского полигона для испытания морских робототехнических комплексов // V военно-научная конференция «Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации» (Анапа, 29–30 июля 2020): сборник трудов. – Анапа: Военный инновационный технополис «Эра», 2020. С. 285-294.
5. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Концептуальная модель разнесенной системы радиолокационного наблюдения сложных маневрирующих баллистических целей // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87350>
6. ГОСТ РВ 0008-002-2013 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения. – М.: Стандартинформ, 2014. - 28 с.
7. Журавлёв Р.А. Состояние и перспективы развития полигонно-измерительного комплекса ГЦМП МО РФ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 3 (262). С. 18.
8. Дмитриев А.К., Марков В.М., Городецкий В.И. Элементы теории испытаний контроля технических систем. - Л.: Энергия, 1978. - 192 с.
9. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений». – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 90 с.

10. Иванова В.М., Калинина В.Н., Нешумова Л.А., Решетникова И.О. Математическая статистика. - М.: Высшая школа, 1975. - 400 с.
11. Ллойд Э., Ледерман У. Справочник по прикладной статистике. Том 2. / Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 526 с.
12. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. - М.: Наука, 1983. - 464 с.
13. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Трофимчук М.В. Применение методов теории планирования эксперимента для оценки безотказности агрегатов топливной системы авиационного двигателя воздушного судна // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93371>
14. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. - М.: Машиностроение, 1980. - 304 с.
15. Астрономический ежегодник на 2023 год. - СПб.: Институт прикладной астрономии РАН, 2022. Т. 102. - 683 с.
16. Иберла К. Факторный анализ. - М.: Статистика, 1980. – 398 с.
17. Морозов А.Е. Факторный анализ в моделировании повседневной деятельности ВУЗа // Труды МАИ. 2007. № 26. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34026>
18. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. - М.: Metallurgia, 1969. - 287 с.
19. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 282 с.

20. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. - М.: Металлургия, 1981. - 151 с.
21. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. - М.: Мир, 1997. - 278 с.
22. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. - М.: Мир, 1981. - 520 с.
23. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. - М.: Наука, 1976. - 223 с.
24. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума подобия. - М.: Наука, 1964. - 164 с.

References

1. Chernukha V.N., Novokshonov Yu.V., Plyaskota S.I. *Osnovy ispytanii aviatsionnoi tekhniki* (Fundamentals of testing of aviation equipment), Moscow, VVIA im. prof. N.E.Zhukovskogo, 1994, Chast' 2, 334 p.
2. Znamenskii K.N. *Avtomatika. Svyaz'. Informatika*, 2018, no. 6, pp. 18-20.
3. Dodonov A.G., Putyatin V.G. *Matematicheskie mashiny i sistemy*, 2018, no. 1, pp. 3-30.
4. Polishchuk S.V., Zakharov A.N. *V voenno-nauchnaya konferentsiya «Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiiskoi Federatsii»*: sbornik trudov, Anapa, Voennyi innovatsionnyi tekhnopolis «Era», 2020, pp. 285-294.
5. Ashurkov I.S., Leshko N.A., Tsybul'nik A.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87350>

6. GOST RV 0008-002-2013 GSI. *Attestatsiya ispytatel'nogo oborudovaniya, primenyaemogo pri otsenke sootvetstviya oboronnoi produktsii. Organizatsiya i poryadok provedeniya* (GOST RV 0008-002-2013 GSI. Certification of test equipment used in the assessment of conformity of defense products. Organization and procedure of the event), Moscow, Standartinform, 2014, 28 p.
7. Zhuravlev R.A. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2012, no. 3 (262), pp. 18.
8. Dmitriev A.K., Markov V.M., Gorodetskii V.I. *Elementy teorii ispytaniy kontrolya tekhnicheskikh sistem* (Elements of the theory of testing control of technical systems), Leningrad, Energiya, 1978, 192 p.
9. *Metodicheskii material po primeneniyu GOST 8.009-84 «GSI. Normiruemye metrologicheskie kharakteristiki sredstv izmerenii»* (Methodological material on the application of GOST 8.009-84 "GSI. Normalized metrological characteristics of measuring instruments"), Moscow, Izd-vo standartov, 1985, 90 p.
10. Ivanova V.M., Kalinina V.N., Neshumova L.A., Reshetnikova I.O. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics), Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 400 p.
11. Lloid E., Lederman U. *Spravochnik po prikladnoi statistike* (Handbook of Applied Statistics), Moscow, Finansy i statistika, 1989, Vol. 2, 526 p.
12. Braverman E.M., Muchnik I.B. *Strukturnye metody obrabotki empiricheskikh dannykh* (Structural methods of empirical data processing), Moscow, Nauka, 1983, 464 p.
13. Zavyalik I.I., Fetisov E.V., Trofimchuk M.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93371>

14. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimenta* (Optimization of metal technology processes by methods of experiment planning), Moscow, Mashinostroenie, 1980, 304 p.
15. *Astronomicheskii ezhegodnik na 2023 god* (Astronomical Yearbook for 2023 g), Saint Petersburg, Institut prikladnoi astronomii RAN, 2022, vol. 102, 683 p.
16. Iberla K. *Faktornyi analiz* (Factor analysis), Moscow, Statistika, 1980, 398 p.
17. Morozov A.E. *Trudy MAI*, 2007, no. 26. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34026>
18. Adler Yu.P. *Vvedenie v planirovanie eksperimenta* (Introduction to experiment planning), Moscow, Metallurgiya, 1969, 287 p.
9. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* (Experiment planning in the search for optimal conditions), Moscow, Nauka, 1976, 282 p.
20. Nalimov V.V., Golikova T.I. *Logicheskie osnovaniya planirovaniya eksperimenta* (Logical bases of experiment planning), Moscow, Metallurgiya, 1981, 151 p.
21. Khartman K. *Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* (Planning an experiment in the study of technological processes), Moscow, Mir, 1997, 278 p.
22. Dzhonson N., Lion F. *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: Metody planirovaniya eksperimenta* (Statistics and experiment planning in engineering and science: Methods of experiment planning), Moscow, Mir, 1981, 520 p.

23. Brodskii V.Z. *Vvedenie v faktornoe planirovanie eksperimenta* (Introduction to factor planning of the experiment), Moscow, Nauka, 1976, 223 p.

24. Klepikov N.P., Sokolov S.N. *Analiz i planirovanie eksperimentov metodom maksimuma podobiya* (Analysis and planning of experiments by the method of maximum similarity), Moscow, Nauka, 1964, 164 p.

Статья поступила в редакцию 07.09.2023

Одобрена после рецензирования 11.09.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 07.09.2023; approved after reviewing on 11.09.2023; accepted for publication on 27.10.2023