

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТОЕВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИБОРОВ НА ПРИМЕРЕ РАДИОМОНТАЖНОГО ЦЕХА

В.И. Палий¹
С.В. Ванцов²

v.i.paliy@vpk.npomash.ru
van2851@mail.ru

¹ АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов,
Московская обл., Российская Федерация

² МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснована актуальность снижения простоев как неотъемлемой части прибыльности и конкурентоспособности предприятий в современных условиях хозяйствования. Выполнен анализ простоев опытного производства — одного из основных этапов инновационного процесса промышленного предприятия. Выявлены проблемы управления, организации и планирования опытного производства. Рассмотрены основные этапы изготовления опытных образцов приборов. Определена новая характерная особенность опытного производства — наличие случайно возникающих простоев производственного оборудования, связанных с ошибками при проектировании изделий и составлении технической документации на их изготовление. Исследованы характеристики случайно возникающих простоев производственного оборудования, что позволило доказать их пуассоновские свойства. Определены специфические факторы простоев, характерные только для процессов создания опытных образцов приборов. Исследована связь специфических факторов с общими простоями, выявлено, какой фактор является наиболее значимым с точки зрения объема потерь. Наличие такого фактора приводит к пересмотру существующих и формированию принципиально новых подходов к созданию технологических цепочек процесса производства экспериментального или опытного образцов. Опытное производство в составе большинства приборостроительных предприятий обуславливает высокую практическую значимость проведенного анализа

Ключевые слова

Опытно-конструкторские работы, опытный образец, прибор, технологический процесс, инциденты, простои, статистический анализ, регрессионная модель

Поступила 05.04.2022

Принята 10.03.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) занимает все большую долю в инвестиционных расходах, превышая в наукоемких отраслях расходы на приобретение оборудования и строительство [1]. Интенсивность НИОКР в настоящее время во многом определяет уровень экономического развития. В глобальной экономической конкуренции выигрывают те страны, которые обеспечивают благоприятные условия для научных исследований и научно-технического прогресса. На современном этапе развития требуется комплексное исследование способов повышения эффективности функционирования опытного производства предприятий как неотъемлемой части НИОКР, которые реализуются в процессе инновационной деятельности [2, 3]. Такое производство обеспечивает изготовление опытных образцов изделий, на базе которых отрабатываются технические характеристики, и подготовку к их серийному производству. Характерной особенностью опытного производства является наличие случайно возникающих простоев производственного оборудования, связанных с выявлением ошибок как при проектировании изделий, так и при составлении технической документации на их изготовление. В силу этого формируется поток прерываний технологических процессов изготовления опытных образцов приборов и, как следствие, поток простоев (инцидентов). Такой поток носит случайный характер [4] как по возникновению места прерывания, так и по времени простоя технологического оборудования. Эти неотъемлемые для опытного производства факторы приводят к убыткам предприятия. Поэтому исследования по минимизации простоев представляются весьма актуальной задачей.

Постановка задачи. Для минимизации убытков предприятия необходимо решить задачу сокращения простоев путем оптимизации загрузки производственных участков цехов.

В качестве критерия оптимизации загрузки сборочных производственных участков цеха рассматривается суммарный коэффициент загрузки рабочих мест

$$K_3 = \frac{1}{T_{y.n}} \sum_{i=1}^n T_{0i} \rightarrow \max,$$

где $T_{y.n}$ — учетный период времени работы цеха; T_{0i} — время фактического выполнения технологической операции на i -м рабочем месте.

Предположим, что все технологические операции выполняются последовательно и имеют разную продолжительность, т. е. $(i+1)$ -я операция не начнется до полного выполнения i -й операции, что указывает на вероятностный характер целевой функции.

Для определения оптимальной загрузки участков цеха необходимо проанализировать причины, выявить факторы, приведшие к простоям, и определить реальные потери (в нормо-часах), которые зависят от времени простоя. Действенным инструментом для выявления факторов влияния и их значимости для конкретного опытного производства является статистический анализ результатов наблюдений за ходом технологического процесса [5–9].

Выбор метода решения. В ходе исследований собраны статистические данные о простоях технологических процессов при изготовлении и испытании опытных образцов изделий шести наименований. Данные фиксировались в цеховом журнале инцидентов. В результате проведенного анализа выявлена новая особенность опытного производства — к традиционным причинам простоев (поломки оборудования, дефекты материала и др.), типичным для мелкосерийного и серийного производств, добавляются специфические, характерные только для процессов создания опытного образца изделия. Специфические факторы, влияющие на простои производственного процесса, можно выявить при классификации простоев по параметру «ответственный за инцидент». Для определения коэффициента загрузки производственного оборудования необходимо не только исследовать связь потерь с общими простоями, но и выявить, какой из факторов является наиболее значимым с точки зрения объема потерь, что приводит к пересмотру существующих и созданию принципиально новых подходов к формированию технологических цепочек процесса производства экспериментального или опытного образца. Действенным инструментом для выявления таких факторов является аппарат регрессионного анализа данных наблюдений [10–12].

Результаты анализа. Из полученных данных можно выделить две составляющие простоев, а именно простои x_1 (по компетенциям сотрудников отдела конструктора) и x_2 (по компетенциям сотрудников отдела разработчика), и определить меру зависимости между результативным признаком и одним из факторов. Для этого проведен корреляционный анализ для выявления наличия корреляционной связи между зависимой переменной y (общие потери) и независимыми переменными x_1, x_2 . Результаты расчета парных линейных коэффициентов корреляции Пирсона приведены в табл. 1.

Согласно полученным результатам, между исследуемыми показателями существует линейная связь (коэффициент корреляции 0,807). Это объясняется тем, что некоторые ошибки разработчика влекут за собой изменение

конструкции. Получается, что конструктор исправляет свои конструктивные ошибки и дополнительно, не допустив ошибок, исправляет конструкцию из-за ошибок разработчика. Очевидно, изменение методики взаимодействия между отделами может привести к уменьшению времени простоя на производстве [13–15]. При наличии такой связи для построения общей модели оптимизации необходимо исследовать корреляционную зависимость по каждому параметру, так как это влияет на необходимые исходные данные и, как следствие, на адекватность оптимизационной модели.

Таблица 1

Матрица парных коэффициентов корреляции

Коэффициент	Общие потери y	Простои по компетенциям отдела конструктора x_1	Простои по компетенциям отдела разработчика x_2
Общие потери y	1,00000	0,807100*	0,146685
Простои по компетенциям отдела конструктора x_1	0,807100*	1,00000	0,539376
Простои по компетенциям отдела разработчика x_2	0,146685	0,539376	1,00000

* Статистически значимый коэффициент по уровню 0,05.

Корреляционное поле зависимости общих потерь y от простоев по компетенциям конструктора x_1 приведено на рис. 1. Из графика следует, что с ростом значений x_1 наблюдается рост значений y , т. е. имеется прямая взаимосвязь между признаками, видно значительное отклонение исходных данных от линейной зависимости. В этом случае основной характеристикой причин простоев будет уравнение только линейной регрессии, что должно обеспечить выбор таких факторов, при которых возможна последующая их классификация для возможности системного подхода:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \varepsilon, \quad (1)$$

где y — результативный признак общего числа простоев; b_0 , b_1 , b_2 — коэффициенты регрессии; x_1 и x_2 — независимые переменные компетенции конструктора и разработчика; ε — остаток или случайная составляющая. Модель (1) адекватна и хорошо отвечает практическим задачам только

в том случае, если факторы подчиняются нормальному закону распределения. Поэтому важной задачей является статистический анализ нормальности распределения простоев технологических процессов при изготовлении опытных образцов приборов на примере радиомонтажного цеха.

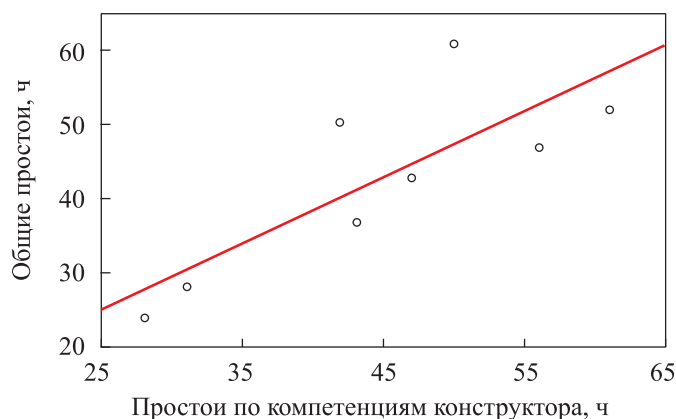


Рис. 1. Корреляционное поле зависимости общих простоев от простоев по компетенциям конструктора

Объем выборок n попадает в диапазон $8 \leq n \leq 50$, поэтому гипотезу нормальности распределения простоев проверяли графическим методом и методом Шапиро — Уилка*. Гистограмма зависимости частоты распределения случаев простоя от времени простоя приведена на рис. 2.

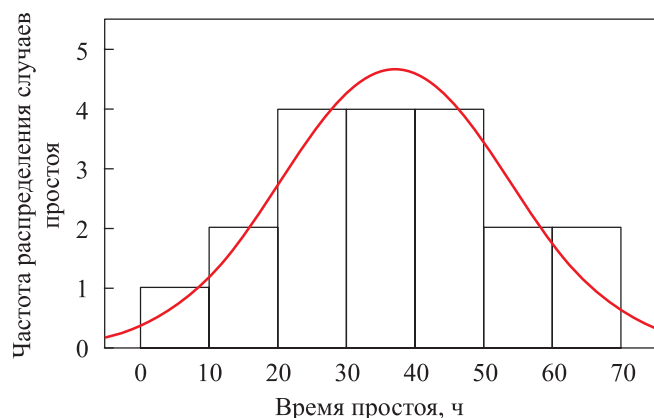


Рис. 2. Гистограмма зависимости частоты распределения случаев простоя от времени простоя

* ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. М., Изд-во стандартов, 2002.

Гистограмма на рис. 2 симметрична и хорошо описывается законом нормального распределения. Приведем значения коэффициентов Шапиро — Уилка: $W = 0,98277$, $p = 0,96959$, что больше, чем выбранный уровень значимости $\alpha = 0,05$, следовательно, нулевая гипотеза (данные получены из нормально распределенной совокупности) не может быть отклонена. Сравнение с нормальным законом распределения приведено на рис. 3.

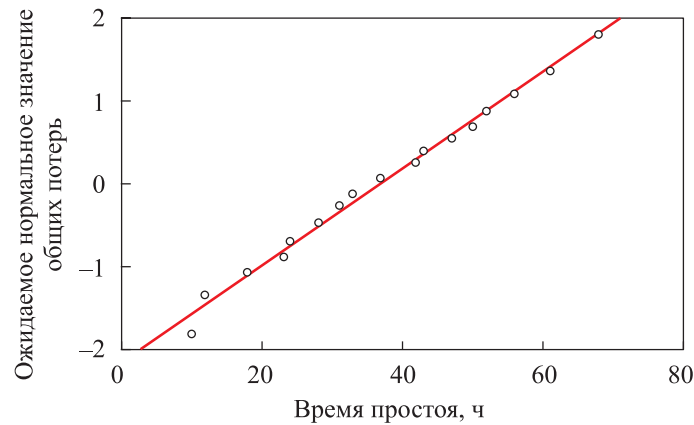


Рис. 3. Нормальный вероятностный график распределения общих потерь

Согласно графику на рис. 3, точки фактических данных расположены вблизи теоретической прямой, систематические выбросы и отклонения отсутствуют. Это свидетельствует о том, что гипотеза о нормальности распределения данных не отклоняется, в целом распределение значений общих потерь можно характеризовать как нормальное распределение.

Приведем следующие данные по оценке общего качества полученной модели: множественные коэффициенты корреляции $R = 0,87687627$ и линейной детерминации $R^2 = 0,768911992$; нормированный коэффициент $R^2 = 0,676476789$; стандартная ошибка составляет 7,10257081; критерий Фишера $F(2,5) = 8,31838917$; уровень значимости критерия Фишера $F \alpha = 0,0256710444$; проведено восемь наблюдений.

Достоверность модели по уровню значимости F -критерия Фишера составляет 0,026, что значительно меньше уровня значимости $\alpha = 0,05$, следовательно, модель значима. Степень точности описания процесса $R^2 = 0,77$, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации — модель хорошо описывает процесс.

Данные по оценке коэффициентов полученной модели приведены в табл. 2. Коэффициенты регрессии определяли методом наименьших квадратов. Значение p для коэффициента регрессии b_1 меньше уровня значимо-

сти $\alpha = 0,05$, следовательно, его можно считать ненулевым. Значение p для коэффициентов регрессии b_0 и b_2 больше уровня значимости $\alpha = 0,05$, следовательно, они могут полагаться нулевыми. Регрессионная модель y для расчета общего числа простоев от простоев x_1 и x_2 по компетенциям конструктора и разработчика будет иметь вид:

$$y = 1,12x_1 + \varepsilon \quad (2)$$

с достоверностью $R^2 = 77\%$. Для оценки адекватности модели необходимо исследовать остатки регрессии. Для этого будем использовать визуальные методы. Полученный график остатков регрессии приведен на рис. 4.

Таблица 2

Оценка коэффициентов полученной модели

Полученная модель	Коэффициент регрессии b_1	Стандартная ошибка b	Критерий Стьюдента t
y -пересечение	0,3211147	11,002333	0,02919
Независимая переменная компетенции конструктора x_1	1,128438	0,28061	4,02135
Независимая переменная компетенции разработчика x_2	-0,250193	0,15691	-1,59447

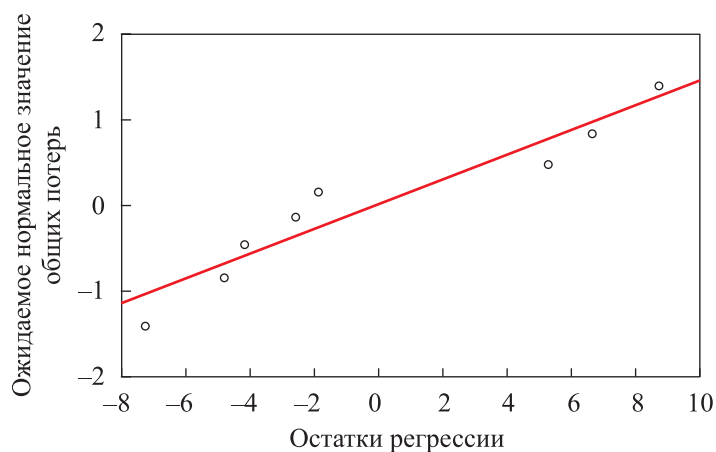


Рис. 4. Нормальный вероятностный график остатков регрессии

Согласно графику (см. рис. 4), остатки регрессии достаточно хорошо ложатся на прямую, соответствующую нормальному закону. Предпо-

жение о нормальном распределении ошибок можно считать выполненным. Полученный график зависимости остатков регрессии от предсказанных значений зависимой переменной приведен на рис. 5.

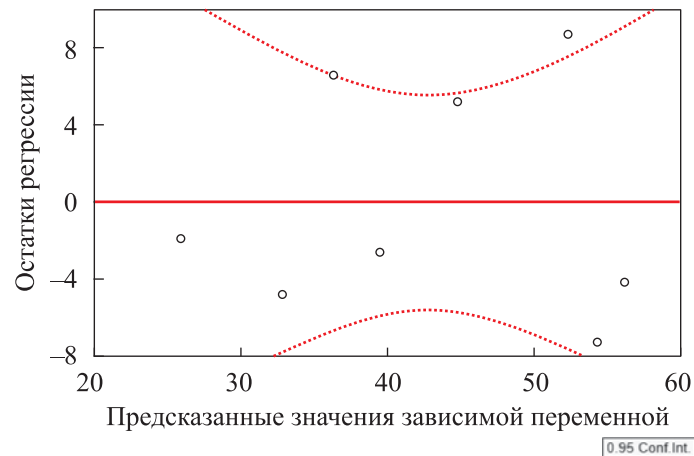


Рис. 5. График зависимости остатков регрессии от предсказанных значений

На графике (см. рис. 5) заметны резко выделяющиеся остатки регрессии, выходящие за границу доверительного интервала, распределенные хаотично относительно прямой средних остатков. Это свидетельствует о том, что модель достаточно адекватно описывает данные и результаты могут быть использованы для построения оптимизационной модели загрузки производственных участков.

Заключение. Выполнен статистический анализ результатов исследования простоев технологических процессов, построена регрессионная модель (2) простоев технологических процессов изготовления опытных образцов приборов. Проведен анализ основных факторов, в результате выявлена зависимость общих простоев от простоев по компетенциям конструктора.

Подтверждена гипотеза о нормальности распределения данных о простоях, построена регрессионная модель. Проверка по критериям и остаткам регрессии показала адекватность линейной корреляционной модели зависимости времени простоев от простоев по компетенциям конструктора, что позволяет разработать алгоритмы оптимизации загрузки производственных участков радиомонтажного цеха при построении математической модели с отказами на основе марковских цепей с пуассоновским потоком распределения вероятности инцидентов по времени. Подобная модель дает возможность:

- определить рабочие места, критически значимые с точки зрения влияния на целевую функцию;
- установить объемы межоперационных переделов, позволяющие выровнять время фактической работы в технологической цепочке;
- уменьшить длительность простоев при выполнении опытно-конструкторских работ в части изготовления опытных образцов приборов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаренко Е.Г. Риски проведения опытно-конструкторских работ в 2017 году. *Наукoведение*, 2017, т. 9, № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/22EVN417.pdf>
- [2] Коновалова Г.И. Методология управления обновлением основных средств машиностроительного предприятия. *Организатор производства*, 2021, т. 29, № 3, с. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.34.80.013>
- [3] Оранова М.В., Ширяева Ю.С. К вопросу планирования опытного производства в процессе инновационной деятельности промышленных предприятий. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2007, № 3, с. 162–164.
- [4] Мордасов Ю.П. Построение однопараметрической, стохастической модели производственного процесса. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2014, т. 8, № 4-5, с. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67317>
- [5] Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. М., ФИЗМАТГИЗ, 1963.
- [6] Боровиков В.П., Боровиков И.П. *Statistica. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows*. М., Филинь, 1998.
- [7] Боровиков В.П. *Statistica. Искусство анализа данных на компьютере*. СПб., Питер, 2001.
- [8] Бьюль А., Цефель П. *SPSS: искусство обработки информации*. СПб., ДиаСофт, 2005.
- [9] Каримов Р.Н. *Обработка экспериментальной информации. Ч. 1. Разведочный анализ. Анализ качественных данных*. Саратов, Изд-во СГТУ, 2002.
- [10] Дрейнер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ*. М., Финансы и статистика, 1986.
- [11] Винн Р., Холден К. *Введение в прикладной эконометрический анализ*. М., Финансы и статистика, 1981.
- [12] Бендат Дж., Пирсол А. *Применение корреляционного и спектрального анализа*. М., Мир, 1979.
- [13] Жилина С.Б. Организация подготовки производства приборостроительного предприятия с непрерывно поступающими изменениями в конструкторской и технологической документациях. Дис. ... канд. техн. наук. Казань, КГТУ им. А.Н. Туполева, 2017.

[14] Швацкий А.В., Казанцев М.А., Капулин Д.В. Методы построения системы электронного документооборота неучтенной конструкторской документации на предприятии радиоэлектронной промышленности. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2014, № 7, с. 767–768.

[15] Жилина С.Б. Автоматизация процесса информационного обеспечения производства приборостроительного предприятия комплектующими изделиями. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2016, т. 18, № 4-7, с. 1372–1380.

Палий Виктор Иванович — инженер АО «ВПК «НПО машиностроения» (Российская Федерация, 143966, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33).

Ванцов Сергей Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии приборостроения МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Палий В.И., Ванцов С.В. Статистический анализ распределения простоев технологических процессов при изготовлении опытных образцов приборов на примере радиомонтажного цеха. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 2 (143), с. 39–50.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-39-50>

STATISTICAL ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES DOWNTIME DISTRIBUTION IN MANUFACTURING PROTOTYPES OF DEVICES ON THE EXAMPLE OF A RADIO ASSEMBLY SHOP

V.I. Paliy¹

S.V. Vantsov²

v.i.paliy@vpk.npomash.ru

van2851@mail.ru

¹JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia”, Reutov, Moscow Region, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper substantiates relevance of reducing downtime as an integral part of the enterprise profitability and competitiveness in modern economic conditions. Downtime of the pilot production, which is one of the main stages of the innovation process at the industrial enterprise, was analyzed. Problems of management, organization and planning in pilot production were revealed. Main stages of the devices manufacturing prototypes were considered. A new characteristic fea-

Keywords

Design and development, prototype, instrument, technological process, incidents, downtime, statistical analysis, regression model

ture of pilot production was revealed, i.e., random production equipment downtime associated with errors in design of the products and preparation of technical documentation for their manufacture. Characteristics of random production equipment downtime was studied, which made it possible to prove their Poisson properties. Specific factors of downtime characterizing only the processes of creating the device prototypes were determined. Relationship between specific factors and general downtime was studied to find the factor most significant in terms of the amount of losses. Presence of such a factor leads to revision of existing and formation of fundamentally new approaches in creating technological chains in production of the experimental or prototype samples. Pilot production as part of the most instruments manufacturing enterprises determines high practical significance of the analysis performed

Received 05.04.2022

Accepted 10.03.2023

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Zakharenko E.G. Risks of carrying out development work in 2017. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 4 (in Russ.).
Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/22EVN417.pdf>
- [2] Konovalova G.I. Methodology for managing the renewal of fixed assets machine-building enterprises. *Organizator proizvodstva* [Organizer of Production], 2021, vol. 29, no. 3, pp. 160–170 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.34.80.013>
- [3] Oranova M.V., Shiryayeva Yu.S. Pilot-scale production planning in the process of innovative activity of industrial enterprises. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2007, no. 3, pp. 162–164 (in Russ.).
- [4] Mordasov Yu.P. Construction of a one-parameter stochastic model of the production process. *Izvestiya MSTU "MAMI"*, 2014, vol. 8, no. 4-5, pp. 27–34 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67317>
- [5] Anderson T.W. An introduction to multivariate statistical analysis. New York, John Wiley & Sons, 2003.
- [6] Borovikov V.P., Borovikov I.P. *Statistica. Statisticheskiy analiz i obrabotka dannykh v srede Windows* [Statistica. Statistical analysis and data processing in Windows]. Moscow, Filin Publ., 1998.
- [7] Borovikov V.P. *Statistica. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere* [Statistica. The art of data analysis on a computer]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001.
- [8] Bühl A., Zöfel P. *SPSS Version 10. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows*. München, Boston, Addison-Wesley, 2000.

- [9] Karimov R.N. Obrabotka eksperimentalnoy informatsii. Ch. 1. Razvedochnyy analiz. Analiz kachestvennykh dannykh [Processing of experimental information. P. 1. Exploratory analysis. Analysis of qualitative data]. Saratov, SSTU Publ., 2002.
- [10] Draper N.R., Smith H. Applied regression analysis. New York, John Wiley & Sons, 1998.
- [11] Wynn R.F., Holden K. An introduction to applied econometric analysis. London, Macmillan, 1974.
- [12] Bendat J.S., Piersol A.G. Engineering applications of correlation and spectral analysis. New York, John Wiley & Sons, 1980.
- [13] Zhilina S.B. Organizatsiya podgotovki proizvodstva priborostroitel'nogo predpriyatiya s nepreryvno postupayushchimi izmeneniyami v konstruktorskoy i tekhnologicheskoy dokumentatsiyakh. Dis. kand. tekhn. nauk [Organization of pre-production of an instrument-making enterprise with continuously incoming changes in design and technological documentation. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Kazan, KSTU im. A.N. Tupoleva, 2017 (in Russ.).
- [14] Shvatskiy A.V., Kazantsev M.A., Kapulin D.V. Methods of design of electronic document management system for unaccounted designer documentation at radioelectronic enterprise. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2014, no. 7, pp. 767–768 (in Russ.).
- [15] Zhilina S.B. An automation of information support process to provide an instrument making plant with component parts. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2016, vol. 18, no. 4-7, pp. 1372–1380 (in Russ.).

Paliy V.I. — Engineer, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya” (Gagarina ul. 33, Reutov, Moscow Region, 143966 Russian Federation).

Vantsov S.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Instrument Engineering, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Paliy V.I., Vantsov S.V. Statistical analysis of the technological processes downtime distribution in manufacturing prototypes of devices on the example of a radio assembly shop. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 2 (143), pp. 39–50 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-39-50>