

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], (входит в Перечень ВАК)
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ], (не входит в Перечень ВАК)
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.09 Материаловедение (по отраслям)] (входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.
Макаревич Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Артюшенко В.М., Воловач В.И.
ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА СЛЕДЯЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ В АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ НА ФОНЕ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ. СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДИСКРИМИНАТОРА. ЧАСТЬ II.....3

Бабин В.С.
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ.....11

Брусков А.А.
НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ, СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СПУТНИКОВ И ПОДСИСТЕМ СПУТНИКОВ.....19

Мороз А.П., Скворцов Р.В.
КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ БОРТОВЫХ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....33

Мосалов О.П., Завьялова Ю.В.
ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШУМА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....42

Овейчук И.А., Скворцов Р.В.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ БЛОКА УСИЛЕНИЯ И КОММУТАЦИИ БОРТОВОЙ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ.....51

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Аббасова Т.С.
РЕАЛИЗАЦИЯ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ В ВЕБ-СЕРВИСЕ.....59

Маслобоев А.В., Путилов В.А.
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЦЕЛЕВЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ (ЧАСТЬ 2. ПОКРЫВАЮЩИЕ И АДЕКВАТНЫЕ СИСТЕМЫ).....67

Мокану Г.С.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РОССИИ.....77

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
16. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
17. **Стрелюк Ю.В.**, д.т.н., профессор
18. **Халиулин В.И.**, д.т.н., профессор
19. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
20. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 17.09.2021
Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,4
Тираж 500 экз.
Заказ № 91-03

Отпечатано в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И
УПРАВЛЕНИЕ**

Мосалов О.П., Ефимова А.О., Соколова Д.А.
**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФА
В ЗАДАЧЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ НОВЫХ
ЗАВИСИМОСТЕЙ.....83**

Сотников А.И.
**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО
ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ.....95**

Шевелев С.В., Семенов А.Б.
**ПРОГРАММНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ КАК СРЕДСТВО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ
СЕТЕЙ WI-FI.....106**

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Васильев А.Н.
**АНАЛИЗ РЫНКА СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ
АККУМУЛЯТОРОВ В РОССИИ И МИРЕ.....116**

Прокопенко А.К., Попов С.А., Корнеев А.А.
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩИХ
НАНОТЕХНОЛОГИЙ.....124**

Чесноков А.В., Андреев В.Н., Тимофеев И.А.
КРЕПЕЖ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ.....135

УДК 621.396.96:621.26

**Точность измерения информационного параметра сигнала
слеющим измерителем в авиационной и ракетно-космической
технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех.
Спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора.
Часть II**

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационные технологии
и управляющие системы,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Рассмотрено и проанализировано влияние мультипликативных помех,
действующих одновременного с аддитивными помехами, на точность измерения
одного информационного параметра слеющим измерителем. Проанализирована
спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора.*

Слеющий измеритель, мультипликативные и аддитивные помехи, точность измерения информационного параметра полезного сигнала, дискриминационная характеристика.

**Accuracy of measurement of the information parameter of the signal by a
tracking meter in aviation and rocket and space technology against the
background of additive and multiplicative interference.
The spectral density of the discriminator output signal.
Part II**

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
head of the Department of information technologies and control systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor
head of the Department «Information and electronic services»,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education,
Volga Region State University of Service, Togliatti

The influence of multiplicative interference acting simultaneously with additive interference on the accuracy of measurement of one information parameter by a tracking meter is considered and analyzed. The spectral density of the discriminator output signal is analyzed.

Tracking meter, multiplicative and additive interference, measurement accuracy of the information parameter of the useful signal, discrimination characteristic.

Спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора при когерентном входном сигнале. Спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора в стационарном режиме определяется выражением

$$G_{\chi} = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\chi(\varepsilon, \tau)\chi(\varepsilon, \tau - s)} \Big|_{s=0} ds - \overline{|\chi(\varepsilon, \tau)|^2} \quad (1)$$

Выходной сигнал дискриминатора можно представить в виде

$$\begin{aligned} \chi(\varepsilon, \tau) &= \frac{1}{8} \operatorname{Re} \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} [\dot{A}(t_1, \varepsilon - \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon - \Delta_l, \tau) - \right. \\ &\quad \left. - \dot{A}(t_1, \varepsilon + \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon + \Delta_l, \tau)] dt_1 dt_2, \right. \\ &\text{где } \dot{A}(t_1, \varepsilon - \Delta_l, \tau) = [\dot{M}(t_1) \dot{U}(t_1, l_0) + \dot{N}(t_1)] \dot{H}(\tau - t_1) U_0^*(t_1, l_0 - \varepsilon + \Delta_l). \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \chi(\varepsilon, \tau)\chi(\varepsilon, \tau - s) &= \frac{1}{128} \operatorname{Re} \left\{ \iiint_{-\infty}^{\infty} [\dot{A}(t_1, \varepsilon - \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon - \Delta_l, \tau) - \right. \\ &\quad \left. - \dot{A}(t_1, \varepsilon + \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon + \Delta_l, \tau)] [A^*(t_3, \varepsilon - \Delta_l, \tau - s) \dot{A}(t_4, \varepsilon - \Delta_l, \tau - s) - \right. \\ &\quad \left. - A^*(t_3, \varepsilon + \Delta_l, \tau - s) \dot{A}(t_4, \varepsilon + \Delta_l, \tau - s)] dt_1 dt_2 dt_3 dt_4 \right\} + \\ &+ \frac{1}{128} \operatorname{Re} \left\{ \iiint_{-\infty}^{\infty} [\dot{A}(t_1, \varepsilon - \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon - \Delta_l, \tau) - \right. \\ &\quad \left. - \dot{A}(t_1, \varepsilon + \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon + \Delta_l, \tau)] [\dot{A}(t_3, \varepsilon - \Delta_l, \tau - s) A^*(t_4, \varepsilon - \Delta_l, \tau - s) - \right. \\ &\quad \left. - \dot{A}(t_3, \varepsilon + \Delta_l, \tau - s) A^*(t_4, \varepsilon + \Delta_l, \tau - s)] dt_1 dt_2 dt_3 dt_4 \right\}. \end{aligned}$$

Путем замены переменных: $t_3 = x$, $t_4 = y$ в первом слагаемом последнего выражения и $t_3 = y$, $t_4 = x$ – во втором слагаемом, можно убедиться, что оба указанных слагаемых равны между собой. При этом

$$\begin{aligned} \chi(\varepsilon, \tau)\chi(\varepsilon, \tau - s) &= \frac{1}{64} \operatorname{Re} \left\{ \iiint_{-\infty}^{\infty} [\dot{A}(t_1, \varepsilon - \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon - \Delta_l, \tau) - \right. \\ &\quad \left. - \dot{A}(t_1, \varepsilon + \Delta_l, \tau) A^*(t_2, \varepsilon + \Delta_l, \tau)] [A^*(t_3, \varepsilon - \Delta_l, \tau - s) \dot{A}(t_4, \varepsilon - \Delta_l, \tau - s) - \right. \\ &\quad \left. - A^*(t_3, \varepsilon + \Delta_l, \tau - s) \dot{A}(t_4, \varepsilon + \Delta_l, \tau - s)] dt_1 dt_2 dt_3 dt_4 \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

После подстановки (2) в (1) и несложных преобразований получим:

$$G_{\chi} = \frac{1}{64} Re \left\{ \iiint_{-\infty}^{\infty} [2N_0 \delta(t_1 - t_3) B_M(t_4 - t_2) \dot{U}_4 U_2^* + 2N_0 \delta(t_4 - t_2) B_M(t_1 - t_3) \dot{U}_1 U_3^* + 2N_0 \delta(t_4 - t_3) B_M(t_1 - t_2) \dot{U}_1 U_2^* + 2N_0 \delta(t_1 - t_2) B_M(t_1 - t_3) \dot{U}_4 U_3^* + \dot{N}_1 N_2^* N_3^* \dot{N}_4 + \dot{M}_1 M_2^* M_3^* \dot{M}_4 \dot{U}_1 U_2^* U_3^* \dot{U}_4] \times f_1(t_1, t_2, t_3, t_4, \varepsilon, \Delta_l) \dot{H}(\tau - t_1) H^*(\tau - t_2) H^*(\tau - s - t_3) \times \dot{H}(\tau - s - t_4) dt_1 dt_2 dt_3 dt_4 ds \right\}_{\varepsilon=0} - [\chi(\varepsilon, \tau)]_{\varepsilon=0}^2, \quad (3)$$

где

$$f_1(t_1, t_2, t_3, t_4, \varepsilon, \Delta_l) = [U_0^*(t_1, \varepsilon - \Delta_l) \dot{U}_0(t_2, \varepsilon - \Delta_l) - U_0^*(t_1, \varepsilon + \Delta_l) \dot{U}_0(t_2, \varepsilon + \Delta_l)] \times [\dot{U}_0(t_3, \varepsilon - \Delta_l) U_0^*(t_4, \varepsilon - \Delta_l) - \dot{U}_0(t_3, \varepsilon + \Delta_l) U_0^*(t_4, \varepsilon + \Delta_l)],$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}(l_0, t_i) = \sqrt{E} \dot{U}_0(l_0, t_i); \dot{N}_i = \dot{N}(t_i); \dot{M}_i = \dot{M}(t_i), (i = 1, 2, 3, 4);$$

$$B_M(t_1 - t_2) = \overline{M(t_1) M^*(t_2)}.$$

Рассмотрим последовательно интегралы, соответствующие отдельным слагаемым функции, заключенной в квадратные скобки (3). Первый интеграл:

$$I_1(\varepsilon, \Delta_l) = 2N_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} \delta(t_1 - t_3) B_M(t_4 - t_2) \dot{U}(t_4) U^*(t_2) f_1(t_1, t_2, t_3, t_4, \varepsilon, \Delta_l) \times \dot{H}(\tau - t_1) H^*(\tau - t_2) H^*(\tau - s - t_3) \dot{H}(\tau - s - t_4) dt_1 dt_2 dt_3 dt_4 ds. \quad (4)$$

С учетом выражения для $f_1(t_1, t_2, t_3, t_4, \varepsilon, \Delta_l)$

$$I_1(\varepsilon, \Delta_l) = I_{11}(\varepsilon, \Delta_l) + I_{11}(\varepsilon, -\Delta_l) - I_{12}(\varepsilon, \Delta_l) + I_{12}(\varepsilon, -\Delta_l), \quad (5)$$

где

$$I_{11}(\varepsilon, \Delta_l) = \frac{8EN_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) g^*(\Omega) |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^2 \dot{\lambda}(0, \Omega) d\Omega = 16EN_0 I'_{11}(\varepsilon, \Delta_l),$$

$$I_{12}(\varepsilon, \Delta_l) = \frac{8EN_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) g^*(\Omega) \dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega) \dot{\lambda}^*(\varepsilon + \Delta_l, \Omega) \times \dot{\lambda}(2\Delta_l, \Omega) d\Omega = 16EN_0 I'_{12}(\varepsilon, \Delta_l). \quad (6)$$

Если вместо функции $\delta(t_1 - t_3) B_M(t_4 - t_2) \dot{U}_4 U_2^*$ в (4) подставить функцию $\delta(t_4 - t_2) B_M(t_1 - t_3) \dot{U}_1 U_3^*$, то получим выражение для $I_2(\varepsilon, \Delta_l)$. Нетрудно видеть, что $I_2(\varepsilon, \Delta_l) = I_1^*(\varepsilon, \Delta_l)$.

Можно далее показать, что $I_3(\varepsilon, \Delta_l) = I_4(\varepsilon, \Delta_l) = 0$. При вычислении $I_5(\varepsilon, \Delta_l)$ учтем, что для нормального белого шума $\overline{\dot{N}_1 N_2^*} = 2N_0 \delta(t_1 - t_2)$, $\overline{\dot{N}_1 \dot{N}_2} = 0$. Тогда

$$\overline{\dot{N}_1 N_2^* N_3^* \dot{N}_4} = 4N_0^2 \delta(t_1 - t_2) \delta(t_3 - t_4) + 4N_0^2 \delta(t_1 - t_3) \delta(t_2 - t_4).$$

С учетом последнего соотношения интеграл $I_5(\varepsilon, \Delta_l)$ равен

$$I_5(\varepsilon, \Delta_l) = I_{51}(0, 0) - I_{51}(0, \Delta_l), \quad (7)$$

где

$$I_{51}(0, \Delta_l) = \frac{16N_0^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\Phi}^2(\Omega) \dot{\lambda}(2\Delta_l, \Omega) \dot{\lambda}(-2\Delta_l, \Omega) d\Omega = 32N_0^2 I'_{51}(0, \Delta_l). \quad (8)$$

Наибольшие трудности возникают при вычислении интеграла $I_6(\varepsilon, \Delta_l)$, включающего четвертый смешанный момент функции помеховой модуляции $\dot{M}(t)$, выражение для которого в общем случае отсутствуют.

Примем для дальнейших расчетов, что флюктуации функции помеховой модуляции имеют нормальное распределение. В этом случае

$$\overline{\dot{M}_1 \dot{M}_2^* \dot{M}_3^* \dot{M}_4} = \alpha_0^4 + B_V(t_1 - t_2)B_V(t_4 - t_3) + \alpha_0^2 B_V(t_1 - t_2) + \alpha_0^2 B_V(t_4 - t_3) + B_V(t_1 - t_3)B_V(t_4 - t_2) + \alpha_0^2 B_V(t_1 - t_3) + \alpha_0^2 B_V(t_4 - t_2). \quad (9)$$

С учетом (9) имеем

$$I_6(\varepsilon, \Delta_l) = [\overline{\chi(\varepsilon, \tau)}]^2 + I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) + I_{61}(\varepsilon, -\Delta_l) - I_{62}(\varepsilon, \Delta_l) + I_{63}(\varepsilon, \Delta_l) + I_{63}(\varepsilon, -\Delta_l) - I_{64}(\varepsilon, \Delta_l), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) &= \frac{8E^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V^2(\Omega) |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^4 d\Omega = 16E^2 I'_{61}(\varepsilon, \Delta_l), \\ I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) &= \frac{16E^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V^2(\Omega) |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega)|^2 |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega)|^2 d\Omega = \\ &= 32E^2 I'_{62}(\varepsilon, \Delta_l), \\ I_{63}(\varepsilon, \Delta_l) &= 32\alpha_0^2 E^2 |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, 0)|^4 = 32\alpha_0^2 E^2 I'_{63}(\varepsilon, \Delta_l), \\ I_{64}(\varepsilon, \Delta_l) &= 64\alpha_0^2 E^2 |\dot{\lambda}(\varepsilon + \Delta_l, 0)|^2 |\dot{\lambda}(\varepsilon - \Delta_l, 0)|^2 = 64\alpha_0^2 E^2 I'_{64}(\varepsilon, \Delta_l). \end{aligned} \quad (11)$$

При отсутствии систематических ошибок измерения в соответствии с выражением

$$|\dot{\lambda}(-\Delta_l)|^2 = |\dot{\lambda}(\Delta_l)|^2 \quad [1], \quad |\dot{\lambda}(\Delta_l, 0)|^2 = |\dot{\lambda}(-\Delta_l, 0)|^2; \quad |\dot{\lambda}(-\Delta_l, \Omega)|^2 = |\dot{\lambda}(\Delta_l, -\Omega)|^2; \quad G_V(\Omega) = G_V(-\Omega), \quad \text{тогда} \quad I_{61}(0, \Delta_l) = I_{61}(0, -\Delta_l), \quad I_{64}(0, \Delta_l) = 2I_{63}(0, \Delta_l) = 2I_{63}(0, -\Delta_l).$$

С учетом сказанного для рассматриваемого нами случая отсутствия систематических ошибок измерения после подстановки (4)-(11) в (3), получим

$$\begin{aligned} G_\chi &= \frac{N_0 E}{2} \operatorname{Re}\{I'_{11}(0, \Delta_l) + I'_{11}(0, -\Delta_l) - I'_{12}(0, \Delta_l)\} + \\ &+ \frac{N_0^2}{2} \operatorname{Re}\{I'_{51}(0, 0) - I'_{51}(0, \Delta_l)\} = \frac{E^2}{2} \{I'_{61}(0, \Delta_l) - I'_{62}(0, \Delta_l)\}. \end{aligned}$$

Полученное выражение для спектральной плотности флюктуаций G_χ – чрезвычайно громоздко, а его анализ в общем виде затруднен. В связи с этим анализ влияния модулирующих помех на функцию G_χ в данной статье будет опущен.

Спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора при входном сигнале в виде последовательности некогерентных импульсов. При вычислении спектральной плотности $G_{\chi 0}$ для сигнала в виде последовательности некогерентных импульсов после подстановки принимаемого сигнала в виде [1]

$$\dot{U}(t) = \sum_k \dot{U}_1(t - kT_n) \exp\{j\varphi_{0,k}\},$$

в (3) под знаком пятикратного интеграла оказывается произведение четырех сумм с различными индексами суммирования.

Поскольку начальные фазы отдельных импульсов независимы, то есть $\overline{\exp j(\varphi_k - \varphi_m)} = 0$ при $k \neq m$,

суммирование под знаком пятикратного интеграла вида (3) должно проводиться для t_1, t_2 и t_3, t_4 по одинаковым индексам.

Тогда интеграл, включающий первое слагаемое в квадратных скобках выражения типа (3), после интегрирования по t_3 будет

$$\begin{aligned} I_1(\varepsilon, \Delta_l) = & 2N_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} \int \sum_k B_M(t_4 - t_2) \dot{H}(\tau - t_1) H^*(\tau - t_2) H^*(\tau - s - t_1) \times \\ & \times \dot{H}(\tau - s - t_4) \dot{U}(t_4 - kT_n) U^*(t_2 - kT_n) \left[|\dot{U}_0(t_1 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l)|^2 \times \right. \\ & \times \dot{U}_0(t_2 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l) U_0^*(t_4 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l) - U_0^*(t_1 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l) \times \\ & \times \dot{U}_0(t_2 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l) \dot{U}_0(t_2 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l) U_0^*(t_4 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l) - \\ & - U_0^*(t_1 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l) \dot{U}_0(t_1 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l) \dot{U}_0(t_1 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l) U_0^*(t_4 - kT_n, \varepsilon - \Delta_l) + \\ & \left. + |\dot{U}_0(t_1 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l)|^2 \dot{U}_0(t_2 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l) U_0^*(t_4 - kT_n, \varepsilon + \Delta_l) \right] dt_1 dt_2 dt_4 ds. \end{aligned} \quad (13)$$

Проведя замену переменных $t_1 - kT_n = x, t_2 - kT_n = y, t_4 - kT_n = z$, введя преобразование Фурье от $B_M(t_2 - t_4), \dot{H}(\tau - t_1), H^*(\tau - t_2), H^*(\tau - s, t_1), \dot{H}(\tau - s - t_4)$ и учитывая соотношения учитывая соотношение [2]

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\{jkT_n(\omega_1 - \omega_2)\} = \frac{1}{T_n} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{2\pi k}{T_n} - \omega_1 + \omega_2\right),$$

получим

$$\begin{aligned} I_1(\varepsilon, \Delta_l) = & \frac{16EN_0}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_k \exp\left\{j\tau \frac{2\pi k}{T_n}\right\} \iiint_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) \dot{g}(\omega_1) g^*\left(\omega_1 - \frac{2\pi k}{T_n}\right) \times \\ & \times G_{\Phi}(\omega_2) \left[\dot{\rho}(0, \omega_1 - \omega_2) \dot{\rho}\left(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_1 + \frac{2\pi k}{T_n}\right) \rho^*(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_2) - \right. \\ & - \dot{\rho}(2\Delta_l, \omega_1 - \omega_2) \dot{\rho}\left(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_1 + \frac{2\pi k}{T_n}\right) \rho^*(\varepsilon + \Delta_l, \Omega - \omega_2) - \\ & - \dot{\rho}(-2\Delta_l, \omega_1 - \omega_2) \dot{\rho}\left(\varepsilon + \Delta_l, \Omega - \omega_1 + \frac{2\pi k}{T_n}\right) \rho^*(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_2) + \\ & \left. + \dot{\rho}(0, \omega_1 - \omega_2) \dot{\rho}\left(\varepsilon + \Delta_l, \Omega - \omega_1 + \frac{2\pi k}{T_n}\right) \rho^*(\varepsilon + \Delta_l, \Omega - \omega_2) \right] d\Omega d\omega_1 d\omega_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Из (14) непосредственно видно, что $I_1(\varepsilon, \Delta_l)$ зависит от времени τ . То есть в рассматриваемом случае спектральная плотность G_{χ} также будет зависеть от τ . Эта зависимость обусловлена импульсным характером принимаемого сигнала.

Как уже отмечалось выше, постоянная времени сглаживающих цепей следящего измерителя, следующих за дискриминатором, много больше периода повторения входного сигнала, поэтому целесообразно рассматривать среднее по времени значение спектральной плотности выходного сигнала дискриминатора,

то есть интегралы $I_1 - I_6$, входящие в выражение для G_x необходимо усреднить по времени τ на интервале, равному периоду повторения сигнала T_n .

После такого усреднения с учетом соотношения

$$\int_{-T_n/2}^{T_n/2} \exp\left\{j\tau \frac{2m\pi}{T_n}\right\} = T_n \frac{\sin(\pi m)}{\pi m} = T_n \delta_m$$

для $I_1(\varepsilon, \Delta_l)$ получим

$$\langle I_1(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \langle I_{11}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle + \langle I_{11}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle - \langle I_{12}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle - \langle I_{12}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \langle I_{11}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle &= \frac{16EN_0}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \dot{\rho}(0, \omega_1 - \omega_2) B_{SM}(\varepsilon - \Delta_l, \varepsilon + \Delta_l; \omega_1, \omega_2) \times \\ &\times G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = \frac{16EN_0}{T_n} \langle I'_{11}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle; \\ \langle I_{12}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle &= \frac{16EN_0}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \dot{\rho}(2\Delta_l, \omega_1 - \omega_2) B_{SM}(\varepsilon - \Delta_l, \varepsilon + \Delta_l; \omega_1, \omega_2) \times \\ &\times G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = \frac{16EN_0}{T_n} \langle I'_{12}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle; \end{aligned} \quad (16)$$

$B_{SM}(\varepsilon - \Delta_l, \varepsilon + \Delta_l; \omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) \dot{\rho}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega + \omega_1) \rho^*(\varepsilon + \Delta_l, \Omega - \omega_2) d\Omega$ – функция корреляции нецентрированного сигнала единичной энергии, искаженного мультипликативной помехой, на выходе согласованного фильтра.

Как и при измерении параметров когерентного сигнала, для рассматриваемого случая $\langle I_2(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \langle I_1^*(\varepsilon, \Delta_l) \rangle$, $\langle I_3(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \langle I_4(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = 0$.

После необходимых преобразований для усредненного на периоде повторения значения функции $\langle I_5(\varepsilon, \Delta_l) \rangle$ получим

$$\langle I_5(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \langle I_{51}(0, 0) \rangle - \langle I_{52}(0, \Delta_l) \rangle - \langle I_{52}(0, -\Delta_l) \rangle, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \langle I_{51}(0, 0) \rangle &= \frac{32N_0^2}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) |\dot{\rho}(0, \omega_1 - \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 = \\ &= \frac{32N_0^2}{T_n} \langle I'_{51}(0, 0) \rangle, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \langle I_{52}(0, 0) \rangle &= \langle I_{51}(0, 0) \rangle = \frac{16N_0^2}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) |\dot{\rho}(2\Delta_l, \omega_1 - \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 = \\ &= \frac{16N_0^2}{T_n} \langle I'_{52}(0, \Delta_l) \rangle. \end{aligned}$$

При отсутствии систематической ошибки $\langle I_{52}(0, \Delta_l) \rangle = \langle I_{52}(0, -\Delta_l) \rangle$.

При вычислении функции $\langle I_6(\varepsilon, \Delta_l) \rangle$ рассмотрим два случая:

– флуктуации функции помеховой модуляции имеют нормальное распределение;

– функция помеховой модуляции записывается в виде $\dot{M}(t) = \exp\{j\varphi(t)\}$, причем фазовые искажения – медленные на интервале длительности одного импульса последовательности.

Кроме того, будем полагать, что интервал корреляции флуктуаций функции помеховой модуляции меньше периода повторения сигнала.

В первом из указанных случаев после необходимых преобразований с учетом (9) получим

$$\langle I_6(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = [\overline{\chi(\varepsilon, \Delta_l)}]^2 + \langle I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle + \langle I_{61}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle - \langle I_{62}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle - \langle I_{62}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle + Re\{\langle I_{63}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle + \langle I_{63}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle - \langle I_{64}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle - \langle I_{64}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle\}, \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} \langle I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle &= \frac{16E^2}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) |B_s(\varepsilon + \Delta_l, \varepsilon + \Delta_l; \omega_1, \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 = \\ &= \frac{16E^2}{T_n} \langle I'_{61}(0, \Delta_l) \rangle, \\ \langle I_{62}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle &= \frac{16E^2}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) |B_s(\varepsilon + \Delta_l, \varepsilon - \Delta_l; \omega_1, \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 = \\ &= \frac{16E^2}{T_n} \langle I'_{62}(0, \Delta_l) \rangle, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\langle I_{63}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \frac{32E^2}{T_n} \frac{\alpha_0^2}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) |B_s(\varepsilon + \Delta_l, \varepsilon - \Delta_l; \omega_1, \omega_2)|^2 \times \times \rho^*(\varepsilon + \Delta_l, -\omega_1) \dot{\rho}(\varepsilon + \Delta_l, -\omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = \frac{32E^2 \alpha_0^2}{T_n} \langle I'_{63}(0, \Delta_l) \rangle,$$

$$\langle I_{64}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \frac{32E^2}{T_n} \frac{\alpha_0^2}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}(\omega_1) G_{\Phi}(\omega_2) |B_s(\varepsilon + \Delta_l, \varepsilon - \Delta_l; \omega_1, \omega_2)|^2 \times \times \rho^*(\varepsilon + \Delta_l, -\omega_1) \dot{\rho}(\varepsilon - \Delta_l, -\omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = \frac{32E^2 \alpha_0^2}{T_n} \langle I'_{64}(0, \Delta_l) \rangle,$$

$$B_s(\varepsilon + \Delta_l, \varepsilon - \Delta_l; \omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \dot{\rho}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega + \omega_1) \rho^*(\varepsilon - \Delta_l, \Omega + \omega_2) d\Omega$$

– функция автокорреляции флюктуаций сигнала единичной энергии, искаженного мультипликативной помехой, на выходе согласованного фильтра.

Найдем теперь I_6 для второго случая, когда мультипликативная помеха представляет собой медленные чисто фазовые искажения. В этом случае

$$\overline{\dot{M}_1 M_2^* M_3^* \dot{M}_4} = \overline{\exp[\varphi(t_1) - \varphi(t_2) - \varphi(t_3) + \varphi(t_4)]} = \theta_4^{\varphi}(1, -1, -1, 1),$$

где $\theta_4^{\varphi}(1, -1, -1, 1)$ – четырехмерная характеристическая функция фазовых искажений.

При условии медленных фазовых искажений на интервале, равном длительности одного импульса последовательности, $\varphi(t)$ может быть представлен рядом Тейлора.

Ограничившись двумя первыми членами этого ряда, получим

$$\overline{\dot{M}_1 M_2^* M_3^* \dot{M}_4} \approx \overline{\exp[\varphi'(t_1)(t_1 - t_2 - t_3 + t_4)]} = \theta_4^{\varphi'}(t_1 - t_2 - t_3 + t_4). \quad (21)$$

Таким образом, при медленных фазовых искажениях четвертый смешанный момент $\dot{M}(t)$ может быть выражен через одномерную характеристическую функцию производной фазовых искажений $\theta_1^{\varphi'}(x)$ при значении параметра

$$x = t_1 - t_2 - t_3 + t_4.$$

С учетом (21) можно получить следующее выражение для $\langle I_6(\varepsilon, \Delta_l) \rangle$:

$$\langle I_6(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \langle I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle + \langle I_{61}(\varepsilon, -\Delta_l) \rangle - \langle I_{62}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle, \quad (22)$$

где

$$\langle I_{61}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \frac{16E^2}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} G_\theta(\Omega) G_\Phi(\omega_1) G_\Phi(\omega_2) \times \\ \times |\dot{\rho}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_1)|^2 |\dot{\rho}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_2)|^2 d\Omega d\omega_1 d\omega_2,$$

$$\langle I_{62}(\varepsilon, \Delta_l) \rangle = \frac{16E^2}{T_n} \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} G_\theta(\Omega) G_\Phi(\omega_1) G_\Phi(\omega_2) \times \\ \times |\dot{\rho}(\varepsilon - \Delta_l, \Omega - \omega_1)|^2 |\dot{\rho}(\varepsilon + \Delta_l, \Omega - \omega_2)|^2 d\Omega d\omega_1 d\omega_2,$$

$$G_\theta(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \theta_1^{\omega'}(x) \exp\{-j\Omega x\} dx$$

– преобразование Фурье от характеристической функции (21), совпадающее по форме записи с плотностью вероятностей производной от фазовых искажений, то есть с плотностью вероятностей изменений мгновенной частоты сигнала, обусловленных мультипликативной помехой.

Подставляя (13)-(20) в (3), получим для случая, когда флуктуации помеховой модуляции распределены нормально,

$$\langle G_\chi \rangle = \frac{EN_0}{2T_n} \operatorname{Re}\{\langle I'_{11}(0, \Delta_l) \rangle + \langle I'_{11}(0, -\Delta_l) \rangle - \langle I'_{12}(0, \Delta_l) \rangle - \langle I'_{12}(0, -\Delta_l) \rangle\} + \\ + \frac{N_0^2}{2T_n} \langle I'_{51}(0, 0) \rangle - \frac{N_0^2}{4T_n} [\langle I'_{52}(0, \Delta_l) \rangle + \langle I'_{52}(0, -\Delta_l) \rangle] + \frac{E^2}{4T_n} [\langle I'_{61}(0, \Delta_l) \rangle + \\ + \langle I'_{61}(0, -\Delta_l) \rangle - \langle I'_{62}(0, \Delta_l) \rangle - \langle I'_{62}(0, -\Delta_l) \rangle] + \frac{E^2 \alpha_0^2}{2T_n} \operatorname{Re}\{\langle I'_{62}(0, \Delta_l) \rangle + \langle I'_{62}(0, -\Delta_l) \rangle - \\ - \langle I'_{64}(0, \Delta_l) \rangle - \langle I'_{64}(0, -\Delta_l) \rangle\}, \quad (23)$$

где функции $\langle I'_{km} \rangle$ отличаются от $\langle I_{km} \rangle$ лишь коэффициентами.

Для случая медленных чисто фазовых искажений в (23) вместо всех членов с $\langle I'_{6i} \rangle$ ($i = 1, 2, 3, 4$) необходимо подставить (22) и вычесть $[\chi(\varepsilon, \Delta_l)]^2$.

Выводы. Таким образом, произведен анализ точности измерения информационного параметра сигнала следящим измерителем в авиационной и ракетно-космической технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех.

Осуществлен анализ спектральной плотности выходного сигнала дискриминатора при когерентном входном сигнале, а также спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора при входном сигнале в виде последовательности некогерентных импульсов.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Точность измерения информационного параметра сигнала следящим измерителем в авиационной и ракетно-космической технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех. Крутизна дискриминационной характеристики. Часть 1 // Информационно-технологический вестник. 2021. № 2(24).
2. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех. М.: Советское радио, 1961.

УДК 621.39

Перспективные технологии повышения эффективности функционирования специализированных авиационных и ракетно-космических систем связи

В.С. Бабин, аспирант кафедры информационных технологий и управляющих систем,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Развитие авиационных и ракетно-космических систем специальной связи в настоящий момент характеризуется увеличением объемов речевых информационных сообщений. Речь, как наиболее привычная форма общения, позволяет выражать эмоции и личные качества говорящего, чего гораздо сложнее добиться иными путями информационного обмена. Растущий спрос на голосовую связь порождает необходимость выработки перспективных технологий повышения эффективности функционирования таких систем, анализ которых и проведен в данной статье.

Перспективные технологии, повышение эффективности, специализированные системы связи.

Promising technologies for improving the efficiency of specialized aviation and rocket-space communication systems

V.S. Babin, post-graduate student of the Department of information technologies and control system,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The development of aviation and rocket-space systems of special communication is currently characterized by an increase in the volume of speech information messages. Speech, as the most familiar form of communication, allows you to express the emotions and personal qualities of the speaker, which is much more difficult to achieve in other ways of information exchange. The growing demand for voice communication creates the need to develop promising technologies to improve the efficiency of such systems, the analysis of which is carried out in this article.

Promising technologies, improving efficiency, specialized communication systems.

В течение непродолжительного временного отрезка был совершен значительный скачок в истории развития современной связи и информационных технологий. Сделанные в такой сравнительно короткий исторический отрезок времени открытия и изобретения позволили получить практически любому члену общества новые и уже ставшие привычными средства связи.

Параллельно с этим постепенно трансформировался и понятийный аппарат, стали возникать такие понятия как информационное общество, связь и телекоммуникации, информация и информатизация, информационные технологии и ресурсы. Данные понятия уже находятся на слуху у большинства современных людей, и в тоже время позволяют охарактеризовать отрасль экономики – связь и информационные технологии, как наиболее динамично развивающуюся и одну из лидирующих в мире.

Особое место в данной отрасли целесообразно отвести системам специальной связи. Под «специальной связью» в данной статье понимается канал связи, предназначенный исключительно для ограниченного круга лиц (осуществляющих управление государством) канал, позволяющий осуществлять обмен информацией с соблюдением комплекса требований по информационной безопасности.

Ключевыми характеристиками систем специальной связи на практике принято считать нижеследующие:

- Системы специальной связи, как правило, имеют «государственный статус», т.е. предназначены для органов государственного управления;
- Передаваемая по таким системам связи информация должна быть защищена с точки зрения информационной безопасности (например, конфиденциальности информации целесообразно обеспечивать с помощью методов криптографической защиты);
- Системы специальной связи, как правило, базируются на технических компонентах, которые обособлены по отношению к сетям общего пользования;
- На законодательном уровне разработан комплект документов, направленных на регулирование данной сферы (например, федеральный закон «О связи», федеральный закон «Об информации, информатизации и защите информации» и т.д.).

Важно отметить, что информация, передаваемая с помощью систем специальной связи, представляет огромную ценность с точки зрения государственного управления (может относиться к государственной тайне). В связи с этим требования к информационной безопасности таких систем должны быть организованы на высоком уровне и носить комплексный характер. Такие свойства информации как доступность, целостность и конфиденциальность должны быть реализованы в системах специальной связи на должном уровне, поскольку от наличия в ключевой момент доступа у высших лиц государства к данной информации и в тоже время ее конфиденциальность по отношению к третьим лицам, может зависеть принятие важных решений, имеющих далеко идущие последствия. Целостность информации в таких системах также важна, поэтому защита от

деструктивных воздействий в системах специальной связи также играет немало важную роль.

Многообразие угроз информационной безопасности относительно систем специальной связи сводится к следующим основным позициям: угрозы деструктивного воздействия со стороны технических разведок в интересах завладения секретной информацией и заполнения контроля над государственными системами управления; внедрение закладных устройств в программно-аппаратные средства. Основными же объектами информационной безопасности в системах специальной связи целесообразно считать: сами информационные ресурсы, средства информатизации и автоматизации, на которых происходит непосредственно обработка информации, а также технические средства (и может быть помещения), посредством которых происходит обмен (прием-передача) информации.

На практике наиболее распространенной формой представления речи принято считать сигнал – получаемое на выходе акустоэлектрического преобразователя электрическое колебание. При работе с речевыми сигналами важно учитывать алфавит того языка, на котором речь произносится, потому что число фонем и число букв во всех языках разное, например, у русского языка 42 звука речи – 36 согласных и 6 гласных [1, 2].

Таким образом, перечисленные аспекты, а именно понимание механизмов образования речи, представляются ключевыми для реализации процесса ее обработки.

Процесс формирования речевого сообщений в наиболее общем виде представляет собой некую последовательность, начинающуюся с формирования в мозге человека некоего сообщения, заканчивая работой артикуляционного аппарата, приводимого в действие нервными импульсами (рис. 1).



Рисунок 1 – Артикуляционный аппарат человека

Рассматривая отдельно взятый звук в качестве случайного процесса, которому присущ определенный набор характеристик, можно получить следующие количественные показатели [3, 4]:

- Длительность отдельных звуков речи 20-350 мс;
- Длительность гласных звуков 200 мс, а согласных – 80 мс;
- Уровень речи имеет динамический диапазон 35-45 дБ.

Важной характеристикой также выступает частота основного тона (далее – OT ; F_{OT}), – частота колебаний голосовых связок или частота первой гармоники спектра вокализованных звуков; $T_0 = 1 / F_{OT}$ – период основного тона голоса (рис. 2).

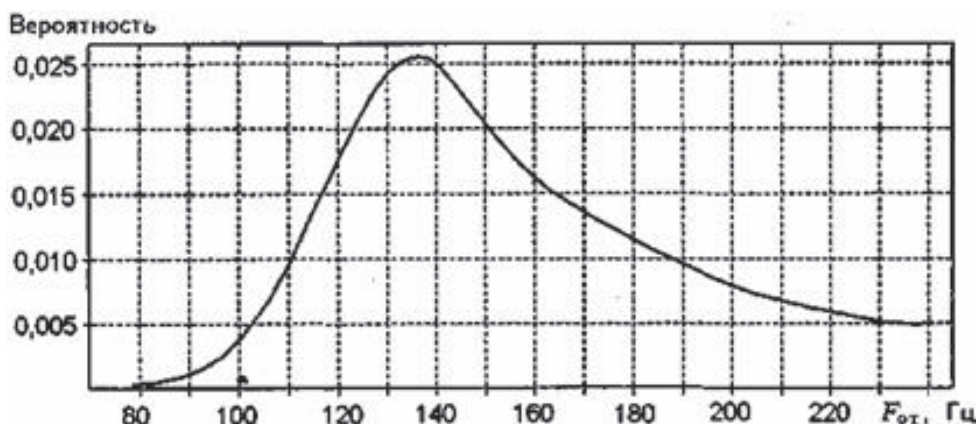


Рисунок 2 – Плотность распределения вероятности частоты основного тона

Другой, не менее важной, характеристикой речи является ее спектр. Для русской речи спектр можно представить в виде усредненных значений мужских и женских голосов (рис. 3).

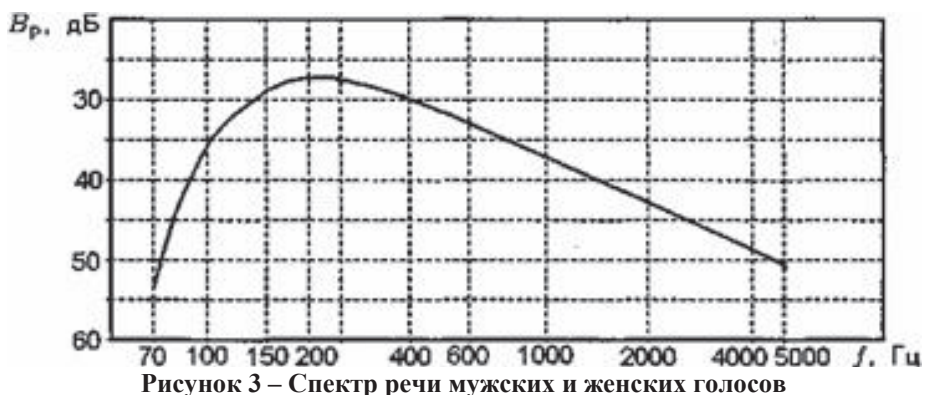


Рисунок 3 – Спектр речи мужских и женских голосов

Из рисунка 3 видно, что основная энергия находится в области низких частот, а максимальное значение спектральной плотности составляет 300 Гц.

Звуки речи также различны и по своему спектральному составу. Так гласные и звонкие согласные имеют энергетический спектр, отличный от иных звуков (рис. 4). Данное явление находит объяснение в природе формирования подобных звуков.

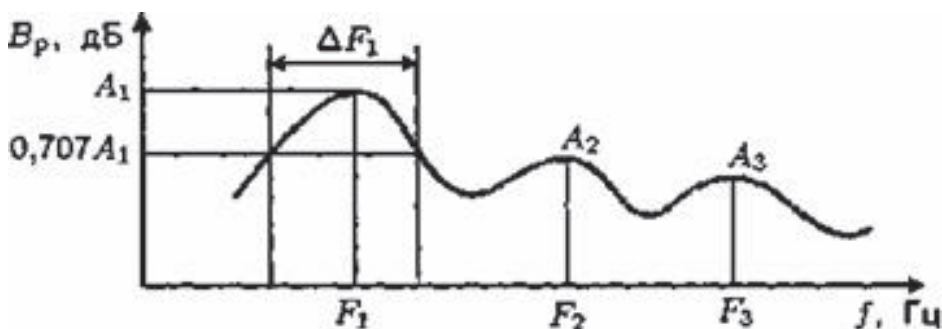


Рисунок 4 – Формантный рисунок вокализованных звуков

Анализируя существующие подходы к передаче речевых сигналов, целесообразно предварительно представить данный процесс в виде общей блок-схемы (рис. 5).



Рисунок 5 – Модель цифровой системы связи

Как видно из рисунка 5 первым звеном в данной модели выступает источник сообщения. Данный источник отвечает непосредственно за формирование сообщения, которое далее поступает на специальное устройство – аналогово-цифровой преобразователь (далее – АЦП).

Полученный сигнал последовательно преобразуется и с помощью кодера источника (кодера речи) кодируется, чтобы убрать избыточность. Такой цифровой сигнал имеет одну из ключевых характеристик – скорость цифрового представления, измеряемую в битах в секунду. Подобное сжатие информации позволяет добиться приемлемого качества передачи речи, и в то же время значительно снизить скорость цифрового потока. Заключительным шагом в данном блоке является непосредственно помехоустойчивое (избыточное) кодирование, позволяющее своевременно обнаруживать и исправлять возможные ошибки в процессе передачи сигнала [5, 6].

На завершающем этапе передачи сигнал модулируется и направляется через радиоблок. С технической точки зрения модулятор в данной схеме можно рассматривать как блок, отвечающий за формирование синусоидального сигнала, несущего информацию. Данный сигнал впоследствии переносится в радиодиапазон с присущими ему спектральными параметрами. От того насколько эффективно будут использованы имеющиеся спектральные ресурсы, зависит не только качество передаваемого сигнала, но и отсутствие искажений сигналов, передаваемых по соседним областям спектра.

Радиоблок в данной схеме представляет собой высокочастотный (далее – ВЧ) блок, необходимый для усиления радиосигнала. Такой усилитель должен обладать большим динамическим диапазоном и должен функционировать в нелинейной области своих характеристик.

На принимающей сигнал стороне происходят процессы обратные тем, что были на стороне отправителя. Так после усиления и фильтрации принятый сигнал проходит процесс демодуляции. Здесь основной задачей является определение последовательности импульсов, полученных после ВЧ обработки. Затем происходит выделение данных из сигнала и их преобразование в двоичные последовательности.

Из двоичной последовательности на канальном декодере выделяется информационная составляющая, и декодированный сигнал, пройдя цифро-аналоговое преобразование (далее – ЦАП), попадает в приемник сообщений.

К числу наиболее важных требований по отношению к процессам преобразования и передачи информации относятся высокое качество передаваемого сигнала при низкой временной задержке. Важно отметить, что в данном процессе наибольшее влияние на качество речи оказывает скорость цифрового потока на выходе кодера речи – чем ниже скорость цифрового потока, тем выше качество передаваемого сигнала (речь носит естественные тона, отсутствуют прерывания и т.д.)

В интересах достижения оптимального сочетания скорости и качества на практике применяются алгоритмы сжатия речи. Данные алгоритмы также влияют в конечном итоге и на стоимость услуг связи.

Исторически сложились два направления кодирования речи: кодирование формы сигнала (далее – КФС) и кодированием источника сигнала.

КФС метод базируется на использовании статистических характеристик речевого сигнала и подразумевает аппроксимацию формы речевого сигнала во времени (табл. 1).

Таблица 1 – Методы преобразования речи

Вид преобразования речи	Устройства преобразования	Алгоритмы кодирования-декодирования речи	Скорость передачи, кбит/с
Кодирование формы сигнала	Кодеры формы сигнала	Импульсно - кодовая модуляция (ИКМ)	64
		Дифференциальная ИКМ (ДИКМ)	48/52/56
		Адаптивная дельта-модуляция (АДМ)	40
		Адаптивная дифференциальная ИКМ (АДИКМ)	32
Параметрическое компандирование (кодирование) речи	Вокодеры	Спектрально-временные (полосный, формантный, гармонический)	1,2-4,8
		Кодирование на основе линейного предсказания (LPC)	
	Гибридные кодеры	Линейное предсказание с возбуждением от остатка предсказания (RELPC)	4,8-16
		Линейное предсказание с многоимпульсным возбуждением (MPE-LPC)	
		Линейное предсказание с долговременным предсказанием (LTP-LPC)	
		Линейное предсказание с регулярным импульсным возбуждением (RPE-LPC)	
		Линейное предсказание с кодовым возбуждением (CELP)	
		Линейное предсказание с кодовым возбуждением и малой задержкой (LD-CELP)	
		Линейное предсказание с возбуждением алгебраическим кодом (ACELP)	
		Линейное предсказание с векторным возбуждением (VSELP)	
		Адаптивное кодирование с предсказанием (APC)	
		Метод квантования по максимуму правдоподобия (MP-MLQ)	

Из анализа представленной выше таблицы можно сделать вывод, что существует ряд сложностей, препятствующих созданию таких кодеков, которые обеспечивали бы минимальные скорости передачи при сохранении максимального качества речи:

речевой сигнал нельзя рассматривать как стационарный процесс;

рассматривая речь как колебаниями сложной формы, возникает проблема зависимости формы такого сигнала от множества индивидуальных параметров – тембра голоса, интонации и т.д.;

особую сложность представляет решение такой проблемы, как формализация критерия верности передачи, который в большей степени является субъективным. В связи с этим решить задачу определения качественных характеристик источника речевого сигнала лишь методами теории передачи информации затруднительно.

Таким образом, использование только лишь параметрических методов накладывает ряд неприемлемых ограничений на выходе – худшее (по сравнению с другими методами) звучание речи и высокая чувствительность к шуму. В связи с этим именно применение на практике гибридных методов позволит повысить эффективность функционирования специализированных систем связи.

Литература

1. Федеральный закон «О связи» от 07.07.2003 № 126-ФЗ.
2. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27.07.2006 № 149-ФЗ.
3. ГОСТ Р ИСО 9921-2013 Национальный стандарт Российской Федерации. Эргономика. Оценка речевой связи. Ergonomics. Assessment of speech communication.
4. РД 45.083-99 Рекомендации по обеспечению стойкости аппаратурных комплексов объектов проводной электросвязи к воздействию дестабилизирующих факторов.
5. Макаренко С.И. Описательная модель сети связи специального назначения // Журнал «Системы управления, связи и безопасности» № 2. 2017.
6. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов // Журнал «Радиотехнические и телекоммуникационные системы». № 4 (12). 2013.

УДК 629.7.017.1

**Непараметрический, статистический анализ надежности спутников
и подсистем спутников**

А.А. Брусков, аспирант кафедры информационных технологий
и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Надёжность долгое время признавалась главным качеством для систем космического аппарата. К сожалению, в литературе имеются лишь ограниченные данные об отказах на орбите и статистическом анализе надежности спутников. Для восполнения этого пробела был проведен непараметрический анализ надежности спутников для спутников на околоземной орбите. В этой работе я расширяю статистический анализ надежности спутников и исследую надежность подсистем космических аппаратов. Поскольку набор данных подвергнут цензуре, я широко использую оценщик Каплана-Мейера для расчета функций надежности и получаю доверительные интервалы для непараметрических результатов надежности для каждой подсистемы спутника.

Надежность, распределение Вейбулла, сбои, аномалии, оценщик Каплана-Мейера, спутники.

**Nonparametric, statistical analysis of the reliability of satellites
and satellite subsystems**

A.A. Bruskov, post-graduate student of the Department of Information Technologies
and Control Systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Reliability has long been recognized as the main quality for spacecraft systems. Unfortunately, there is only limited data in the literature on failures in orbit and statistical analysis of the reliability of satellites. To fill this gap, a nonparametric analysis of the reliability of satellites for satellites in near-Earth orbit was carried out. In this work, I expand the statistical analysis of the reliability of satellites and investigate the reliability of spacecraft subsystems. Since the data set is censored, I make extensive use of the Kaplan-Meyer estimator to calculate reliability functions and obtain confidence intervals for nonparametric reliability results for each spootik subsystem.

Reliability, Weibull distribution, failures, anomalies, Kaplan-Meyer estimator, satel-

lites.

Введение. Надёжность уже давно признается в качестве одного из главных качеств космических систем при проектировании космических аппаратов. Например, высокая надежность космического аппарата может быть достигнута с помощью более качественных, надежных деталей, резервированием подсистем или с помощью более обширных испытаний. К сожалению, несмотря на признание ее важности, в технической литературе имеются ограниченные данные об отказах на орбите и статистическом анализе надежности спутников. В результате в литературе сохраняется отсутствие эмпирической основы для решения вопросов, касающихся, например, существования или отсутствия «младенческой смертности» у спутников. С одной стороны, распределения Вейбулла с параметром формы около 1,7 (значение, обычно используемое для спутниковых систем) обычно используются для моделирования надежности спутника. Напоминаю, что параметр формы Вейбулла больше единицы представляет увеличивающуюся частоту отказов или отказов, вызванных износом конструкций, но без «младенческой смертности».

Хотя диапазон применимости предыдущих исследований, четко не определен, существует очевидное несогласие в отношении важного вопроса поведения частоты отказов спутников. Однако исследователи надежности космических аппаратов сходятся во мнении, что экспоненциальное распределение времени жизни не может совпадать с данными, полученными из опыта полета, и что прогнозы надежности спутника с постоянной частотой отказов нереалистичны [1].

Чтобы помочь устранить это противоречие в отношении существования или отсутствия «младенческой смертности» у спутников и тем самым заполнить пробел в технической литературе в отношении надежности спутников, я собрал данные об отказе 1584 спутников на околоземной орбите, успешно запущенных в период с января 1990 года по октябрь 2020 года. Затем я провел непараметрический анализ надежности спутников и продемонстрировал, что распределение Вейбулла с «младенческой смертностью» (т.е. параметр формы меньше единицы) надлежащим образом фиксирует поведение спутников при отказах на орбите. Напомним, что функция плотности вероятности Вейбулла может быть выражена как:

$$f(t; \beta, \theta) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \right], \text{ где } t \geq 0 \quad (1)$$

где β – параметр формы и θ -параметр масштаба, оба неотрицательные. Связанной функцией надежности Вейбулла является:

$$R(t; \beta, \theta) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \right] \quad (2)$$

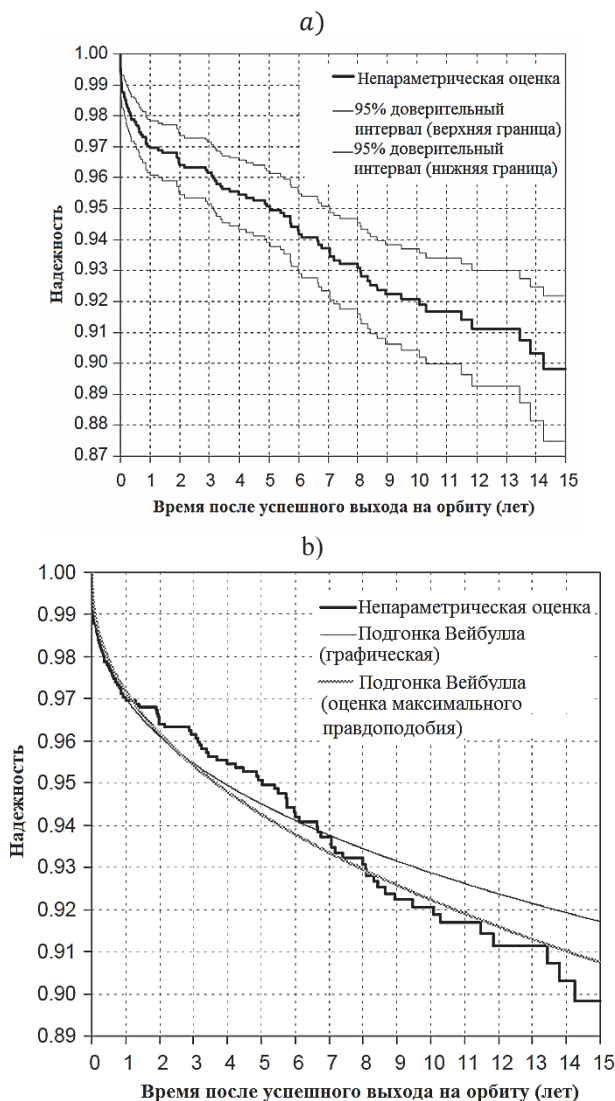


Рисунок 1 – Надежность спутника с 95% доверительными интервалами (а) и непараметрическая надежность спутника и подгонка Вейбулла (б)

На рисунке 1а представлен результат вычислений для непараметрической надежности спутника с 95% доверительными интервалами. На рисунке 1б показано распределение Вейбулла, соответствующее непараметрической надежности, полученное двумя методами:

- графический метод: параметр формы посадки Вейбулла составляет $\beta-0,3875$, а параметр масштаба $\theta-8316$ лет;
- процедура оценки максимального правдоподобия: параметр формы посадки Вейбулла составляет $\beta-0,4521$, а его параметр масштаба $\theta-2607$ лет.

Таблица 1 – Шаблон сбора данных для статистического анализа надежности спутников (спутники не показаны в хронологическом порядке)

Номер образца	Дата запуска	Дата отказа (если произошел отказ)	Подсистема виновника	Дата проведения исследования (если сбой не произошло)
Космический корабль № 1	06/11/1998	15/11/1998	Подсистема телеметрии, слежения и управления	-
Космический корабль № 2	01/03/2002	-	-	02/10/2008
...
Космический корабль № 1584	26/04/2018	28/03/2020	Механизмы	-

В этой работе я расширяю статистический анализ надежности спутников и исследую надежность подсистем спутников, то есть дополнительно уточняю анализ от системного уровня до отказов на уровне подсистем. Цель состоит в том, чтобы внести дополнительный вклад в полное выявление механизмов отказа спутников. Результаты, представленные в этой работе, должны оказаться полезными для космической промышленности, например, в деле пересмотра программ испытаний или обеспечения эмпирической основы для распределения избыточности подсистем и планов повышения надежности.

Описание базы данных и данных. Для этого исследования я использовал базу данных SpaceTrak [2]. Эта база данных считается наиболее авторитетной базой данных в космической отрасли с подробной информацией и данными об отказах для более чем 6400 космических аппаратов.

По каждому космическому аппарату я собираю из базы данных:

- 1) Дата его запуска;
- 2) Дата его отказа, если произошел сбой;
- 3) Подсистема, идентифицированная как вызвавшая отказ космического аппарата, далее именуемая «подсистемой виновника»;
- 4) «Цензурированное время», если не произошло отказа. Этот последний момент дополнительно объясняется в следующем разделе, где я обсуждаю цензуру данных и оценку Каплана-Мейера. Шаблон сбора данных и образцы данных для анализа приведены в таблице 1.

В базе данных распознается несколько спутниковых подсистем. В этой работе я изучал следующие 11 подсистем:

1. Гироскоп / солнечный датчик.
2. Двигатель / Топливная система двигателя.
3. Функционирования антенны.
4. Центральная вычислительная машина.
5. Механизмы.
6. Полезная нагрузка.
7. Аккумуляторная батарея.

8. Распределения электроэнергии.
9. Развертывание солнечных батарей.
10. Работа солнечной батареи.
11. Телеметрии, слежения и управления.

Например, привод солнечной батареи, если его отказ приводит к неразвертыванию солнечных батарей, будет классифицироваться по подсистеме № 9 в предыдущем списке.

Когда не удалось идентифицировать подсистему-виновника, приведшую к отказу спутника, отказ космического аппарата приписывается в базе данных к категории «неизвестный».

Я, статистически анализируя «коллективное» поведение спутников, запущенных недавно, могу утверждать, что ни один из спутников не является действительно одинаковым, и что каждый спутник работает в отдельной среде (на разных орбитах или даже на одной и той же орбите, где спутники, если они не расположены совместно, подвергаются воздействию различных сред космической среды).

Следствием этого является то, что в отсутствии «массового производства спутников», статистический анализ данных об отказе спутников и надежности сталкивается с дилеммой выбора между вычислением точной «средней» надежности спутников или получением, неопределенной «специфической» надежности спутников. Эта дилемма объясняется следующими двумя возможными подходами.

Первый подход заключается в объединении различных спутников и анализе их «коллективного» поведения при отказе на орбите (предполагая, что времена отказа спутников независимы и одинаково распределены). Преимущество этого состоит в том, что можно работать с относительно большой выборкой и, таким образом, получать некоторую точность и узкий доверительный интервал для анализируемой «коллективной» надежности. Недостаток заключается в том, что это допущение может быть нереалистичным, а вычисленная «коллективная» надежность может не отражать специфическую надежность конкретного типа космического аппарата.

Второй подход заключается в специализации данных, например, для конкретной платформы космического аппарата или типа миссии, или для спутников на определенных орбитах. Преимущество этого заключается в том, что анализируемая надежность зависит от типа рассматриваемого космического аппарата (это больше не «коллективная» надежность на орбите). Недостатком является то, что размер выборки уменьшается, и, как следствие, доверительный интервал расширяется (т.е. результаты становятся все более неопределенными).

С учетом имеющегося количества спутников (несколько тысяч) специализация данных, которая могла бы уменьшить размер выборки до менее чем ста точек данных, привела бы к значительно большим доверительным интервалам и, таким образом, к высокорассредоточенным или неопределенным расчетам надежности «конкретных» спутников.

В этой статье я принимаю первый подход, то есть анализирую «коллективное» поведение отказов спутников и подсистем околоземной орбиты. Я также

обсуждаю второй подход и анализирую надежность спутников на орбите по типу полета, орбите и массовым категориям (также доступны данные по конкретным спутниковым платформам и по производителю). Тем не менее, независимо от выбора выборки, статистический подход и анализ, представленные в этом документе, остаются верными.

В следующем разделе я использую собранные данные (таблица 1) для проведения непараметрического анализа надежности всех спутниковых подсистем, идентифицированных ранее.

Непараметрическая надежность спутниковых подсистем. Далее я использую то, что упоминается в базе данных как отказ I класса, то есть отказ подсистемы, приводящий к выводу спутника из эксплуатации, для вычисления надежности рассматриваемой подсистемы. Только подсистема функционирования антенны не показывает отказа I класса в данном наборе данных. Таким образом, я изучаю 10 оставшихся подсистем и неизвестную категорию.

Цензурированная выборка данных и оценщик Каплана-Мейера. Цензура происходит, когда данные для статистического анализа набора элементов являются неполными, что и происходит в моей выборке. Более конкретно, есть цензура IV типа, то есть правая цензура с шахматным вводом. Это означает следующее:

- 1) Спутники в этой выборке активируются в различные моменты времени (т.е. спутники запускаются в различные календарные даты), но все эти времена активации в выборке известны;
- 2) Даты отказов и цензура являются стохастическими;
- 3) Цензура происходит либо потому, что спутник удаляется из выборки до сбоя, либо потому, что спутник все еще работает в конце окна наблюдения.

Кроме того, при анализе отказа, обусловленного конкретной подсистемой, отказ, обусловленный любой другой подсистемой, представляет собой дополнительную форму цензуры. Цензура требует тщательного внимания: получение функции надежности из цензурированных данных о жизни не является тривиальным, и важно, чтобы это было сделано должным образом, чтобы результаты были значимыми и непредвзятыми. В этой работе я беру и использую оценщик Каплана-Мейера, который лучше всего подходит для работы с тем типом цензуры, который имеется в образце. Вывод формулы оценки Каплана-Мейера можно найти в [3]. Оценщик Каплана-Мейера функции надежности с цензурированными данными задается:

$$\hat{R}(t) = \prod_{\substack{\text{все } i \\ \text{такие, что } t_{(i)} \leq t}} \hat{p}_i = \prod_{\substack{\text{все } i \\ \text{такие, что } t_{(i)} \leq t}} \frac{n_i - 1}{n_i} \quad (3)$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{(i)} - \text{время до } i\text{-го отказа (в порядке возрастания)} \\ \hat{p}_i = \frac{n_i - 1}{n_i} \\ n_i = \text{количество операционных блоков непосредственно перед } t_{(i)} = \\ n - [\text{число цензурированных блоков непосредственно перед } t_{(i)}] - \\ [\text{количество отказавших блоков непосредственно перед } t_{(i)}] \end{array} \right. \quad (4)$$

Если в моменты времени отказа имеются связи, скажем, что спутник отказал точно в $t_{(i)}$ – эта ситуация называется связью кратности 1, тогда в выражении (4) заменяется на m

$$\hat{p}_i = \frac{n_i - m_i}{n_i} \quad (5)$$

Если время цензуры точно равно времени сбоя, принимается, что цензура произошла сразу после сбоя (то есть на бесконечно малом временном интервале после сбоя).

Анализ доверительных интервалов. Оценщик Каплана-Мейера (Выражение (3)) обеспечивает оценку максимального правдоподобия надежности, но не информирует нас о дисперсии вокруг $\hat{R}(t_i)$. Эта дисперсия фиксируется дисперсией или стандартным отклонением оценщика, которое затем используется для получения верхней и нижней границ, например 95% доверительного интервала (то есть 95% вероятности того, что фактическая надежность упадет между двумя вычисленными границами, при этом анализ Каплана-Мейера предоставляет нам наиболее вероятную оценку). Дисперсия оценщика обеспечивается формулой Гринвуда:

$$v\hat{a}r[R(t_i)] = \sigma^2(t_i) = [\hat{R}(t_i)]^2 \sum_{j < i} \frac{m_j}{n_j(n_j - m_j)} \quad (6)$$

И 95% доверительный интервал определяется, как

$$R_{95\%}(t_i) = \hat{R}(t_i) \pm 1.96\sigma(t_i) \quad (7)$$

Графики надежности спутниковых подсистем. С помощью этого краткого обзора функционала, оценщика Каплана-Мейера и доверительных интервалов теперь можно анализировать надежность спутниковых подсистем из наборов данных (по одному для каждой подсистемы). Для проанализированных спутников 1584 и рассмотренных 11 подсистем я получил 17 424 времени цензуры и отказа. Данные обрабатываются с помощью оценщика Каплана-Мейера (Выражение (3)), и получаются графики Каплана-Мейера надежности всех подсистем спутников, перечисленных в разделе 2. Кроме того, когда Выражение (6) и (7) применяются к данным из выборки, получим 95% кривые доверительного интервала. Графики Каплана надежности всех рассматриваемых здесь спутниковых подсистем вместе с 95% доверительными интервалами показаны на рисунке 2а и 2б.

Рисунки 2а и 2б гласят следующее. Рассмотрим подсистему гироскопа, её надежность показана в левом верхнем углу рисунке 2а: после успешного запуска надежность подсистемы гироскопа падает примерно до 99,5% через 4 года на

орбите. Точнее –

$$\hat{R}(t) = 0.9948 \text{ для } 1146 \text{ дней} < t < 1967 \text{ дней, что составляет } 3,137 \text{ года} \\ < t < 5,385 \text{ года}$$

Кроме того, надежность этой подсистемы будет падать между 99,09% и 99,86% с вероятностью 95% (доверительный интервал) за этот период времени. Та же самая «сетка считывания» на рисунке 2а и 2б относительно оцененной надежности $\hat{R}(t)$ и доверительного интервала применяется ко всем другим подсистемам. Например, надежность подсистемы телеметрии, слежения и управления (правый нижний угол на рис. 2б) падает до 0,984 через 8 лет на орбите. Необходимо обратить внимание на особую непараметрическую надежность развертывания солнечной батареи (константа), которая обусловлена одноразовым характером этой «подсистемы» (или, точнее, этой фазы подсистемы солнечной батареи). В следующем разделе приводится параметрическая подгонка Вейбулла для непараметрических результатов надежности каждой из этих подсистем.

Параметрическая надежность спутниковых подсистем. Непараметрический анализ дает мощные результаты, так как расчет надежности не ограничен тем, чтобы соответствовать какому-либо заранее определенному распределению срока службы. Однако эта гибкость делает непараметрические результаты не простыми и не удобными для использования в различных целях, часто встречающихся при проектировании. Кроме того, некоторые тенденции и закономерности отказов более четко идентифицируются и распознаются с помощью параметрического анализа. Существует несколько возможных методов подгонки параметрического распределения под непараметрическую оценочную функцию надежности (обеспечиваемую оценщиком Каплана-Мейера), таких как графические процедуры и процедуры вывода.

Далее будут кратко рассмотрены графики вероятности; я использую их для обоснования выбора распределения Вейбулла для моделирования надежности спутниковой подсистемы.

Вероятностный график или графическая оценка. Я начинаю обзор методов подгонки с простого в использовании и визуально привлекательного графического метода, известного как вероятностный график (или график позиций). Я использую этот метод, чтобы продемонстрировать, что распределение Вейбулла является подходящим выбором для захвата поведения отказа спутников и подсистем спутников.

Графики вероятностей представляют собой простую графическую методику для подгонки параметрического распределения к непараметрическим данным. Эта методика основана на том факте, что некоторые параметрические модели, такие как экспоненциальное распределение или распределение Вейбулла, могут иметь свою функцию надежности, линеаризованную с помощью конкретного математического преобразования. Рассмотрим, например, распределение Вейбулла. Взяв натуральный логарифм обеих сторон выражения(2), получим:

$$\ln(R(t)) = -\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta} \quad (8)$$

Взяв снова натуральный логарифм (отрицательных) двух сторон этого

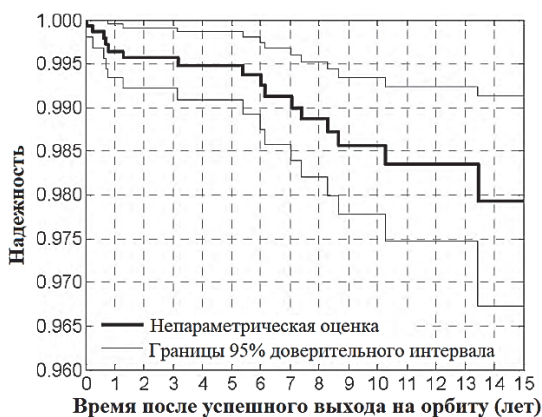
равенства, получим:

$$\ln[-\ln R(t)] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\Theta) \quad (9)$$

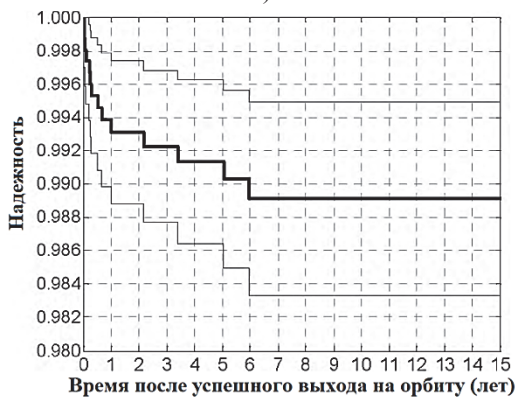
Выражение (9) эквивалентно Выражению (2)

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\Theta} \right)^\beta \right] \leftrightarrow \ln[-\ln R(t)] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\Theta) \quad (10)$$

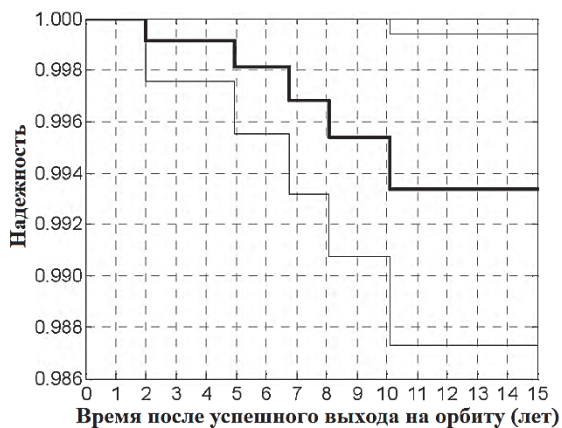
Теперь предположим, что я не знаю базового параметрического распределения, но у меня есть непараметрическая оценка надежности для элемента, $\hat{R}(t_i)$, в различные моменты времени t_i . Если я строю график $\ln[-\ln \hat{R}(t_i)]$ как функцию $\ln(t_i)$, то получаю точки данных, которые выровнены в пространство $(\ln(t); \ln[-\ln \hat{R}(t)])$ – результирующий граф называется графиком Вейбулла – тогда можно сделать вывод, что эффективные данные возникают из распределения Вейбулла (то есть основное параметрическое распределение действительно является распределением Вейбулла). Кроме того, наклон линии, которая соответствует этим точкам данных, предоставляет нам параметр формы β распределения Вейбулла. А параметр масштаба Θ может быть вычислен, например, по значению пересечения линии с осью Y .



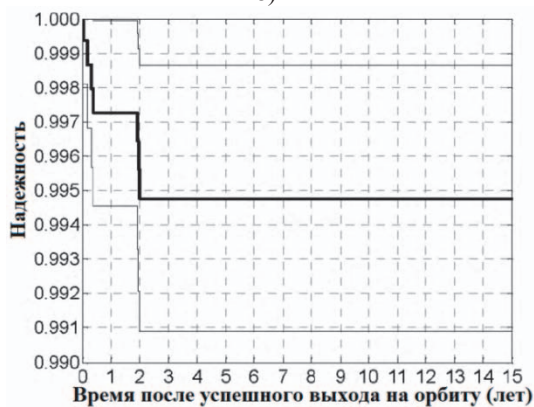
а)



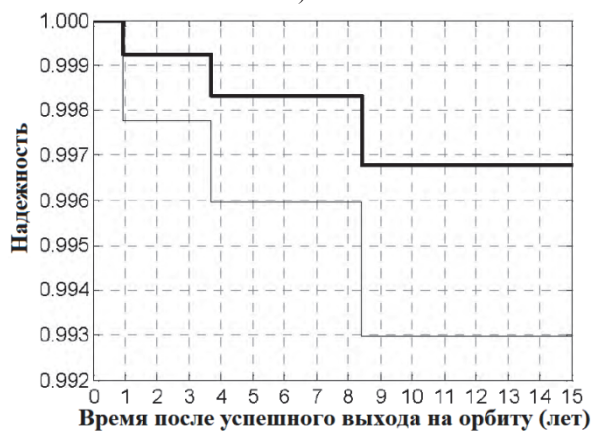
б)



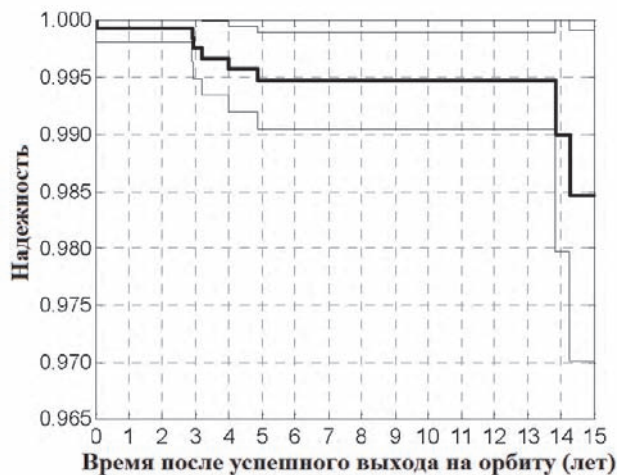
а)



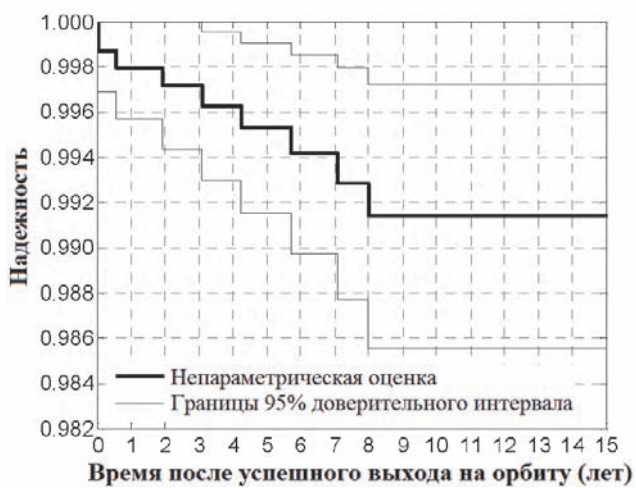
б)



в)



e)



ж)



з)

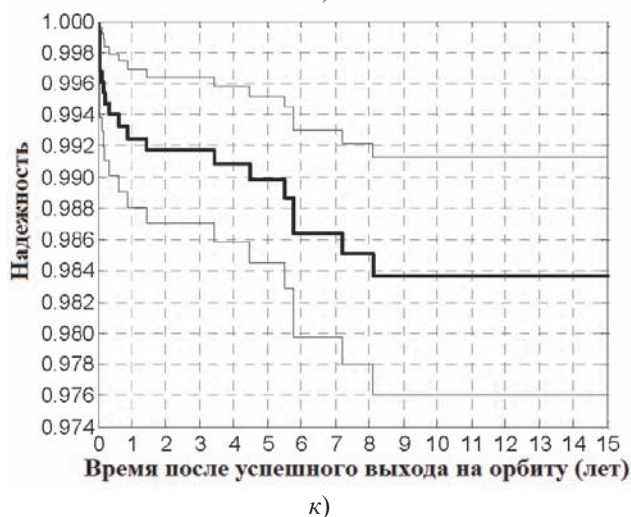
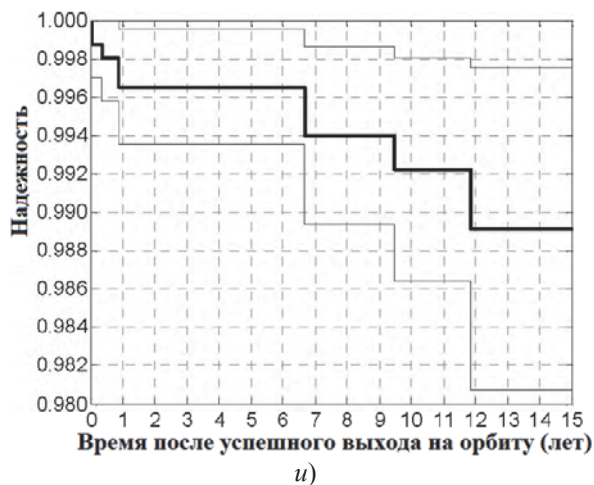


Рисунок 2 – Надежность подсистем космического аппарата с 95% доверительными интервалами, где: *a* – гироскоп / солнечный датчик; *b* – двигатель / топливная система двигателя; *v* – ЦВМ; *z* – механизмы; *d* – полезная нагрузка; *e* – аккумуляторная батарея; *ж* – распределения электроэнергии; *з* – разворачивание солнечных батарей; *и* – работа солнечной батареи; *к* – телеметрии, слежения и управления

Параметрические распределения, отличные от графиков Вейбулла, также имеют свои соответствующие «графики вероятности» (например, графики экспоненциальной, нормальной или логнормальной вероятности), и если вычисленные дискретные непараметрические данные выровнены на этих графиках вероятности, то можно сделать вывод, что данные эффективно возникают из ассоциированного распределения.

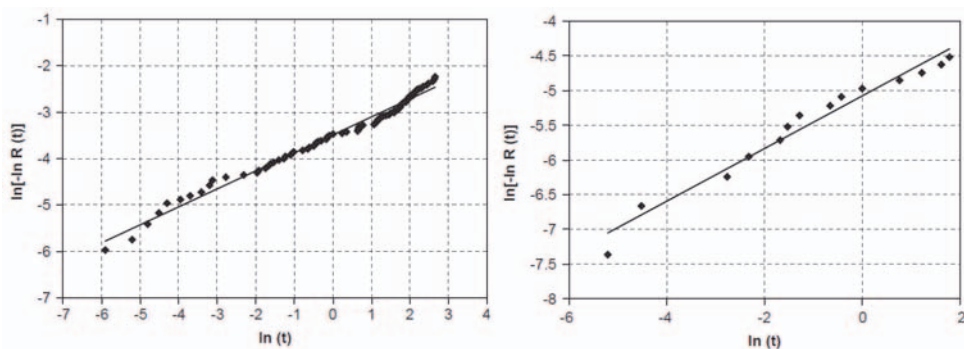


Рисунок 3 – Графики надежности спутника (слева) и двигателя, топливной подсистемы (справа)

Я ограничиваю себя в настоящей работе графиками Вейбулла (обратите внимание, что если нижележащее распределение является экспоненциальным, его можно легко идентифицировать на графике Вейбулла, когда наклон линии, соответствующей параметру формы, равен единице). На рисунке 3 показаны графики Вейбулла для надежности спутника и надежности подсистемы двигателя, топливной подсистемы.

Точки данных на рисунке 3 хорошо выровнены, таким образом, обеспечивая указание на то, что посадка Вейбулла действительно является хорошей как для надежности спутника, так и для надежности подсистемы двигателя, топливной системы.

Аналогичные результаты получены для других подсистем. Поэтому я могу утверждать, что надежность спутников и надежность спутниковых подсистем (за исключением развертывания солнечной батареи) может быть надлежащим образом аппроксимирована распределениями Вейбулла.

Вероятностные графики или графические методы параметрического вписывания имеют мощное преимущество в своей простоте: их легко настроить, они не требуют задействованных вычислений и дают немедленную (визуальную) информацию о достоверности (или нет) предполагаемого параметрического распределения. Кроме того, параметры предполагаемого распределения (в данном случае распределения Вейбулла) можно вычислить простой наименьшей квадратной линейной подгонкой данных на вероятностных графиках. Однако графики вероятностей имеют некоторые недостатки при использовании для расчета фактических параметров распределения. Например:

1) При распределениях, требующих логарифмических временных преобразований (например, Вейбулла или логнормального распределения), чрезмерный вес придается временам ранних отказов, и, как следствие, результирующая параметрическая подгонка смещается (в сторону большей точности для ранних отказов).

2) В результате (i) соответствие наименьших квадратов на графике вероятности не приводит к минимальной оценке дисперсии фактического распределения.

3) Оценка параметров может быть плохой, если время отказа не распре-

делено должным образом по диапазону данных.

Если цель или задачи проведения исследования надежности не требуют «точных» результатов, то графики вероятностей или графические оценки адекватны для проведения параметрических посадок. Для целей этой работы я использовал графики вероятностей для обоснования выбора распределения Вейбулла для моделирования надежности спутниковой подсистемы.

Выводы. Надёжность долгое время признавалась главным конструктивным атрибутом космических систем. Космические аппараты – это ценные активы, стоимость которых часто превышает сотни миллионов долларов и местоположение или операционная среда которых делает их физически недоступными для технического обслуживания для компенсации ненадежности. Несмотря на эти наблюдения, в технической литературе имеются ограниченные данные о статистическом анализе надежности космических аппаратов. В этой работе я заполнил этот пробел, проведя непараметрический статистический анализ надежности спутников и надежности подсистем спутников. Я также продемонстрировал, что распределение Вейбулла хорошо подходит для определения надежности подсистем космических аппаратов.

Литература

1. Krasich M. Reliability prediction using flight experience: Weibull adjusted probability of survival method. NASA technical report, Jet Propulsion Laboratory, Document ID: 20060041898, April 1995.
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.space-track.org/>.
3. Брусков А.А. Анализ отказов различных систем космического аппарата // «Информационно-технологический вестник». № 4(26). 2020. С. 34-46. ISSN 2409-1650.

УДК 621.398

Критерий выбора оборудования для повышения долговечности печатных плат бортовых радиотелеметрических систем

А.П. Мороз, доктор технических наук, профессор МГОТУ,
Академик Российской академии космонавтики,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

Р.В. Скворцов, заместитель начальника отдела,
Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной
техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область

Рассматривается критерий задачи корректного выбора типа оборудования для устранения причин возникновения соответствующих видов дефектов многослойных печатных плат бортовых радиотелеметрических систем на этапе производства. Ограничением является объем выделяемых на это средств.

Бортовая телеметрическая система, многослойная печатная плата, надежность, ракета-носитель, разгонный блок.

Equipment selection criteria for increasing the durability of printed circuit boards of on-board radio telemetry systems

A.P. Moroz, Doctor of Technical Sciences, Professor of MGOTU,
Academician of the Russian Academy of Cosmonautics,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

R.V. Skvortsov, Deputy Head of Department,
Joint Stock Company «Scientific industrial association of measuring equipment»
(NPO IT JSC), Korolev, Moscow region

The criterion of the problem of the correct choice of the type of equipment to eliminate the causes of the corresponding types of defects of multilayer printed circuit boards of on-board radio telemetry systems at the production stage is considered. The limit is the amount of funds allocated for this purpose.

On-board telemetry system, multilayer printed circuit board, reliability, booster, upper stage.

Одними из основных требований, предъявляемых к бортовым радиотелеметрическим системам (БРТС) ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ),

является возможность контроля текущего состояния системы в процессе ее применения и обеспечение заданной долговечности. В совокупности два этих свойства определяют надежность БРТС.

Основным компонентом БРТС являются печатные платы с установленными на них электрорадиоизделиями, которые соединены между собой несколькими слоями проводников.

Анализ результатов применения многослойных печатных плат (МПП) в радиоэлектронной аппаратуре БРТС РН и РБ показал следующее.

Уровень надежности МПП по показателю «долговечность» в ряде случаев не соответствует нормативному требованию (20 лет), установленному ГОСТом 23752.79 «Платы печатные. Общие технические условия» [1]. В связи с этим большинство отказов бортовых РТС происходит из-за отказов МПП [2, 3].

Виды и статистика отказов МПП, предназначенных для применения в радиоэлектронной аппаратуре БРТС РН и РБ за двадцатилетний период, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Виды и статистика отказов четырехслойных МПП за двадцатилетний период

№ п/п	Вид дефекта	Количество отказавших МПП	Доля отказавших МПП
1	Обрыв кабеля	1420	0,1094
2	Замыкание контактных площадок	1231	0,0948
3	Замыкание выводов	840	0,0647
4	Разрыв связи в переходном отверстии	691	0,0532
5	Микротрещина в переходном отверстии	521	0,0401
Всего		4703	0,3622

В связи с этим актуальной задачей является разработка мероприятий, позволяющих устранить причины возникновения дефектов МПП в процессе производства, или существенно снизить долю некачественных плат.

Для реализации таких мероприятий требуются определенные финансовые средства. Объем финансовых средств, выделяемых на реализацию рассматриваемых мероприятий, ограничен. В связи с этим важно распорядится ими максимально эффективно.

Рассмотрим предлагаемый критерий выбора мероприятий по повышению долговечности МПП. Критерий использует сочетание максимального снижения количества возможных дефектных плат, за счет устранения причин возникновения на этапе производства соответствующих видов дефектов, при условии соблюдения ограничения на объем выделяемых на это средств.

Для разработки критерия используется статистика отказов МПП БРТС за двадцатилетний период. Отказы классифицируются по видам дефектов. Для устранения причин возникновения каждого вида дефектов МПП требуется приобретение соответствующего оборудования, позволяющего повысить качество производства. Полагаем, что приобретение оборудования i -го вида позволит полно-

стью устранить причины возникновения i -го вида дефектов МПП. Исходя из такого предположения, необходимо определить приоритеты приобретения конкретных видов оборудования с учетом его стоимости и ограничений финансирования на эти закупки.

С учетом вышеизложенного, предлагаемый подход формализованно представим в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n n_i = n_{max}, \\ \sum_{i=1}^n C_i \leq C_{don}, \end{cases} \quad (1)$$

где: n_i – количество плат, отказавших за 20 лет по i -му виду дефектов;

n – общее количество видов дефектов;

n_{max} – количество видов дефектов, причины возникновения которых устраняются при приобретении соответствующего оборудования;

C_i – стоимость оборудования, требующегося для устранения причины возникновения i -го вида дефектов;

C_{don} – объем финансирования, выделяемого на приобретение оборудования для устранения причин возникновения дефектов.

Т.е. требуется выбрать такие виды i -го оборудования, которые соответствуют максимуму суммы соответствующих видов дефектов, а стоимость отобранного оборудования не превышает установленный лимит C_{don} (1).

Для разработки на основе предлагаемого подхода работоспособного критерия необходимо на основе формализованного представления (1) разработать математическую модель. Для этого преобразуем выражение (1) к следующему виду:

$$\begin{cases} \Delta_1 k_1 + \Delta_2 k_2 + \dots + \Delta_i k_i + \dots + \Delta_n k_n = max, \\ C_1 k_1 + C_2 k_2 + \dots + C_i k_i + \dots + C_n k_n \leq C_{don}, \end{cases} \quad (2)$$

где: Δ_i – прогнозируемое снижение доли дефектных МПП i -го вида дефектов при приобретении соответствующего оборудования, позволяющего повысить качество производства;

k_i – весовой коэффициент; $k_i = 1$, если оборудование для предотвращения i -го вида дефектов приобретается; $k_i = 0$, если оборудование для предотвращения i -го вида дефектов не приобретается;

C_i – стоимость приобретения оборудования для предотвращения i -го вида дефектов.

Таким образом, анализ выражения (2) показывает следующее.

Для снижения доли производственного брака МПП необходимо приобрести максимум оборудования, предотвращающее причины возникновения всех типов производственных дефектов.

С другой стороны, стоимость оборудования не должна превышать объему финансирования, выделяемого на год на устранение причин возникновения дефектов. Как правило, объем выделяемых средств не позволяет приобрести все

оборудование, указанное в верхней строке выражения (2).

Ниже рассмотрены реальные варианты выбора приобретаемого оборудования с учетом ограничения финансирования на эти цели. Поскольку количество видов дефектов МПП и типов соответствующего приобретаемого оборудования относительно невелико ($i_{max} = n = 5$), в этом конкретном случае задача поиска оптимального решения может быть решена методом перебора.

На приобретение оборудования для предотвращения дефектов МПП запланировано выделить 3,5 млн. руб. на год. Рассмотрим возможные варианты выбора приобретаемого оборудования.

При приобретении оборудования для предотвращения причины возникновения первого вида дефектов

$$\begin{cases} \Delta_1 k_1 = \max? \\ C_1 k_1 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0,1094 \times 1 = 0,1094, \\ 1079550 \times 1 < 3500000. \end{cases}$$

Установленный лимит финансирования не превышен, поэтому рассмотрим следующие возможные варианты.

При приобретении оборудования для предотвращения причины возникновения второго вида дефектов

$$\begin{cases} \Delta_2 k_2 = \max? \\ C_2 k_2 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0,0948 \times 1 = 0,0948, \\ 2671200 \times 1 < 3500000. \end{cases}$$

Поскольку установленный лимит финансирования на приобретение оборудования не превышен, рассматриваем следующий вариант.

При приобретении оборудования для предотвращения причины возникновения третьего вида дефектов

$$\begin{cases} \Delta_3 \times k_3 = \max? \\ C_3 \times k_3 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0,0647 \times 1 = 0,0647, \\ 1946451 \times 1 < 3500000. \end{cases}$$

При приобретении оборудования для предотвращения причины возникновения четвертого вида дефектов значительно превышает установленный лимит финансирования:

$$\begin{cases} \Delta_4 \times k_4 = \max? \\ C_4 \times k_4 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} = \rightarrow \begin{cases} 0,0532 \times 1 = 0,0532, \\ 32445024 \times 1 > 3500000. \end{cases}$$

При приобретении оборудования для предотвращения причины возникновения пятого вида дефектов значительно превышает установленный лимит финансирования:

$$\begin{cases} \Delta_5 \times k_5 = \max? \\ C_5 \times k_5 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} = \rightarrow \begin{cases} 0,0401 \times 1 = 0,0401, \\ 8368758 \times 1 > 3500000. \end{cases}$$

В связи с этим вопросы приобретения оборудования для предотвращения причин возникновения четвертого или пятого видов дефектов отбрасываем из дальнейшего рассмотрения возможных вариантов.

Рассмотрим варианты одновременного приобретения оборудования для предотвращения причин возникновения нескольких видов дефектов: первого и второго, первого и третьего, второго и третьего.

При приобретении оборудования для предотвращения причин возникновения первого и второго видов дефектов

$$\begin{cases} \Delta_1 \times k_1 + \Delta_2 \times k_2 = \max? \\ C_1 \times k_1 + C_2 \times k_2 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0,1094 \times 1 + 0,0948 \times 1 = 0,2042, \\ 1079550 \times 1 + 2671200 \times 1 = 3750750 > 3500000. \end{cases}$$

Лимит финансирования превышен на 250750 руб.

При приобретении оборудования для предотвращения причин возникновения первого и третьего видов дефектов

$$\begin{cases} \Delta_1 \times k_1 + \Delta_3 \times k_3 = \max? \\ C_1 \times k_1 + C_3 \times k_3 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0,1094 \times 1 + 0,0647 \times 1 = 0,1741, \\ 1079550 \times 1 + 1946451 \times 1 = 3026001 < 3500000. \end{cases}$$

Лимит финансирования не превышает, остается неиспользуемый резерв около 500 тыс. руб.

При приобретении оборудования для предотвращения причин возникновения второго и третьего видов дефектов

$$\begin{cases} \Delta_2 \times k_2 + \Delta_3 \times k_3 = \max? \\ C_2 \times k_2 + C_3 \times k_3 \leq C_{\text{дон}}? \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0,0948 \times 1 + 0,0647 \times 1 = 0,1595, \\ 2671200 \times 1 + 1946451 \times 1 = 4617651 > 3500000. \end{cases}$$

Установленный лимит финансирования значительно превышает, этот вариант неприемлем.

Далее целесообразно построить графические зависимости в координатах, где по одной оси откладываются значения стоимостей приобретаемого оборудования, а по другой оси – соответствующие значения Δ_i и их суммы.

Анализ рассмотренных вариантов показывает, что самым рациональным вариантом является приобретение оборудования для предотвращения первого и третьего видов дефектов. В этом случае доля предотвращаемых дефектов будет равна 0,1741.

В случае изыскания возможности увеличения финансирования на 250750 руб. более привлекательным будет вариант приобретения оборудования для предотвращения первого и второго видов дефектов, так как доля предотвращаемых дефектов существенно увеличится и составит 0,2042.

При большом количестве типов дефектом и неполном устранении причин возникновения отказов МПП при приобретении соответствующего вида оборудования рассмотренный подход оказывается трудоемким и малоэффективным. В связи с этим предлагается следующий способ, позволяющий оперативно обосновать оптимальный состав оборудования для устранения причин возникновения отказов МПП.

Введем два следующих показателя:

$\delta_i = \frac{\Delta_i}{C_i}$ - отношение доли дефектных МПП i -го вида дефектов к стоимости приобретаемого соответствующего оборудования;

P_i – вероятность устранения причин возникновения i -го вида дефектов при приобретении соответствующего оборудования.

Составим такой ранжированный ряд из элементов $\delta_i = \frac{\Delta_i}{C_i}$, чтобы каждый его член δ_j имел большее значение, чем следующий за ним. С учетом этого преобразуем выражение (1) к следующему виду:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \delta_j k_j P_j = \max, \\ \sum_{j=1}^n C_j k_j \leq C_{\text{дон}}. \end{cases} \quad (3)$$

В этом случае процедура перебора сводится к синхронному суммированию по j членов верхнего и нижнего выражений в (3) до того момента, пока не нарушится условие в нижнем выражении. После этого, отбросив по одному последнему элементу в верхнем и нижнем выражениях, получаем искомый перечень оборудования для устранения причин возникновения отказов МПП.

Если превышение стоимости незначительное и возможно увеличение финансирования, то последние элементы сумм в (3) не отбрасываются.

Если увеличение запланированного финансирования недопустимо, то после отбрасывания последних элементов сумм в (3) анализируются оставшиеся элементы C_j в нижнем выражении (3) с целью выбрать такой (такие) из них, чтобы при добавлении их в сумму не было превышено $C_{\text{дон}}$. Если такой C_j элемент находится, то соответствующий j -й элемент добавляется в верхнее выражение суммы в (3).

Значения P_i для выражения (3) могут быть определены методом экспертного опроса или по результатам анализа использования аналогичного оборудования на других предприятиях-изготовителях аналогичных МПП.

Алгоритм решения рассматриваемой задачи приведен на рисунке 1.

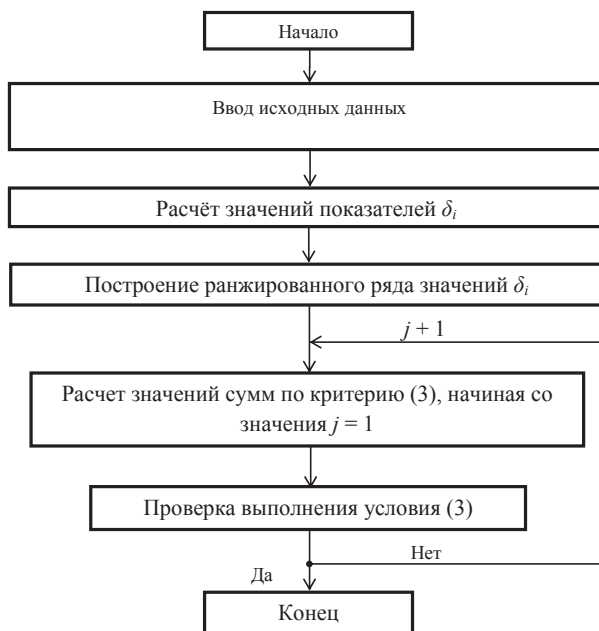


Рисунок 1 – Алгоритм обоснования выбора приобретаемого оборудования для предотвращения дефектов МПП

На рисунке 2 показано сочетание устранения всех возможных видов дефектов, повышение долговечности и прибыли [4] за 1 дм² МПП.

На рисунках 3, 4 показана стоимость различных видов оборудования для устранения причин возникновения различных видов дефектов и их сочетаний.

Следует отметить, что различные классы оборудования для устранения причин возникновения различных видов дефектов могут относиться к разным ценовым категориям, что видно при анализе рисунков 3, 4. Как правило, более высокая ценовая категория оборудования имеет более высокое значение вероятности P_j в (3).

Анализ рисунков 2...4 позволяет сделать следующие выводы.

Приоритетными решениями по устранению видов дефектов являются:

устранение первого и третьего видов дефектов. Это позволит повысить долговечность МПП на 17%, прибыль за 1 дм² МПП будет составлять 1 тыс. 875 руб. Стоимость оборудования – 3млн. 026 тыс. руб;

устранение первого и второго видов дефектов – долговечность повысится на 16% – прибыль за 1 дм² – 2 тыс. 358 руб, стоимость оборудование составит 3 млн.750 тыс. руб.

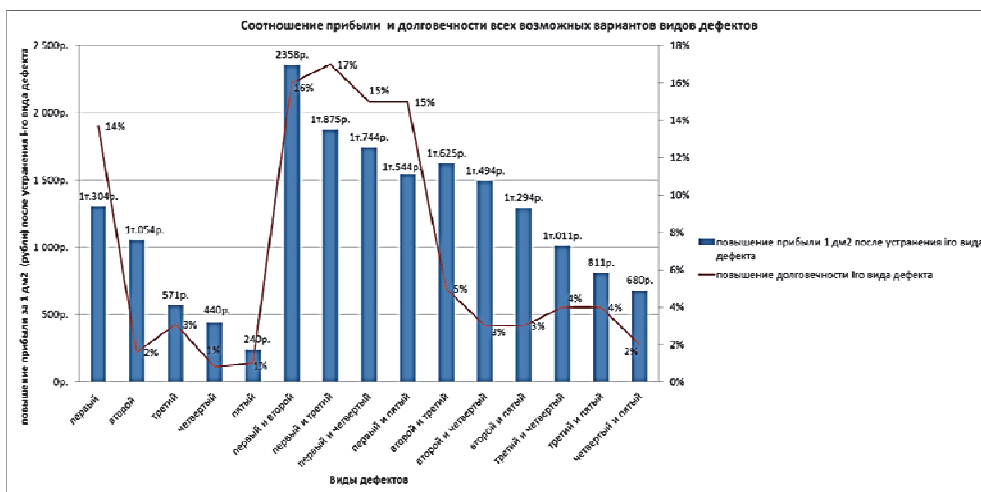


Рисунок 2 – Соотношение прибыли и долговечности от устранения всех возможных вариантов видов дефектов

Самыми плохими результатами являются устранение пятого дефекта (долговечность повысится на 1% – прибыль за 1 дм² – 240 руб., стоимость оборудования составит 8 млн. 369 тыс. руб.), и четвертого и пятого (долговечность повысится на 2% – прибыль за 1 дм² – 680 руб., стоимость оборудования составит свыше 40 млн. руб.).

С учётом результатов анализа статистики отказов МПП для РЭА телеметрических средств за 20-летний период, на основе разработанного критерия оценки рациональных направлений повышения долговечности МПП обоснованы приоритетные направления повышения их надежности по показателю максими-

зации прибыли МПП [4]. Такими направлениями оказались технологии, при внедрении которых будут устранены причины возникновения дефектов, приводящих к обрыву кабеля, замыканию контактных площадок и замыканию выводов.

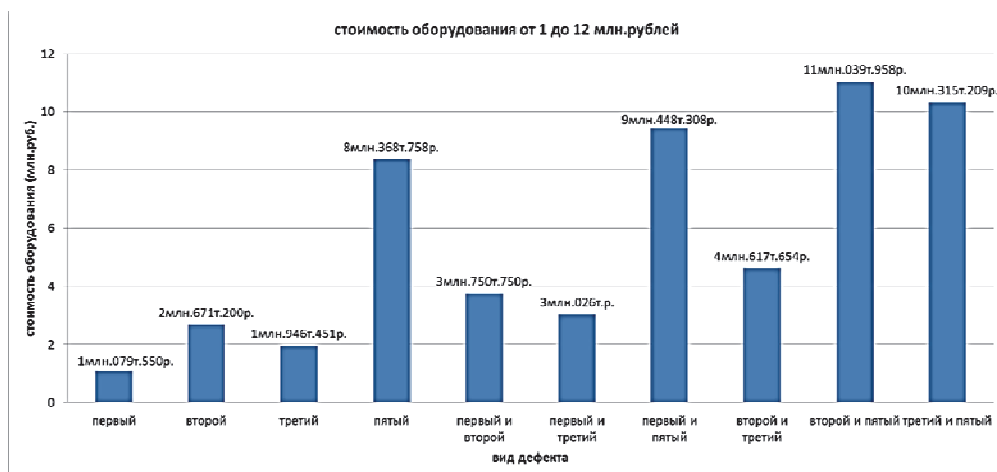


Рисунок 3 – Стоимость оборудования в интервале от 1 до 12 млн. руб.

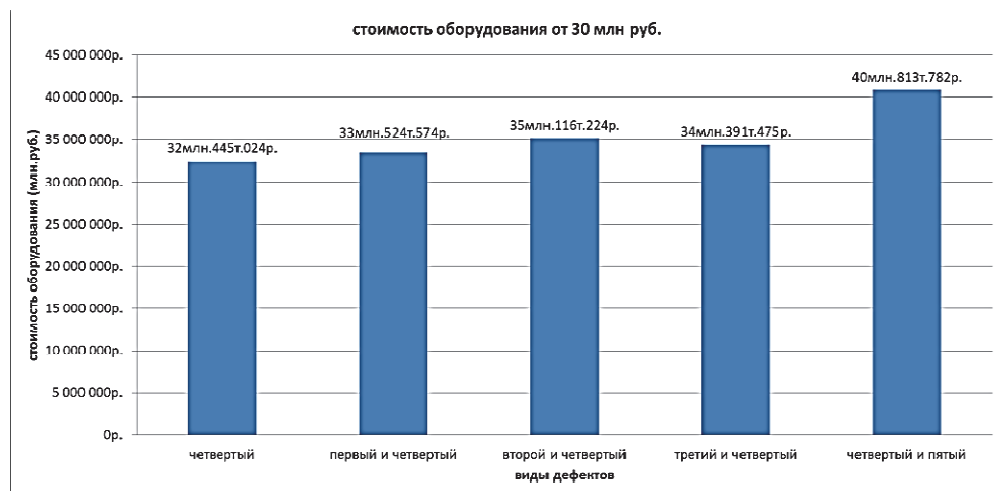


Рисунок 4 – Стоимость оборудования от 30 млн. руб.

Выводы

1. Предложен критерий выбора оптимального состава оборудования для устранения причин возникновения отказов многослойных печатных плат на этапе их производства и эксплуатации. Критерий основан на использовании двух показателей.

Первый показатель представляет собой сумму максимально возможного снижения доли дефектов многослойных печатных плат по нескольким видам дефектов из числа сумм их возможных сочетаний.

Второй показатель представляет собой предельно допустимую сумму за-

трат на приобретение соответствующего первому показателю оборудования для устранения причин возникновения отказов многослойных печатных плат.

2. Предложен способ и алгоритм его реализации, позволяющие оперативно обосновать оптимальный состав оборудования для устранения причин возникновения отказов многослойных печатных плат. Способ основан на введении в критерий двух дополнительных показателей:

отношения δ_i доли A_i дефектных многослойных печатных плат i -го вида дефектов к стоимости C_i приобретаемого оборудования для устранения причин появления такого вида дефектов;

вероятностей P_i устранения причин возникновения i -го вида дефектов при приобретении соответствующего оборудования,

построении ранжированного ряда значений δ_j , расчете сумм значений рядов δ_j и C_j и проверке выполнения условий критерия.

Литература

1. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия. 34 с.
2. Мороз А.П., Скворцов Р.В. Алгоритм оценки повышения долговечности многослойных печатных плат для ракет-носителей и разгонных блоков // II Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». С.Пб, Военная академия им. А.Ф. Можайского, 17-18.12.2014: Сб. трудов II Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». Под общей ред. М.Н. Пенькова. СПб ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. 265 с. С. 218-221.
3. Мороз А.П., Скворцов Р.В. Математический аппарат по повышению долговечности многослойных печатных плат бортовой РЭА для ракет-носителей и разгонных блоков // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сборник научных трудов 3-ей Международной научно-технической конференции (28-29 апреля 2015 года) / редкол. Павлов Е.В. – отв. ред.; Юго-зап. гос. ун-т, Курск, 2015. 203 с. С. 148-153.
4. Мороз А.П., Скворцов Р.В. Методический аппарат оценки надежности и определения приоритетных направлений повышения долговечности многослойных печатных плат бортовой РЭА для ракет-носителей и разгонных блоков // Информационно-технологический вестник. 2015. № 4(6). С. 60-68.

УДК 534.28

Физическая модель шума в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя

О.П. Мосалов, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных систем управления, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,
Ю.В. Завьялова, инженер, Федеральное казённое предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», г. Пересвет, Сергиево-Посадский район, Московская область

В статье рассмотрена задача определения резонансных характеристик камер сгорания жидкостного ракетного двигателя. Приведён и математически обоснован подход к созданию алгоритмов решения такой задачи с помощью анализа спектральной плотности мощности шумовых сигналов параметров рабочих процессов. Рассмотрены вычислительные эксперименты и продемонстрированы их результаты для модельного сигнала с единственной модой.

Физическая модель шума, анализ спектра, спектральная плотность мощности.

Physical model of noise in the combustion chamber of a liquid-propellant engine

O.P. Mosalov, PhD., Head of the Laboratory of Intelligent Control Systems, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
Yu.V. Zavyalova, Engineer, Federal state-owned enterprise «Scientific and testing center of the rocket and space industry», Peresvet, Sergiyev-Posad district, Moscow region

In this article a task of determining of resonance characteristics for combustion chambers of a liquid rocket engine. The approach for development of algorithms to solve this task using analysis of power spectral density of noise signals of working procedure parameters is considered and mathematically justified. Computational experiments are considered and their results for a model signal with a single mode is demonstrated.

Physical noise model, spectrum analysis, power spectral density.

Интерес к альтернативным методам спектрального анализа поддерживается тем улучшением характеристик, которое они обещают, а именно – более высоким частотным разрешением, повышенной способностью к обнаружению слабых сигналов или же сохранением «достоверности» формы спектра при меньшем числе используемых параметров. Аналитически описать характеристики большинства методов в случае ограниченного времени анализа, т.е. в случае короткой записи данных, весьма затруднительно; именно поэтому в литературе можно найти лишь очень малое количество эмпирических результатов. Это обусловлено появлением ряда проблем в области современного спектрального оценивания [6].

Алгоритм определения резонансных характеристик камер сгорания жидкостного ракетного двигателя может быть создан на основе анализа спектральной плотности мощности шумовых сигналов параметров рабочих процессов. Предполагается, что широкополосный шум, генерируемый процессами в камере сгорания, изменяется под действием геометрического объема камеры и представляется в виде суммы узкополосных сигналов, являющихся выходами линейных фильтров второго порядка. Линейные фильтры, в свою очередь, определяются колебательными контурами второго порядка, которые соответствуют собственным модам камеры сгорания.

Теоретическая постановка задачи. Исходное дифференциальное уравнение, описывающее колебательный контур, в котором $x(t)$ – это вход фильтра, а $y(t)$ – выход фильтра, в обобщенном виде может быть записано так [2, 3]:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\delta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = x(t) \quad (1)$$

где δ – коэффициент затухания; ω_0 – частота собственных колебаний контура (для $\delta \ll 1$).

Применяя к уравнению (1) преобразование Лапласа [1, 4], получим передаточную функцию аналогового фильтра, соответствующего левой части уравнения:

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2} \quad (2)$$

При подстановке $p = i\omega$, выражение (2) переходит в амплитудно-частотную характеристику резонатора (аналогового фильтра). После несложных преобразований можно записать выражение для амплитудно-частотной характеристики в форме, позволяющей непосредственно определять положение резонанса (максимума характеристики):

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\omega^2\omega_0^2\zeta^2}} = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2(1 - 2\zeta^2))^2 + 4\omega_0^2\zeta^2(1 - \zeta^2)}}$$

где $\zeta = \delta/\omega_0$ – безразмерный коэффициент затухания.

Если δ мало, то при нормальном случайном входе $x(t)$ выход фильтра $y(t)$ является узкополосным сигналом, спектр мощности которого совпадает с квадратом амплитудно-частотной характеристики фильтра с точностью до постоянного множителя. При значении $\delta < 0,1$ допустимо приближение:

$$H(\omega) = \frac{1/(2\omega_0)}{\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

тогда спектральная плотность мощности случайного процесса $y(t)$ выражается так [2, 6]:

$$S_y(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{(2\omega_0)^2} \frac{1}{(\omega - \omega_0)^2 + \delta^2} \quad (4)$$

Максимум спектральной плотности мощности $y(t)$ соответствует ω_0 , более точно – частоте равной $\omega_0(1 - 2\zeta)^{1/2}$.

В результате воздействия нескольких независимых колебательных контуров на входной случайный процесс $x(t)$ спектральная плотность мощности процесса $y(t)$ будет содержать несколько подъемов, которые должны идентифицироваться собственными модами камеры сгорания.

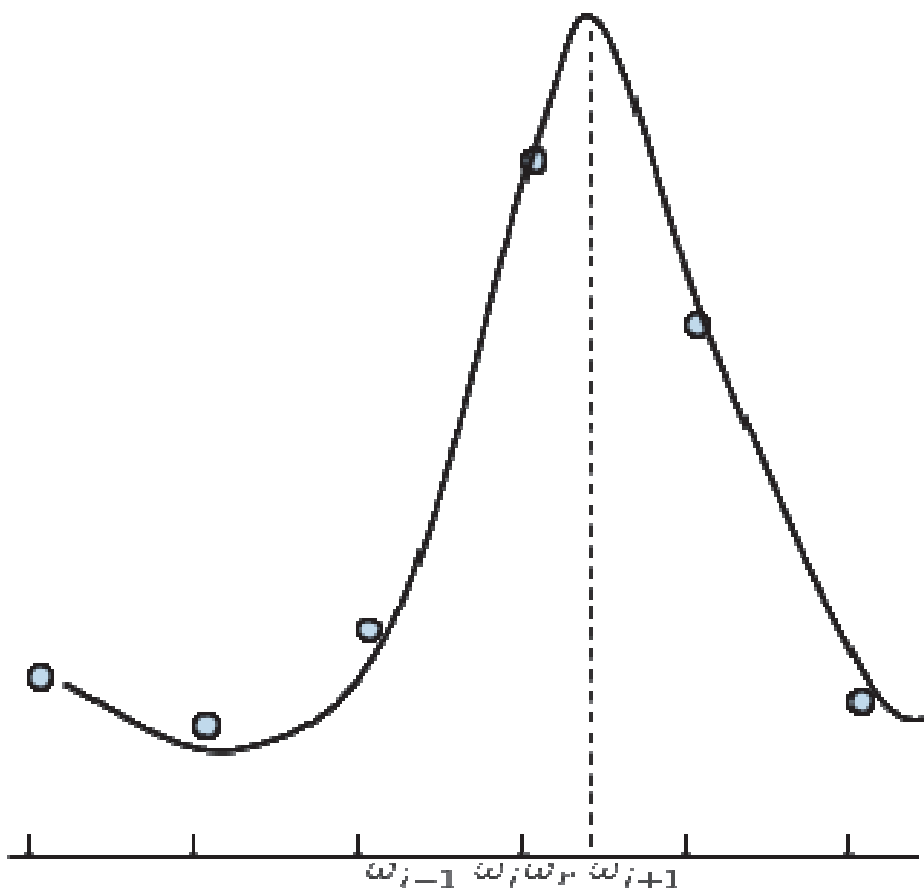


Рисунок 1 – Фрагмент спектра мощности выходного сигнала резонатора

Анализ спектра осуществляется по дискретизированным сигналам, при

этом предполагается выполненным требование теоремы Котельникова о частотном составе $y(t)$ по отношению к частоте дискретизации [5, 7]. Цифровые методы определения спектра мощности формируют результат в виде дискретного набора спектральных отсчетов. Характерный вид анализируемого фрагмента спектра сигнала представлен на рисунке 1.

Параметр $A = \frac{S_x}{(2\omega_0)^2}$, введённый для удобства записи, а также параметры $d = \delta^2$, ω_0 , полностью определяющие форму спектрального пика, можно найти по трем ближайшим к локальному максимуму отсчетам, используя функциональную зависимость (4). При этом получаются три алгебраических уравнения для этих точек:

$$S_i = \frac{A}{(\omega_i - \omega_0)^2 + d}, i = 1; 2; 3 \quad (5)$$

которые позволяют получить явные решения для указанных параметров:

$$A = \frac{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 + \omega_2 - 2\omega_0)}{1/s_1 - 1/s_2} = \frac{(\omega_3 - \omega_2)(\omega_3 + \omega_2 - 2\omega_0)}{1/s_3 - 1/s_2}$$

$$d = \delta^2 = \frac{A}{s_2} - (\omega_2 - \omega_0)^2$$

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \frac{\frac{(\omega_2^2 - \omega_3^2)}{1/s_2 - 1/s_3} - \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{1/s_1 - 1/s_2}}{\frac{(\omega_2 - \omega_3)}{1/s_2 - 1/s_3} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{1/s_1 - 1/s_2}}$$

Параметры A , d и ω_0 могут быть получены и без разложения по малым членам по δ выражения для частотной характеристики (3):

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2(1 - 2\zeta^2))^2 + 4\omega_0^4\zeta^2(1 - \zeta^2)}} = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - B/2)^2 + C}}$$

где B и C – параметры, введённые для удобства записи, аналогично A :

$$B = 2\omega_0^2(1 - 2\zeta^2)$$

$$C = 4\omega_0^4\zeta^2(1 - \zeta^2)$$

Тогда решения системы примут такой вид:

$$A = \frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\frac{1/s_3 - 1/s_2}{\omega_3^2 - \omega_2^2} - \frac{1/s_1 - 1/s_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}}$$

$$\omega_p^2 = B/2 = 1/2 \left(\omega_3^2 + \omega_1^2 - A \frac{1/s_3 - 1/s_1}{\omega_3^2 - \omega_1^2} \right)$$

$$C = \frac{A}{S_2} - \left(\omega_2^2 - \frac{B}{2} \right)^2$$

Для параметра δ в этих обозначениях можно записать уравнение:

$$\zeta^2(1 - \zeta^2) = \frac{C}{B^2 + 4C} \quad (6)$$

Решать квадратное уравнение (6) для ζ^2 нет необходимости, так как для $\zeta < 0,1$ (а именно такие случаи и представляют интерес) с дополнительной погрешностью $\sim 1\%$ можно записать:

$$\zeta^2 = \frac{C}{B^2 + 4C}$$

Специфика решаемой задачи. С учетом наличия статистических погрешностей при определении спектральной плотности мощности могут потребоваться процедуры уточнения параметров. Наиболее надежным (и одновременно достаточно трудоемким в вычислительном отношении) является оценивание параметров резонатора по методу наименьших квадратов. Нужно также иметь в виду, что для узкополосных сигналов эффективность уточняющих алгоритмов уменьшается из-за малого количества используемых в них спектральных отсчетов, формирующих пик.

Для получения спектральной плотности мощности процессов в камере сгорания и далее экспериментальных оценок частот собственных мод, коэффициентов затухания и среднеквадратических уровней колебаний необходим фрагмент сигнала определенной длины, в пределах которого случайный процесс считается стационарным. Временная привязка значений параметров, найденных в результате обработки, имеет неопределенность, соответствующую используемому временному интервалу фрагмента сигнала.

Спектральная плотность мощности анализируемого сигнала может быть определена с помощью одного из многочисленных методов анализа случайного процесса. Преимуществами классического спектрального анализа, основанного на преобразовании Фурье сегмента последовательности исходных данных или автокорреляционной последовательности, являются устойчивость, применимость почти ко всем типам стационарных сигналов, линейная зависимость оценок от мощности синусоидальных компонент сигналов, вычислительная эффективность, основанная на алгоритмах быстрого преобразования Фурье.

В тоже время классические методы обладают такими существенными недостатками как искажение спектральных оценок при обработке конечных последовательностей, относительно низкое разрешение, которое в основном зависит от длины сегментов данных. Параметрический спектральный анализ позволяет добиться высокого разрешения без значительного ухудшения оценок спектральной плотности мощности [6].

В настоящее время широко применяются три типа моделей дискретных случайных процессов, основанные на линейных инвариантных к временному сдвигу системах (фильтрах). Предполагается, что на вход такой системы поступает белый шум, при этом выходной сигнал определяется одним из следующих формирующих фильтров:

1. модель авторегрессионного процесса;
2. модель процесса скользящего среднего;

3. модель процесса авторегрессии-скользящего среднего.

Результаты экспериментов. В данной работе моделирование шумов камер сгорания осуществляется с помощью АР-процесса большого порядка. Проверка работоспособности алгоритма определения параметров резонатора проводилась с помощью модельных сигналов, представляющих собой пульсации давления в экспериментах по исследованию влияния на высокочастотную неустойчивость различных конструкций форсунок. Для этого модельный цифровой сигнал должен обладать заданными характеристиками – резонансной частотой и коэффициентом затухания. Модельный сигнал можно сформировать, например, выполняя линейную фильтрацию гауссовой последовательности с использованием соответствующего рекурсивного фильтра 2-го порядка.

Верификация разработанного алгоритма проводилась на модельных сигналах, генерируемых с использованием соотношения подпрограммой GetModel.sci [8]. Характеристики модельных сигналов задавались следующими:

- Частоты максимумов передаточных функций 500-5000 Гц;
- Коэффициенты затухания в диапазоне 0,001-0,1;
- Частоты дискретизации сигналов 30000-50000 Гц.

Анализируются сигналы, сформированные при пропуске нормального гауссова шума через одиночный рекурсивный фильтр. Погрешность определения резонансной частоты составила не более 5% даже для второго порядка АР-модели и длительности сегмента сигнала 0,05 секунды. Анализ оценок коэффициента затухания показывает наличие систематической погрешности – смещения оценок в сторону завышения при малых порядках АР-модели. Второй порядок дает смещение около 10%, для порядка, равного 60, смещение не превышает 4%. В то же время повышение порядка модели приводит к некоторому росту дисперсии оценок для одной и той же длины сегмента данных. Среднеквадратические уровни колебаний на частоте пика являются, по сути, интегральными характеристиками, поэтому в случае одномодовых сигналов вполне ожидаемо отсутствие существенного влияния порядка модели на оцениваемые параметры.

Рисунки 2-4 иллюстрируют представленные результаты для модельного сигнала с единственной модой имеющей частоту, равную 1000 Гц, и значение безразмерного коэффициента затухания $\zeta = 0,05$ при частоте дискретизации 50000 Гц. По вертикальным осям графиков отложены значения оценок частоты пика в Гц (рис. 2), коэффициентов затухания (рис. 3) и среднеквадратических уровней колебаний на частоте пика (рис. 4). Пунктирные линии на графиках показывают положения задаваемых в модельном сигнале соответствующих величин.

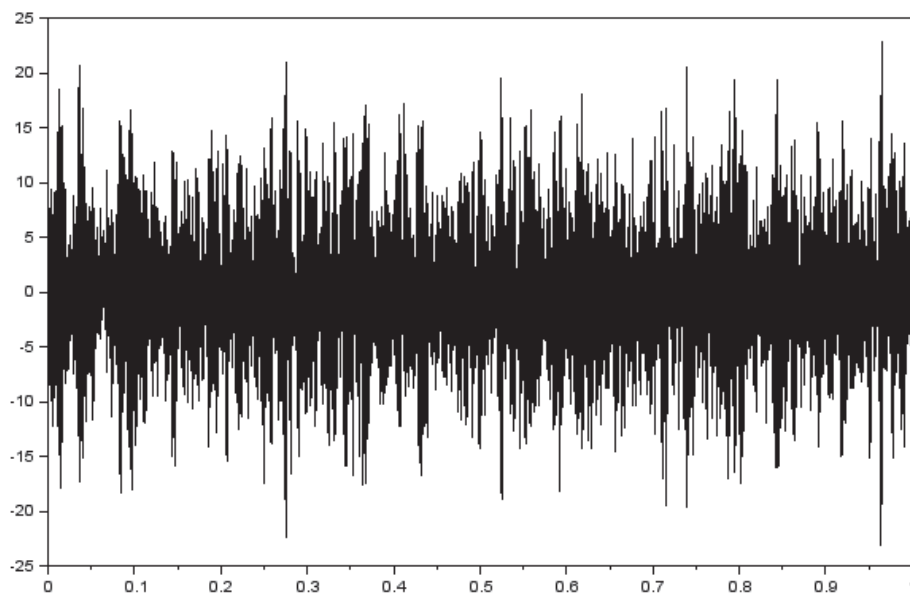


Рисунок 2 – Одномодовый сигнал $f_0 = 1000$ Гц, $\zeta = 0,05$; $f_d = 50000$ Гц

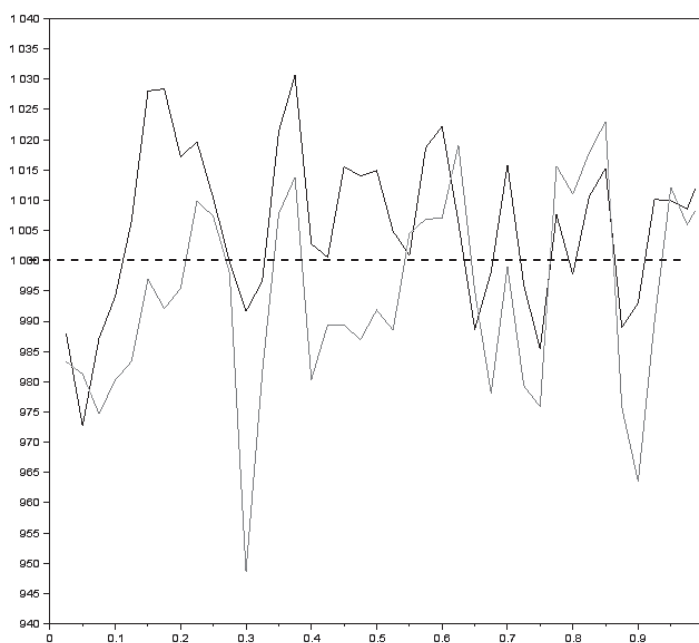


Рисунок 3 – Зависимость частоты основного спектрального подъема модельного сигнала от времени
(длина сегмента 0,05 с; – АР-модель 2-го порядка; – АР-модель 60-го порядка)

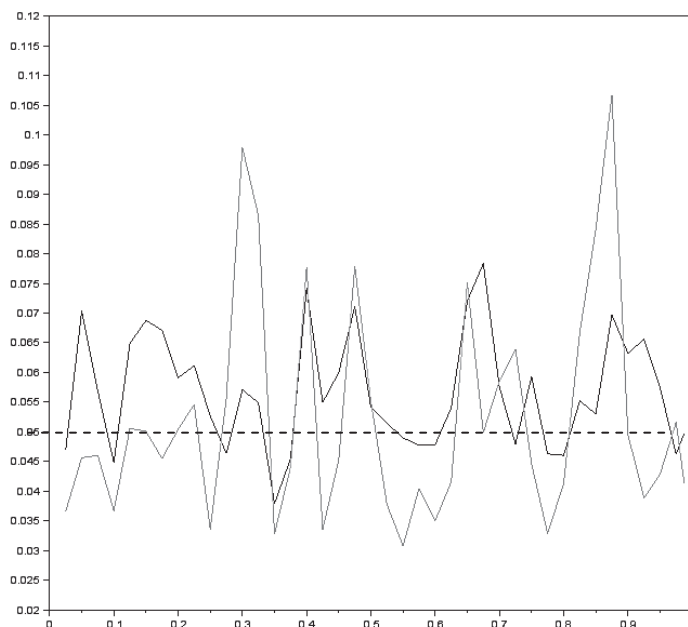


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента затухания модельного сигнала от времени (длина сегмента 0,05 с; – AR-модель 2-го порядка; – AR-модель 60-го порядка)

Полученные результаты показывают, что применение предложенного алгоритма к решению рассматриваемой задачи позволяет эффективно получать решение, однако существует потенциал для улучшения алгоритма.

Выводы. Сутью параметрических методов спектрального анализа является использование некоторой априорной информации о сигнале для формирования его модели. Такой подход позволяет делать более реалистичные предположения о данных вне анализируемого фрагмента данных, чем гипотеза об их нулевых значениях, принимаемая в классическом анализе.

В данной работе продемонстрирован алгоритм параметрического спектрального анализа на модельных сигналах с заданными характеристиками и показано его применение. Вычислительные эксперименты на модельном сигнале с одной модой показали эффективность предложенного подхода и перспективность его дальнейшего развития.

В качестве ближайших шагов планируется смысл рассмотрение других алгоритмов спектрального анализа сигналов, построение методики сравнения различных алгоритмов и поиск оптимальных алгоритмов для заданных условий.

Литература

1. Владимиров В.С., Жаринов В.В. Уравнения математической физики // М.: Физматлит. 2004.
2. ВятГУ Общая теория связи. Лекция 17 «Спектральная плотность мощности случайного процесса» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://iweb.vyatsu.ru/document/material/39/ОТС/Лекции/>

- Лекция%2017.pdf (дата обращения: 08.03.2020).
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. // М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
 4. Корпусов М.О. Эллиптические уравнения. Лекция 1 «Оператор Лапласа» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://math.phys.msu.ru/data/366/elllec1.pdf> (дата обращения: 08.03.2020).
 5. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук: Журнал. 2006. № 7. С. 762-770.
 6. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения // М., Мир. 1990.
 7. Теорема Котельникова. Дискретные и цифровые сигналы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://siblec.ru/radiotekhnika-i-elektronika/radiotekhnicheskie-tsepi-i-signaly/3-diskretnye-i-tsifrovye-signaly/3-1-teorema-kotelnikova> (дата обращения: 08.03.2020).
 8. Microsoft. Документация .NET Framework 4.0 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.web.dynamicdata.metamodel.getmodel?view=netframework-4.0> (дата обращения: 01.08.2021).

УДК 621.3(0.75)

Повышение надежности блока усиления и коммутации бортовой радиотелеметрической аппаратуры

И.А. Овейчук, инженер-конструктор,
Р.В. Скворцов, начальник сектора, заместитель начальника отдела,
Акционерное общество «Научно-производственное объединение
измерительной техники», г. Королев, Московская область

В настоящей статье представлены научные результаты решения задачи повышения надёжности и технологичности бортовой радиотелеметрической аппаратуры. Рассмотрены 3 варианта решения поставленной задачи и выбран наиболее перспективный – замена ЭРИ на источники вторичного питания. Данный метод показал наиболее высокие характеристики по сравнению с аналогичными методами. Приведённые расчёты наглядно показывают эффективность предложенного метода.

Повышение надёжности, модуль питания, радиоэлектроника.

Improving the reliability of the amplification and switching unit of on-board radio telemetry equipment

I.A. Oveichuk, design engineer,
R.V. Skvortsov, head of sector-deputy head of department,
Scientific and production association of measuring equipment «NPO IT»,
Korolev, Moscow region

This article presents the scientific results of improving the reliability and manufacturability of on-board radio telemetry equipment. We considered 3 variants of the solution of the task and choose the most promising – the replacement of radio elements with secondary power sources. This method demonstrates the highest characteristics compared to similar methods. The above calculation clearly demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Improving reliability, power supply module, radio electronics.

В настоящее активно развивающаяся ракетно-космическая отрасль требует разработки современных инновационных технологий, а также ужесточения норм качества, надёжности.

В связи с этим в качестве объекта исследования мы рассматриваем повышение надёжности радиотелеметрической аппаратуры, в качестве предмета исследования взят блок усиления и коммутации бортовой радиотелеметрической системы («БРТС»), разработанный на АО «НПО ИТ». Блок усиления и коммутации («БУК») предназначен для усиления и коммутации антенно-фидерного уст-

ройства, устанавливаемого в командный отсек возвращаемого аппарата и двигательный отсек пилотируемого транспортного корабля нового поколения, а также в телеметрических системах наземных комплексов. Актуальность обусловлена растущими темпами развития радиотелеметрических технологий как в ракетно-космической, так и в военной и гражданских отраслях.

БУК состоит из следующих модулей: модуль усиления мощности, антенного коммутатора, полосового фильтра приёмника, коммутатора приёмника, автоматической регулировки мощности, управления, питания и выходной усилитель мощности. Наиболее проблемным модулем оказался модуль питания ввиду того, что он является коммутационной платой и наиболее часто выходит из строя, поскольку состоит из множества взаимосвязанных радиоэлементов, что сказывается на его надёжности и, следовательно, на надёжности устройства в целом.

Для анализа статистики отказов в процессе эксплуатации использована столбиковая диаграмма (рисунок 1), показывающая количество отказов модуля питания до модернизации в результате испытаний в течение 1000 часов.



Рисунок 1 – Диаграмма причин отказов

На диаграмме видно, что большая часть отказов обусловлена выходом из строя радиоэлементов. Также существенная часть отказов вызвана разрушением паяных соединений. В силу того, что в результате сборки модуля необходимо осуществить 647 операций пайки, цена ошибки каждой последующей возрастает.

На рисунке 2 изображён один из распространённых дефектов в виде сгоревшего элемента, т.к. подобные поломки не всегда удаётся устранить, поэтому они часто приводят в негодность весь модуль, выводя из строя устройство.

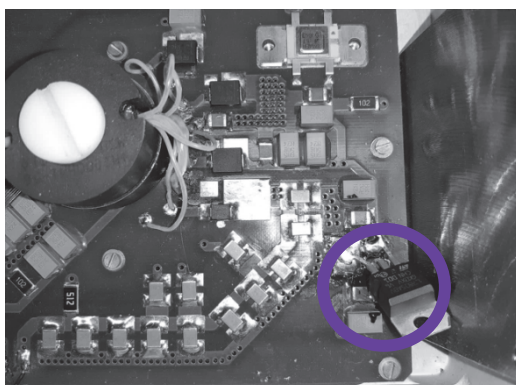


Рисунок 2 – Дефект в виде сгоревшего элемента

Существует 3 варианта решения:

1. Установка стабилизаторов на каждом выходе.
 2. Установка ШИМ-контроллера на каждое напряжение, взамен общего.
 3. Установка четырёх ячеек питания МДМ и фильтра покупного типа.
- Преимущества и недостатки решений предоставлены в таблице 1.

Таблица 1 – преимущества и недостатки предложенных путей решения

Варианты решения	Преимущества	Недостатки
1	Низкая стоимость и трудоёмкость реализации	Проблема решается лишь отчасти, поскольку частота поломок модуля питания сохраняется на достаточно высоком уровне
2	Высокий уровень надёжности	Высокая трудоёмкость, высокая стоимость и неремонтопригодность
3	Высокая надёжность, высокая ремонтопригодность, низкий показатель трудоёмкости, отсутствие помех	Высокая стоимость ячеек питания

Рассмотрим применение варианта решения № 3.

На рисунке 3 – чертёж исходного модуля питания. На нём можно увидеть множество элементов, таких как резисторы, транзисторы, микросхемы и прочие.

Ячейки вторичного питания (рисунок 4, рисунок 5) поставляются предприятием-изготовителем «Александр Электрик». Ячейки питания серии МДМ малой, средней и высокой мощности применяются в телеметрических системах космического и военного назначения. Предназначены для жёстких условий эксплуатации в технике промышленного и специального назначения.

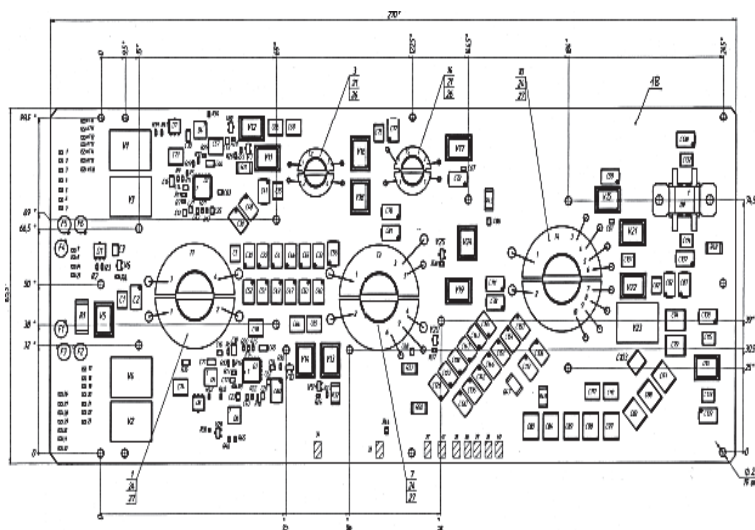


Рисунок 3 – Сборочный чертёж исходного модуля питания



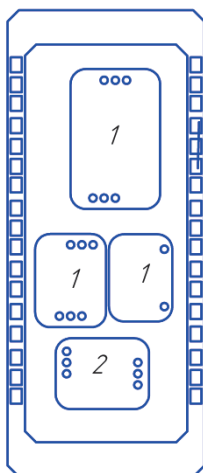
Рисунок 4 – Ячейка вторичного питания МДМ



Рисунок 5 – Ячейка вторичного питания МДМ

Эскиз модернизированного модуля питания представлен на рисунке 6, в 3d – на рисунке 7. Показано взаимное расположение четырёх ячеек и фильтра МДМ. Ячейки с нанесённой на них термопроводящей пастой устанавливаются

непосредственно в корпус устройства, что увеличивает теплоотвод, снижая риск теплового повреждения установленных радиоэлементов, также увеличивая срок службы печатной платы. Вокруг ячеек располагается стеклотекстолитовая рамка с контактными площадками для осуществления разводки и пайки, а вместо токопроводящих дорожек используются обыкновенные провода.



1 – ячейка питания; 2 – фильтр

Рисунок 6 – Эскиз модернизированного модуля питания

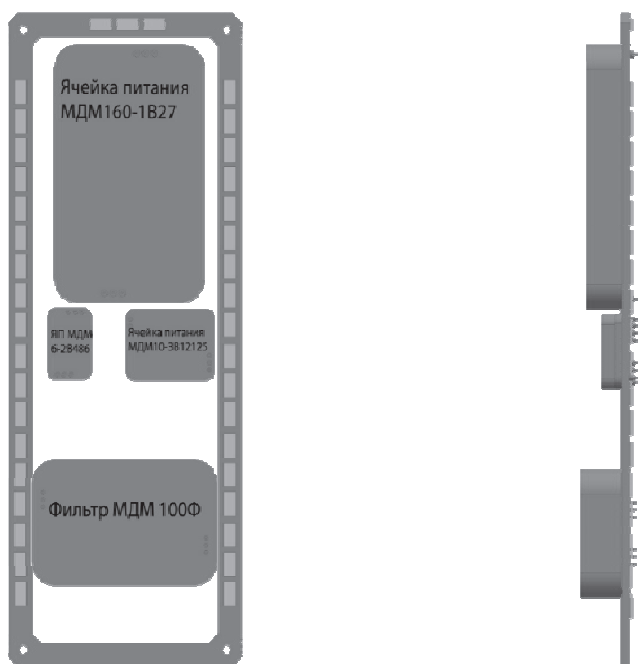


Рисунок 7 – 3d-модель модернизированного модуля питания

Модернизация в значительной степени снижает количество отказов, о чём свидетельствует результат испытаний модуля после модернизации в течение 1000 часов, в результате которых было разрушено 1 паяное соединение. Стоит обратить внимание на тот факт, что проблема выхода из строя элементов была устранена полностью.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что проблема неправильной пайки радиоэлементов была существенно снижена, поскольку количество операций пайки снизилось до 47. Также было устранено влияние низкого качества радиоэлементов в силу уменьшения их количества и повышения требований к их надёжности.

В таблице 2 приведены статистические данные отказов в результате испытаний до и после модернизации. Испытания проводились в нормальных условиях при имитации функционирования в штатном режиме в течение 1000 часов. В расчёте количества отказов принято совокупное значение отказов радиоэлементов и паяных соединений, соответственно указанных в таблице в виде суммы.

Таблица 2 – результаты испытаний до и после модернизации

	Количество элементов	Количество отказов
До модернизации	251+647=898	27+19=46
После модернизации	4+47=51	0+1=1

На основе полученных данных были рассчитаны следующие показатели надёжности после модернизации:

1. Интенсивность отказов $\frac{n}{N \cdot \Delta t} = 1,19 \cdot 10^{-5}$, где n – количество отказов элементов, N – общее количество элементов
2. Вероятность безотказной работы $P = e^{-\lambda t} = 1,96 \cdot 10^{-5}$, где λ – интенсивность отказов, t – время работы устройства.
3. Нарботка на отказ $T_0 = \frac{1}{\lambda} = 51000$ ч.
4. Коэффициент готовности $K_T = \frac{T_0}{T_0 + T_B} = 0,99$, где T_B – среднее время восстановления, равное 1 часу.

Также для повышения надёжности был ужесточён входной и выходной контроль. В таблице 2 содержится последовательный перечень операций для производства модернизированного модуля питания. В сравнении с исходным он отличается наличием входного рентген-контроля, рентген-контролем вместо визуального контроля и существенным снижением затрат времени на проведение операций комплектования, контроля комплектования и электромонтажа.

Статьи расходов на производство состоят из затрат на материалы и комплектующие, электроэнергию, основную и дополнительную заработную плату, социальные отчисления из заработной платы, амортизацию основных и нематериальных активов, а также накладных расходов, что в конечном итоге даёт общую стоимость производства равную 104 414,91 руб. (таблица 3). С учётом перечисленных достоинств и экономии средств за счёт уменьшения времени производства и частоты замены вышедшего из строя модуля, такая стоимость целесо-

образна и оправдана.

Таблица 3 – перечень технологических операций изготовления модернизированного модуля питания

№	Наименование операции	Трудоёмкость (Чел./час.)
1	Комплектование	0,25
2	Контроль комплектования	0,15
3	Входной рентген-контроль	0,5
4	Электромонтаж	0,5
5	Рентген-контроль	0,5
6	Функционирование	0,5
7	Контроль внешнего вида	0,25
8	Транспортирование	0,15
	Итого:	2,8

Таблица 4 – материальные затраты на производство модернизированного модуля питания

Статья затрат	Затраты, руб.
1. Материалы и комплектующие	9 130
2. Электроэнергия	380,91
3. Основная заработная плата	51 085
4. Дополнительная заработная плата	10 217
5. Отчисления из заработной платы	19 400
6. Амортизация основных средств и нематериальных активов	3 985
7. Накладные расходы	10 217
Итого: полная себестоимость	104 414,91

Модернизация в значительной степени исключила проблему неправильной пайки радиоэлементов, поскольку количество операций пайки снизилось

приблизительно до 28. Анализ статистики отказов ЭРИ примененных в действующей схеме и в предлагаемом варианте исполнения модуля питания, показал повышение вероятности безотказной работы на 3,05%, снижение интенсивности отказов на 0,003%, повышение коэффициента готовности на 0,15% и увеличение показателя наработки на отказ на 31478,26 ч.

Т.о. определены дефекты, которые влияют на технологичность и надежность при изготовлении блока усиления и коммутации. Разработаны рекомендации и предложено одно из приоритетных направлений – замена радиоэлементов на источники вторичного питания. Разработана конструкторская модель, рассчитана и определена экономическая целесообразность данных решений – данный вариант решения эффективен.

Литература

1. Слесарев А.Ч., Моисейкин Е.В., Устьянцев Ю.Г. Аспекты проектирования электронных схем на основе микроконтроллеров // Издательство Уральского Университета, 2018. 140 с.
2. Варварин В.К. Выбор и наладка электрооборудования. Форум-М, 2006г. 240 с.
3. Акимова Н.А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. Издательский центр «Академия», 303 с.
4. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. От простого к сложному. М.: Солон-Пресс, 2015. 416 с.

УДК 004.05

Реализация массово-параллельной архитектуры в веб-сервисе

Т.С. Аббасова, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Проанализированы пути снижения времени выполнения запроса к веб-сервису от базы данных. Разработана схема массово-параллельной архитектуры для повышения показателя скорости приёма и обработки информации. Изменена система организации потоков информации, применён новый тип системы хранения информации. Предложены аналитические соотношения для определения снижения времени обращения к веб-сервису хранилища данных.

Нагрузка на веб-сервис, хранение данных, агрегация данных, архитектура хранилища данных.

Implementing Massively Parallel Architecture in a Web Service

T.S. Abbasova, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information technologies and control systems

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The ways of reducing the execution time of a request to a web service from a database are analyzed. A scheme of massively parallel architecture has been developed to increase the rate of information reception and processing. The system for organizing information flows has been changed, a new type of information storage system has been applied. Analytical relationships are proposed to determine the reduction in the access time to the data warehouse web service.

Web service load, data storage, data aggregation, data warehouse architecture.

Введение

Обработка и визуализация агрегированных данных, характерных для веб-сервисов информационных систем, за счёт изменения подхода к организации процессов между командами и системами, актуальна. В настоящее время реализуются подходы, которые заключаются в распределённом сборе, централизованной аналитике и гибкой политике доступа к информации. Такие подходы обеспечивают увеличение скорости приёма и обработки информации в хранилищах данных (ХД) и базах данных (БД), взаимодействующих с веб-сервисами [1,

С.12;2. С.8;3, С. 15].

Результаты исследования

Для визуализации агрегированных данных в виде графиков и гистограмм широко распространено инструментальное программное средство Kibana – web-приложение, написанное на фреймворке JavaScript – Angular.js.

Kibana строит на основе данных из поискового индекса ES (от англ. Elastic search – эластичный поиск) графики и диаграммы различных видов, размещаемых в так называемых панелях; позволяет создавать страницы (дашборды) с различным набором панелей с визуализацией (графиками).

Рассмотрим подробно формирование поискового индекса ES. ES представляет собой поисковую систему, написанную на Java и основанную на библиотеке полнотекстового поиска Lucene. Использует удобный для чтения и написания как человеком, так и компьютером формат JSON (от англ. JavaScript Object Notation – простой формат обмена данными) и в качестве прикладного программного интерфейса (от англ. Representational State Transfer Application Programming Interface – передача состояния представления прикладным программным интерфейсом). RESTAPI использует HTTP-запросы для получения, извлечения, размещения и удаления данных. Является свободно распространяемым программным обеспечением. В ES попадают агрегируемые данные для более быстрого доступа к ним. В случае если данные будут изменяться, то к ним будет применена операция логирования, осуществляемая на нескольких ячейках кластера. Операция логирования предназначена для повышения отказоустойчивости [4, С.28;5, С.9].

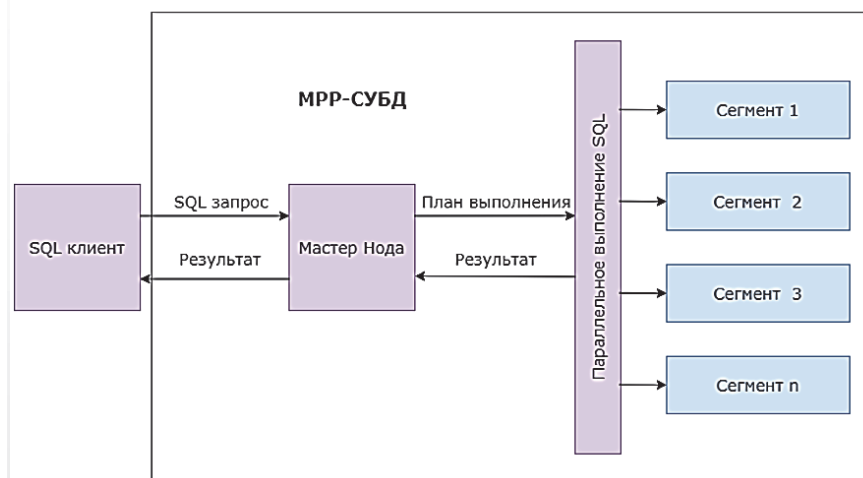


Рисунок 1 – Схема архитектуры MPP-СУБД (составлено автором)

Также, со временем, возникает необходимость следить за нагрузкой на ХД и сервер приложений, и тут помогает Zabbix (ZX). ZX – это система с открытым исходным кодом, предназначенная для постоянного наблюдения и отслеживанием статусов серверов и сетевого оборудования. Для хранения данных используется реляционная система управления PostgreSQL [4, С.33]. Применимо к

системе хранения и обработки данных web-сервиса, ZX визуализирует с помощью диаграмм нагрузку на ХД и сервера приложений.

Для обновления ХД выбрано решение о внедрении MPP системы управления БД (СУБД). MPP (от англ. Massive parallel processing – массово-параллельная архитектура) – это разделение памяти узлов физическим образом и объединенных в единый кластер [6]. Архитектура MPP-СУБД представлена на рисунке 1.

Аналитика web-сервиса показала, что в последнее время чтение и запись данных в хранилище увеличились, и время ответа системы увеличилось. Нагрузка на систему, отраженная в системе Zabbix, представлена на рисунке 2.

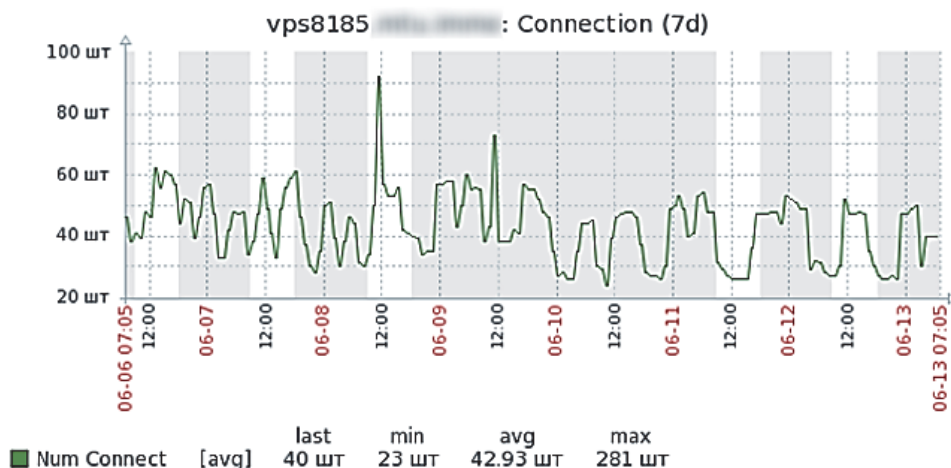


Рисунок 2 – Визуализация данных о повышенной нагрузке на исследуемый Web-сервис в системе Zabbix (составлено автором)

Было решено оптимизировать время ответа системы. Для этого необходимо выяснить, от чего оно зависит.

Время выполнения запроса к web-сервису основывается на времени обращения к веб серверу и времени выполнения инструкций SQL к серверу БД. Наиболее трудозатратной операцией является время выполнения SQL. Данный показатель как раз и зависит от данных, их количества и оптимизаций.

Разработана математическая модель улучшения данного показателя:

$$T = f(t_{\text{обpc}}, t_{\text{esql}}) \rightarrow \min \quad (1)$$

где T – время выполнения запроса к web-сервису, $t_{\text{обpc}}$ – время обращения к web серверу, t_{esql} – время обращения к БД.

$$T = t_{\text{обpc}} + t_{\text{esql}}. \quad (2)$$

Для сокращения времени запроса к сервису было решено внедрять MPP архитектуру ХД, которая призвана снизить нагрузку на этот сегмент путем па-

раллельного распределения нагрузки. Для обеспечения непрерывности потока данных было принято решение воспользоваться диспетчером очереди MQ (от англ. Queue Manager – диспетчер очереди). Функции диспетчера очереди выполняет брокер сообщений. Он является сервисом, обеспечивающим прием и передачу сообщений между различными модулями и приложениями, которые входят в состав информационной системы. Схема пересылки данных между модулями и приложениями показана на рисунке 3 [7].

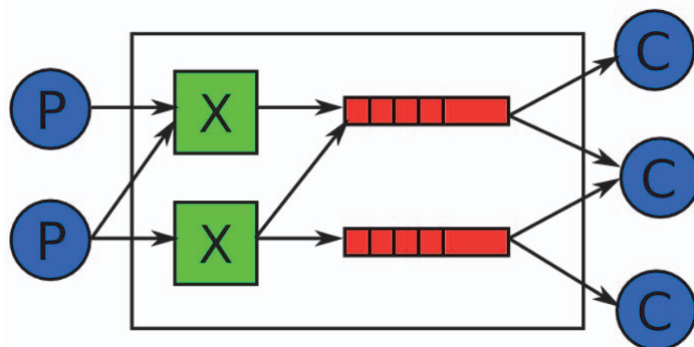


Рисунок 3 – Схема диспетчера очереди [7]

Брокер AMQP (от англ. Advanced Message Queuing Protocol – открытый протокол для передачи сообщений) выполняет посреднические брокерские функции между компонентами системы и основным ядром продукта с использованием шаблонов RPC (от англ. Remote Procedure Call – удалённый вызов процедур) [6].

Для оценки минимизации времени выполнения запроса к web-сервису путем распараллеливания распределения нагрузки с помощью кластера сегментов (серверов) предложено расчетное соотношение

$$T_{min} = T / n \quad (3)$$

где n – количество серверов.

Для построения кластера MPP СУБД определено, что для разгрузки vrs8003 необходимо добавить ещё 3 аналогичных сервера. Данное решение в совокупности составляет кластер из 4 сегментов. Были определены основные и зеркальные сегменты.

В реализации Greenplum предусмотрен механизм резервного мастера, который включается при отказе основного, в его качестве используем сервер vrs7003. Каждый из мастер-серверов будет обращаться к своей версии интерконнекта (interconnect 1, interconnect 2) для разгрузки канала. В качестве клиента будет выступать сервер приложений vrs6136. Спроектированная схема представлена на рисунке 4.

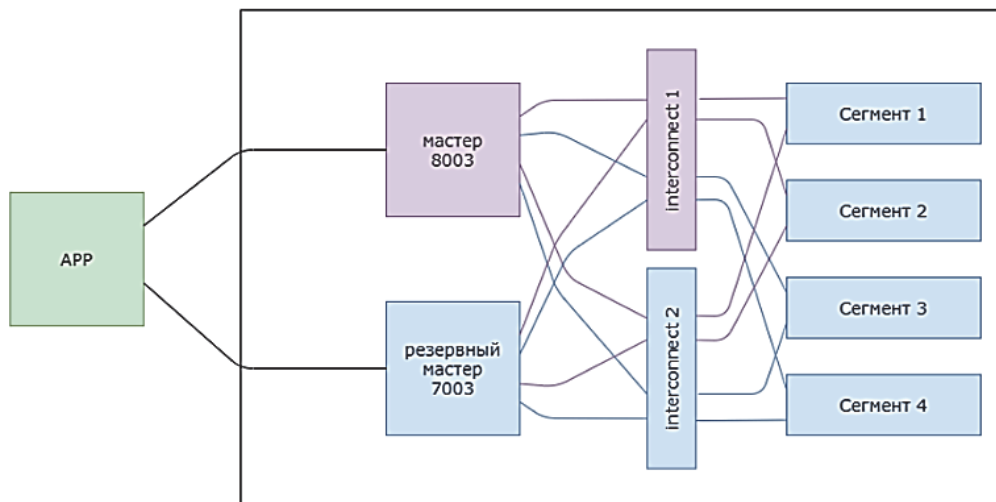


Рисунок 4 – Схема реализации MPP архитектуры в web-сервисе (составлено автором)

Таким образом, уменьшение времени обращения к сервису выражается как время ответа сервера для данного варианта с 4 сегментами кластера

$$T_{\min} = T / 4 \quad (4)$$

По результатам внедрения кластера был настроен мониторинг нагрузки в системе Zabbix. Zabbix не подключается напрямую к БД или ХД, он основывается на интерфейсе ODBC (от англ. Open Database Connectivity – программный интерфейс, независимый от языка программирования и операционной системы). Эта функция позволяет осуществлять мониторинг баз данных с различными целями с большей эффективностью – например, проверка специфичных запросов к базе данных, статистика использования и прочее.

По результатам исследования для транспортировки данных в сервисе был выбран Apache Kafka в качестве брокера сообщений [8]. Подписанные клиенты уведомляются автоматически об обновлениях и создании новых сообщений. Эта система является более эффективной и масштабируемой по сравнению с другими.

Расчеты по формуле (4) показали, что применение массово-параллельной архитектуры в веб-сервисе позволило существенно сократить время времени обращения к сервису системы, в среднем на 420 сек.

Основной и важной процедурой в запуске кластера является его конфигурирование. Конфигурация ресивера представлена на рисунке 5.

```
1 # receiver.py
2 import argparse
3 import time
4
5 import grpc
6 from google.cloud import pubsub_v1
7
8 def callback(message):
9     print(message)
10
11 if __name__ == '__main__':
12     parser = argparse.ArgumentParser(
13         description='Prints messages from a subscription')
14     parser.add_argument('--host', required=True, help='The emulator host or IP address')
15     parser.add_argument('--port', type=int, required=True,
16         help='The emulator port number')
17     parser.add_argument('--project-id', required=True)
18     parser.add_argument('--subscription-id', required=True)
19     args = parser.parse_args()
20
21     path = '/'.join(['projects', args.project_id, 'subscriptions', args.subscription_id])
22     print('Subscribing to {}'.format(path))
23
24     emulator_location = ':'.join([args.host, str(args.port)])
25     channel = grpc.insecure_channel(emulator_location)
26     subscriber = pubsub_v1.SubscriberClient(channel=channel)
27     subscriber.subscribe(path, callback)
28
29     # Keep the process running.
30     while True:
31         time.sleep(60)
```

Рисунок 5 – Конфигурация ресивера (составлено автором)

Далее идёт конфигурация отправителя для обмена данными с СУБД и везде с Elastic (или PostgreSQL) [9, С.44]. Конфигурация отправителя (сендера) представлена на рисунке 6.

```
1 # sender.py
2 import argparse
3
4 import grpc
5 from google.cloud import pubsub_v1
6
7 if __name__ == '__main__':
8     parser = argparse.ArgumentParser(
9         description='Publishes messages to a topic')
10    parser.add_argument('--host', required=True, help='The emulator host or IP address')
11    parser.add_argument('--port', type=int, required=True,
12        help='The emulator port number')
13    parser.add_argument('--project-id', required=True)
14    parser.add_argument('--topic-id', required=True)
15    parser.add_argument('message')
16    args = parser.parse_args()
17
18    emulator_location = ':'.join([args.host, str(args.port)])
19    channel = grpc.insecure_channel(emulator_location)
20    publisher = pubsub_v1.PublisherClient(channel=channel)
21
22    topic_path = publisher.topic_path(args.project_id, args.topic_id)
23    publisher.publish(topic_path, args.message.encode())
```

Рисунок 6 – Конфигурация сендера (составлено автором)

После изменения системы организации потоков информации с помощью предложенных мероприятий, а также внедрения нового типа системы хранения информации, показатели нагрузки на web-сервис существенно уменьшились. Данные о нагрузке, полученные с помощью Zabbix, приведены на рисунке 7.

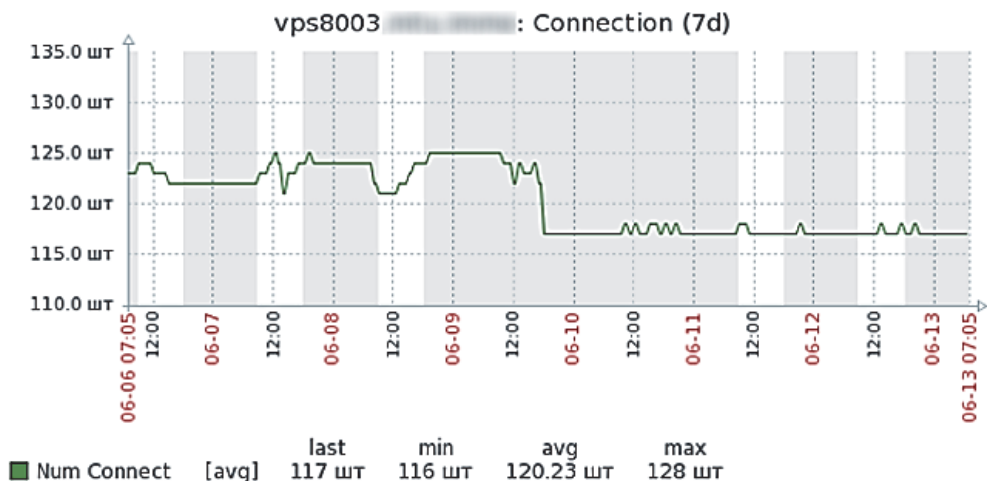


Рисунок 7 – Визуализация данных о снижении нагрузки на web-сервис в системе Zabbix (составлено автором)

Сравнительный анализ данных рисунка 2 и рисунка 7 показал, что нагрузка более равномерно распределена.

Выводы

Найдены решения по улучшению хранилища данных в виде внедрения системы Zabbix для мониторинга и визуализации нагрузки на базу данных, массово-параллельной архитектуры, взаимодействующего с web-сервисом, брокера сообщений Apache Kafka.

Спроектирован и внедрен кластер в хранилище данных с применением MPP Greenplum и реализована система, включающая в себя кластер из 4 сегментов. Показано, что применение массово-параллельной архитектуры в веб-сервисе позволило существенно сократить время времени обращения к веб-сервису системы, в среднем на 420 сек.

Литература

1. Артюшенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / Под научной редакцией А.Б. Семенова. М.: Издательство «Научный консультант». 2019. 232 с.
2. Расчет параметров системы управления обработкой больших данных: отчет о НИОКР, выполняемой в рамках тематического плана по заданию Минобрнауки РФ в 2020 году, фундаментальное исследование, № госрегистрации АААА-А20-120022590034-8 // Москва: ГБОУ ВО «МГОТУ». 2020. 65 с.
3. Фрэнкс Б. Революция в аналитике. Как в эпоху Big Data улучшить ваш бизнес с помощью операционной аналитики // Альпина Диджитал. 2016. 230 с.
4. Анналин Ы., Кеннет С. Теоретический минимум по Big Data. Всё что нужно знать о больших данных // Питер. 2019 г.
5. Коул Нафлик. Данные: визуализируй, расскажи, используй // Манн, Иванов и Фербер (МИФ). 2019. 130 с.

6. Брендан Тирни, Джон Келлехер. Наука о данных. Базовый курс // Альпина Диджитал. 2020. 222 с.
7. Как устроена MPP-СУБД Greenplum [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bit.ly/3hNfAMJ> (дата обращения 11.06.21).
8. API диспетчера очереди печати [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/windows/win32/printdocs/print-spooler-api> (дата обращения 11.06.21).
9. Kafka: установка и первый запуск [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bit.ly/3eqIVeH> (дата обращения 11.06.21).
10. Аббасов Э.М., Польшин С.Н. Повышение производительности больших баз данных и действующих на их основе прикладных сервисов // Информационно-технологический вестник. 2020. № 1 (23). С.42-54.

УДК 004.94, 338.24, 623.618.3

**Функционально-целевые модели управления
региональной безопасностью
(Часть 2. Покрывающие и адекватные системы)**

А.В. Маслобоев, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,
В.А. Путилов, доктор технических наук, профессор, научный руководитель,
Институт информатики и математического моделирования Федерального исследова-
тельского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»
(ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты

Работа направлена на развитие формального аппарата анализа и синтеза многоуровневых распределенных систем управления региональной безопасностью с целью повышения адекватности этих систем в условиях усложнения управленческих задач в этой области. В работе предложены математические модели управления региональной безопасностью, основанные на функционально-целевой технологии и теории иерархических многоуровневых систем. Модели обеспечивают формальную постановку задач и практическую реализацию процедур автоматизации структурно-алгоритмического синтеза адекватных систем информационной поддержки управленческой деятельности. Работа состоит из двух частей. В первой части рассматриваются формальные процедуры синтеза цепочек целей и действий в управлении региональной безопасностью. Во второй части обсуждаются вопросы синтеза моделей покрывающих и адекватных систем, обеспечивающих решение задач управления путем удовлетворения условий изоморфизма всех уровней их декомпозиции и функциональной организации системы.

Рекуррентная модель, теорема о покрытии, многоуровневая система управления, региональная безопасность, синтез адекватных систем.

**Functional-target management models of regional security
(Part 2. Covering and adequate systems)**

A.V. Masloboev, Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Leading research fellow,
V.A. Putilov, Dr. Sci. Tech., Professor, Research supervisor,
Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal
Research Center «Kola Science Center of Russian Academy of Sciences»
(IIMM KSC RAS), Apatity

The study is aimed to development of the mathematical apparatus for analysis and synthesis of the multi-level distributed management systems of regional security for the purpose of system adequacy enhancement under management problems complication in this field. Mathematical models for regional security management based on the functional-target technology and the theory of hierarchical multi-level systems are

proposed. Models provide formalized problem statement and practical implementation of automation procedures of the structural-algorithmic synthesis of appropriate systems for information support of management activity. Our research work consists of two parts. In the first part formal procedures of the chain synthesis of goals and actions in regional security management are considered. In the second part the model synthesis issues of covering and adequate systems, providing management problem-solving by isomorphism conditions settlement of the all problem decomposition levels and the system functional organization.

Recurrent model, covering theorem, multi-level management system, regional security, adequate system synthesis.

Введение

Для повышения эффективности и адекватности многоуровневых распределенных систем управления безопасностью критически важных объектов различной природы и масштаба в условиях непрерывного роста сложности управленческих задач, а также для адаптации профиля защиты к трансформации этих объектов и к быстроменяющейся внешней среде необходимо как постоянное совершенствование самих этих систем в целом, так и отдельных, входящих в их состав компонентов на всех стадиях жизненного цикла – от проектирования и ввода в эксплуатацию системы до оперативного синтеза спецификаций и динамического конфигурирования ее структуры и состава под задачу. Желаемого эффекта в этом вопросе можно достигнуть за счет функционально-целевого моделирования и комплексной автоматизации процесса разработки систем обеспечения безопасности, а также за счет использования адекватной решаемым задачам управления и принятия решений структуры программно-технических средств и нормативной базы на концептуальном, виртуальном и организационном уровнях функционирования этих систем. Для этого при построении систем обеспечения безопасности требуется применение современных методов математического и компьютерного моделирования вкупе со средствами автоматизированного синтеза исполнительных сред: алгоритмов и программ управления. На практике это позволит нивелировать такие факторы, сдерживающие развитие систем обеспечения безопасности критических инфраструктур, как высокая стоимость и длительное время разработки и внедрения этих систем для силовых структур, органов государственной власти и корпораций, а также проблемы координации взаимодействия распределенных элементов этих систем на разных уровнях управления, сложность их интеграции в единую цифровую среду и сопровождения после введения в эксплуатацию на базе того или иного ведомства или организации. К другим возможным положительным эффектам можно отнести потенциальный рост количества решаемых этими системами управленческих задач в единицу времени и минимизацию ресурсных затрат при различных режимах работы систем обеспечения безопасности (нормального функционирования, стратегического планирования и кризисной ситуации). Несмотря на то, что роль математического и компьютерного моделирования в процессе построения информационно-управляющих систем обеспечения безопасности сложных объектов вполне оче-

видна, многие вопросы в этой области остаются недостаточно изученными. Ответом на этот вызов служит настоящее исследование, состоящее из двух частей. Во второй части работы рассматриваются вопросы синтеза моделей покрывающих и адекватных систем, обеспечивающих решение задач управления путем выполнения условий изоморфизма на уровнях декомпозиции целевой задачи и функциональной организации системы.

Теоретические основы исследования

В многоуровневой распределенной системе организационного управления региональной безопасностью процессы обеспечения безопасности разнотипных объектов тесно переплетаются между собой как внутри элементов различных уровней этой системы, так и в рамках всей системы в целом. Между этими процессами возникают сложные взаимосвязи как по входным данным (информационной структуре принятия решений), так и по функциональной структуре управления. Это обусловлено самой распределенной структурой задач обеспечения региональной безопасности и связанной с ней аналогичной структурой моделей управления, итерационным характером процессов обеспечения региональной безопасности и многообразием средств информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений. В ходе предыдущих исследований [1-3] показана возможность решения задач автоматизации структурно-алгоритмического синтеза таких систем управления региональной безопасностью на основе функционально-целевого подхода [4] и теории иерархических многоуровневых систем [5]. Синтез производится по предварительно созданной концептуальной модели предметной области и выбранным критериям эффективности функционирования системы управления. В ходе синтеза фиксируются элементы функционального базиса с соответствующими показателями качества алгоритмов управления. С использованием концептуальной модели предметной области строятся цепочки действий на уровне примитивов. При этом оцениваются, либо оптимизируются показатели качества цепочек. По этим показателям качества выбираются элементы соответствующего уровня системы управления. Аналогичным образом оцениваются параметры цепочек действий следующего уровня и т.д. В случае невозможности реализации элемента системы управления, обеспечивающего требуемые показатели действий соответствующего уровня декомпозиции, следует либо изменить функциональный базис, либо смягчить требования к показателям качества, либо отказаться от реализации класса алгоритмов управления этого уровня. Технически структурно-функциональный синтез системы управления производится итерациями. В качестве средства автоматизации синтеза используется система интерактивного вывода алгоритмов управления.

В работе [6] были рассмотрены формальные процедуры синтеза цепочек целей и действий в управлении региональной безопасностью. Проведен анализ процесса построения структуры системы управления, покрывающей цели этой предметной области, на основе предложенных рекуррентной модели [1], единообразно описывающей цели управления и действия по их достижению на всех уровнях декомпозиции исходной задачи, и введенных показателей качества цепочек целей и действий. В результате использования принципа управления через

целесообразность обеспечивается синтез всего многообразия вариантов управления через композиции элементов цепочек целей и действий, построенных на базе рекуррентной модели. Показано, что если строить структуру системы обеспечения безопасности декомпозицией на подсистемы подобно декомпозиции целей управления на подцели, то множество действий системы покрывает множество целей тогда и только тогда, когда все множества действий подсистем на любом уровне декомпозиции покрывают соответствующие множества подцелей. Далее приводится доказательство этого утверждения, впервые предложенное в работе [4].

Теорема о покрытии. Система, построенная из подсистем, покрывающих подзадачи основной целевой задачи системы, покрывает основную целевую задачу системы.

Доказательство. Пусть имеется некоторая декомпозиция основной целевой задачи P системы S на множество подзадач P_i :

$$P = \{P_i\}, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где N – число подзадач основной целевой задачи системы. Декомпозиция проведена так, что множества подзадач не пересекаются:

$$P = \bigcup_i P_i, P_i \cap P_j = \begin{cases} P_i, & \text{если } i = j, \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (2)$$

Каждой подзадаче P_i поставим в соответствие некоторую подсистему C_i системы S , такую, что совокупность действий A_i , выполняемых этой подсистемой, будет покрывать подзадачу P_i :

$$(V_i): P_i \leftrightarrow A_i : A_i \text{ покрывает } P_i.$$

Тогда объединение действий A_i всех подсистем будет покрывать объединение всех подзадач целевой задачи системы:

$$\bigcup_i A_i \text{ покрывает } \bigcup_i P_i.$$

Учитывая выражение (2), получаем, что множество действий, выполняемых подсистемами, покрывает основную целевую задачу системы:

$$\bigcup_i A_i \text{ покрывает } P.$$

Таким образом, доказано, что если строить систему S из подсистем C_i , покрывающих подзадачи P_i , то множество действий A системы S покрывает множество целей P тогда и только тогда, когда совокупность действий A_i подсистемы C_i покрывает множество соответствующих подцелей P_i для каждого i .

Однако некоторая подзадача P_i может быть представлена в виде множества подзадач следующего уровня иерархии, то есть:

$$P_i = \bigcup_j P_{ij}, j = \overline{1, N_i}, \quad (3)$$

где N_i – количество подзадач задачи P_i . Следовательно, множество действий A_i покрывает множество задач P_i тогда и только тогда, когда действия A_{ij} подсистем C_{ij} покрывают соответствующие подцели P_{ij} для каждого j и т.д. Теорема доказана.

Следствие. Если строить декомпозицию системы изоморфно декомпозиция цели на подцели, то множество действий A системы C покрывает множество целей P тогда и только тогда, когда некоторое множество действия A_{ik} подсистемы C_{ik} покрывает множество подцелей P_{ik} на любом k -м уровне декомпозиции, включая нижний. Следовательно, вопрос о покрытии целей действиями можно решать для подзадач и подсистем малой размерности по отдельности, что значительно упрощает процедуру решения исходной (глобальной) задачи системы.

Определение покрывающей системы использует понятие гомоморфного отображения концептуальной модели предметной области на модель автоматизированной системы управления. Этот гомоморфизм обеспечивается, если действия системы покрывают цели предметной области на всех уровнях системной организации. Для формализации понятия покрытия использовано понятие вариативности, введенное в работе [7] для технологических процессов. Покрытие обеспечивается, если вариативность действий оказывается не меньше вариативности целей при удовлетворении ограничений на множества целей и действий. При этом предполагается, что множество действий содержит действия, не участвующие в покрытии целей, только в том случае, если все цели из множества целей покрыты действиями из множества действий, а каждой цели соответствует действие из множества действий, обеспечивающее достижение этой цели. Количественно покрытие определяется показателями качества алгоритмов управления и выбранными критериями эффективности автоматизированной системы управления в целом. Считается, что покрытие обеспечено, если достигается требуемое значение/диапазон значений показателей качества (целевых функций управления). Кроме того, понятие вариативности используется для оценки гибкости систем по отношению к решаемым задачам. Определив термин «покрытие» и его смысл, перейдем к рассмотрению вопросов синтеза моделей покрывающих и адекватных систем в управлении безопасностью.

Формализация понятий покрывающих и адекватных систем

Синтез рекуррентной модели многоуровневой распределенной системы обеспечения безопасности региона позволяет формализовать постановку задач управления региональной безопасностью, которое сводится к выполнению набора различных примитивов. Таким образом, определяется множество действий (функций) системы для достижения поставленных целей управления региональной безопасностью. Пусть в результате проведенной декомпозиции некоторой задачи управления построено дерево действий системы обеспечения безопасно-

сти и определен набор примитивов $\{T_j^K\}$, $j = \overline{1, N_K}$, где N_K – число классов эквивалентных действий на нижнем $(K - \mu)$ уровне дерева действий.

Построение виртуальной макроструктуры системы управления в соответствии с теоремой о покрытии, приведенной и доказанной выше, производим «снизу вверх», в направлении, обратном декомпозиции этой задачи. Предполагается, что нижний уровень системы управления реализован из некоторых элементарных управляющих компонентов m_i , составляющих алфавит $M = \{m_i\}$. Компонент m_i в общем случае характеризуется состоянием s , управляющим воздействием u для задания режима его работы, входной w и выходной v информацией:

$$v = m_i(u, s, w).$$

Атомарная функциональная операция $L_j : v = L_j(w)$ задается тройкой: $L_j = m_i(u, s)$. Следовательно, алфавит функциональных атомов задается декартовым произведением алфавита управляющих компонентов системы на пространства их управлений и состояний:

$$L = M \times U \times S.$$

Будем считать, что атомарная операция L_j реализуема в системе управления, если:

$$(\exists m_i \in M), (\exists u \in U), (\exists s \in S) : [(\forall w \in W), (L_j(w) = m_i(u, s, w))].$$

Цепочка F функциональных атомов реализуема в системе управления, если реализуемы все составляющие ее атомы в заданной цепочкой последовательности, а также обеспечены механизмы последовательного и параллельного запуска, соответствующие операциям \otimes и \oplus . Рекуррентное применение понятия реализуемости [8] в системе управления приводит к следующему утверждению общего характера: программа управления $f^k \in \sum^k$ реализуема в системе тогда и только тогда, когда реализуемы в системе все входящие в нее алгоритмы $f^{k+1} \in \sum^{k+1}$ в последовательности, определяемой f^k , обеспечены механизмы, соответствующие \otimes и \oplus .

Данное утверждение есть не что иное, как требование гомоморфизма Γ концептуальной модели A^k предметной области k -го уровня детализации на k -й иерархический уровень системы управления $C^k : \Gamma : A^k \xrightarrow{\Gamma} C^k$ ($\forall k, k = \overline{1, K}$), что, в свою очередь, влечет за собой требование гомоморфизма полной модели A^k предметной области на автоматизированную систему управления C^k . Такая система C^k называется системой, покрывающей предметную область A^k , а такой гомоморфизм функционально обеспечивает покрытие целей управления, заданных на концептуальной модели предметной области, действиями соответствующей автоматизированной системы.

В любой покрывающей системе C^k можно выделить подсистему C_0^k (в том числе и виртуальную), изоморфную модели предметной области A^k :

$$\forall C^k, A^k \xrightarrow{\Gamma} C^k, \exists C_0^k \subseteq C^k : A^k \xleftarrow{\Gamma} C_0^k.$$

C_0^k называется системой, адекватной предметной области или адекватной системой. Адекватная система является минимальной из всех возможных покрывающих систем: если покрывающая система не тождественна адекватной, то в ней существуют одна или несколько подсистем, не участвующих в покрытии A^k . Следовательно, анализ задач предметной области и построение ее концептуальной модели определяют и оптимальную (адекватную) структуру соответствующей автоматизированной системы управления для этой предметной области.

Синтез виртуальной макроструктуры системы управления и ее отображение на реальную структуру программно-аппаратных средств позволяет определить набор элементарных компонентов (атомов) для структурно-алгоритмического синтеза системы. Построение адекватной системы - достаточно трудоемкая задача, связанная с необходимостью удовлетворения условий изоморфизма на всех соответствующих уровнях декомпозиции задачи и организации системы, причем эти требования должны удовлетворяться для любой задачи исследуемой предметной области, что находится в противоречии с требованием гибкости системы по отношению к описанию предметной области.

Поэтому для практических приложений в динамичных областях, таких как управление безопасностью сложных систем, актуальна задача синтеза покрывающих систем, обеспечивающих решение комплекса управленческих задач субъекта управления с удовлетворяющими его значениями параметров качества цепочек действий. Согласно принципам построения покрывающих систем каждая подзадача этого комплекса решается отдельной подсистемой. При этом по известным параметрам атомарных элементов нижнего уровня макроструктуры строятся отображения алгебры цепочек на алгебры соответствующих параметров «снизу вверх», до уровня иерархии системы, на котором субъект управления может принять решение либо о целесообразности использования синтезированной системы, либо о необходимости изменения постановки исходной задачи или коррекции программно-аппаратного обеспечения системы с целью изменения параметров атомарных элементов. Примеры такого синтеза приведены в ряде современных исследований [9-13].

Проблемы синтеза покрывающих и адекватных систем

При построении покрывающих и адекватных систем на основе формальной рекуррентной модели в задачах управления безопасностью сложных объектов приходится сталкиваться с множеством трудностей, характерных для процессов принятия управленческих решений. Так, на уровнях оперативного и стратегического управления региональной безопасностью не всегда возможна полная формализация решаемых задач управления. Это относится к процедурам синтеза концептуальной модели этой предметной области (выбор числа уровней модели и элементов различных уровней, выделение классов эквивалентности и предста-

вителей классов эквивалентности), алгоритмов и программ управления безопасностью (выбор конкретных представителей классов эквивалентности и операций, объединяющих этих представителей). Подобные процедуры практически реализуемы только с привлечением неформализованных экспертных знаний потенциальных участников процессов обеспечения региональной безопасности во взаимодействии с соответствующими средствами информационно-аналитической поддержки их управленческой деятельности. Этот интерактивный диалоговый процесс представляет собой, по сути, последовательность выработки и принятия решений.

К важнейшим в выработке решений относятся проблемы представления званий о состоянии и изменениях предметной области, оценка текущих состояний решения задач, выбор конкретного решения, обучение системы на основании накопленного опыта. Знания могут иметь неясную, неточную, неопределенную природу, обусловленную неточностью наблюдений и измерений, априорным незнанием, неопределенностью (недостаточностью информации для оценки или принятия решения), субъективными факторами, неполнотой данных, расплывчатостью (формой выражения качества объекта, события, процесса, которая не может быть выражена количественно). В оценке, выборе и обучении также могут присутствовать подобные элементы, связанные с присущими человеку индивидуальными особенностями мышления и накопления опыта, в том числе влияние на управление так называемого человеческого фактора.

В реальных приложениях цели, ограничения, критерии выбора достаточно субъективны и точно не определены. Поэтому при синтезе моделей покрывающих и адекватных систем для управления сложными объектами различной природы и масштаба возникает необходимость использования нечеткой логики, нечетких множеств и отношений [14]. Нечеткие отношения позволяют моделировать плавное, постепенное изменение свойств, а также неизвестные функциональные зависимости, выраженные в виде качественных взаимосвязей. Нечеткие алгоритмы управления, допускающие применение нечетких инструкций, широко распространенных в различных сферах человеческой деятельности, позволяют задавать приближенные рассуждения и, следовательно, пригодны для приближенного анализа систем управления и процедур принятия решений, не формализуемых на основе использовании традиционных количественных методов. Таким образом, применение математического аппарата теории нечетких множеств и отношений для многоцелевого распределенного управления безопасностью региона позволит упростить задачу обеспечения региональной безопасности за счет нечеткой постановки целей управления и смягчения ограничений, накладываемых на управление и соответствующие показатели качества (целевые функции) системы поддержки принятия решений.

Заключение

В работе предложена адаптация функционально-целевого подхода к построению структуры покрывающих и адекватных систем для задач управления региональной безопасностью на основе формальной рекуррентной модели этой предметной области, содержательно представляющей собой изоморфный или гомоморфный «проект» соответствующей этим задачам автоматизированной

системы управления. Подход обеспечивает структурно-алгоритмический синтез многоуровневых распределенных систем управления, действия которых покрывают цели и задачи обеспечения региональной безопасности на всех уровнях системной организации, и позволяет учитывать специфику предметной области. Новизна предлагаемого подхода заключается в расширении области применения функционально-целевой технологии на задачи управления региональной безопасностью. В частности, созданные рекуррентные модели и формализованные на их основе понятия покрывающих и адекватных систем для этой предметной области обеспечили формальную основу сочетания численных и экспертных оценок адекватности алгоритмов и программ управления с эвристическими приемами участников процессов принятия управленческих решений в применении к слабоформализованным задачам управления безопасностью региональных социально-экономических систем.

С точки зрения практики, покрывающие и адекватные системы интересны, прежде всего, тем, что они отражают структуру решаемых задач управления. Формируя профиль защиты критически важных объектов региона и планируя меры противодействия угрозам региональной безопасности на концептуальной модели предметной области, тем самым синтезируются алгоритмы и программы управления рисками нарушения безопасности этих объектов в соответствующей автоматизированной системе и на соответствующих уровнях обеспечения безопасности. Рекуррентные способы интерактивного планирования алгоритмов и программ управления региональной безопасностью позволяют использовать эту систему не только как формальную основу автоматизации постановки и решения задач управления безопасностью, но и как средство структурного проектирования самой системы управления на основе функционально-целевого подхода. Одно из характерных отличий функционально-целевого подхода заключается в том, что если построена покрывающая или адекватная система, то синтезированные цепочки целей уже являются концептуальными описаниями алгоритма или программы управления, то есть описаниями композиций действий для достижения этих целей. При этом для количественной оценки параметров построенных цепочек целей и действий используется один и тот же математический аппарат.

Результаты исследования нашли применение при решении задач информационной поддержки и координации управления региональной безопасностью Мурманской области, а также использованы при реализации основных направлений государственной политики России в Арктике на период до 2035 года в части разработки систем поддержки принятия решений для региональных ситуационных центров.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (тема НИР № 0226-2019-0035).

Литература

1. Маслобоев А.В., Путилов В.А., Сютин А.В. Многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региона //

- Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6(94). С. 163-170.
2. Маслобоев А.В., Путилов В.А., Сютин А.В. Координация в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 130-138.
 3. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. 222 с.
 4. Кузьмин И.А., Путилов В.А., Фильчаков В.В. Распределенная обработка информации в научных исследованиях. Л.: Наука, 1991. 304 с.
 5. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 343 с.
 6. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Функционально-целевые модели управления региональной безопасностью (Часть 1. Синтез цепочек целей и действий) // Информационно-технологический вестник. 2021. № 2.
 7. Мясников В.А., Игнатьев М.Б., Перовская Е.И. Модели планирования и управления производством. М.: Экономика, 1982. 231 с.
 8. Игнатьев М.Б. Голономные автоматические системы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 204 с.
 9. Меркулов А.А. Синтез облика организации на основе комбинированных подходов и моделей // Информатизация и связь. 2019. № 3. С. 26-32.
 10. Цыгичко В.Н., Попович А.Ю. Синтез иерархических систем управления. Теория и практика. М.: Красанд, 2011. 256 с.
 11. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Модели и технологии информационной поддержки логистики инноваций // Инновации. 2011. № 6(152). С. 40-53.
 12. Смирнов А.В., Пашкин М.П., Шилов Н.Г., Левашова Т.В. Контекстно-управляемая поддержка принятия решений в распределенной информационной среде // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 1. С. 38-48.
 13. Игнатьев М.Б., Путилов В.А., Смольков Г.Я. Модели и системы управления комплексными экспериментальными исследованиями. М.: Наука, 1986. 232 с.
 14. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, Iss. 3. pp. 338-353.

УДК 004.8

Перспективы развития искусственного интеллекта в России

Г.С. Мокану, аспирант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Статья посвящена обзору современной ситуации и перспектив развития искусственного интеллекта в Российской Федерации. Россия обладает огромным потенциалом для развития искусственного интеллекта и информационных технологий, в связи с этим актуальным становится изучение проблем развития данных сфер. Помимо этого статья излагает варианты решения проблем повышения инновационной активности в области искусственного интеллекта и информационных технологий.

Искусственный интеллект, проблемы развития, информационные технологии, Российская Федерация, конкурентоспособность.

Prospects for the development of artificial intelligence in Russia

G.S. Mokanu, graduate student,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The article is devoted to the review of the current situation and prospects for the development of artificial intelligence in the Russian Federation. Russia has a huge potential for the development of artificial intelligence and information technologies, in this regard, the study of the problems of the development of these areas becomes relevant. In addition, the article presents options for solving the problems of increasing innovation activity in the field of artificial intelligence and information technologies.

Artificial intelligence, development problems, information technologies, the Russian Federation, competitiveness.

В настоящее время в экономике одним из важнейших ресурсов является информация, поэтому на современном этапе развития науки серьезное внимание уделяется технологии ее обработки. Искусственный интеллект называют кульминацией развития информационных технологий [10, С. 20]. Искусственный интеллект направлен на укрепление человеческого потенциала для принятия решений и управления [10, С. 26].

Цель работы – анализ проблем развития технологий искусственного интеллекта в РФ.

Клаус Шваб, немецкий экономист и основатель Всемирного экономического форума, считал, что искусственный интеллект является одним из основных факторов четвертой промышленной революции [7, стр. 51]. Формирование и развитие искусственного интеллекта как научного направления можно отнести к 50 гг., когда уровень развития науки и техники позволил ученым уверенно говорить о возможности создания и использования искусственного «разума».

Искусственный интеллект – междисциплинарное научное и прикладное направление, характеризующееся множественностью применяемых методов. В процессе создания интеллектуальных информационных систем специалисты в области информатики, программирования, нейрофизиологии, экономики, психологии, лингвистики и т.д. [5, 7] взаимодействуют друг с другом.

По мнению А.П. Ершова, искусственный интеллект – это наука, изучающая общие свойства и закономерности, присущие процессу мышления [6, С. 35].

Как отмечает А.С. Карпенко, искусственный интеллект (ИИ) – это совокупность знаний и методов их использования для создания интеллектуальных систем, обеспечивающих работу интерфейсов человек-машина. Он также определяется как область исследований по созданию программного обеспечения, способного генерировать суждения естественного языка, обоснованные обоснования, основанные на этих суждениях, имитация поведения человека.

В начале 70-х годов XX века, когда возникла новая область, его последователи рассматривали программирование как своеобразный способ общения с компьютером. Программирование для них было лишь удобным средством обмена информацией между человеком и машиной, то есть средством общения.

Они считали, что в будущем машины смогут мыслить как люди, и считали необходимым научить их пользоваться простыми правилами и процедурами. Однако уже на ранних стадиях развития этой области возникло противоречие между желанием общаться с машиной и желанием развивать искусственный интеллект [7, Р. 151].

В дальнейшем эти противоречия только усиливаются. Когда в результате долгих исследований и экспериментов нам удалось сформулировать основные законы человеческой мысли, мы почувствовали, что это еще не все, над чем нам нужно работать. Если мы сможем сформулировать законы мышления, универсальные для каждого, это приведет к созданию системы, способной понимать и оперировать человеческим мышлением. Именно на этом этапе нам удалось разработать систему, которая позволяет компьютеру понять, о чем мы говорим.

Поскольку машины не обладают «интеллектом», они не могут отвечать на вопросы, заданные человеком, а значит, такие ответы не могут быть полезны. Мы можем научить машину принимать решения, и, следовательно, она может заменить нас во многих случаях. Но если мы сможем научить ее задавать вопросы, она не сможет на них ответить, потому что не будет знать, о каких вопросах идет речь.

Создание интеллектуальных информационных систем осуществляется в одной или нескольких областях искусственного интеллекта, суть которых кратко изложена в таблице 1.

Таблица 1 – Краткая характеристика основных направлений искусственного интеллекта

Направление	Характеристика
Представление знаний	Формализация и презентация знаний в памяти интеллектуальных информационных систем. Создайте специальные модели представления знаний и языков программирования, чтобы описать их. Формирование методов и процедур извлечения знаний.
Манипулирование знаниями, в том числе автоматизация рассуждений	Разработка методов убедительного вывода о доступных знаниях. Создание моделей мышления, основанных на знаниях и подражании процессу мышления человека. Разработка методов пополнения, структурирования, формализации и классификации знаний.
Восприятие и общение, в том числе обработка образной информации, обработка естественного языка	Решение проблем распознавания, понимания и синтеза связанных текстов на естественном языке, речи и визуальных изображениях.
Пользовательский интерфейс и модели пользователя	Динамическое моделирование пользователей (например, в системах электронной коммерции), создание настраиваемого интерфейса, мониторинг и анализ поведения пользователей в информационной и коммуникационной сети Интернет.
Обучение интеллектуальных информационных систем	Создание методов адаптации доступных знаний на основе новой информации, методов создания новых знаний, методов классификации и обобщения знаний и т.д.
Интеллектуальный анализ данных	Это направление исследования связано с раскрытием форм в доступной информации и прогнозированием на основе выбранных шаблонов.
Поведение интеллектуальных информационных систем, в том числе много-агентные системы	Создание специальных поведенческих процедур, которые позволяют интеллектуальным информационным системам адекватно взаимодействовать с внешней средой, другими информационными системами и людьми. Разработка модели соответствующего, нормативного и ситуационного поведения, специальных.
динамические интеллектуальные системы	Многоуровневые методы планирования и методы коррекции планов в динамических условиях.
Нечеткие модели и мягкие вычисления	Изучение нечетких схем заключения, «аналоговое рассуждение», разработка методов решения проблем оптимизации с использованием технологий генетического поиска, создание алгоритмов эволюционного моделирования с динамическими параметрами и т.д.
Создание аппаратного и программного обеспечения интеллектуальных информационных систем	Разработка инструментов, предназначенных для создания интеллектуальных информационных систем, компьютеров, ориентированных на обработку информации о персонаже, интеллектуальных роботах и т.д.

Направление	Характеристика
Игры и машинное творчество	Качество компьютерной игры во многом зависит от уровня реализации элементов искусственного интеллекта в ней. Написание музыки и поэзии, автоматизация изобретений новых объектов.
Интеллектуальные роботы	Создание интеллектуальных роботов стало возможным благодаря сочетанию технологий и методов искусственного интеллекта, кибербезопасности и робототехники.

Направление искусственного интеллекта, представленное в таблице 1, тесно связано, поэтому в некоторых случаях это различие обусловлено.

Как справедливо отмечали Е.Н. Смирнов и С.А. Лукьянов, «развитие искусственного интеллекта может не только изменить бизнес, но и изменить форму конкуренции на мировом рынке, способствовать дифференциации стран мира по уровням экономического и технологического развития...» [9, С. 58]. По мнению экспертов Организации экономического сотрудничества и развития (англ., Организация экономического сотрудничества и развития, ОЭСР), в краткосрочной перспективе ожидается развитие использования искусственного интеллекта в сфере услуг (медицина, развлечения, Маркетинг, Финансы) [9, С. 58].

Искусственный интеллект как научное направление начал развиваться в Советской России в 1950-х годах XX века, но позже эта индустрия знаний подверглась критике в рамках кибернетики, долгое время считавшейся лженаукой. Но, несмотря на все трудности, российские исследователи внесли значительный вклад в развитие технологий искусственного интеллекта.

В частности, в нашей стране впервые был разработан программный комплекс, способный решать сложные задачи анализа текстов. Кроме того, русский ученый разработал систему машинного перевода, которая стала первой в мире и сегодня используется в системах распознавания речи для переводов с одного языка на другой.

Следует отметить, что отечественные машины способны не только переводить текст, но и распознавать речь, чтобы составить предложение. Кроме того, в России разрабатывается технология, которая позволит определить наличие или отсутствие психических расстройств у человека. Российские ученые считают, что в ближайшее время можно будет точно диагностировать у человека шизофрению или биполярное расстройство. По данным российских СМИ, в настоящее время отечественная биоинженерия добилась очень больших успехов в этой области. Так, ведутся работы по созданию модели искусственного интеллекта, которая позволит распознавать, например, признаки шизофрении у водителя или пациента Нейропсихиатрического диспансера.

Рождение искусственного интеллекта в нашей стране было связано с 1954 годом, когда в МГУ открылся семинар «игровые автоматы и мысль» под руководством ученых, в состав которого вошли специалисты в области математики, психологии, лингвистики, физиологии [2, с. 12]. Вскоре в Советской России, как и за рубежом, сформировались две области искусственного интеллекта: нейроги-

бернетика и кибернетика «черного ящика» [3].

В настоящее время в РФ искусственный интеллект официально признан областью науки. Издаются специализированные научные журналы, проводятся научные конференции и семинары по различным темам, связанным с искусственным интеллектом. Российская ассоциация искусственного интеллекта (Раиа) продолжает свою работу. В 2020 году Ассоциация состояла из 44 региональных филиалов и 158 членов. RIA является организатором многочисленных научных семинаров по искусственному интеллекту, которые ежегодно проводятся в разных регионах страны [6].

В Российской Федерации ведутся исследования по распознаванию речи, распознаванию лица и модели, автономным системам вождения и т.д., а крупная российская компания активно использует технологию искусственного интеллекта в процессе хозяйственной деятельности [7]. Эксперты отмечают высокую перспективу развития России в области искусственного интеллекта, которая, к сожалению, ограничена отсутствием финансирования и отсутствием необходимых институциональных условий [9, С. 65-66]. Конкретные примеры современных национальных достижений в области искусственного интеллекта можно найти в статье [7].

Сегодня использование ИИ в России находится на довольно низком уровне. Во всем мире технологии ИИ становятся все более распространенными и востребованными в промышленности и услугах. Технологии ИИ, которые могут быть применены в этой области, имеют решающее значение для развития конкурентных преимуществ компании. По оценкам экспертов, рынок технологий искусственного интеллекта (ИИ) в России оценивается более чем в 1 млрд долларов. Однако, по словам представителей IT-индустрии, в стране отсутствует общее понимание того, что такое искусственный интеллект, его отличительные особенности и преимущества, которые он может принести компаниям.

К сожалению, в России прикладные исследования в области искусственного интеллекта и коммерциализация результатов этих исследований идут гораздо медленнее, чем за рубежом [2, С. 12], и был разрыв между фундаментальной наукой и воплощением ее достижений в конкретный продукт [7, С. 57].

В последние годы наблюдается тенденция к созданию интегрированных систем, включающих как отдельные блоки, так и взаимосвязанные подсистемы (далее именуемые «KSA»), а также формирование рынка KSA. Так, по данным Министерства образования и науки РФ, рост количества KCA в стране с 2000 по 2012 год составил в среднем три раза, количество KCA на предприятиях превысило 5000 единиц [2, С. 16].

Результаты исследования, представленного в статье [1], показывают, что Российская Федерация обладает значительным инновационным потенциалом. Народная экономика в процессе решения проблемы совершенствования инноваций (в том числе технологии искусственного интеллекта) необходима, прежде всего, для повышения качества процессов управления на всех уровнях экономической системы.

Развитие технологии искусственного интеллекта можно рассматривать как один из важных факторов повышения конкурентоспособности отечественной

экономики. Отставание в развитии искусственного интеллекта грозит длительной экономической отсталостью. Россия обладает значительным потенциалом в области технологий искусственного интеллекта. Народная экономика в процессе решения проблемы совершенствования инноваций в области искусственного интеллекта необходима, прежде всего, для повышения качества процессов управления на всех уровнях экономической системы.

Литература

1. Бакуменко М.А. Оценка влияния инноваций на уровень глобальной конкурентоспособности национальной экономики // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2020. No 4 (70). С. 66-72.
2. Казаков П.В., Шкаберин В.А. Основы искусственного интеллекта // Брянск: БГТУ. 2007. 196 с.
3. Масленникова О.Е., Попова И.В. Основы искусственного интеллекта // Магнитогорск: МаГУ. 2008. 282 с.
4. Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. М.: ЛЕНАНД, 2018. 272 с.
5. Остроух А.В. Системы искусственного интеллекта: монография / А.В. Остроух, Н.Е. Суркова. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 228 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/113401> (дата обращения: 24.08.2021).
6. Официальный сайт Российской ассоциации искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.raai.org/> (дата обращения: 24.08.2021).
7. Пройдаков Э.М. Современное состояние исследований в области искусственного интеллекта // Цифровая экономика. 2018. No 3 (3). С. 50-63.
8. Рябова А.А., Гериева М.Х. Искусственный интеллект как научная область. Основные направления исследований // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2019. No 2. С. 62-64.
9. Смирнов Е.Н., Лукьянов С.А. Формирование и развитие глобального рынка систем искусственного интеллекта // Экономика региона. 2019. Т. 15. вып. 1. С. 57-69.
10. Смолин Д.В. Введение в искусственный интеллект. Москва: Физматлит, 2007. 292с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=76617> (дата обращения: 24.08.2021).

УДК 004.891

**Анализ влияния характеристик графа в задаче предсказания
новых зависимостей**

О.П. Мосалов, кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией интеллектуальных систем управления,
А.О. Ефимова, студент 3 курса кафедры информационно-коммуникационных
систем и технологий,
Д.А. Соколова, студент 3 курса кафедры информационно-коммуникационных
систем и технологий,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В работе рассматривается задача предсказания новых зависимостей между сущностями предметной области на основе информации, извлечённой из плохо структурированных данных. Предложены структура хранения таких данных в виде графа и алгоритм поиска новых сущностей на основе значений ряда характеристик такого графа. Приведены описание вычислительных экспериментов и обсуждение их результатов. Сформулированы требования к единой метрике оценки эффективности таких алгоритмов, приведены результаты анализа существующих метрик.

Граф онтологии, поиск новых связей в графе, метрика эффективности алгоритма, анализ данных.

Analysis of influence of graph characteristics in the task of link prediction

O.P. Mosalov, PhD., Head of the Laboratory of Intelligent Control Systems,
A.O. Efimova, 3rd year student of the Department of Information and Communication
Systems and Technologies,
D.A. Sokolova, 3rd year student of the Department of Information and Communication
Systems and Technologies,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

In the article a task of link prediction in a subject area, that is based on the information extracted from improperly structured data, is considered. A structure to store such data in a form of a graph and an algorithm for link prediction based on the characteristics of the graph are suggested. The computational experiments are described and their results are discussed. Requirements for a unified metric for such algorithms are defined, and the results of existing metrics analysis are given.

Ontology graph, link prediction, algorithm performance metric, data mining.

Анализ данных является одним из приоритетных направлений компаний для их успешного развития и получения дополнительных средств путем привлечения новых потребителей, но не все имеющиеся данные возможно представить в виде, который подходит для машинного анализа. Анализ данных – это своего рода процесс извлечения знаний из экспериментальных данных или же процесс фильтрации, исследования. Большинство компаний сталкиваются с такой проблемой, как отсутствие готовых инструментов и экспертизы для работы с плохо структурированными данными [1].

В данной статье предлагается подход для решения данной проблемы, который позволяет улучшить качество работы при обработке плохо структурированных данных на промышленных предприятиях.

Формат хранения обработанных данных. Существует огромное количество способов хранения и обработки информации, подходящих для различных задач и имеющих свои плюсы и минусы.

В данной работе рассматривается графовая структура данных [2, 3], так как она реализует иерархию, что соответствует экспертным представлениям о рассматриваемых данных. Эта структура данных позволяет быстро и эффективно получать доступ к атрибутам сущностей и связям между ними, по сравнению с иными структурами данных, а также позволяет эффективно визуализировать полученные данные [8, 9, 18].

В данной работе в качестве источника данных был использован массив документов, предоставленных компанией-партнёром. Документы имели различный формат: doc, docx, pdf, ppt и т.п., а также различный тип: презентация с конференции, письмо, запрос на коммерческое предложение, благодарность, чертёж и другие.

Иерархия рассматриваемой структуры данных состоит из пяти слоёв, а именно: «способности», «компания», «интересы», «технологии» и «материалы». Информация сохраняется в данной структуре в виде точек, соответствующих отдельным сущностям, и в виде зависимостей между ними. Ключевой слой – это «компания», именно от него идут зависимости к другим слоям и сущностям. При этом считается, что между двумя сущностями есть зависимость, если обе эти сущности упомянуты в одном и том же документе.

Для извлечения информации из массива документов и представления её в виде описанной выше структуры данных было использовано два дополняющих друг друга подхода:

1. Анализ документов и извлечение данных вручную.
2. Получение данных с помощью алгоритмов извлечения именованных сущностей.

Первый подход даёт очень хорошие точность и качество извлечения данных, но требует большого количества ресурсов как на подготовительном этапе – когда определяются общие правила извлечения данных, так и на основном этапе

– когда данные непосредственно извлекаются.

Второй подход гораздо эффективнее и быстрее в части процесса извлечения данных, однако может обеспечить меньшую точность, так как часть информации существующими алгоритмами извлечь не удалось.

Исходя из описанных достоинств и недостатков рассматриваемых подходов, они были применены совместно: первый подход (ручное извлечение данных) применялся на первом этапе, чтобы корректно сформулировать алгоритм для второго подхода (автоматического извлечения данных), при этом результат ручного извлечения также использовался для оценки работы автоматического извлечения.

Так, по итогам ручного анализа 15% имеющегося массива документов было выделено 429 сущностей следующих типов:

- «способности» – 23 сущности;
- «компании» – 183 сущности;
- «интересы» – 50 сущностей;
- «технологии» – 78 сущностей;
- «материалы» – 95 сущностей.

Примеры выделенных сущностей:

- «способности»: «сертификация готовых изделий», «изготовление форсунок газовых турбин»;
- «компании»: «ПАО Электромеханика», «МИСиС»;
- «интересы»: «струйная 3D-печать», «производство стального порошка»;
- «технологии»: «выборочное лазерное плавление», «прямое лазерное спекание»;
- «материалы»: «тугоплавкие металлы», «порошок никелевый».

Примеры выделенных зависимостей:

- «компания – компания»: «Роскосмос» – «Sciaky, Inc.»;
- «способности – технологии»: «порошок из титанового сплава втб» – «аддитивные технологии»;
- «компания – интерес»: «СПбПУ» – «развитие технологий».

На рисунке 1 приведён пример визуализации данных, где граф построен на реальных данных.

Нужно отметить, что для выделенных 429 сущностей потенциально возможно существование $\frac{1}{2} 429(429 - 1) = 91806$ зависимостей, однако извлечено было только 693 зависимости, что составляет 0,75% от потенциально возможного количества.

В связи с этим сделано предположение, что фактически существуют и другие зависимости между известными сущностями, информация о которых не содержится в явном виде в имеющихся данных, но может быть определена с помощью алгоритма предсказания новых зависимостей. Такие предсказанные зависимости могут связывать точки на разных слоях структуры данных и быть весьма неочевидными.

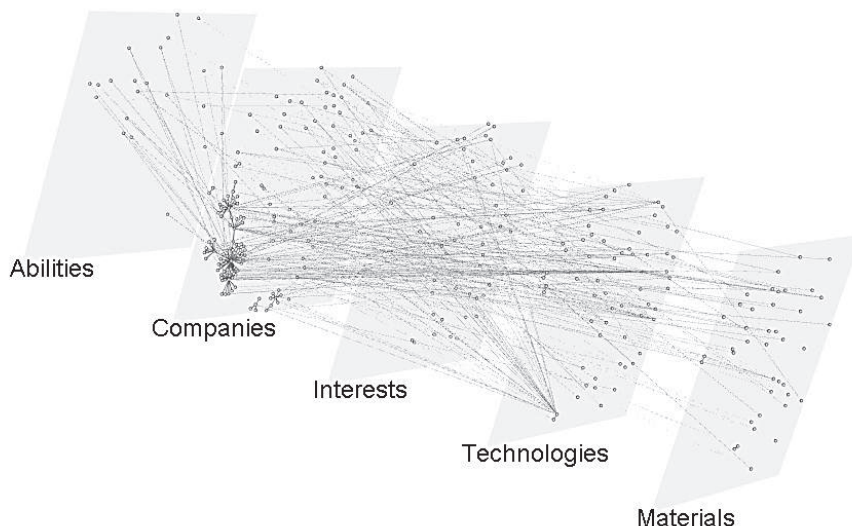


Рисунок 1 – Пример визуализации на текстовых данных

Существует большое количество семейств алгоритмов, применимых к данной задаче, в данной статье рассматривается одно из таких семейств.

Описание используемого алгоритма. В рамках данной работы предлагается к рассмотрению алгоритм, основанный на вычислении ряда характеристик графа, образованного сущностями и связями между ними. Алгоритм основан на использовании следующих десяти характеристик графа, реализованных в библиотеке NetworkX [14]:

- Сообщества, основанные на модулярности.
- Сообщества, полученные методом распространения меток.
- Связность.
- К-компонентная структура.
- Клики.
- Кластеризация.
- Доминирующие множества.
- Независимое множество.
- Паросочетание.
- Вершинное покрытие.

Ниже каждая из этих характеристик рассмотрена более подробно и для каждой из них выделены предлагаемые параметры алгоритма:

1. Сообщества, основанные на модулярности.

Сообщество – это подмножество точек графа и связи между ними.

Модулярность – величина из отрезка $[-1,1]$, оптимизируя которую можно получить разбиение графа на сообщества.

Модулярность сообщества – это разность между количеством связей, входящих в него, и ожидаемым количеством связей в сообществе, если бы все связи были заданы случайно.

Рассматриваемый алгоритм изначально считает каждую точку отдельным сообществом, а затем объединяет пары сообществ так, чтобы модулярность возрастала, пока это не станет невозможным.

Результат работы метода – набор сообществ.

Предлагаемый параметр для анализа – количество сообществ.

2. Сообщества, полученные методом распространения меток.

Алгоритм присваивает каждой точке графа уникальную метку, затем для каждой точки берутся все метки в ее окрестности (от точек, соединенных с данной) и метка точки заменяется на самую популярную метку из окрестности. Если несколько меток одинаково популярны – берется одна из них случайным образом. Когда метка каждой точки совпадает с самой популярной точкой ее окрестности – алгоритм останавливается.

Результат работы метода – набор сообществ.

Предлагаемый параметр для анализа – количество сообществ.

3. Связность.

Связность – это минимальное количество точек, которые нужно удалить из графа, чтобы он стал несвязным.

Результат работы метода – величина связности графа.

Предлагаемый параметр для анализа – величина связности графа.

4. К – компонентная структура.

Алгоритм возвращает пары «число – подграф», где подграф – максимален и имеет связность не ниже указанного числа. K -связность означает, что из графа надо удалить минимум k связей, чтобы он стал несвязным.

Предлагаемые параметры для анализа – размер подграфа для значения связности 1, 2, 3.

5. Клики.

Клика – это набор точек, каждая пара из которых соединена связью. Алгоритм возвращает клику максимального размера.

Предлагаемый параметр для анализа – размер максимальной клики.

6. Кластеризация.

Величина кластеризации для точки – это отношение количества треугольников, которые существуют в окрестности точки к общему количеству возможных треугольников в окрестности точки.

Средняя величина кластеризации графа – среднее значение кластеризации точек по всем точкам графа.

Алгоритм берет случайную точку в графе, затем берет две случайных точки в ее окрестности и проверяет, соединены ли они связями (есть ли треугольник). Это повторяется N раз, после чего оценкой кластеризации считается отношение количества найденных треугольников к числу повторов N . Алгоритм возвращает оценку средней величины кластеризации графа.

Предлагаемый параметр для анализа – средняя величина кластеризации для N больше числа точек в графе (10000) при фиксированном значении инициализации генератора случайных чисел.

7. Доминирующие множества.

Для графа можно определить доминирующее множество точек и домини-

рующее множество связей.

Доминирующее множество точек – такое подмножество точек графа, что любая точка, не входящая в это подмножество, соединена связью с одной из точек подмножества.

Доминирующее множество связей – такое подмножество связей графа, что любая связь, не входящая в это подмножество, содержит точку одной из связей подмножества.

Алгоритмы возвращают минимальные доминирующие множества точек и связей графа.

Предлагаемые параметры для анализа – размеры минимальных доминирующих множеств.

8. Независимое множество.

Независимое множество – это подмножество точек графа, никакие две из которых не связаны между собой.

Алгоритм возвращает максимальное независимое множество.

Предлагаемый параметр для анализа – размер максимального независимого множества.

9. Паросочетание.

Паросочетание – это множество попарно несмежных связей в графе.

Максимальное паросочетание – такое паросочетание, которое не содержится в другом паросочетании.

Алгоритм возвращает наименьшее максимальное паросочетание.

Предлагаемый параметр для анализа – размер наименьшего максимального паросочетания.

10. Вершинное покрытие.

Вершинное покрытие графа – такое множество точек графа, что у любой связи хотя бы одна точка входит в данное множество.

Алгоритм возвращает минимальное вершинное покрытие графа.

Предлагаемый параметр для анализа – размер минимального вершинного покрытия.

Итого, после рассмотрения приведённых выше характеристик, был сформулирован следующий список параметров для алгоритма:

- Количество сообществ, основанных на модулярности;
- Количество сообществ, найденных алгоритмом распространения мемов;
- Величина связности графа;
- Размер подграфа для значения связности 1;
- Размер подграфа для значения связности 2;
- Размер подграфа для значения связности 3;
- Размер максимальной клики;
- Оценка средней величины кластеризации графа для 10000 повторов;
- Размер минимального доминирующего множества точек;
- Размер минимального доминирующего множества связей;
- Размер максимального независимого множества;

- Размер наименьшего максимального паросочетания;
- Размер минимального вершинного покрытия.

Алгоритм построения новых связей в графе имеет следующий вид:

1. Фиксируется список параметров для анализа.
2. Вычисляются и сохраняются значения параметров для исходного графа.
3. Формируется список потенциальных новых связей – всех возможных связей, отсутствующих в графе.
4. Для каждой связи из списка потенциальных новых связей вычисляются и сохраняются значения параметров для анализа.
5. Вычисляются евклидовы расстояния от значений параметров для потенциальных связей до значений параметров исходного графа.
6. Отбираются десять самых близких и десять самых дальних конфигураций графа по отношению к исходному графу.
7. Полученные данные анализируются и интерпретируются.

Вычислительные эксперименты. Для проведения вычислительных экспериментов, в том числе с применением мощностей СберКлауд [4], была создана программа на языке программирования Python, которая ищет новые связи.

В рамках серии экспериментов была проведена трудоемкая работа по анализу параметров. Все десять параметров были проверены и классифицированы на два типа: максимально влияющие на результат работы алгоритма и вносящие минимальные изменения.

План вычислительных экспериментов выглядел следующим образом: вычисляем самые похожие и самые непохожие десять потенциальных рёбер для следующих наборов параметров:

1. Первые два – «Количество сообществ, основанные на модулярности», «количество сообществ, полученные методом распространения меток»;
2. Первые три – «Количество сообществ, основанные на модулярности», «количество сообществ, полученные методом распространения меток», «величина связности графа»;
3. Первые четыре – «Количество сообществ, основанные на модулярности», «количество сообществ, полученные методом распространения меток», «величина связности графа», «размер подграфа для значения связности 1, 2, 3» (было показано, что имеет смысл рассматривать только один из этих трёх параметров, так как влияние на результат идентично);
4. Первые пять – «Количество сообществ, основанные на модулярности», «количество сообществ, полученные методом распространения меток», «величина связности графа», «размер подграфа для значения связности 1, 2, 3», «размер максимальной клики».

В результате оказалось, что для всех этих экспериментов полученные новые зависимости совпадают, причём вычисляемые в процессе работы расстояния между новыми вариантами графа и исходным графом также совпадают.

Далее аналогично были проанализированы различные наборы параметров с шестого по десятый: «Оценка средней величины кластеризации графа», «раз-

меры минимальных доминирующих множеств», «размер максимального независимого множества», «размер наименьшего максимального паросочетания», «размер минимального вершинного покрытия».

В данном случае полученные отношения снова совпали, однако различались вычисленные расстояния.

Далее были проведены эксперимент по комбинации различных вариантов параметров и наблюдалось, как меняются новые отношения и вычисляемые расстояния. Целью данного эксперимента заключалось в том, чтобы увидеть изменения ребер и влияние данных параметров, понять их нужность и актуальность. В таблице 1 кратко изложены результаты теста.

Таблица 1 – Результат тестирования

Параметр	Количество сообществ, основанные на модулярности, количество сообществ, полученные методом распространения меток
Максимальная клика	Ближние ребра – одинаковые Дальние ребра – разные
Оценка средней величины	Ближние ребра – отчасти схожи Дальние ребра – разные
Максимально независимое множество	Ближние ребра – разные Дальние ребра – разные
Мин. доминирующие множества	Ближние ребра – одинаковые Дальние ребра – разные

В результате начальный список из десяти параметров был переработан:

- часть параметров (четыре) были отброшены по одной из двух причин: либо минимальное влияние на результат работы алгоритма, либо существенное увеличение времени работы алгоритма;
- часть параметров (четыре) были выбраны основными, как имеющие наибольшее влияние на результаты: «размер максимальной клики», «оценка средней величины кластеризации графа», «размер максимального независимого множества», «размер минимальных доминирующих множеств»;
- часть параметров (два) были оставлены как опциональные, в том числе для дальнейшего изучения: «количество сообществ, основанные на модулярности» и «количество сообществ, полученные методом распространения меток».

Работа по созданию единой метрики. Так как задача данной работы заключается в поиске новых зависимостей между объектами на основании имеющейся информации об объектах и их известных связях, для решения данной задачи необходимо иметь возможность сравнивать различные алгоритмы или версии одного алгоритма. Добиться необходимого результата возможно путём создания единой метрики как критерия для сравнения.

В рамках данной работе рассмотрено одиннадцать различных метрик эффективности алгоритмов поиска новых зависимостей, как общеупотребительных, так и специфичных для генеративно-состязательных сетей [15]:

- Frechet Inception Distance (FID) [11] – по своей сути FID сравнивает статистику сгенерированных образцов с реальными выборками. Чем меньше расстояние между распределениями, тем выше схожесть между реальным и сгенерированным изображением.

- Annealed Importance Sampling (AIS) [10] – возвращает набор взвешенных выборок, и, в пределе бесконечного множества промежуточных распределений, дисперсия весов приближается к нулю. Чаще всего используется для оценки функций распределения, а также для оценки статистической суммы вероятностной модели.

- Geometry Score [13] – данная метрика может помочь корректировать и «настраивать» гиперпараметры в ходе работы алгоритма. В этом методе проблема оценки качества и разнообразия сгенерированных изображений решается путем изучения топологии базового множества сгенерированных выборок, которые могут отличаться от топологии исходного множества данных, что дает представление о свойствах GAN и может использоваться для настройки гиперпараметров.

- Tournament Based Method [12] – соревновательный подход, в котором одна модель оценивается, играя против её прошлых и будущих версий. Процент побед в турнире обозначает среднюю скорость, с которой сеть генератора «обманывает» сеть дискриминатора. Система оценки навыков, как следует из названия, даёт рейтинг навыков для каждого генератора, то есть данная метрика помогает контролировать процесс обучения GAN. И эти измерения подразделяются на два рейтинга: процент побед и рейтинг навыков.

- Discriminator Rejection Sampling [6] – идея этого метода заключается в том, чтобы улучшить качество обученных генераторов путем последующей обработки их выборок с использованием информации от обученного дискриминатора. При довольно строгих предположениях это позволяет точно восстановить распределение данных. Затем проводится исследование, где эти строгие допущения нарушаются, и разрабатывается практический алгоритм, называемый выборкой отбраковки дискриминатора, который можно использовать с реальными наборами данных.

- Precision And Recall [16] – с помощью этой метрики измеряется точность. Ключевая идея данной метрики заключается в измерении точности представленных данных с «заложенным нами идеалом», что практически невозможно в нашей задаче. Точность определяется как доля соответствующих экземпляров среди всех извлеченных экземпляров.

- Birthday Paradox Test [17] – идея этой метрики заключается в том, что алгоритм пытается найти «клона» исходных данных среди всех данных. Чаще всего это не работает, но если выбрать n ближайших пар в соответствии, то получим потенциальный пул «почти дубликатов».

- Normalized Relative Discriminative Score (NRDS) [19] – с помощью данной метрики можем сравнивать полученные результаты и выделять из них «наиболее ценные».

- Hits_at_n_score [5, 7] – суть метрики в формировании некоторого списка по «важности» среди выстроенных связей, что отчасти подходит к данной задаче.
- Hit and K [5, 7] – данная метрика частично подойдет к данной задаче, она используется при поиске информации по критериям в документах.
- Mrr_score [5, 7] – метрика направлена на выявление наиболее соответствующих полученных критериев к заданным. Подойдет совместно с другой метрикой.

Ниже представлена оценочная таблица 2, в которой каждая метрика рассматривается на критерии соответствия.

Таблица 2 – Оценка метрик

	Соответствует	Частично соответствует	Не соответствует
Frechet Inception Distance (FID)		+	
Annealed Importance Sampling (AIS)			+
Geometry Score		+	
Tournament Based Method			+
Discriminator Rejection Sampling		+	
Precision And Recall			+
Birthday Paradox Test			+
Normalized Relative Discriminative Score (NRDS)	+		
Hits_at_n_score		+	
Hit and K		+	
Mrr_score	+		

Для оценки того, насколько каждая рассматриваемая метрика подходит к решаемой задаче, был сформирован набор требований:

1. Универсальность – метрика не должна быть слишком специфичной, т.к. она будет применяться к различным алгоритмам и не должна вносить слишком жёсткие ограничения на их устройство.
2. Простота – числовое значение метрики должно вычисляться быстро, как минимум – оценка алгоритма не должна занимать больше времени, чем работа алгоритма.
3. Интерпретируемость – результаты применения метрики не должны быть просто числами для сравнения друг с другом, а должны соответствовать каким – то действительно существующим величинам.
4. Устойчивость – результаты вычисления метрики для алгоритма не должны меняться сильно при небольших изменениях параметров самого алгоритма.

Представим данный вывод с помощью таблицы 3.

Таблица 3 – Результат по метрикам

	«Самостоятельная» метрика	«Дополнительная» метрика
Frechet Inception Distance (FID)		+
Geometry Score		+
Discriminator Rejection Sampling		+
Normalized Relative Discriminative Score (NRDS)	+	
Hits_at_n_score		+
Hit and K		+
Mrr_score	+	

На основании данных требований из проанализированных метрик были выделены две подгруппы: основные метрики, которые могут применяться самостоятельно, и дополнительные метрики, которые могут применяться вместо основных для уточнения оценки.

В подгруппу основных метрик вошли Normalized Relative Discriminative Score (NRDS) и Mrr_score.

В подгруппу дополнительных метрик вошли Frechet Inception Distance (FID), Geometry Score, Discriminator Rejection Sampling, Hits_at_n_score и Hit and K.

Выводы и планы дальнейших исследований. В данной работе разработан формат хранения информации, извлечённой из плохо структурированных данных; предложен алгоритм поиска новых, ранее неизвестных зависимостей в графе; проведен ряд экспериментов, исходя из которых были отобраны параметры, которые не дают ошибочных результатов; проанализировано одиннадцать различных метрик, для дальнейшего анализа отобрано пять из них.

В дальнейшем необходимо разработать и рассмотреть другие, более сложные и более точные алгоритмы формирования векторных представлений рёбер графов, а также продолжить работу над созданием единой метрики, которая поможет упростить работу оценки эффективности алгоритмов.

Также, для снятия ряда ограничений, имеющихся в рассматриваемом подходе к решению задачи, планируется рассматривать данные не как статические, а в динамике. Это усложнит процесс сбора и обработки данных, однако позволит более интерпретируемо применять алгоритмы поиска новых зависимостей.

Литература

1. Ефимова А.О., Соколова Д.А. Представление и поиск информации с помощью графа онтологии // Сборник материалов XXI Ежегодной научной конференции студентов Технологического университета «Ресурсам области – эффективное использование». 2021.
2. Муромцев Д., Волчек Д., Романов А. Индустриальные графы знаний – интел-

- лектуальное ядро цифровой экономики // Control Engineering Россия. 2019. № 5(83). С. 32-39.
3. Орлов Ю.Н., Парфенова Ю.А. Анализ структуры онтологического графа толкового словаря // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 31. 25 с.
 4. СберКлауд [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aicloud.sbercloud.ru> (дата обращения: 07.06.2021).
 5. Accenture. Ampligraph [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/Accenture/AmpliGraph> (дата обращения: 21.03.2021).
 6. Azadi S., Olsson C., Darrell T., Goodfellow I., Augustus O. Discriminator rejection sampling [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://deeprai.org/publication/discriminator-rejection-sampling> (дата обращения: 21.03.2021).
 7. Costabello L., Pai S., Van C.L., McGrath R., McCarthy N., Tabacof P. AmpliGraph: a Library for Representation Learning on Knowledge Graphs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zenodo.org/record/4792436> (дата обращения: 21.03.2021).
 8. De Domenico M. Multilayer Networks: Analysis and Visualization. Introduction to tuxViz with R // Принято к публикации в Springer-Verlag. 2021.
 9. De Domenico M., Porter M.A., Arenas A. Multilayer Analysis and Visualization of Networks // Journal of Complex Networks 3. 2015. PP. 159-176.
 10. Grosse R., Reed C. Annealed importance sampling [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://metacademy.org/graphs/concepts/annealed_importance_sampling (дата обращения: 21.03.2021).
 11. Jean N. Fréchet Inception Distance [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nealjean.com/ml/frechet-inception-distance> (дата обращения: 21.03.2021).
 12. Jiang X., Gripon V., Berrou C., Rabbat M. Storing sequences in binary tournament-based neural networks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1409.0334v1.pdf> (дата обращения: 21.03.2021).
 13. Khrulkov V., Oseledets I. Geometry Score: A Method For Comparing Generative Adversarial Networks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1802.02664.pdf> (дата обращения: 21.03.2021).
 14. Network Analysis in Python [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://networkx.github.io> (дата обращения: 06.03.2021).
 15. Sagar R. Top 6 Metrics To Monitor The Performance Of GANs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://analyticsindiamag.com/top-6-metrics-to-monitor-the-performance-of-gans> (дата обращения: 07.04.2021).
 16. Sajjadi M.S.M., Bachem O., Lucic M., Bousquet O., Gelly S. Assessing Generative Models via Precision and Recall [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1806.00035.pdf> (дата обращения: 21.03.2021).
 17. Sanjeev A., Zhang Y. Do GANs actually learn the distribution? An empirical study [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1706.08224.pdf> (дата обращения: 21.03.2021).
 18. The Open Graph Viz Platform [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gephi.org/> (дата обращения: 06.03.2021).
 19. Zhang Zh., Song Y., Qi H. Decoupled Learning for Conditional Adversarial Networks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1801.06790.pdf> (дата обращения: 21.03.2021).

УДК 004.02

Современные технологии глубокого обучения для прогнозирования временных рядов

А.И. Сотников, аспирант второго года обучения кафедры управления,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Прогнозирование временных рядов стало очень интенсивной областью исследований, число которых в последние годы даже увеличивается. Глубокие нейронные сети доказали свою эффективность и достигают высокой точности во многих областях применения. По этим причинам в настоящее время они являются одним из наиболее широко используемых методов машинного обучения для решения проблем, связанных с большими данными.

Обработка данных, глубокое обучение, временные ряды.

Modern technologies of deep learning for forecasting time series

A.I. Sotnikov, graduate second year of the Department of Management,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Time series forecasting has become a very intensive area of research, the number of which has even increased in recent years. Deep neural networks have been proven to be effective and achieve high accuracy in many applications. For these reasons, they are currently one of the most widely used machine learning methods for solving big data problems.

Data processing, deep learning, time series.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие интерес к обработке огромных объемов данных резко вырос из-за массового развертывания интеллектуальных датчиков или платформ социальных сетей, которые генерируют данные на постоянной основе. Однако эта ситуация создает новые проблемы, такие как хранение этих данных на дисках или предоставление необходимых вычислительных ресурсов.

В этом контексте аналитика больших данных становится важным процессом, ориентированным на эффективный сбор, организацию и анализ больших данных с помощью стремления обнаруживать закономерности и извлекать ценную информацию. В большинстве организаций это помогает выявлять новые возможности и принимать более разумные меры, что ведет к более эффективным

операциям и более высокой прибыли [1, С.80].

На основе всех полученных знаний. В парадигмах, которые в настоящее время используются в больших данных, глубокое обучение выделяется из-за его выдающейся производительности по мере увеличения масштаба данных. Большинство вычислений слоев в глубоком обучении можно выполнять параллельно, например, мощными графическими процессорами (GPU). Таким образом, масштабируемые распределенные модели легче создавать, и они обеспечивают лучшую точность при гораздо более высокой скорости. Большая глубина позволяет выполнять более сложные нелинейные функции, но, в свою очередь, требует более высоких вычислительных затрат.

Глубокое обучение может применяться во многих областях исследований. Приложения как для контролируемых, так и для неконтролируемых задач можно найти в изобилии в литературе. Распознавание и классификация образов были первыми и наиболее актуальными применениями глубокого обучения, достигшими большого успеха в распознавании речи, интеллектуальном анализе текста или анализе изображений. Тем не менее, приложение к задачам регрессии становится довольно популярным в настоящее время в основном из-за развития архитектур глубокого обучения, специально предназначенных для работы с данными, индексированными с течением времени. Так обстоит дело с временными рядами и, более конкретно, с прогнозированием временных рядов.

Временные ряды – это набор показателей, собранных через равные промежутки времени и упорядоченных в хронологическом порядке. Трудно найти физические или химические явления без переменных, которые меняются с течением времени. По этой причине предложение подходов к прогнозированию временных рядов является плодотворным и может быть найдено почти во всех научных дисциплинах.

Статистические подходы использовались с 1970-х годов, особенно те, которые основаны на методологии Бокса-Дженкинса. Однако методы, основанные на глубоком обучении, в настоящее время достигают превосходных результатов, и много усилий прилагается для разработки новой архитектуры.

Несмотря на все, что было упомянуто ранее, основной мотивацией этой статьи является предоставление всестороннее понимание основ глубокого обучения для исследователей, интересующихся областью прогнозирования временных рядов. Кроме того, в нем содержится обзор нескольких приложений, в которых эти методы оказались успешными, и, как следствие, в литературе были выявлены пробелы в исследованиях, которые, как ожидается, вдохновят на новые и более совершенные формы знаний.

Нейронная сеть с прямой связью

Нейронные сети с глубокой прямой связью (DFFNN), также называемые многослойным персептроном, возникли из-за неспособности однослойных нейронных сетей изучать определенные функции [2, С.32]. Архитектура DFFNN состоит из входного слоя, выходного слоя и различных скрытых слоев, как показано на рисунке 1. Кроме того, каждый скрытый слой имеет определенное количество нейронов, которые необходимо определить.

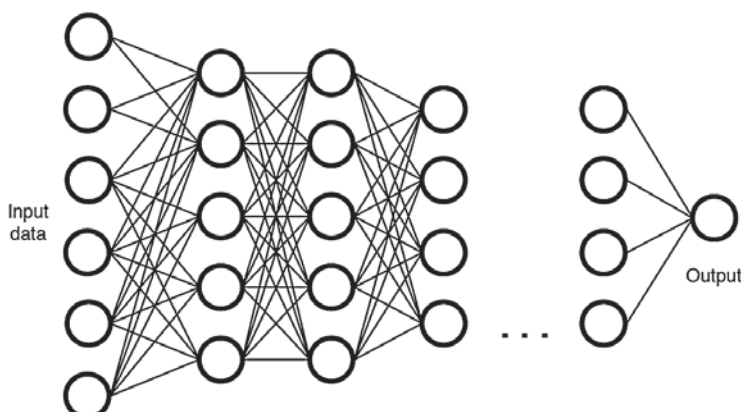


Рисунок 1 – Базовая архитектура DFFNN для прогнозирования временных рядов

Отношения между нейронами двух последовательных слоев моделируются весами, которые вычисляются на этапе обучения сети. В частности, веса вычисляются путем минимизации функции стоимости с помощью методов оптимизации градиентного спуска. Затем алгоритм обратного распространения используется для вычисления градиента функции стоимости. После вычисления весов значения выходных нейронов сети получают с помощью процесса прямой связи, определяемого следующим уравнением:

$$a^l = g(W_1^l a^{l-1} + b_a^l) \quad (1)$$

где a^l – значения активации в l -м слое, то есть вектор, составленный из значений нейронов l -го слоя, W_1^l и b_a^l – веса и смещение, соответствующие l -му слою, а g – функция активации. Следовательно, все значения a^l вычисляются с использованием значений активации $l-1$ слоя a^{l-1} в качестве входных данных. При прогнозировании временных рядов выпрямленная линейная единичная функция обычно используется в качестве функции активации для всех слоев, за исключением выходного слоя для получения прогнозируемых значений, который обычно использует функцию гиперболического тангенса (\tanh).

Для всех сетевых архитектур необходимо заранее выбрать значения некоторых гиперпараметров. Эти гиперпараметры, такие как количество слоев и количество нейронов, определяют архитектуру сети и другие гиперпараметры, такие как скорость обучения, импульс и количество итераций или размер минипакета, среди прочего, имеют большое влияние на сходимость методов градиентного спуска. Оптимальный выбор этих гиперпараметров важен, поскольку эти значения сильно влияют на результаты прогнозирования, полученные сетью. Более подробно гиперпараметры будут рассмотрены в разделе Оптимизация гиперпараметров.

Рекуррентная нейронная сеть

Рекуррентные нейронные сети (RNN) специально разработаны для работы с последовательными данными, такими как последовательности слов в задачах, связанных с машинным переводом, аудиоданные при распознавании речи или временные ряды в задачах прогнозирования [3, С.91]. Все эти проблемы имеют общую характеристику, заключающуюся в том, что данные имеют вре-

менную зависимость между ними. Традиционные нейронные сети с прямой связью не могут учитывать эти зависимости, и RNN применяют именно для решения этой проблемы. Следовательно, входные данные в архитектуре RNN являются как прошлыми, так и текущими данными. Существуют разные типы архитектур, в зависимости от количества входов и выходов данных в сети, например, один к одному (один вход и один выход), один ко многим (один вход и множество выходов), многие к одному (много входов и один выход), и многие ко многим (много входов и выходов). Наиболее распространены RNN «многие к одному» для задач классификации или «многие ко многим» для машинного перевода или прогнозирования временных рядов. Кроме того, в случае временного ряда длина последовательности входных данных обычно отличается от размера последовательности выходных данных, которая обычно представляет собой количество выборок, которые необходимо спрогнозировать. Базовая архитектура RNN для прогнозирования временных рядов показана на рисунке 2. X_i и \hat{X}_i – фактические и прогнозируемые значения временного ряда в момент времени i , а h – количество выборок, которые необходимо прогнозировать, называемые горизонтом прогнозирования.

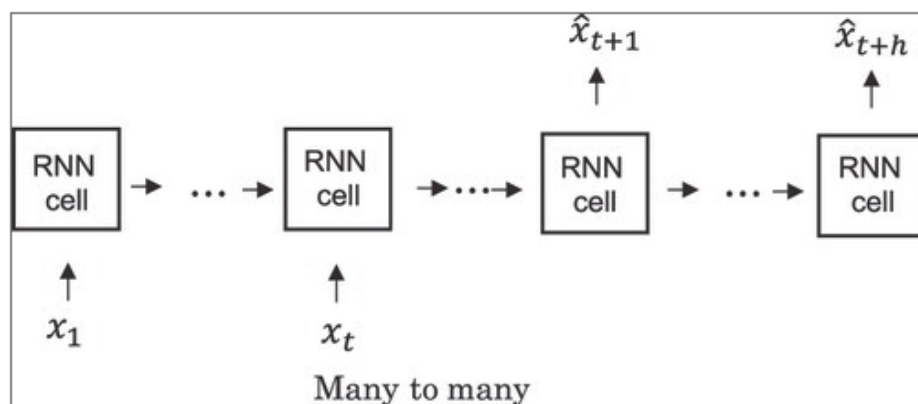


Рисунок 2 – Базовая архитектура РНС для прогнозирования временных рядов

Ниже кратко описаны наиболее широко используемые RNN для прогнозирования временных рядов.

Elman RNN

Сеть Элмана (ENN) была первой RNN и включала в себя t -состояние скрытого блока для прогнозирования последовательностей данных. ENN состоит из классической однослойной сети с прямой связью, но скрытый слой подключается к новому слою, называемому слоем контекста, с использованием фиксированных весов, равных единице, как показано на рисунке 3. Основная функция нейронов этого слоя контекста – сохранять копию значений активации нейронов скрытого слоя. Тогда модель определяется:

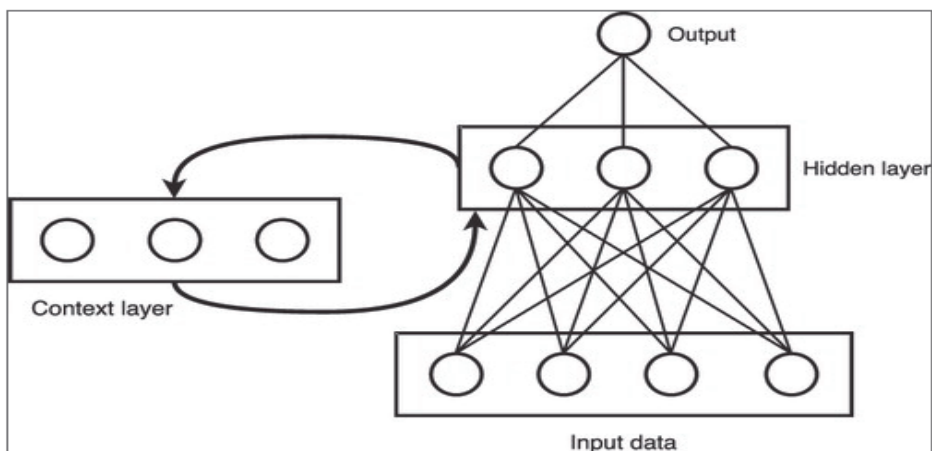


Рисунок 3 – Архитектура ENN для прогнозирования временных рядов

$$a_t = g(W_a x_t + U_a a_{t+1} + b_a) \quad (2)$$

Где a_t – значения нейронов в состоянии t в скрытом слое, x_t – текущий вход, a_{t-1} – информация, сохраненная в скрытых единицах контекста, W_a , U_a и b_a – веса и смещение, а g – функция активации.

Долговременная краткосрочная память

Стандартные базовые RNN страдают от проблемы исчезающего градиента, которая состоит в том, что градиент уменьшается по мере увеличения количества слоев. Действительно, для глубоких RNN с большим количеством слоев градиент практически становится нулевым, что препятствует обучению сети. По этой причине эти сети обладают кратковременной памятью и не дают хороших результатов при работе с длинными последовательностями, которые требуют запоминания всей информации, содержащейся в полной последовательности. Для решения проблемы исчезающего градиента возникают повторяющиеся сети с долговременной кратковременной памятью (LSTM). Для этой цели LSTM использует три шлюза, чтобы хранить долгосрочную релевантную информацию и отбрасывать нерелевантную информацию. Γ^f . Это ворота забывания, Γ^u ворота обновления и выходные ворота Γ^o . Γ^f решает, какую информацию следует выбросить или сохранить. Значение, близкое к 0, означает, что предыдущая информация забыта, тогда как значение, близкое к 1, означает, что она остается. Γ^u решает, какую новую информацию \hat{c}_t использовать для обновления состояния памяти C_t . Таким образом, c_t обновляется с использованием обоих Γ^f и Γ^u . Наконец, Γ^o решает, какое выходное значение будет входом для следующего скрытого блока.

Информация a_{t-1} о предыдущем скрытом блоке и информация о текущем входе x_t передается через сигмоид σ функция активации для вычисления всех значений ворот и с помощью функции активации \hat{c}_t для вычисления новой информации, которая будет использоваться для обновления. Уравнения, определяющие модуль LSTM:

$$\hat{c}_t = \tanh(W_c[a_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (3)$$

$$\Gamma^u = \sigma(W_u[a_{t-1}, x_t] + b_u) \quad (4)$$

$$\Gamma^f = \sigma(W_f[a_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (5)$$

$$\Gamma^o = \sigma(W_o[a_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (6)$$

$$c_t = \Gamma^u \times \hat{c}_t + \Gamma^f \times c_{t-1} \quad (7)$$

$$a_t = \Gamma^o \times \tanh(c_t) \quad (8)$$

где W_u , W_f и W_o , а b_u , b_f и b_o – веса и смещения, которые управляют поведением вентилях, и соответственно Γ^f , Γ^u и Γ^o , а W_c и b_c – веса и смещения кандидата \hat{c}_t в ячейку памяти.

На рисунке 4 показано, как скрытый модуль работает в повторяющейся сети LSTM. Операторы \times и $+$ означают поэлементное умножение и суммирование векторов.

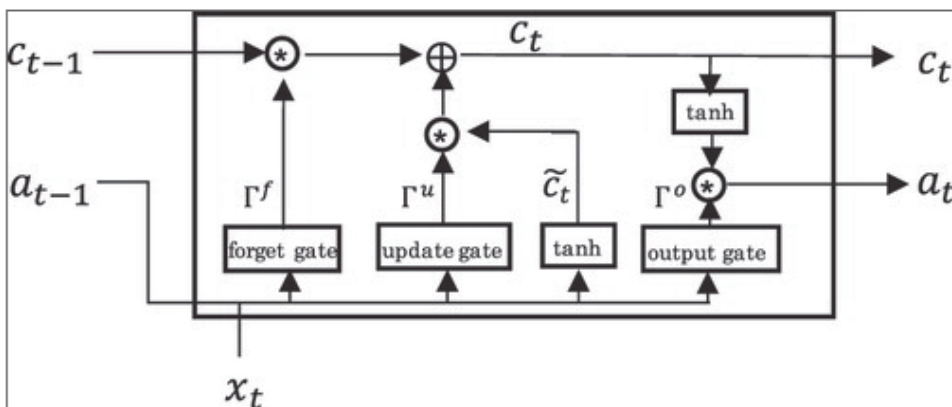


Рисунок 4 – Скрытый блок в LSTM. LSTM

Блокированные повторяющиеся блоки

Рекуррентные сети с блокированными повторяющимися блоками (GRU) представляют собой сети с долговременной памятью, такие как LSTM, но они появились в 2014 как упрощение LSTM из-за высокой вычислительной стоимости сетей LSTM [4, С.7]. GRU – одна из наиболее часто используемых версий, к которой пришли исследователи и которая оказалась надежной и полезной для решения множества различных проблем. Использование шлюзов в RNN позволило улучшить захват очень дальних зависимостей, что сделало RNN намного более эффективными. LSTM более мощный и эффективный, так как он имеет три шлюза вместо двух, но GRU – более простая модель и вычислительно быстрее, поскольку имеет только два шлюза, Γ^u ворота обновления и Γ^r ворота релевантности, как показано на рисунке 5. Γ^u ворота будут решать, обновляется или не обновляется состояние памяти c_t , с помощью \hat{c}_t кандидата в состояние памяти. Γ^r ворота определяют, насколько релевантным c_{t-1} является вычисление следующего кандидата на c_t , то есть \hat{c}_t . GRU определяется следующими уравнениями:

$$\Gamma^u = \sigma(W_u[c_{t-1}, x_t] + b_u) \quad (9)$$

$$\Gamma^r = \sigma(W_r[c_{t-1}, x_t] + b_r) \quad (10)$$

$$\hat{c}_t = \tanh(W_c[\Gamma^r \times c_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (11)$$

$$c_t = \Gamma^u \times \hat{c}_t + (1 - \Gamma^r) \times c_{t-1} \quad (12)$$

$$a_t = c_t \quad (13)$$

где W_u и W_r , a_{u_t} и b_r – веса и смещение, которые управляют поведением Γ^r и Γ^u вентилялей и соответственно, а W_c и b_c – веса и смещение кандидата \hat{c}_t в ячейку памяти.

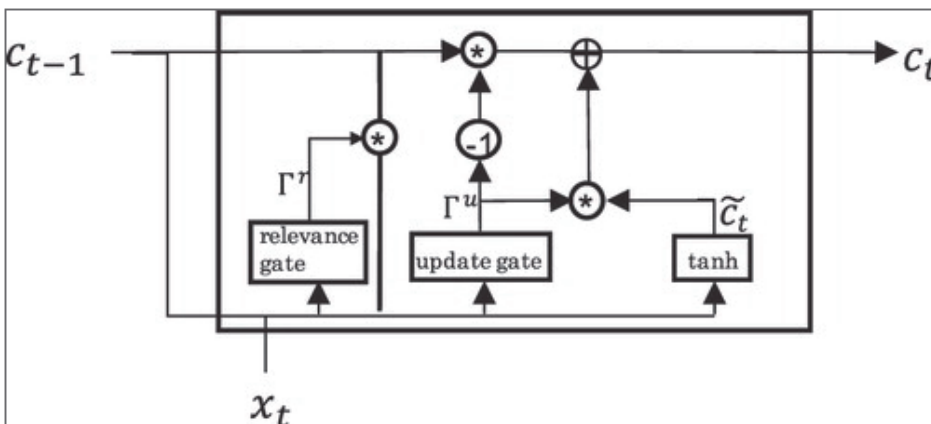


Рисунок 5 – Скрытый юнит в GRU

Двунаправленный RNN

Есть некоторые проблемы, например, в области обработки естественного языка (NLP), когда для прогнозирования значения последовательности данных в данный момент времени информация из последовательности как до, так и после этого нужен момент. Двунаправленные рекуррентные нейронные сети (BRNN) решают эту проблему для решения такого рода задач. Основным недостатком BRNN является то, что вся последовательность данных необходима до того, как можно будет сделать прогноз.

Стандартные сети вычисляют значения активации для скрытых единиц, используя однонаправленный процесс прямой связи. Однако в BRNN при прогнозировании использует информацию из прошлого, а также информацию из настоящего и будущего в качестве входных данных, используя как прямую, так и обратную обработку.

Таким образом, прогноз в момент времени t , \hat{x}_t , получается путем использования функции активации g , применяемой к соответствующим весам с прямой и обратной активацией в момент времени t . То есть:

$$x_t^{\hat{}} = g(W_x[a_t^f, a_t^b] + b_x) \quad (14)$$

где W_x и b_x – веса и смещения, a_t^f и a_t^b – значения активации скрытых единиц, вычисленные путем прямой и обратной обработки, соответственно, а g – функция активации.

На рисунке 6 представлена основная архитектура БРНН. BRNN можно рассматривать как две RNN вместе, где разные скрытые блоки имеют два значения: одно вычисляется прямым, а другое обратным. Кроме того, блоки BRNN

могут быть стандартными блоками RNN или блоками GRU или LSTM. Фактически, BRNN с модулями LSTM обычно используется для множества проблем NLP.

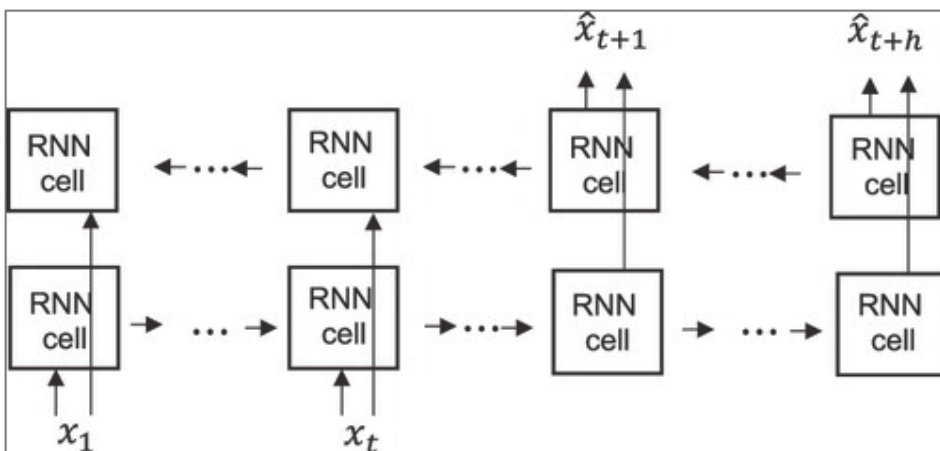


Рисунок 6 – Базовая архитектура BRNN

Глубокая рекуррентная нейронная сеть

Глубокая рекуррентная нейронная сеть (DRNN) может рассматриваться как RNN с более чем одним слоем, также называемая многослойной RNN. Скрытые блоки могут быть стандартными блоками RNN, GRU или LSTM, и они могут быть однонаправленными или двунаправленными, как описано в предыдущих разделах. На рисунке 7 показана архитектура DRNN с тремя уровнями.

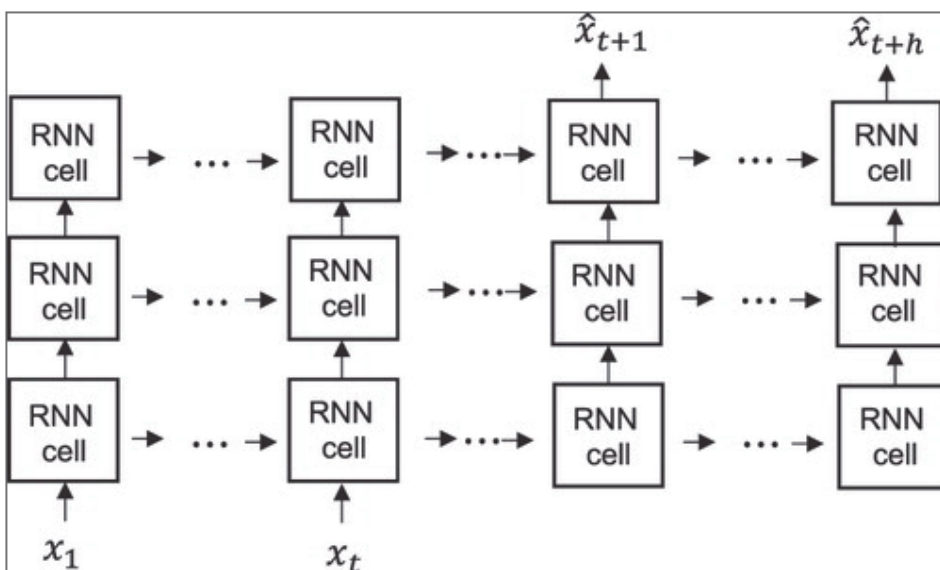
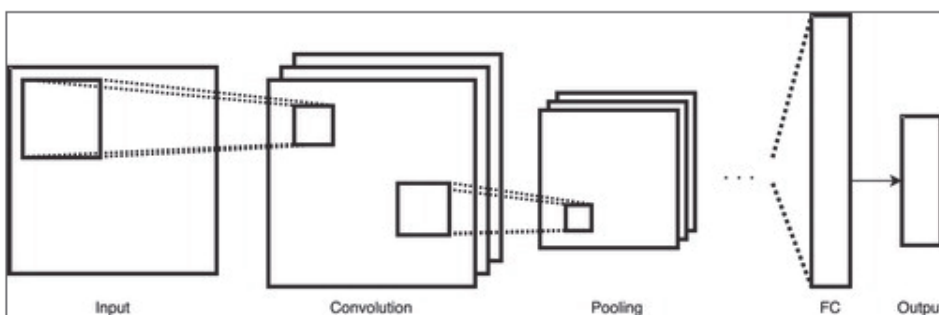


Рисунок 7 – Базовая архитектура DRNN

В общем, DRNN работает достаточно хорошо для прогнозирования временных рядов, но ее производительность ухудшается при использовании в качестве входных данных очень длинных последовательностей данных. Чтобы решить эту проблему, в модель могут быть включены механизмы внимания, что является одной из самых мощных идей в глубоком обучении. Модель внимания позволяет нейронной сети обращать внимание только на часть последовательности входных данных, пока она генерирует выходные данные. Это внимание моделируется с помощью весов, которые вычисляются однослойной нейронной сетью с прямой связью.

Сверточные нейронные сети

Сверточные нейронные сети (CNN) являются одной из наиболее распространенных архитектур в обработке изображений и компьютерном зрении. CNN имеют три типа уровней: свертка, объединение и полное подключение. Основная задача сверточных слоев – изучение функций на основе ввода данных. Для этого к данным применяются фильтры заранее определенного размера с использованием операции свертки между матрицами. Свертка – это сумма всех поэлементных произведений. Объединение уменьшает размер входных данных, ускоряя вычисления и предотвращая переоснащение. Самыми популярными методами объединения являются среднее и максимальное объединение, которые суммируют значения с использованием среднего или максимального значения соответственно. После того, как объекты были извлечены сверточными слоями, прогнозирование выполняется с использованием полносвязных слоев, также называемых плотными слоями, как в DFFNN. Входными данными для этих последних полностью связанных слоев являются сглаженные элементы, полученные в результате сверточных и объединяющих слоев. На рисунке 8 изображена общая архитектура CNN.



Рисунгов 8 – Архитектура CNN

Недавно для последовательности данных появился вариант CNN, называемый временными сверточными сетями (TCN) [5, С.263], который напрямую конкурирует с DRNN с точки зрения времени выполнения и требований к памяти.

TCN имеют то же самое. Архитектура как DFFNN, но значения активаций для каждого уровня вычисляются с использованием более ранних значений

из предыдущего уровня. Расширенная свертка используется для выбора, какие значения нейронов из предыдущего слоя будут вносить вклад в значения нейронов в следующем слое. Таким образом, эта операция расширенной свертки захватывает как локальную, так и временную информацию.

Расширенная свертка, F_d , является функцией, определяемой следующим образом:

$$F_d(x) = \sum_{i=0}^{K-1} f(i) * x_{t-d*i} \quad (15)$$

где d – параметр коэффициента расширения, а f – фильтр размера K .

На рисунке 9 показана архитектура TCNN при применении расширенной свертки с использованием фильтра размера 3 и коэффициентов расширения 1, 2 и 4 для каждого слоя соответственно.

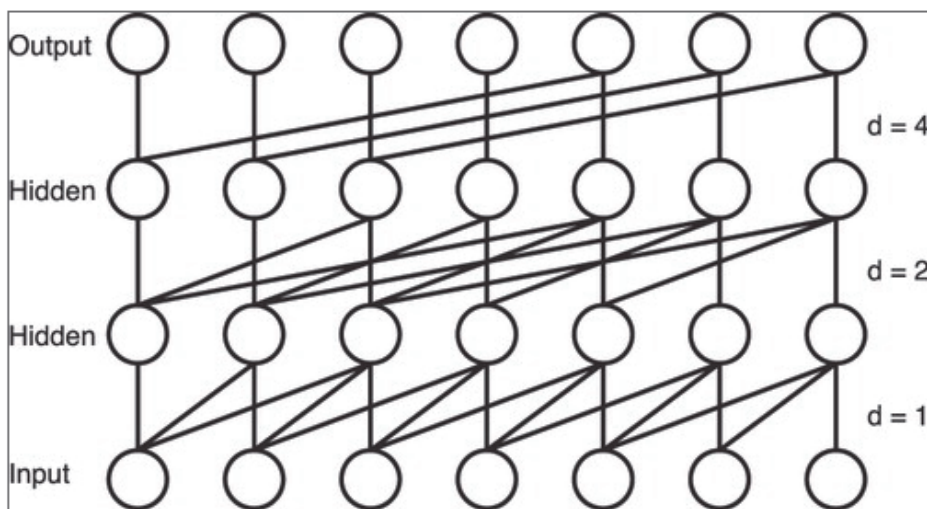


Рисунок 9 – Архитектура TCN с использованием фильтра размера 3

Более того, необходимо использовать общие остаточные модули в дополнение к сверточным слоям, когда используются более глубокие и большие TCN для достижения дальнейшей стабилизации. Эти общие остаточные блоки состоят из добавления входных данных к выходным перед применением функции активации. Тогда модель TCN может быть определена следующим образом:

$$a_t^l = g(W_a^l F_d(a_t^{l-1}) + b_a^l + a_t^{l-1}) \quad (16)$$

где $F_d()$ – расширенная свертка фактора d , определенного в уравнении (15), a_t^l – значение нейрона l -го слоя в момент времени t , W_a^l и b_a^l – веса и смещение, соответствующие l -му слою, а g – активация функция.

Выводы

Глубокое обучение оказалось одним из самых мощных методов машинного обучения для решения сложных проблем, связанных с большими данными. В настоящее время большая часть данных, генерируемых в основном с помощью интеллектуальных устройств, представляет собой временные ряды, и их прогнозирование является одной из наиболее частых и актуальных проблем почти во

всех областях исследований. Были описаны наиболее часто используемые архитектуры глубокого обучения для данных временных рядов в последние годы, с особым акцентом на важные практические аспекты, которые могут иметь большое влияние на полученные результаты.

Литература

1. Nguyen G., Dlugolinsky S., Bobák M., et al. Machine learning and deep learning frameworks and libraries for large-scale data mining: A survey // *Artif Intell Rev.* 2019. № 52. С. 77-124.
2. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и их приложения. Казань, 2018. 121 с.
3. Elman J.L. Finding structure in time // *Energy Rep.* 1990. № 14. С. 179-211.
4. Chung J., Gulcehre C., Cho K., et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. In: *Proceedings of the Neural Information Processing Systems.* Canada, 2014. 12 с.
5. Zhang W., Hasegawa A., Matoba O., et al. Shift-invariant neural network for image processing: Learning and generalization. *Appl Artif Neural Netw III.* 1992. № 1709. С. 257-268.

УДК 654.16

Программные приложения как средство обеспечения качества обслуживания сетей Wi-Fi

С.В. Шевелев, кандидат технических наук, доцент,
А.Б. Семенов, доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва

Рассмотрены принципы обеспечения заданного уровня качества обслуживания QoS в беспроводных сетях, позволяющие достигнуть устойчивого функционирования программных приложений реального времени за счет тонкой настройки приоритезации генерируемого ими трафика. Основное внимание уделяется механизму управления доступом на основе конкуренции и контролируемого доступа, а также их расширениям. Затронуты вопросы инкапсуляции базовых механизмов управления в решения более высоких уровней EDCA и TXOP. Приведены расчетные значения соответствующих параметров.

Мультимедийные приложения, уровень качества, критические требования, механизмы приоритезации.

Software Applications as an Ensuring Means the Quality of Service the Wi-Fi networks

S.V. Shevelev, candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
A.B. Semenov, Doctor of Technical Sciences, professor,
National Research University Moscow State University of Civil Engineering
(NRU MGSU), Moscow

The principles of ensuring a given level of quality of QoS service in wireless networks are considered, which allow achieving the stable functioning of real-time software applications by fine-tuning the prioritization of the traffic generated by them. The main focus is on the competition-based access control mechanism and controlled access, as well as their extensions. The issues of encapsulation of basic control mechanisms in solutions of higher levels of EDCA and TXOP are touched upon. The calculated values of the corresponding parameters are given.

Multimedia applications, quality level, critical requirements, prioritization mechanisms.

Современный объект недвижимости всегда проектируется таким образом, чтобы сделать пребывание в нем безопасным и комфортным как для постоянных обитателей, так и для гостей. В перечень обязательных систем инженерного

обеспечения современного здания или их комплекса в последние годы в обязательном порядке включается информационно-коммуникационная система. Последняя может быть построена с привлечением различных технологий, но в реалиях сегодняшнего дня организация информационного обмена между отдельными терминальными устройствами и серверами осуществляется с привлечением технических и программных средств Ethernet.

Физический уровень сетей Ethernet может быть реализован на основе волоконно-оптических и электропроводных витопарных кабельных каналов связи (передача данных в силовой проводке возможна, но встречается в единичных случаях) и беспроводной техники радио и оптического диапазона длин волн [1, С.98;2, С.152]. С учетом обеспечиваемых скоростей передачи, простоты обслуживания, достигаемого уровня защиты от несанкционированного доступа и иных характеристик наиболее выгодной считается реализация основной внутренней сети на проводных каналах, тогда как в основу гостевой сети кладется беспроводная технология Wi-Fi. Последняя присутствует в большинстве домашних, общедоступных и корпоративных сетей. В отсутствие в коммерческой эксплуатации беспроводных сетей 5G Wi-Fi становится физической основой функционирования Интернета вещей [3, С.5]. Широкому распространению этой технологии способствует ее подробное нормирование стандартами группы IEEE 802.11 [4, С.80].

Одна из серьезных проблем пакетной передачи информации по технологии Ethernet, вне зависимости от разновидностей ее реализации - отсутствие гарантированного времени доставки пакета от передатчика к приемнику. Ее острота усиливается тем, что современные телекоммуникационные сети должны поддерживать передачу больших объемов мультимедийного трафика с заданным качеством обслуживания. Для достижения этого полезного свойства необходимо стремиться к отсутствию перегрузок сети и нежелательного падения скорости передачи данных. Гарантия обеспечения качества обслуживания (QoS) относится к критическим требованиям для чувствительных к задержкам мультимедийных приложений, функционирующих в реальном времени через сети WLAN.

Вопросы предоставления заданного уровня QoS хорошо проработаны для сетей связи общего пользования [5, С.25]. Традиционные стандарты IEEE 802.11 затрудняют предоставление услуг QoS для программных приложений, которые пользуются ресурсами нормированных им беспроводных сетей [6, С.102]. Причина данного положения дел заключается в том, что применяемое в оборудовании штатное программное обеспечение не поддерживает в явном виде механизм дифференциации качества предоставляемой телекоммуникационной услуги [7, С.28].

Например, версия IEEE 802.11a, а также сменившие ее IEEE 802.11b и IEEE 802.11g используют распределенную функцию координации (Distributed coordination function, DCF). В ее основу положено предоставление доступа запросам и процессам к радиоканалу связи в порядке их поступления в очередь (First Come First Serve, FCFS). Фактически эти процедуры сводятся к наиболее простым алгоритмам планирования. Ситуацию дополнительно усугубляет то, что в механизме FCFS не предусмотрено ранжирование информационных потоков с

разными требованиями QoS. Фактически FCFS не предусматривает приоритезацию трафика, что указывает на отсутствие гарантии QoS в IEEE 802.11a / b / g. Результатом применения соответствующих спецификаций становится потенциальный риск снижения производительности в периоды большой нагрузки. Частота появления нежелательных событий возрастает в случае мультимедийных приложений.

Выявление перечисленных недостатков привело к ратификации в 2005 году спецификации IEEE 802.11e, явно нацеленной на предоставление решений QoS для сетей IEEE 802.11. Спецификация IEEE 802.11e, которая становится одним из ключевых расширений традиционного стандарта IEEE 802.11, включает несколько улучшений QoS на уровне управления доступа к среде (MAC).

Согласно IEEE 802.11e улучшение качества функционирования сети в части полноценной реализации механизмов QoS достигнуто введением приоритетов передачи пакетов данных по требованиям программных приложений. Известные механизмы DCF и дополнительная функция координации точек (Point Coordination Function, PCF) объединены и расширены до качественно новой функции гибридной координации (Hybrid Coordination Function, HCF). Ее основное новое свойство – введение дополнительной категории трафика (Traffic Classes, TC). В 2016 году эта функция включена в MAC-уровень оборудования беспроводных сетей и формализована спецификацией IEEE 802.11 2016 [8, С.15].

В распределенных беспроводных сетях протокол управления доступом к среде (MAC) с учетом QoS используется для обеспечения некоторых гарантий качества предоставления телекоммуникационной услуги для программных приложений. В частности, гарантируется минимальная пропускная способность, максимальная задержка кадра, наибольшее изменение задержки сигнала (джиттера) и максимальный коэффициент потери кадров.

Исходный функционал IEEE 802.11e

Распределенные протоколы MAC с учетом QoS развиваются из протоколов MAC, поддерживающих только услуги наилучшего качества. Первый MAC протокол, которым стала т.н. чистая ALOHA, был предложен Норманом Абрамсоном ещё в 1970-х годах и реализован в форме протокола произвольного доступа для сетей пакетной радиосвязи. Чистая ALOHA и его улучшенная версия, обозначаемая как слотированная ALOHA, а также многие ранние протоколы MAC, построенные на основе механизма множественного доступа с контролем несущей (Carrier Sense Multiple Access, CSMA), такие как множественный доступ с предотвращением коллизий (Multiple Access with Collision Avoidance, MACA) и «улучшенная версия протокола с технологией исключения столкновения пакетов» (Floor Acquisition Multiple Access, FAMA), обеспечивают увеличение пропускной способности сети за счет уменьшения коллизий. Однако по мере появления гетерогенного трафика поддержка QoS с дифференциацией услуг на уровне MAC становится незаменимой. Например, чувствительный к задержкам трафик, такой как голос, нуждается в более высоком приоритете по сравнению с трафиком передачи данных.

Поправка IEEE 802.11e к стандарту IEEE 802.11 включает серию улучшений, расширяет функциональные возможности уровня MAC за счет интеграции

НСF для обеспечения приоритетного и параметризованного доступа QoS к беспроводной среде. НCF объединяет функции DCF и PCF в исходных протоколах 802.11 MAC как для конкурентного (CP), так и для бесконкурентного (CFP) доступа. В частности, он реализует два механизма дифференциации услуг:

- расширенный распределенный доступ к каналу (Enhanced Distributed Channel Access, **EDCA**) для обеспечения доступа на основе конкуренции;
- управляемый доступ к каналу НCF (НСF Controlled Channel Access, **НССА**) для доставки трафика без конкуренции (IEEE 802.11e 2005).

Благодаря механизму EDCA трафик с высшим приоритетом, генерируемый программным приложением, получает большую вероятность отправки, по сравнению с теми, которые уступают ему по данному параметру. Этот простой прием способствует уменьшению задержки передачи пакетов с высокоприоритетным трафиком.

В основу механизма EDCA положено восемь пользовательских приоритетов (значения, назначаемые для каждого блока данных), а также распределение трафика по четырем категориям доступа (AC): голос (VO), видео (VI), Best effort (BE) и фон (BK). Соотношение между этими приоритетами и категориями представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни приоритета качества обслуживания

Приоритет (от низшего к высшему)	Категория доступа (AC)	Тип трафика
1	AC_BK	Фон
2		
0	AC_BE	Best effort (негарантированная доставка)
3		
4	AC_VI	Видео
5		
6	AC_VO	Голос
7		

Из-за необходимости обеспечения нормального взаимодействия людей, находящихся на разных концах линии, наивысший приоритет естественным образом присваивается голосовому трафику. Видео в большинстве приложений также должно иметь достаточно высокий приоритет, но не такой критичный, как голос. В частности, это подтверждается тем, что при организации передачи допускается буферизация. Best effort подразумевает трафик, передаваемый, к примеру, при просмотре веб-страниц, здесь лишние пару миллисекунд задержки не так критичны. А при передаче фоновых типа трафика можно снизить его приоритетизацию до минимума. Хорошим примером часто встречающегося программного приложения, которое не критично к задержке, является обычная электронная почта.

Стоит отдельно указать на то, что в основу механизма распределения приоритетизации трафика, используемый в IEEE 802.11e, положены соответствующие положения более раннего стандарта IEEE 802.1p. Последний определял

метод передачи информации о приоритете сетевого трафика. Сопоставление уровней данных стандартов, которое дополнительно иллюстрирует наличие тесной связи между этими нормативными документами, представлено в таблице 2 [9].

Таблица 2 – Сравнение уровней приоритета качества обслуживания стандартов IEEE 802.1p и IEEE 802.11e

Приоритет (от низшего к высшему)	IEEE 802.1p		Приоритет (от низше- го к выс- шему)	IEEE 802.11e	
	Акроним	Тип трафика		Категория доступа (AC)	Тип трафика
1	BK	Фон (Background)	1	AC_BK	Фон (Background)
0	BE	Best effort	2	AC_BK	
2	EE	Excellent effort	0	AC_BE	Best effort
3	CA	Критические приложения (Critical Applications)	3	AC_BE	
4	VI	Видео (Video)	4	AC_VI	Видео (Video)
5	VO	Голос (Voice)	5	AC_VI	
6	IC	Межсетевое управление (Internetwork Control)	6	AC_VO	Голос (Voice)
7	NC	Сетевое управление (Network Control)	7	AC_VO	

В данном случае произошло объединение восьми категорий в четыре. Голос объединил в себе управление сетью и получил наивысший приоритет.

Сильная сторона EDCA заключается в том, что станции, принадлежащие различным категориям AC, могут конкурировать за отправку пакетов с разными наборами параметров. Это достигается за счёт:

- обращения к методу арбитражного межкадрового пространства (Arbitration inter-frame spacing, AIFS);
- применения так называемого окна конкуренции (Contention Window, CW);
- введения параметра возможности передачи (Transmit Opportunity, TXOP). AIFS предназначен для установления приоритета в пределах категорий

доступа АС. Реализация соответствующих процедур основана на предоставлении трафику с высшим приоритетом более короткого пространства AIFS. AIFS определяется категорией доступа и номером межкадрового интервала арбитража (AIFSN) как: $AIFS [AC] = AIFSN [AC] \times aSlotTime + aSIFSTime$, где параметр AIFSN назначается точкой доступа или управляющим объектом.

Суть окна конкуренции CW заключается в том, что преимущество высокоприоритетному трафику обеспечивается за счет задания минимального и максимального значений CWmin и CWmax длительности конфликтного окна в каждой из категорий доступа с дополнительным учетом типа передаваемого трафика. Для предоставления преимуществ высокоприоритетному трафику его конкурентное окно должно быть меньше, чем у низкоприоритетного трафика.

В EDCA ограничения конфликтного окна могут быть назначены отдельно для разных АС. В случае выявления коллизии или отсутствия подтверждения о приеме на станции с меньшим приоритетом последняя

- удваивает значение CWmin;
- заново запускает таймер обратного отсчета конкурентного окна;
- после чего повторяет попытку передачи.

Данную операцию станции разрешено проделывать до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное значение конкурентного окна. Дальнейшее повторение попыток передачи осуществляется уже без наращивания длительности окна. Расчет значений границ конкурентного окна представлен в таблице 3. Ее сравнение с таблицей 4, где приведены настройки по умолчанию, АС для интенсивного трафика в видео- и аудиоприложениях показывает, что допустимо назначение окон конкуренции с меньшими значениями, чтобы позволить соответствующим станциям ждать меньше времени при выполнении передачи.

Типовые значения $aCWmin = 15$ и $aCWmax = 1023$, такие используются, к примеру, в OFDM (802.11a) и MIMO (802.11n). Значение таймера случайной задержки определяется равновероятным выбором числа X в интервале $0 < X < CWmin$. К примеру, если $CWmin = 15$, то выбор будет осуществляться между числами от 1 до 14 включительно;

Под параметром возможности передачи TXOP понимается ограниченный временной интервал, на протяжении которого конкретно взятая станция контролирует продолжительность непрерывного занятия канала и передачи пакетов. TXOP реализуется после того, как станция выиграла состязание за доступ к каналу. Дифференциация по параметру TXOP выгодна тем, что позволяет станциям с интенсивным трафиком передавать несколько пакетов в течение более длительного времени и не допускать, чтобы станции с низкой нагрузкой излишне занимали канал на протяжении определенного периода времени.

Обобщив выше сказанное, можем констатировать, что AIFS определяет временной интервал, в течение которого станция сначала принимает решение о том, что канал свободен, и только после этого осуществляет отсрочку передачи или ее начало. Размеры окна конкуренции задают границы случайных периодов отсрочки передачи, а параметр TXOP определяет продолжительность времени, в течение которого станция может передавать пакеты после захвата моноканала.

Таблица 3 – Расчетные значения параметров в EDCA

Категория доступа (AC)	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN	TXOP, мс
AC_BK	aCW _{min}	aCW _{max}	7	0
AC_BE	aCW _{min}	aCW _{max}	3	0
AC_VI	(aCW _{min} + 1) / 2-1	aCW _{min}	2	3,008
AC_VO	(aCW _{min} + 1) / 4-1	(aCW _{min} + 1) / 2-1	2	1,504

Таблица 4 – Параметры по умолчанию в EDCA

Категория доступа (AC)	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN	TXOP, мс
AC_BK	15	1023	7	0
AC_BE	15	1023	3	0
AC_VI	7	15	2	3,008
AC_VO	3	7	2	1,504

Работа данного механизма подводит к основной цели QoS беспроводных сетей. Ее суть заключается в защите высокоприоритетных данных от конкуренции со стороны низкоприоритетных. Дополнительно реализуется сценарии при передаче, в которых необходимо защитить данные одного и того же класса друг от друга. Фактически точки доступа предоставляют сети текущую информацию о доступной полосе пропускания, наличие которой дает возможность осуществить передачу дополнительного трафика.

В рамках реализации рассмотренного механизма с привлечением стандарт IEEE 802.11e существует сертификат совместимости Wi-Fi Alliance, известный как Wi-Fi Мультимедиа (WMM). Этот механизм обеспечивает основное качество обслуживания и определяет приоритизацию мультимедийного трафика. Точки доступа, имеющие данный сертификат, должны быть активны для EDCA и TXOP.

Механизмы высших уровней

Для увеличения пропускной способности сети и наращивания качества обслуживания в некоторых протоколах MAC применяется управление кадрами. В частности, когда задержка передачи кадра, находящегося в очереди MAC-уровня в приемнике, превысила предельное значение или его передача становится бесполезной из-за потери другого зависимого кадра(ов), кадр вполне может быть отброшен уже непосредственно в передатчике, что дополнительно снижает загрузку канала связи. Основная цель изменения приоритета такой разновидности становится увеличение вероятности доступа к каналу для конкретного кадра в условиях наличия ограничения по времени доставки.

При наличии периодических кадров в чувствительном трафике реального времени резервирование канала потенциально позволяет не только уменьшить накладные расходы, связанные с конкуренцией за канал, но и гарантировать определенную величину задержки. Резервирование ресурсов канала может использоваться на основе двух механизмов множественного доступа, т.е. первого варианта с контролем несущей и предотвращением конфликтов (Carrier Sense Multiple

Access With Collision Avoidance , CSMA/CA) или множественного доступа с разделением по времени (Time Division Multiple Access, TDMA).

Протокол предотвращения конфликтов множественного доступа с комбинированным резервированием (Multiple Access Collision Avoidance with Piggyback Reservations, MACA/PR) и протокол множественного доступа с мягким резервированием с назначением приоритета (Soft Reservation Multiple Access with Priority Assignment, SRMA / PA) – это два типа типичных протоколов MAC, построенных на основе CSMA/CA и TDMA соответственно.

Второй механизм HCCA разработан на основе функции PCF координации точек, которая применяется в традиционном IEEE 802.11. Он использует высокоприоритетный гибридный координатор HC, централизованный контроллер, который размещается вместе с точкой доступа AP, для передачи пакетов станциям и управления доступом к их каналам путем выделения TXOP. Для поддержки QoS HCCA позволяет станциям запрашивать у координатора HC значение параметра TXOP для передачи пакетов или загрузки пакетов от AP. Это дает возможность в максимально полной степени учесть их собственные требования QoS. HC принимает решение о возможности приема запроса на основе механизма управления доступом, и планирует TXOP для соответствующей станции, если ее запрос принят.

В отличие от PCF, который делит интервал передачи на период без конкуренции CFP и период конкуренции CP, HCCA определяет дополнительную фазу контролируемого доступа CAP, которая позволяет HC зарезервировать канал для бесконфликтного обмена пакетами со станциями вне конкуренции. Последнее означает, что фаза CAP может быть инициирована в любое время, и внутри периода CP допускается реализация несколько фаз CAP. Другие станции в период CP применяют обычный механизм EDCA, регулирующий доступ к каналу и передачу пакетов.

Механизм HCCA относится к более сложным функциям координации. Это определяется тем, что в случае обращения к HCCA можно настроить QoS с заметно большей точностью. Тем программным приложениям, которые поддерживают технологию VoIP и передают потоковые видео, необходимо, необходимо предоставлять наибольшие ресурсы пропускной способности. Это достигается тем, что станции с поддержкой QoS предоставляется возможность запроса предоставления ряда критически важных параметров информационного обмена: скорость передачи данных, допустимая величина джиттера и некоторые другие.

Уровень требований различных беспроводных сетей в части QoS может меняться в очень широких пределах. Кроме того, требования QoS и индивидуальные протоколы MAC беспроводной сети также развиваются вместе с поддерживаемыми программными приложениями и по мере внедрения более совершенного оборудования, что опять же оказывает значимое влияние на требования к QoS. В качестве пример таких недавно появившихся объектов можно сослаться на беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Network, WSN). На момент разработки WSN доставка данных некоторых видов с минимальной задержкой (а значит, и требования к пропускной способности) не была главным приоритетом у разработчиков, которые уделяли максимальное внимания тому, чтобы добиться

максимально возможной продолжительности срока службы сети. Однако доступность недорогого оборудования и быстрое развитие миниатюрных камер и микрофонов открыло перспективы создания нового класса WSN: мультимедийные или визуальные беспроводные сенсорные сети, которые выдвигают совсем иные требования к уровню QoS MAC к надежной доставке данных с контролируемой по величине задержкой.

Прочие механизмы обеспечения QoS

Помимо этого, существует множество иных механизмов соблюдения QoS. К таковым относятся маршрутизация QoS, контроль перегрузки, управление скоростью и обеспечение энергоэффективности QoS.

Новейшим направлением предоставления QoS становится обращение к его оптимизации в рамках программно-определяемых сетей (SDN) и облачных вычислений. Например, до уровня реального внедрения доведен вариант предоставления QoS, обозначаемый как QoS Flow и применяемый в отношении сетей SDN на основе OpenFlow. В основу этого механизма положено управления планированием передачи пакетов. Кроме того, OpenQoS может быть реализован в виде контроллера OpenFlow, который предназначен для поддержки потоков мультимедиа с требованиями сквозного QoS.

При формировании сквозного QoS речь идет о схеме динамической маршрутизации QoS, которая поддерживает кратчайший путь доставки данных для минимизации вероятности как потери пакетов, так и задержки. Схема принятия решения фактически базируется на моделировании реального окружения WLAN IEEE 802.11, что позволяет значимо улучшить качество предоставления облачных услуг с учетом QoS в облачных беспроводных сетях.

Заключение

1. При передаче мультимедиа-трафика по беспроводным сетям чистая дифференциация услуг на канальном уровне MAC как механизм обеспечения QoS обеспечивает необходимую для практически программных приложений задержку только при небольших нагрузках.
2. Основное средство увеличения качества функционирования беспроводной сети при средней загрузке – контроль допусков.
3. При высоких значениях нагрузки и при взаимодействии нескольких сетей достижение требуемого качества функционирования беспроводной сети без привлечения настроек более высоких уровней сети не представляется возможным.
4. Наиболее перспективным механизмом обеспечения снижения вероятности потери пакетов и минимизации времени задержки в топологически сложных составных сетях является динамическая маршрутизация QoS на основе моделирования реального окружения WLAN IEEE 802.11.

Литература

1. Артющенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем. М.: Научный консультант, 2019. 126 с.
2. Артющенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Введение в структурированные кабельные системы. М.: Научный консультант, 2018. 206 с.

3. Гордеев Д.С., Шевелев С.В. Интернет вещей для «умной» городской среды // Вестник связи. 2019. № 6. С. 4-7.
4. IEEE Standard for Information technology--Local and metropolitan ar-ea networks--Specific requirements--Part 11: Wireless LAN Medium Ac-cess Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, in IEEE Std 802.11e-2005 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003). vol. no. pp.1-212. 11 Nov. 2005. doi: 10.1109/IEEESTD.2005.97890.
5. Гольдштейн Б.С., Маршак М.А., Мишин Е.Д. и др. Показатели функционирования мультисервисной сети связи общего пользования // Техника Связи. 2009. № 3-4. С. 25-31.
6. Ле Ч.Д. Симонина О.А. Механизм приоритезации для обеспечения минимизации задержки в условиях конкурентной среды в сетях Wi-Fi с плотным распределением устройств // Информационные системы и технологии. 2016. № 3(95). С. 99-106.
7. Malik A., Qadir J., Ahmad B. and al. QoS in IEEE 802.11-based wireless networks: a contemporary review // Journal of Network and Computer Applications. 2015. pp. 26-32.
8. «IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, in IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), vol. no. pp.1-3534. 14 Dec. 2016. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995.
9. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11e-2005 (дата обращения 15.07.2021).

УДК 339.13

Анализ рынка свинцово-кислотных аккумуляторов в России и мире

А.Н. Васильев, аспирант кафедры «Технология машиностроения, технологические машины и оборудование»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», ЮРГПУ (НПИ),
г. Новочеркасск, Ростовская область

Проведено исследование состояния рынка свинцово-кислотных аккумуляторов и рассмотрена стратегия развития производителей, экспортеров и импортеров ассоциации. Определено, что за 2019-2020 гг. объемы продаж свинцово-кислотных аккумуляторов в России и мире имеют принципиальные признаки динамики роста и выбор их разнообразия.

Свинцово-кислотный аккумулятор, производитель, аккумуляторная батарея, рынок.

Market analysis of lead-acid batteries in Russia and the world

A.N. Vasiliev, graduate student of the department Engineering Technology, Technological Machines and Equipment,
«Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)», SRSPU (NPI),
Novocherkassk, Rostov Region

The study of the state of the market of lead-acid batteries was carried out and the development strategy of manufacturers, exporters and importers of the association was considered. It was determined that for 2019-2020. The sales volumes of lead-acid batteries in Russia and the world have fundamental signs of growth dynamics and the choice of their diversity.

Lead acid battery, manufacturer, battery, market.

Введение

Основной областью применения свинцово-кислотных аккумуляторов считается автомобильная промышленность. Они нужны для запуска стартера и работы устройств бортовой сети. Она имеет определенный ресурс, который характеризуется количеством циклов разряда и заряда. Зарядка аккумулятора реализована от постоянного напряжения бортовой сети, когда работает генератор. Но в последние 5 лет аккумуляторы начинают широко внедрять и в «зеленой» энергетике, например на солнечных электростанциях [1-3].

Свинцово-кислотный аккумулятор – это химический перезаряжаемый источник электроэнергии, состоящий из двух пластин, разделенных электролитом. При этом одна пластина имеет положительный заряд, состоящий из PbO₂, а вто-

рая, отрицательная, из губчатого. Электролит представляет собой 33-35% раствор H_2SO_4 с плотностью 1,23-1,4 г/см³.

Все автомобильные аккумуляторы разделяются [4]:

- по необходимости обслуживания;
- по строению.

По необходимости обслуживания существуют:

- обслуживаемые;
- необслуживаемые.

Аккумуляторам, обслуживаемым периодически (каждые 12000 км пробега или раз в 6 месяцев), нужно доливать дистиллированную воду, потому что в процессе эксплуатации происходит сильный электролиз воды, за счет которого вода разлагается на кислород и водород, создается впечатление, что аккумулятор кипит. Причина – высокое содержание сурьмы в свинцовых пластинах. В необслуживаемых аккумуляторах кипение практически не происходит, количество сурьмы менее 5%, конструкция полностью герметична и, соответственно, нет необходимости доливать дистиллированную воду (современные аккумуляторы практически все не обслуживаются).

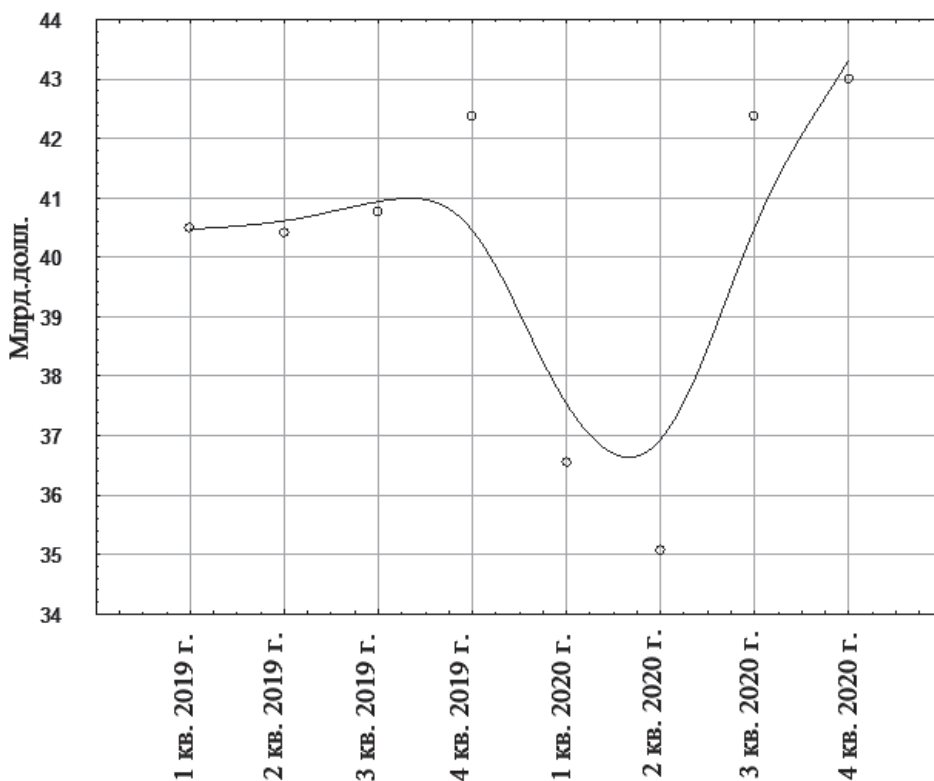


Рисунок 1 – Динамика объемов продаж поквартально свинцово-кислотных аккумуляторов на мировом рынке в 2019-2020 гг.

Рынок аккумуляторов можно сравнивать как в натуральном выражении, так и в количестве денежных средств, оборачивающихся на данном рынке. Так, на 2020 г. мировой рынок свинцово-кислотных аккумуляторов (СКА) рассчитывался в 433 ГВт·ч, показывая рост в 1,3 раза за последние 10 лет. Но целесообразнее оценивать мировой рынок свинцово-кислотных аккумуляторов в денежных средствах. Так, в 2020 году он увеличился на 20,8%, составив порядка 43 млрд. долл., и оценивается как растущий на ближайшие 5 лет, согласно исследованиям аналитических групп [5, 6]. На рисунке 1 представлена динамика объёмов продаж свинцово-кислотных аккумуляторов на мировом рынке за 2019 и 2020 годы.

В последние полвека и по настоящее время свинцово-кислотные аккумуляторы имеют доминирующее место на рынке аккумуляторов в России и достигают более 70% от общего объёма выпуска по сравнению с другими группами химических источников тока [5-7]. Соотношение стоимости единицы накапливаемой и передаваемой энергии с учетом цен аккумуляторных батарей (АКБ) приведено в таблице 1 [8] с учетом 2020 года. Невысокая стоимость единицы энергии обусловлена низкой себестоимостью материалов и техническими характеристиками данного продукта. Тем не менее, несмотря на низкую цену на сырье, в России преобладает импортный вид данного типа аккумуляторов. Однако отечественные предприятия наращивают производственные мощности и выпуск качественных свинцово-кислотных аккумуляторов.

Таблица 1 – Соотношение стоимости единицы накапливаемой и передаваемой энергии с учетом цен АКБ [8]

Вид электрохимической системы	Удельная энергия		Характерная удельная мощность	Относительная стоимость единицы энергии
	Вт·ч/кг	Вт·ч/л		
Литий-ионный аккумулятор	100-280	190-520	умеренная	2-3,5
Никель-металлогидридный источник тока	40-100	180-350	от умеренной до высокой	1,2-2,2
Никель-кадмиевый аккумулятор герметичного типа	20-55	90-200	высокая	1,6-2,2
Никель-кадмиевый аккумулятор открытого типа				1,1-1,3
Необслуживаемый свинцово-кислотный аккумулятор	20-60	50-170	от умеренной до высокой	0,6-1,8
Обслуживаемый свинцово-кислотный аккумулятор				0,4-1,7

Лидерами по производству свинцовых аккумуляторов в России являются более 20 контрагентов, которые занимают доминирующее положение на рынке и предоставляют продукцию не только в России, но и в ближнее зарубежье, из которых можно выделить:

- АО «АКОМ»,
- АО «Тюменский аккумуляторный завод»,
- Группа компаний КАЗ,
- ЗАО «Электротяга»,
- ЗАО Многопрофильная производственная коммерческая фирма «АЛЬКОР» и другие.

Главными поставщиками свинцово-кислотных аккумуляторов в Российскую Федерацию являются компании Johnson Controls, AtlasBX, Hyundai Sungwoo Automotive, TAB.

Среди государств, поставляющих на международный рынок СКА, на первом месте стоит КНР, его доля составляет 20,79%. Следом идет Корея с 10,65% и на третьем месте Германия, ее доля составляет 9,65%. Далее следуют такие страны, как Америка, Испания, Франция, Чехия, Польша, Италия, ОАЭ (рис. 2) [5, 6].

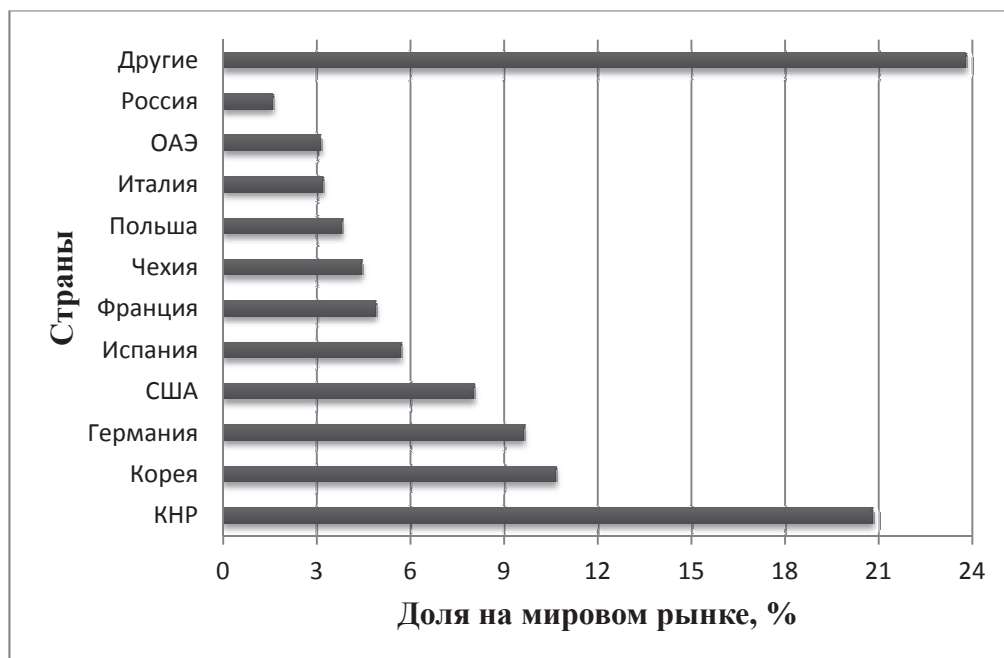


Рисунок 2 – Доля продаж мировых стран на рынке свинцово-кислотных аккумуляторов в 2020 г.

В России в 3 квартале 2020 г. наблюдалась положительная динамика роста объем продаж АКБ на 79,9%, тем не менее, доля нашей страны на этом рынке данного вида аккумуляторов мала.

Свинцово-кислотные аккумуляторы для легковых автомобилей занимают 70% рынка, для коммерческого автотранспорта – 20%. Крупнейшим потребите-

лем свинцово-кислотных аккумуляторов в России является Москва и Московская область, на которые приходится около 15% всего рынка России. Также большие объемы реализации свинцово-кислотных аккумуляторов приходится на Санкт-Петербург, Краснодарский край, Ростовскую обл., Свердловскую обл. и Республику Татарстан – более 300 тыс. единиц в каждом из субъектов. Экспорт аккумуляторных батарей из РФ достигает около 800 тыс. единиц в год, при этом 30-35% АКБ покупается Казахстаном [5-7].

Проблемы на автомобильном рынке приводят к значительным изменениям структуры рынка СКА. Предпочтения отдаются более дешевой продукции, имеется много покупателей, которые готовы приобретать недорогие аккумуляторные батареи непонятного качества и происхождения. Потребители стараются как можно дольше эксплуатировать АКБ и не так часто приобретать новые, что, в свою очередь, приводит к тому, что увеличивается спрос на услуги сервисных центров по диагностике и ремонту аккумуляторов. Кроме того, нередко производители выпускают аккумуляторы, которые не соответствуют производственным характеристикам [9]. Это делается для уменьшения себестоимости, что заставляет покупателей не сосредотачиваться на качестве аккумуляторов. Каналы реализации остаются прежними: 50% потребителей покупают аккумуляторные батареи в магазинах автомобильных запчастей, приблизительно 30% покупателей приобретают их в специализированных магазинах. Растет значение интернет-продаж, не только интернет-магазинов, но и социальных сетей, агрегаторов объявлений и т.д. Но, несмотря на всё вышеперечисленное, первичный, вторичный рынок, производство, продажи, импорт и экспорт СКА в Российской Федерации остаются не только стабильными в некоторых регионах, но и показывают положительную динамику в целом, что является хорошим показателем, учитывая состояние экономики [10].

Наиболее сложным в понимании является ценовая динамика рынка СКА. Аккумуляторные батареи с каждым годом становятся все дешевле, но специалисты этой сферы видят в этом как «положительную», так и «отрицательную» тенденцию. Под «отрицательной» понимается демпинг, ведущийся со стороны частных брендов. «Положительная» связана с повышением эффективности бизнеса свинцово-кислотных аккумуляторов в целом, который включает переход на современное производство. В зависимости от того, какая тенденция перевесит, стоимость может или достигнуть справедливого баланса, или уменьшиться до такого уровня, когда проигрывают и производитель и продавец. Возможность развития второго сценария уменьшилась благодаря потребителю, который смог различать некачественные аккумуляторы. А за потребителем последовали и отечественные производители СКА. Выбор качественной российской продукции стал разнообразнее. Увеличиваются также сроки замены аккумуляторных батарей. Торговые представители стали чаще уделять внимание менеджменту, применять разные стимулирующие акции и бонусы. Все больше продукции реализуется через сеть интернет, доставка и установка аккумуляторных батарей на авто. В то же время послепродажное обслуживание используется все реже.

Рынок России по причине небольшого объема и сложной конкуренции не особо привлекает иностранные инвестиции. Зато производители из России про-

водят исследования по разработке новых конструкций СКА [11-15], а также изменению технологических линий в промышленном секторе, на основании чего в последнее время создаются конструкции АКБ нового поколения, по техническим характеристикам превосходящие прошлые разработки. Благодаря использованию новых сплавов будет снижен саморазряд и газовыделение в свинцово-кислотных аккумуляторах, что приведет к снижению издержек по обслуживанию АКБ в эксплуатации, например, технологии порошковой металлургии или EFB [11-17]. Одновременно увеличивающаяся конкуренция опускает цены. При этом число покупателей, которые выбирают самые бюджетные аккумуляторные батареи, увеличилось, но незначительно.

На рынке значимыми факторами являются экономическое положение в России и выход производителей с усовершенствованной технологией производства батарей. Заметен сдвиг рынка в сторону бюджетных свинцово-кислотных аккумуляторов, обладающих характеристиками ниже заявленных. При этом покупатель за свои средства все равно выбирает аккумуляторную батарею с лучшим качеством. Это и является самым главным фактором, который влияет на вторичный сегмент СКА. Сегодня доля операторов, принципиально не берущих на реализацию дешевые АКБ, очень уменьшилась, особенно внедрилась практика приема использованных батарей в счет приобретения новых. В больших населенных пунктах все чаще потребители делают покупки в интернете, так как это дает возможность выбрать самую бюджетную продукцию. И если раньше доставка оценивалась в 400-500 руб., то сейчас всё больше в торговых фирмах предлагается бесплатная доставка.

Вывод

В связи с пандемией, состояние рынка свинцово-кислотных аккумуляторов на начало 2020 года по сравнению с 2019 годом находилось в регрессе, но, начиная с 3 квартала 2020 года, показывает положительную динамику роста продаж. Тенденция роста производства и продаж наблюдается и в первом квартале 2021 года. Так же стал разнообразнее выбор качественной продукции. Выявлено, что сильнее всего на стоимость и спрос свинцово-кислотных аккумуляторов влияют 3 фактора: цена на сырье; демпинг оптовых продавцов и финансовая способность населения. Потребители всё чаще понимают, что аккумуляторная батарея не тот товар, на котором можно экономить. Что касается производства СКА, прогнозируется уменьшение зарубежных инвестиций и рост производства у отечественных предприятий-изготовителей. Стабильность на рынке свинца и его переработки, а также разработки новых технологий могут повлечь за собой улучшение качества продукции и развитие рынка свинцово-кислотных аккумуляторов.

Литература

1. Patrick T. Moseley, David A. J. Rand. Lead-Acid Batteries for Future Automobiles // Elsevier. 2017. 674 P.
2. Sarah Paul Ayeng'o, Toni Schirmera, Kai-Philipp Kairiesa, Hendrik Axelsena, Dirk Uwe Sauera. Comparison of off-grid power supply systems using lead-acid and lithiumion batteries // Solar Energy. 2018. № 162. P. 140-152.

3. Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants // Appl. Sol. Energy. 2019. № 55. P. 153-158.
4. Коровина Н.В. и Скундина А.М. Химические источники тока: Справочник // М.: Издательство МЭИ. 2003.
5. Информационный материал от Аналитической компании Tebiz Group [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tebiz.ru> (дата обращения: 01.06.2021).
6. Information material from the Analytical Company MetalResearch [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.metalresearch.ru/Lead-acid_accumulators.html (дата обращения: 01.06.2021).
7. Information and analytical materials [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/compendium> (дата обращения: 01.06.2021).
8. Куназаров Р.П. Перспективы развития вспомогательных источников питания // Сборник статей студенческой конференции. 2018. С. 37-39.
9. Ялалова А.И., Сердюк С.П., Зырянов Перспективные электрохимические технологии переработки отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». 2018. С. 524-529.
10. Шкунов Н.А. Анализ факторов, влияющих на стоимость автомобильных аккумуляторов // Перспективы развития науки в современном мире. Сборник статей по материалам IV международной научно-практической конференции. 2017. С. 61-64.
11. Сергеев С.Н., Васильев А.Н., Яценко А.Н., Мараховский М.А. Многокритериальная оптимизация получения горячекомпактированных композиционных материалов Pb-C на основе стружки утилизированных электродов аккумуляторных батарей // Цветные металлы. 2020. № 11. PP. 63-69.
12. Сергеев С.Н., Васильев А.Н., Василенко Д.В. Многокритериальная оптимизация технологических параметров получения композиционного материала Pb-C и углеродного покрытия // Информационно-технологический вестник. 2020. № 3(25). С. 166-174.
13. Кочетов А.Н., Черноусов П.С., Фисунова Е.И. Технология улучшения эксплуатационных характеристик путем восстановления автомобильных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей // Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. Донской государственный технический университет, Аграрный научный центр «Донской». 2019. С. 751-753.
14. Шпекина В.И., Савельева Е.А., Горбачева Е.Ю. Положительный электрод для резервного источника тока // Электрохимическая энергетика: СНИГУ им. Н.Г. Чернышевского. 2014. № 4, с. 214-217.
15. Пат. 2583447 Российская Федерация, МПК: H01M4/18, H01M10/12, H01M4/76. Емельянов С.Г., Коновалов М.Б., Крипачев А.В. Способ изготовления электрода свинцово-кислотного аккумулятора. Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»; заявл. 25.11.14.; опубл. 10.05.16. Бюл. № 13.

16. Gelbke M., Mondoloni C. 5-Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): State-of-the-art // Lead-Acid Batteries for Future Automobiles. 2017. P. 149-184.
17. Kwiecien M., Schröer P., Kuipers M., Sauer D.U. 4 – Current research topics for lead-acid batteries // Lead-Acid Batteries for Future Automobiles. 2017. P. 149-184.

УДК 621.793

Исследование возможности повышения работоспособности подшипников качения применением металлоплакирующих нанотехнологий

А.К. Прокопенко, доктор технических наук, профессор,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

С.А. Попов, главный специалист,
АО «КБТочмаш» имени А.Э. Нудельмана, г. Москва,

А.А. Корнеев, кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, г. Москва

Проведены исследования по повышению износостойкости трущихся деталей подшипника качения за счет использования металлоплакирующих нанотехнологий в процессе обкатки и эксплуатации. Приведены результаты лабораторных триботехнических испытаний подшипниковых материалов в режиме металлоплакирования. Показан механизм образования защитной пленки на стальной поверхности деталей подшипника качения. Экспериментальным путем подтверждена возможность увеличения ресурса подшипников качения в процессе эксплуатации.

Работоспособность подшипников качения, металлоплакирующие нанотехнологии, маслорастворимая металлсодержащая присадка, металлсодержащая технологическая среда, триботехнические испытания.

Investigation of the possibility of improving the performance of rolling bearings using metal-coating nanotechnologies

A.K. Prokopenko, Doctor of Technical Sciences, Professor,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

S.A. Popov, Chief Specialist,
JSC «KBtochmash» named after A. E. Nudelman, Moscow,

A.A. Korneev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
A.N. Kosygin Russian State University, Moscow

Studies have been carried out to increase the wear resistance of the friction parts of the rolling bearing due to the use of metal-coating nanotechnologies in the process of running-in and operation. The results of laboratory tribotechnical tests of bearing materials in the metal plating mode are presented. The mechanism of for-

mation of a protective film on the steel surface of rolling bearing parts is shown. The possibility of increasing the service life of rolling bearings during operation has been experimentally confirmed.

Performance of rolling bearings, metal-coating nanotechnologies, oil-soluble metal-containing additive, metal-containing technological medium, tribotechnical tests.

Введение

Надежность механизмов и машин обуславливается нагрузкой, действующий на подшипник, его быстроходностью, работоспособностью, долговечностью, а также величиной потерь в нем на трение [1]. При повышенных скоростях в опорах широкое применение нашли подшипники качения. Традиционно элементы подшипников качения изготавливаются из специальных шарикоподшипниковых сталей.

Однако, в определенных условиях эксплуатации подшипников, применять традиционные материалы для их изготовления не представляется возможным. В таком случае выходом из данной ситуации служит переход на керамические материалы, среди которых наибольшее распространение получили составы на основе карбида или нитрида кремния, а также оксидов алюминия, циркония [2].

Такие подшипники имеют ряд преимуществ перед традиционными:

- возможность работать в отсутствии смазочного материала;
- устойчивость к агрессивным средам;
- способность работать при высоких температурах из-за малых тепловых расширений деталей;
- высокая чистота обработки рабочих поверхностей;
- низкий коэффициент трения.

Срок службы керамических подшипников за счет снижения контактных напряжений гораздо выше, чем у подшипников из металлического материала [3]. Результаты усталостных испытаний керамических подшипников показали, что они в 8 раз долговечнее стальных подшипников, работающих в тех же условиях [4]. При этом снижается расход смазочного материала.

Однако у керамических подшипников есть и недостатки. Очень часто происходит разрушение керамических колец при высоких скоростях и нагрузках. Стойкость к коррозии у них снижается за счет использования сепараторов из металла.

Кроме этого, керамический материал характеризуется высокой твердостью, хрупкостью и меньшей, чем у стали, плотностью [6].

Малейшее разрушение поверхности керамического шарика может вызвать повышенный износ сопряженной стальной детали и выход ее из строя [7].

В последнее время широкое распространение получили так называемые гибридные подшипники. В них тела вращения выполнены из керамического материала (например, нитрида кремния), а кольца и сепараторы остаются стальными. В некоторых гибридных подшипниках сепараторы изготавливают из пласт-

массы (например, полиамида).

Применение металлических колец в подшипнике позволило увеличить их работоспособность при повышенных скоростях и нагрузках, но в этом случае наблюдается износ рабочих поверхностей металлических колец в результате трения качения с проскальзыванием керамических шариков из-за разности диаметров внутреннего и внешнего колец.

Но если керамические подшипники, изготовленные полностью из керамики, не требуют смазки, то гибридным подшипникам смазочный материал необходим.

Гибридные подшипники от обычных стальных подшипников могут лучше работать при минимальном количестве смазочного материала, так как коэффициент трения хорошо обработанной керамики по стали ниже, чем коэффициент трения стали по стали.

Однако эффективность использования гибридных подшипников также снижается при низких скоростях, сопровождающихся большой нагрузкой [5].

Вопросами изучения работы гибридных пар трения «керамика-сталь» занимаются как в нашей стране, так и за рубежом [8,9,10,11,12].

Наиболее перспективным методом повышения работоспособности подшипников качения, на наш взгляд, является создание в зоне фрикционного контакта условий самовосстановления поверхностей трущихся материалов за счет использования «эффекта безызносности» [13, 14, 15, 16, 17].

Авторы настоящей статьи в течение многих лет занимаются исследованиями «эффекта безызносности» и разработке металлоплакирующих нанотехнологий на его основе [18, 19].

Основа предлагаемых технологий в том, что на поверхностях стальных трения деталей подшипника при их изготовлении, обкатке и эксплуатации за счет сложных физико-химических процессов формируется металлсодержащая пленка толщиной 0,1...1,0 мкм, способная самовосстанавливаться в процессе работы и защищать детали от изнашивания, в том числе и водородного износа. В гибридных керамических подшипниках защитная пленка может образоваться только на стальных деталях, на керамике она не образуется.

Работоспособный поверхностный слой может быть сформирован на всех этапах изготовления и эксплуатации деталей [20, 21]:

- во время придания детали нужной формы резанием или пластическим деформированием;
- во время обработки поверхности детали поверхностно-пластическим деформированием или нанесения многофункционального покрытия фрикционным способом;
- в период обкатки (приработки) узлов трения машин в сборе;
- во время эксплуатации машины или механизма.

Это достигается применением специальных смазочных материалов или технологических сред, за счет введения в их состав поверхностно-активных металлсодержащих химических соединений [18].

Режим металлоплакирования в подшипнике качения может быть реализован за счет применения маслорастворимых металлсодержащих поверхностно-

активных присадок к традиционным смазочным материалам и металлсодержащих технологических сред для формирования на трущихся поверхностях деталей подшипника поверхностных слоев с улучшенными триботехническими свойствами.

Химические составы присадок и технологических сред являются «ноу-хау» авторов данной работы.

Целью настоящих исследований является определение возможности повышения работоспособности подшипников качения, в том числе и гибридных, за счет реализации в узлах трения режима металлоплакирования.

Методика проведения исследований. Во время проведения исследований использовались обычные смазочные материалы, смазочные материалы со специальными маслорастворимыми поверхностно-активными металлсодержащими компонентами (присадками) в малых концентрациях и металлсодержащие поверхностно-активные технологические среды.

Введение нужной концентрации добавки к смазочному материалу является очень важным, так как присадка представляет собой очень сильное поверхностно-активное вещество и ее избыток может вызвать повышенный износ.

Достаточно быстро и точно определить эффективность от применения предложенных технических мероприятий, концентрацию металлсодержащей добавки к смазочному материалу, режимы формирования покрытий на рабочих поверхностях деталей можно на основании триботехнических исследований с материалами шарикоподшипников.

Сравнительные лабораторные триботехнические испытания были проведены на малогабаритной установке для испытаний материалов на трение и износ по схеме: «ролик колодка», общий вид которой показан на рисунке 1.

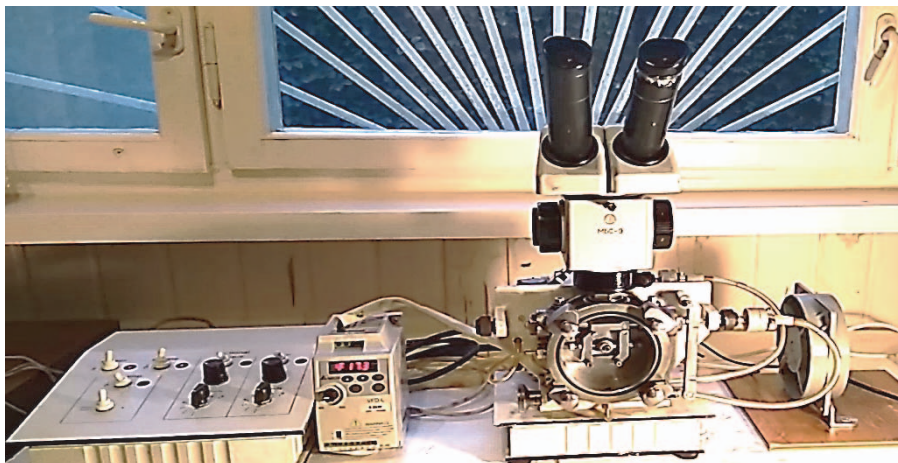


Рисунок 1 – Общий вид установки для испытаний материалов на трение и износ

Чертежи образцов для испытаний показаны на рисунке 2.

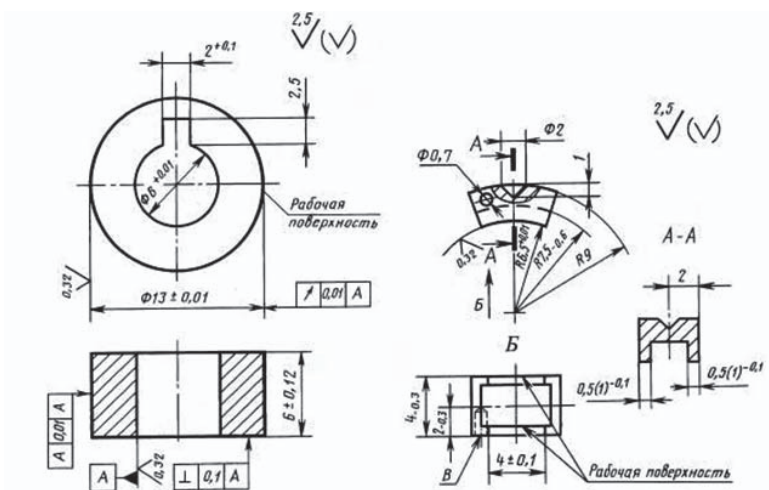


Рисунок 2 – Чертежи образцов для триботехнических испытаний

Рабочая камера установки с испытуемыми образцами, системой их нагружения и системой смазывания показана на рисунке 3.

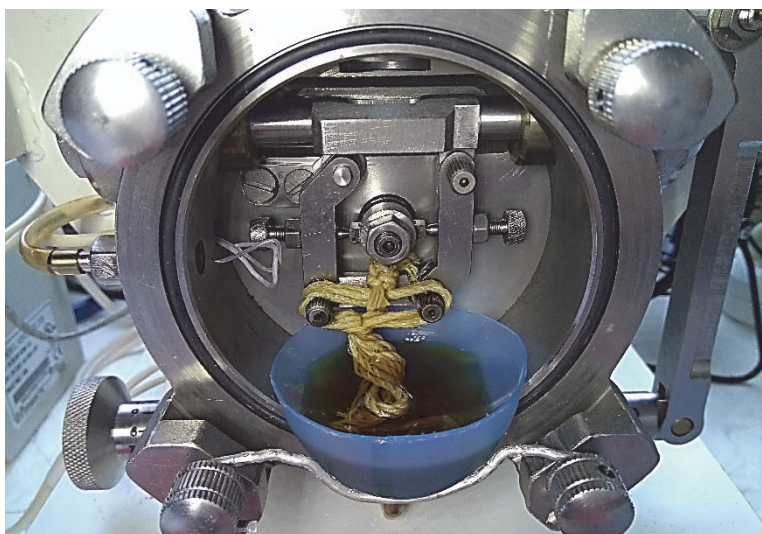


Рисунок 3 – Рабочая камера установки с испытуемыми образцами, системой их нагружения и системой смазывания

Результаты исследований. При проведении исследований было установлено, что при испытаниях пары трения «сталь ШХ15-сталь ШХ15» твердостью 65 HRC при скорости скольжения 2 м/с и удельной нагрузке 10 МПа в смазочной среде ЛИТОЛ-24 с 0,1% маслорастворимой металлосодержащей присадкой износостойкость трущихся материалов повысилась до 4 раз по сравнению с

трением данных материалов в ЛИТОЛ-24 без присадки [18].

Осмотр испытуемых образцов после испытаний показал, что на их рабочих поверхностях после трения в смазочном материале с металлоплакирующей присадкой четко просматривается защитная пленка.

Рентгеноспектральный анализ показал, что основу этой пленки составляет металл, содержащийся в составе присадки.

На рисунке 4 показана фотография поверхности стальной детали, сделанная на электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором, после работы в смазочном материале с металлосодержащей присадкой. Светлые участки на рабочей поверхности и всплески на кривой показывают присутствие в поверхностном слое металла из присадки.

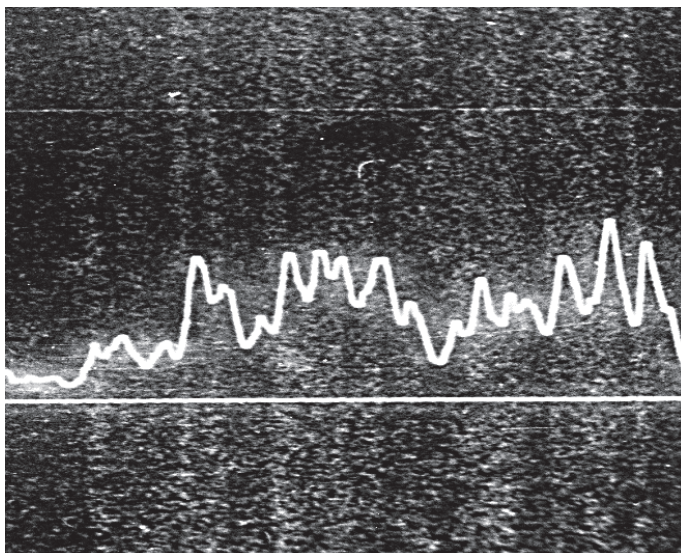


Рисунок 4 – Фотография поверхности стальной детали на электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором

Для определения возможности реализации режима металлоплакирования при трении керамических материалов были проведены триботехнические испытания следующей пары трения:

- ролик – алюминиевый сплав с нанесенным гальваническим способом никель-керамическим покрытием (накасил);
- колодка – сплав стали (50%) и карбида титана (50%).

Испытания проводились в моторном масле М10Г и масле М10Г с 0,1% маслорастворимой металлосодержащей присадкой при скорости скольжения 2 м/с и удельной нагрузке 34МПа в течение 1,5 часов.

В результате испытаний было отмечено:

- снижение коэффициента трения с 0,075 в чистом масле до 0,0625 в масле с присадкой;

– уменьшение суммарного линейного износа образцов времени приработки в масле с присадкой в 2 раза.

На рабочей поверхности колодки наблюдалась образовавшаяся в процессе трения защитная пленка.

Схема образования металлсодержащей пленки на рабочей поверхности детали при трении в металлсодержащей среде представлена на рисунке 5.

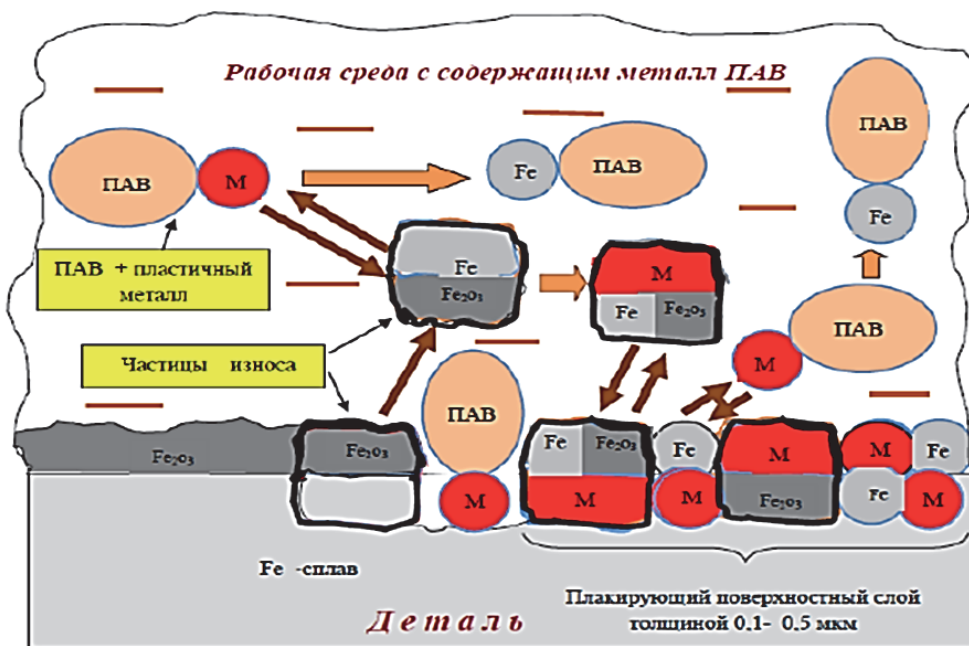


Рисунок 5 – Схема образования металлсодержащей пленки на рабочей поверхности детали при трении в металлсодержащей среде

Таким образом, экспериментальным путем была подтверждена возможность реализации режима металлоплакирования на традиционных подшипниковых материалах и при трении керамических материалов в паре с металлокерамическими материалами.

Процесс металлоплакирования в подшипнике будет таким же, как и при проведенных триботехнических исследованиях.

Механизм образования защитной пленки в этом случае можно описать следующим образом. Во время работы подшипника качения шарики активируют рабочую поверхность сопряженной стальной детали, удаляя окисную пленку. В результате реакций обмена происходит образование самовосстанавливающейся тончайшей пленки из металла присадки и продуктов износа. Атомы входящего в смазочный материал образуют защитную пленку и диффундируют в поверхность стальной детали, повышая ее устойчивость к усталостным разрушениям. Аналогичный процесс будет происходить и при использовании керамических шариков. При использовании шариков из стали процесс образования защитной пленки

происходит и на рабочих поверхностях шарика или ролика.

Условия реальной эксплуатации подшипников иногда делают невозможным замену штатных смазочных материалов или введение в них добавок. В этом случае обработку рабочих поверхностей подшипников следует производить перед установкой в машину.

Чаще всего потребитель получает подшипник качения в собранном состоянии и не имеет возможности осуществить обработку отдельных деталей с целью нанесения защитного покрытия.

В этом случае обработку рабочих поверхностей подшипников следует производить перед установкой в машину обкаткой подшипника качения при малых нагрузках в технологической среде, содержащей соединения металлов.

Технологические среды могут быть в виде жидкостей или паст. Также необходимый для пленкообразования металл может входить в состав инструмента (при фрикционном натирании).

При выполнении настоящей работы для обкатки подшипников в сборе использовались технологические среды, содержащие химические соединения меди и олова.

Обкатка подшипников к данной технологической среде проводилась на холостом ходу до образования защитной пленки. Затем технологическая среда удалялась, и в подшипник вводился штатный смазочный материал.

Шарики (в том числе и керамические) в этом случае выступают в роли инструмента и в результате механо-химических процессов формируют на рабочей поверхности стальной детали пленку из металла толщиной до 5 мкм.

На рисунке 6 показана увеличенная в 1000 раз поверхность металлсодержащей пленки на дорожке трения стальной детали после проведенной обкатки (белые участки – металлическое покрытие).

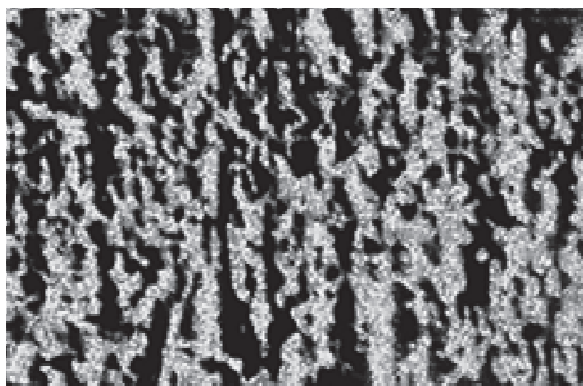


Рисунок 6 – Поверхность дорожки трения стальной детали подшипника после обкатки в металлсодержащей технологической среде

На рисунке 7 показан микрошлиф стальной детали с образовавшимся во время обкатки металлическим покрытием.



Рисунок 7 – Микрошлиф стальной детали с образовавшимся во время обкатки в металлсодержащей технологической среде металлическим покрытием

Обладая высокими антифрикционными свойствами и пористостью сформированная при трении пленка положительно влияет на работоспособность трущихся материалов, снижая вероятность разрушения поверхности металла в начальный период работы.

Схема процесса изнашивания поверхности стальной детали со сформированным во время обкатки подшипника в металлсодержащей среде показана на рисунке 8.

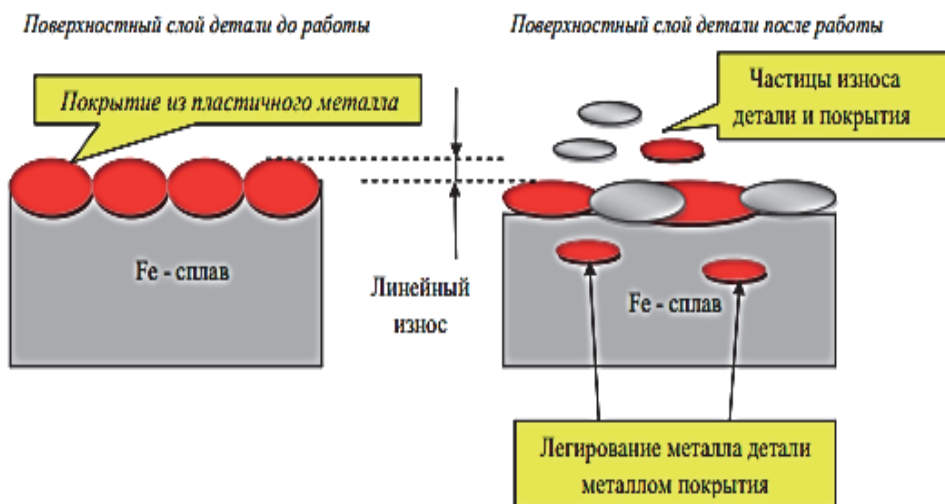


Рисунок 8 – Схема процесса изнашивания поверхности стальной детали со сформированным во время обкатки подшипника в металлсодержащей среде

Проведенные предварительные лабораторные стендовые испытания подшипников качения при одноразовом нанесении смазочного материала подтвердили результаты триботехнических исследований и показали возможность повышения ресурса подшипников на этапе приработки не менее чем в 2-4 раза.

Выводы

Проведенные исследования показали, что работоспособность подшипников качения, в том числе и гибридных, может быть повышена за счет применения металлоплакирующих нанотехнологий при использовании металлсодержащих технологических рабочих сред и металлсодержащих присадок к смазочным материалам в процессе подготовки, обкатки и эксплуатации подшипников.

Экспериментально подтверждена возможность формирования защитной металлсодержащей пленки на рабочих поверхностях стальных деталей подшипников качения в процессе эксплуатации или технического обслуживания, что обеспечивает повышение износостойкости трущихся материалов и повышения ресурса узла в целом.

Проведенные стендовые испытания подшипников при одноразовом введении смазочного материала показали возможность повышения их ресурса на этапе приработки не менее чем в 2 раза.

Полученные результаты показывают перспективность проведения работ по повышению работоспособности узлов трения качения с традиционными и новыми материалами.

Литература

1. Шаргаёв А.А., Макаренко Н.Г., Зиновьев С.С. Обзор способов повышения ресурса подшипников качения // Наука и военная безопасность. 2017. № 2(9). С. 45-51.
2. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Нитридокремниевые керамические материалы для подшипников авиационных ГТД и способы их получения (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7(79). С. 42-49.
3. Лаврентьев Ю.Л. Определение оптимальной области применения гибридных подшипников качения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2018. № 1. С.57-65.
4. Ножницкий Ю.А., Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Гибридные подшипники качения для авиационных двигателей (обзор) // Авиационные двигатели. 2019. № 2(3). С. 73-76.
5. Дроздов Ю.Н., Савинова Т.М. Техническая керамика в высоконагруженных узлах трения // Вестник машиностроения. 2005. № 11. С. 28-32.
6. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Алферов А.И., Гордеев С.К. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников: материал, технология изготовления и механическая обработка, расчеты и испытания // Композиты и наноструктуры. 2010. № 2(6). С. 12-27.
7. Панов А.Д., Панова И.М. Трибологические особенности конструкционных керамических материалов в подшипниках скольжения // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 1(26). С. 82.
8. Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Радзиевский В.А., Майстренко А.Л., Сохань С.В., Кулич В.Г., Евдокимова О.В. Трибология гибридных пар трения скольжения «керамика-сталь» в различных условиях смазки // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 2. С. 248-256.

9. Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Радзиевский В.А., Майстренко А.Л., Сохань С.В., Кулич В.Г. Трение качения гибридных пар керамика - сталь в различных условиях смазки // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 5. С. 586-598.
10. Белова Г.С., Титова Ю.В., Майдан Д.А. Перспективы использования нитрида кремния марки СВС-А3 для производства деталей подшипников // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 2(17). С. 26-33.
11. Сердобинцев Ю.П., Харьков М.Ю., Наззал А. Обзор и анализ применения керамических материалов в различных отраслях промышленности // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. С. 231.
12. Гаршин А.П. Керамика для машиностроения / А.П. Гаршин, В.М. Гропянов, Г.П. Зайцев, С.С. Семенов. М.: Научтехлитиздат, 2003. 384 с.
13. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин. М.: Издательство «МСХА», 2002. 626 с.
14. Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 29-33.
15. Гаркунов Д.Н., Бабель В.Г., Мельников Э.Л., Щедрин А.В., Аванесян В.П. Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 6. С. 18-25.
16. Гаркунов Д.Н., Бабель В.Г., Мельников Э.Л., Щедрин А.В., Минязева Л.Х., Бабель А.Л. Металлосодержащие противоизносные противозадирные присадки к моторным маслам двигателей внутреннего сгорания // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 4. С. 17-24.
17. Поляков С.А. О Взаимосвязи явлений самоорганизации и безызносности при трении // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 5. С. 558-566.
18. Прокопенко А.К., Голубев А.П., Корнеев А.А., Зикеев Г.П. Повышение срока службы деталей машин и инструмента металлоплакированием. М.: НИЦ МГУДТ, 2010. 87 с.
19. Корнеев А.А., Прокопенко А.К., Голубев А.П., Терешкин С.А. Финишная антафрикционная обработка деталей узлов трения машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГУДТ, 2015. 98 с.
20. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Бабель В.Г., Щедрин А.В. Обзор патентов по трибологии на основе самоорганизации за 2005-2018-е Годы // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 7. С. 17-20.
21. Иванова И.В., Маслецов В.В. Приработка деталей машин в режиме металлоплакирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. № 199. С. 150-157.

УДК 621.882: 691.175.5/8

Крепеж из армированных термопластов

А.В. Чесноков, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией,
В.Н. Андреев, аспирант, зав. лабораторией,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,
И.А. Тимофеев, кандидат технических наук, начальник отдела,
АО «Композит», г. Королев, Московская область

Обоснована актуальность применения армированных термопластов для изготовления крепежа для аэрокосмической техники. Разработана технология получения крепежа для соединения трехслойных панелей из угленаполненного (40%) полиэфирэфиркетона импортного и отечественного производства. Проведены исследования полученного крепежа. Полученные результаты применены в разработке технологии изготовления крепежа для несущих ферменных конструкций поддерживающих кабельную разводку на космических аппаратах. Средняя удельная прочность крепежа на разрыв составляет 115 МПа·см³/г, что определяет перспективность применения его в конструкциях аэрокосмической техники. На крепеж получены Технические условия «Детали крепежные армированные».

Армированный крепеж, композиционные материалы, армирование, углеродное волокно, ПЭЭК, полиэфирэфиркетон, ПФС, ПЭИ.

Reinforced thermoplastic fasteners

A.V. Chesnokov, Doctor of Technical Sciences, head of laboratory,
V.N. Andreev, graduate student, head of laboratory,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
I.A. Timofeev, candidate of technical sciences, head department,
JSC «Composite», Korolev, Moscow region

The relevance of the use of reinforced thermoplastics for the manufacture of fasteners for aerospace equipment is substantiated. A technology has been developed for obtaining fasteners for joining three-layer panels made of carbon-filled (40%) polyetheretherketone of foreign and domestic production. The research of the received fasteners has been carried out. The results obtained are used in the development of a technology for the manufacture of fasteners for load-bearing truss structures that support cabling on spacecraft. The average specific tensile strength of the fastener is 115 MPa cm³/g, which determines the prospects of its application in the structures of aero-

space technology. The technical conditions «Reinforced fastening parts» were received for the fasteners.

Reinforced fasteners, composite materials, reinforcement, carbon fiber, PEEK, polyetheretherketone, PPS, PEI.

Армированные термопласты находят применение в аэрокосмической промышленности благодаря своим превосходным свойствам, таким как высокое отношение прочности к весу, вязкость разрушения, устойчивость к повреждениям и повторяемость формования [1-7]. Лидеры рынка производства самолетов Airbus и Boeing представили новые модели самолетов, A350 и B787 соответственно, которые используют материалы, изготовленные из армированных углеродным волокном полимеров [8]. В Авиационной Компании «Туполев» в среднемагистральных самолетах ТУ-154 и ТУ-204 титановый крепеж из BT-16 составляет на одно изделие соответственно 45 кг и 940 кг, в изделиях АК им. С.В. Ильюшина Ил-86 и Ил-96-300, соответственно, 1890 и 2130 кг [9]. Большая часть этого крепежа используется для крепления вспомогательного оборудования и не имеет силовую нагрузку. В космических конструкциях задача снижения веса еще более актуальна.

Композиты на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), армированного углеродным волокном, наиболее перспективны и часто используются в авиации [10-16]. Металлический крепеж широко используется для соединения конструкций из композитов [17], но за счет возникновения электрического потенциала, происходит гальваническая коррозия, ухудшающая соединение. Металлический крепеж имеет более высокую электропроводность, что образует очаг возгорания при ударе молнии в самолет [18, 19] и может приводить к катастрофическим последствиям. Приведенное обоснование указывает на актуальность и важность разработки новых подходов к соединению композиционных материалов в аэрокосмической технике и наиболее перспективными материалами для крепежа являются суперконструкционные армированные термопласты.

В литературе мало информации о крепеже из композитных материалов. Р. Стариков и Дж. Шон сравнили квазистатическое и усталостное поведение титановых и композитных крепежных изделий. Они обнаружили, что титановые крепежные элементы лучше работают при статической нагрузке, но при усталостной нагрузке (до 10^6 циклов нагрузки) полимерные армированные углеродным волокном и титановые крепежные детали выходят из строя при примерно одинаковом максимальном уровне напряжения [20-22].

Усовершенствование конструкции и производственного процесса изготовления крепежа из армированного ПЭЭК позволяет расширить области его рационального применения. В работах [8, 23, 24] проведены исследования болтовых соединений на силу зажима, коэффициент трения, натяг в сопряжении. Неармированный ПЭЭК не желателен для конструкционного применения, из-за низкой жесткости и прочности. ПЭЭК армированный короткими волокнами – это умеренно усиленная система между неармированным ПЭЭК и ПЭЭК с непрерывным волокном. По сравнению с неармированным ПЭЭК, ПЭЭК с коротким

волокон обеспечивает улучшенную жесткость и прочность при сохранении доступной цены благодаря простоте обработки с использованием методов экструзии и литья под давлением. Квазистатические механические свойства ПЭЭК с коротким волокном хорошо изучены [25, 26]. Рашев [25] и его коллеги изучили механические свойства ПЭЭК с коротким волокном и их связь с трибологическими характеристиками и ориентацией волокон. Сарасуа и его коллеги [26] изучили механическое поведение армированного коротким стекловолокном и углеродным волокном ПЭЭК с использованием однонаправленного испытания на растяжение и иммерсионного ультразвукового метода, а также сравнили прочность на межфазный сдвиг.

Томасон [27] пришел к выводу, что характеристики армированных короткими волокнами пластмасс зависят от совокупного влияния свойств волокна и матрицы и способности переноса напряжений на границе раздела волокно-матрица. Было обнаружено, что длина и диаметр волокна не сильно влияют на эффективный модуль упругости материала из-за случайных распределений ориентации волокон во внутренних волоконных нитях.

Кривые растяжения-сжатия матрицы ПЭЭК при различной деформации получены в работе [28]. Исследован ПЭЭК и два типа ПЭЭК армированного короткими волокнами (из углеродного волокна и стекловолокна), при испытаниях на одноосное растяжение при различных скоростях деформации. Скорость деформации варьировалась в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 с⁻¹. Показана зависимость механических свойств ПЭЭК, армированного короткими волокнами, от скорости деформации, и взаимосвязь между характеристиками разрушения, скоростью деформации и типом волокна. Для измерения эволюции распределения деформаций использовались высокоскоростная система камер и метод цифровой корреляции изображений. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) была применена для изучения и анализа механизмов разрушения. Результаты показали, что меньшую чувствительность к скоростям деформации имеют армированные ПЭЭК. ПЭЭК, армированный углеродным волокном и стекловолокном, имеют различия в чувствительности к скорости деформации и механизмам разрушения.

В работе [29] исследована ударопрочность композитов ПЭЭК, армированных короткими углеродными волокнами (30%), сравнивалась с ненаполненным ПЭЭК. Исследования проводились для применения изделий в виде имплантатов к воздействиям ударной нагрузки, было выявлено повышение хрупкости армированного материала.

Главный научный сотрудник компании Victrex, наиболее крупного производителя ПЭЭК и армированных материалов на его основе Джон Грасмедер, отмечает важность контроля температуры прессформ и скорости остывания, так как эти параметры существенно влияют на кристалличность материала и его эксплуатационные свойства [30].

Несмотря на широкое внедрение ПЭЭК в узлах летательных аппаратов, медицине и других отраслях, производителей крепежа из ПЭЭК оказалось очень мало, публикации производителей носят рекламный характер с ограниченным набором показателей, не позволяющих в полной мере определить эксплуатационные характеристики крепежа. Первые в России работы по разработке крепежа

из армированных термопластов проводились в Инжиниринговом центре (ИЦ) Технологического университета [31] на примере болтов и шпилек из суперконструкционных пластиков, таких как: стекло-наполненный (40%) полифениленсульфид (ПФС); угле-наполненный (40%) ПЭЭК; полиэфиримид (ПЭИ), а также композиция на его основе, армированная базальтовыми волокнами (40%).

Цель работы – провести сравнительный анализ свойств крепежа разных производителей и применяемых технологий производства для совершенства технологии производства высококачественного отечественного крепежа для летательных аппаратов и других отраслей.

Из известных производителей крепежа самыми высокими эксплуатационными характеристиками обладают изделия фирмы Icotec [32]. Крепежные изделия из ПЭЭК, армированного длинными углеродными волокнами (62% волокна), обладают прочностью примерно в семь раз выше, чем у алюминия и на 30% больше чем у армированного стекловолокном нейлона 6 или ненаполненного ПЭЭК [32]. По данным [33] предел прочности при растяжении более 400 МПа. Не найдены публикации, в которых бы исследовались свойства этого крепежа, нет данных о характере разрушения крепежа Icotec. Крепеж Icotec изготавливается по запатентованной технологии [34], предполагающей изготовление пултрузией однонаправленного стержня из ПЭЭК и непрерывного углеродного волокна, изготавливаемого фирмой Faigle Kunststofftechnik в Вайсенберге, Германия. Как указано в [32] поставщик стержней использует запатентованный метод высоконаполненного армирования ПЭЭК углеродным волокном. Далее стержень нарезается на заготовки, заготовки перемещаются в камеру нагрева, где ПЭЭК плавится и смачивает непрерывные волокна, сводя к минимуму пустоты. Затем заготовки перемещаются в полость пресс-формы, где прессуются с точной скоростью, температурой и давлением, чтобы сформировать изделие с предсказуемой ориентацией волокна для повышения прочности детали. Волокно в спиральных (резьбовых) участках ориентировано по резьбовому витку, что увеличивает сопротивление скручиванию, позволяя винтам противостоять разрушению. Ориентация на сердечнике винта является однонаправленной, что повышает общую прочность винта.

При сравнении прочности крепежа Icotec и однонаправленной ленты [35] изготовленной по аналогичной технологии и с применением аналогичных материалов (60% углеродного однонаправленного волокна, матрица ПЭЭК), видим, что прочность ленты в 6,5 раза выше. Отсутствие публикаций исследования разрушения крепежа Icotec не дает возможности понять причину снижения прочности крепежа Icotec.

Производитель из Японии [36] Nippon Chemical Screw & Co., Ltd. предлагает широкий спектр изделий, включая крепеж из различных термопластичных материалов. Из приведенных данных [36] можно определить предел прочности крепежа из неармированного ПЭЭК – 83,1 МПа, и из армированного стекловолокном (30%) полиамида МХ06 – 156,2 МПа, это максимальное значение для крепежа этого производителя.

Производитель из Северной Америки [37] Solid Spot LLC с 2016 года производит крепеж из армированного стекловолокном (30%) ПЭЭК, достигну-

тый предел прочности 157 МПа, а из неармированного ПЭЭК – 97 МПа.

Японская компания Mitsuboshi C.I. Co., Ltd. [38] более пяти лет занимается разработкой крепежа из армированных суперконструкционных пластмасс, таких как армированный углеродным волокном (30%) ПЭЭК, на данный момент компания предлагает крепежные изделия, армированные углеродным волокном (30%) из ПФС и поликарбоната, прочностные характеристики не приводятся.

Условия эксплуатации крепежа накладывает требования на его форму и предъявляемые технические характеристики. Рассмотрим применение армированного полимерного крепежа для соединения трехслойных конструкций:

– на рисунке 1 (а) представлено соединение двух трехслойных конструкций встык с двумя накладками. При проведении испытаний на сдвиг, крепежный элемент работает на срез при возникающих в нем сдвиговых напряжениях;

– на рисунке 1 (б) представлено угловое соединение трехслойных конструкций (\perp) с двумя уголками. При проведении испытаний на растяжение, крепежные детали испытывают растягивающие и сдвиговые напряжения и работают в режиме вырыва из трехслойной конструкции;

– на рисунке 1 (в) представлено соединение трехслойной конструкции с элементами конструкции в виде уголков (\perp). При проведении испытаний на растяжение, происходит вырыв крепежных деталей из трехслойной конструкции.

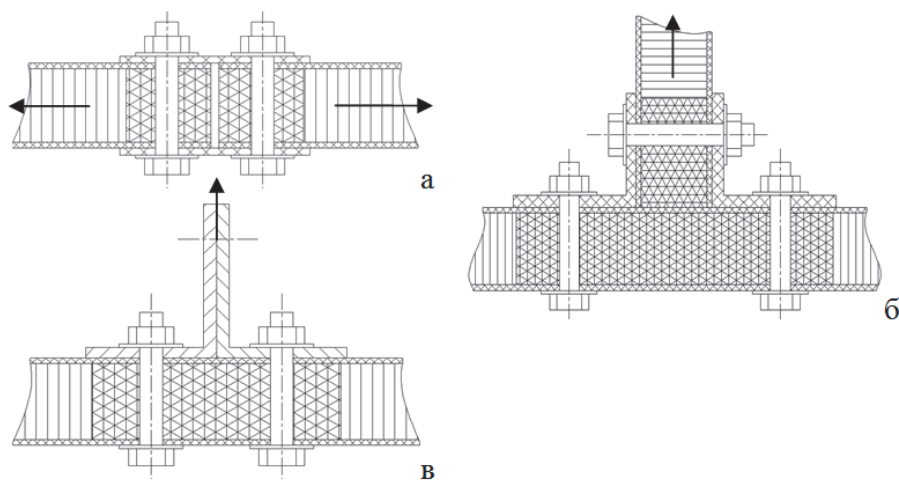


Рисунок 1 – Соединения трехслойных конструкций

Трехслойные конструкции состоят из углепластиковых обшивок и алюминиевого сотового заполнителя, склеенные между собой клеем горячего отверждения. В зоне стыка устанавливаются две углепластиковые накладки. В зоне установки крепежных деталей сотовый заполнитель подкреплен полимерным наполнителем.

В конструкциях отсеков, обтекателей в основном используются соединения «болт-гайка» с использованием типичных резьбовых крепежных деталей, таких как болты, шпильки с диаметром резьбы М6 и М8. В качестве предпочти-

тельных к внедрению в опытные образцы были выбраны четыре типоразмера крепежа – болт М8х60 и М6х60, шпилька М8х80 и М6х80.

В ИЦ Технологического университета отработана технология изготовления крепежных изделий из: стекло-наполненного (40%) ПФС; угле-наполненного (40%) ПЭЭК; ПЭИ, а также композиции на его основе, армированная базальтовыми волокнами (40%). Отработка технологии проводилась на двух термопластавтоматах: вертикальном Shanghai Langle Machinery Co. производства КНР и горизонтальном Arburg производства Австрии. Пресс-форма изготовлена для одновременного изготовления двух болтов и двух шпилек указанных типоразмеров. Пресс-форма и отливка представлены на рисунке 2. При разработке пресс-формы особое внимание уделялось поддержанию заданной температуры формообразующей оснастки, так как этот параметр отмечен производителем полимера [30] как наиболее важный для получения качественных отливок. Формообразующая оснастка выполнена с высокой точностью, что обеспечило высокое качество формообразования резьбы без необходимости выполнения дополнительных операций механической обработки.

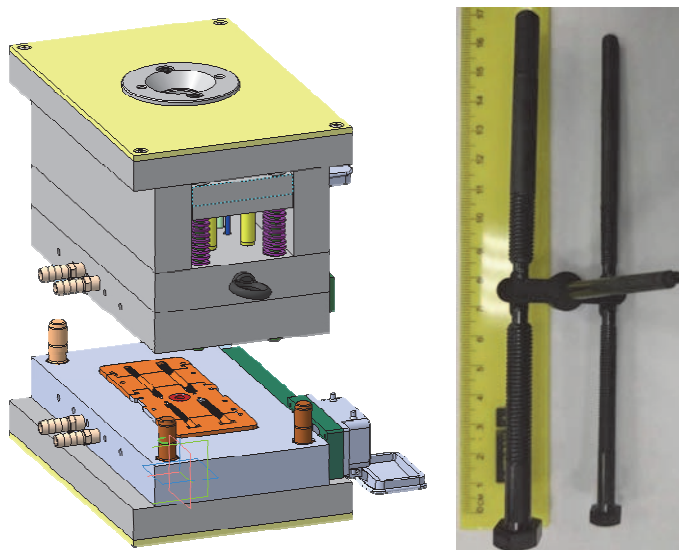


Рисунок 2 – Пресс-форма и полученная отливка

Проанализируем основные свойства полученного крепежа из ПЭЭК 90НMF40 производства Victrex. Средний предел прочности на разрыв для шпилек М6 составил 148,6 МПа, для М8 – 157,3 МПа, разрушение тела шпильки по резьбе. Для болтов предел прочности М6 составил 97,2 МПа, для М8 – 79,5 МПа, разрушение отрывом головки болта.

Для изучения причины отрыва головки болта при столь низких значениях прочности исследованы области мест разрушения. Исследования проводились в Институте высокомолекулярных соединений РАН и осуществлялись следующими методами:

1) Дифференциально-сканирующей калометрии (ДСК) на приборе DSC 204 F1. Испытания проводили в диапазоне температур от 30 до 450 °С при скорости нагрева 10 °С/мин, в инертной среде (аргон). Вес образцов 10 мг;

2) Сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) на приборе Supra 55 VP фирмы Carl Zeiss.

В результате эксперимента ДСК не было выявлено существенной разницы между образцом, разрушенным в месте шестигранной головки и в месте стержня с наружной резьбой. При этом температура плавления образцов находится в пределах погрешности измерения, в области 346-347 °С, результаты представлены на рисунке 3.

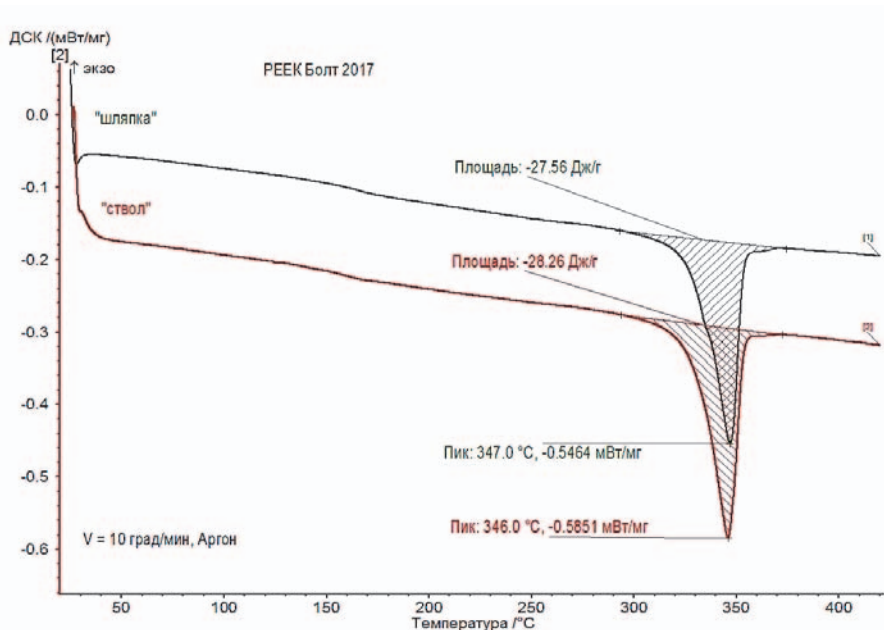


Рисунок 3 – ДСК анализ образцов головки и стержня болта

Исследование поверхности разрушения методом СЭМ показало, что в месте разрушения стержня с резьбой присутствует преимущественная ориентация углеродных волокон вдоль «болта» (рис. 4). В случае разрушения болта в месте шестигранной головки ориентация отсутствует, т.е. углеродные волокна хаотически распределены в матрице (рис. 5).

Таким образом, более высокие прочностные характеристики при разрушении болта в месте стержня с резьбой обусловлены появлением преимущественной ориентации армирующего наполнителя (углеродных волокон) по направлению прикладываемой механической нагрузки. В месте разрушения шестигранной головки ориентация отсутствует, что не приводит к реализации более высоких прочностных характеристик.

В работе [26] исследовано расположение армирующих коротких волокон в процессе заполнения формы на ТПА, сделано заключение, что выравнивание волокон происходит вдоль направления потока расплава. Аналогичные результа-

ты наблюдаем и на рисунке 4. Изменение ориентации армирующих волокон в зоне головки болта вызвано изменением потока полимера в сторону заполнения полости головки, и как следствие волокна разориентированы и в большинстве направлены перпендикулярно стержню.

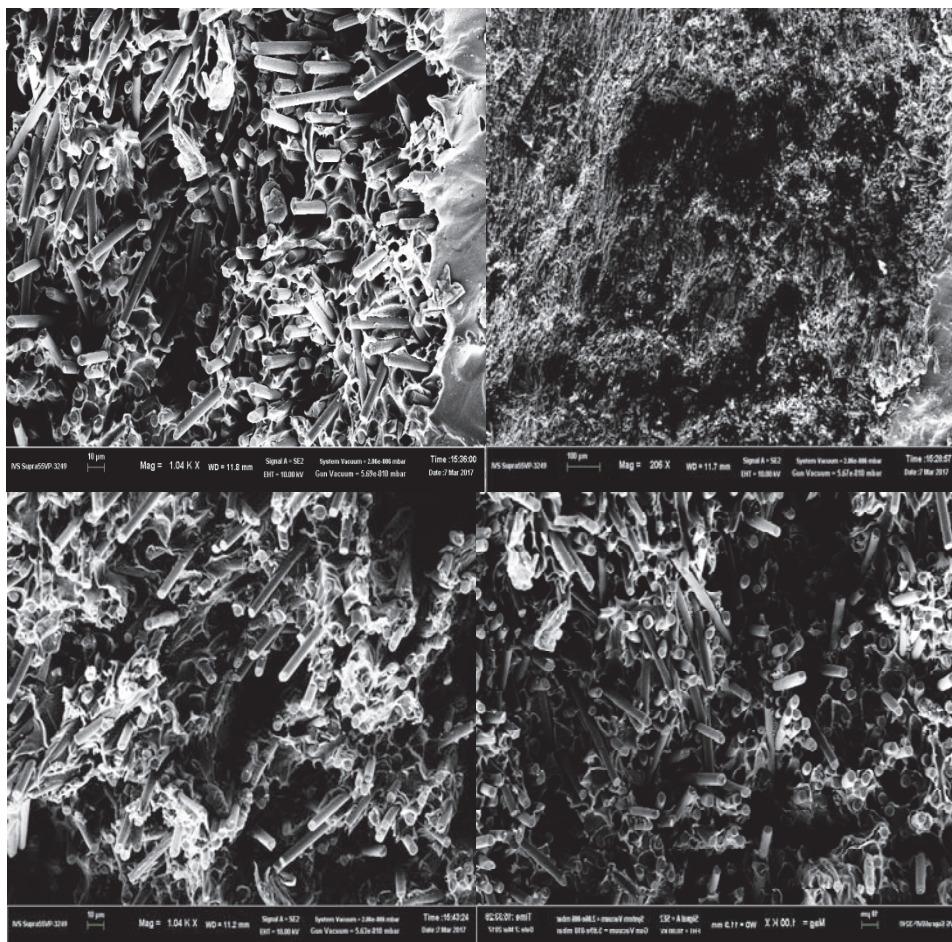


Рисунок 4 – СЭМ фотографии поверхности разрушения болта в месте стержня с резьбой

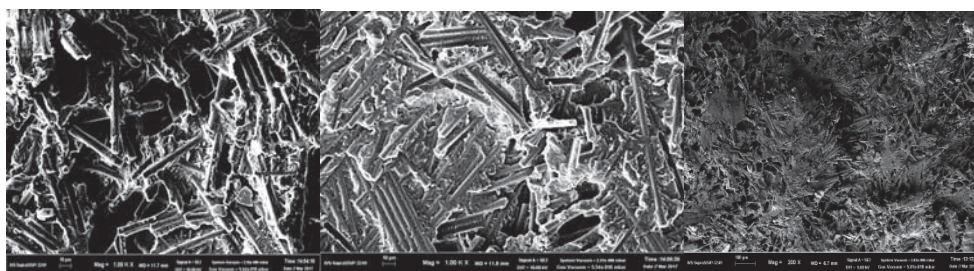


Рисунок 5 – СЭМ фотографии поверхности разрушения болта в месте шестигранной головки

Несмотря на оптимальную ориентацию волокон, полученный предел прочности на разрыв шпильки из ПЭЭК 90НMF40 производства Victrex, в 2 раза ниже от заявленного производителем материала [39]. В публикациях не удалось найти результатов испытаний изделий из этого материала с достижением заявленной прочности.

Получены образцы крепежа из отечественных аналогов 90НMF40, гранул ПЭЭК, армированных углеродным волокном (40%) производства ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (КБГУ) и АО Института пластмасс имени Г.С. Петрова. Полученные образцы крепежа прошли механические испытания, не было выявлено существенных изменений прочностных характеристик.

Наиболее существенное влияние на прочностные характеристики армированных пластиков оказывает [40] степень наполнения их волокном. Снижение наполнения гранул волокном, как и повреждение армирующего материала в процессе получения гранул и при переработке их в термопластавтоматах приводит к существенному снижению прочностных характеристик. Дополнительное снижение характеристик материала получаем за счет ускоренных процессов охлаждения изделий, что снижает кристалличность полимера [30].

Для определения степени наполнения полимера волокном, гранулы и крепеж были термообработаны при 600 °С до полной деструкции полимера. На рисунке 6 (а) представлен внешний вид гранулы РЕЕК 90НMF40 после деструкции. До термообработки вес гранул 21,8 г после термообработки 5,8 г. Пренебрегая весом коксового остатка ПЭЭК, получим, что гранулы наполнены углеродными волокнами менее 27%, что не соответствует паспорту (40% волокна). Аналогичные исследования проведены для гранул производства КБГУ, внешний вид после деструкции полимера представлен на рисунке 6 (б). Явно видно изменение цвета и внешнего вида. До термообработки вес гранул 7,82 г, после термообработки 2,24 г. Пренебрегая весом коксового остатка ПЭЭК, получим, что гранулы наполнены углеродными волокнами менее 30%, что также не соответствует паспорту (40% волокна). На рисунке 6 (в) представлен вид болта из армированного ПЭЭК производства КБГУ после деструкции полимера.

Анализ длины армирующих волокон и их направленности в гранулах и отождённых болтах на основе ПЭЭК 90НMF40 и ПЭЭК КБГУ не удалось провести.

Полученные результаты по фактическому наполнению гранул волокном объясняют причину снижения полученной разрывной прочности стержня шпильки и соответствуют результатам экспериментов, приведенных в работе [40], для такого наполнения углеродным волокном ПЭЭК.

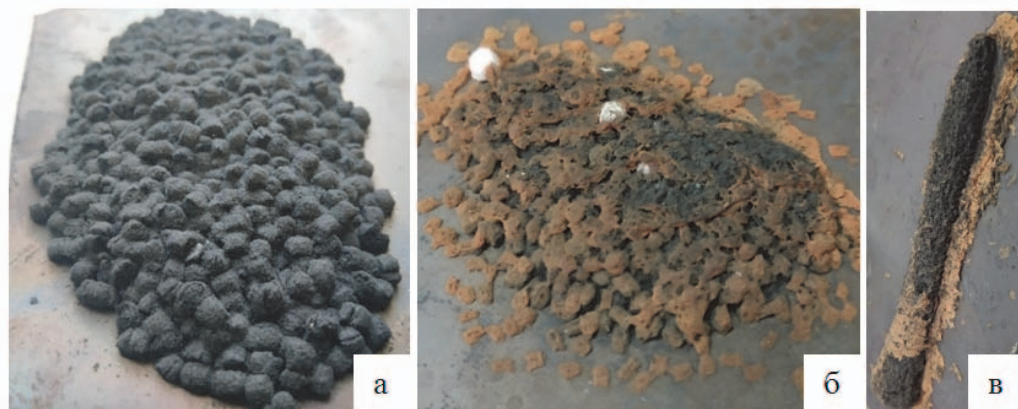


Рисунок 6 – Вид после термообработки

В качестве возможного практического применения разработанного крепежа были проведены исследования его применения при креплении фитинга, имитирующего навесное оборудование к трехслойным панелям. К фитингу прикладывалось растягивающее усилие, крепежные детали работают на срез. Вид разрушения крепежа М6 после достижения усилия 20 кН представлен на рисунке 7 (а). Вид разрушения крепежа М8 после достижения усилия 28 кН представлен на рисунке 7 (б).

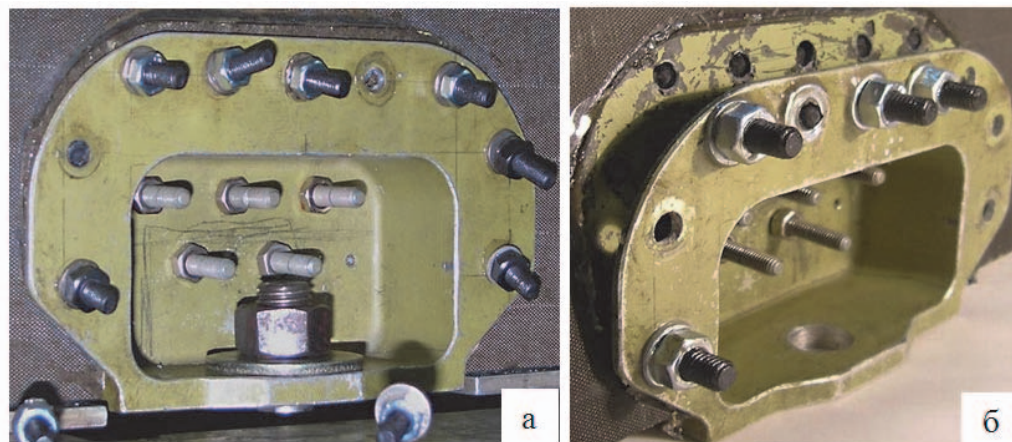


Рисунок 7 – Вид разрушения крепежа

Разработанный вид крепежа из армированных термопластов рационально применять и для крепления вспомогательного оборудования, например, соединения несущих ферменных конструкций поддерживающих кабельную разводку на космических аппаратах. По согласованию со специалистами АО «Российские космические системы» была определена номенклатура перспективных типоразмеров крепежа из армированных термопластов – шпильки М2,5х30; М3х60; М4х60; М5х60. Реализация технологии изготовления указанных типоразмеров

крепежа была осуществлена на горизонтальном термопластавтомате Babyplast, пресс-форма для шпилек и полученная отливка представлены на рисунке 8. Полученный крепеж был использован при изготовлении демонстратора несущей фермы для АО «Российские космические системы», ферма передана на испытания.



Рисунок 8 – Пресс-форма и полученная отливка

Плотность крепежа из армированного углеродом (40%) ПЭЭК – $1,3 \text{ г/см}^3$, средняя удельная прочность полученного крепежа на уровне $115 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$, что определяет перспективность применения его в конструкциях аэрокосмической техники. На разработанный крепеж разработаны Технические условия «Детали крепежные армированные» ТУ 1600-001-48805983-2019.

Выводы

Крепеж из армированных термопластов перспективен для применения в аэрокосмической технике, наиболее высокие эксплуатационные характеристики имеют изделия из полэфирэфиркетона, армированного углеродными волокнами.

Определены типоразмеры и разработана технология изготовления крепежа для соединения трехслойных панелей. Проведены исследования свойств полученного крепежа и выявлены причины снижения свойств крепежа от расчетных значений.

Определены типоразмеры и разработана технология изготовления крепежа для несущих ферменных конструкций поддерживающих кабельную разводку на космических аппаратах.

Полученный крепеж имеет среднюю удельную прочность на разрыв $115 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$, что определяет перспективность применения его в конструкциях аэрокосмической техники.

На крепеж получены Технические условия «Детали крепежные армиро-

ванные», что позволяет применять его в проектируемых конструкциях аэрокосмической техники и других изделиях.

Литература

1. Tian Qiao Liu, Xing Liu, Feng Peng A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects Compos Part B-Eng, (2020). p. 191.
2. Maier A., et al. Temperature-dependent interlaminar shear strength of unidirectional continuous fiber-reinforced thermoplastic profiles Compos Struct (2021). p. 255.
3. Zschehyge M., Böhm R., Hornig A., Gerritzen Gude J. Rate dependent non-linear mechanical behaviour of continuous fibre-reinforced thermoplastic composites – experimental characterisation and viscoelastic-plastic damage modelling Mater Des (2020). p. 193.
4. Wang Z., Zhang W., Luo Q., Zheng G., Li Q., Sun G. A novel failure criterion based upon forming limit curve for thermoplastic composites Compos Part B-Eng, (2020). p. 202.
5. Parvez Alam, Dimitrios Mamalis The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – a review Compos Part B-Eng, 166 (2019). pp. 555-579.
6. Shan-Shan Yao, Fan-Long Jin, Kyong Yop Rhee, et al. Recent advances in carbon-fibre-reinforced thermoplastic composites: a review Compos Part B-Eng, 142 (2018). pp. 241-250.
7. Heuer H., Schulze M., Pooch M., et al. Review on quality assurance along the CFRP value chain – non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques Compos Part B-Eng, 77 (2015). pp. 494-501.
8. Schuett, Martin & Karsten, J & Schott, L & Wittich, H & Schulte, K & Fiedler, B. (2018). Experimental and analytical study of an CF-PEEK Fastener all composites single-lap shear joint under static and fatigue loading // CEAS Aeronautical Journal. 10.1007/s13272-018-0334-z.
9. Братухин В.А., Братухин А.В. Конструкции и технологии крепежных систем авиационной техники // Наука и технологии в промышленности. № 4/2011. С. 34-40.
10. Elwathig A.M. Hassan, Dengteng Ge, Shu Zhu, et al. Enhancing CF/PEEK composites by CF decoration with polyimide and loosely-packed CNT arrays Compos Part A-Apl S, 127 (1-7) (2019). p. 105613.
11. Elwathig A.M. Hassan, Shu Zhu, et al. Synergistic effect of hydrogen bonding and π - π stacking in interface of CF/PEEK composites Compos Part B-Eng, 171 (2019). pp. 70-77.
12. Shu Zhu, Ying Qian, A.M. Elwathig, et al. Enhanced interfacial interactions by PEEK-grafting and coupling of acylated CNT for GF/PEEK composites Compos Commun, 18 (2020). pp. 43-48.
13. Xiping Gao, Zhigao Huang, Huamin Zhou, et al. Higher mechanical performances of CF/PEEK composite laminates via reducing interlayer porosity based on the affinity of functional s-PEEK Polym Compos, 40 (9) (2019). pp. 3749-3757.

14. Fracasso R., Rink M., Pavan A., et al. The effects of strain-rate and temperature on the interlaminar fracture toughness of interleaved PEEK/CF composites *Compos Sci Technol*, 61 (1) (2001). pp. 57-63.
15. Xiaoxue Diao, Lin Ye, Yiu-Wing Mai Fatigue behaviour of CF/PEEK composite laminates made from commingled prepreg. Part I: experimental studies. *Compos Part A-Appl S*, 28 (8) (1997). pp. 739-747.
16. Wang, Lin & Weng, Luqian & Song, Shenhua & Zhang, Zhongyi & Tian, Shengli & Ma, Rui. (2011). Characterization of polyetheretherketone–hydroxyapatite nanocomposite materials. *Materials Science and Engineering: A*. 528. 3689-3696. 10.1016/j.msea. 2011.01.064.
17. Srinivasa D. Thoppul, Joana Finegan, Ronald F. Gibson Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – a review [J] *Compos Sci Technol*, 69 (3) (2008). pp. 308-310.
18. Kamran Yousefpour, Wenhua Lin, Yeqing Wang, et al. Discharge and ground electrode design considerations for the lightning strike damage tolerance assessment of CFRP matrix composite laminates *Compos Part B-Eng*, (2020). p. 198.
19. Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, et al. Damage behavior of CFRP subjected to simulated lightning current under air, reduced-pressure air, and N₂ environments *Compos Struct*, 230 (2019).
20. Starikov R., & Schön J. (2002). Local fatigue behaviour of CFRP bolted joints. *Composites Science and Technology*, 62(2). pp. 243-253.
21. Starikov R. & Schön J. (2001). Quasi-static behaviour of composite joints with countersunk composite and metal fasteners. *Composites Part B: Engineering*, 32(5). pp. 401-411.
22. Starikov R. (2002). Fatigue resistance of composite joints with countersunk composite and metal fasteners. *International Journal of Fatigue*, 24(1). pp. 39-47.
23. Stocchi C., Robinson P. & Pinho S.T. (2013). A detailed finite element investigation of composite bolted joints with countersunk fasteners. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52. pp. 143-150.
24. Junshan Hu, Kaifu Zhang, Hui Cheng, Zhenchao Qi, An experimental investigation on interfacial behavior and preload response of composite bolted interference-fit joints under assembly and thermal conditions, *Aerospace Science and Technology*, Volume 103. 2020. p. 105917.
25. Rasheva Z., Zhang G., Burkhart T. A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fibers reinforced PEEK materials with different fiber orientations. *Tribol. Int.* 43 (2010) pp. 1430-1437.
26. Sarasua JR, Remiro PM, Pouyet J The mechanical behaviour of PEEK short fiber composites. *J. Mater. Sci.* 1995. 30: pp. 3501-3508.
27. Thomason J.L. (2008). The influence of fibre length, diameter and concentration on the modulus of glass fibre reinforced polyamide 6,6. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(11). pp. 1732-1738.
28. Chen C., Zhang C., Liu C., Miao Y., Wong S.-C. & Li Y. (2018). Rate-dependent tensile failure behavior of short fiber reinforced PEEK. *Composites Part B: Engineering*, 136. pp. 187-196.

29. Garcia-Gonzalez D., Rodriguez-Millan M., Rusinek A. & Arias A. (2015). Investigation of mechanical impact behavior of short carbon-fiber-reinforced PEEK composites. *Composite Structures*, 133, pp. 1116-1126.
30. Polymer Crystallinity – HPP Explained 20 November 2017 John Grasmeder [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.victrex.com/en/blog/2017/polymer-crystallinity-hpp-explained-part-3>.
31. Андреев В.Н. Полимерные композиционные материалы с термопластичной матрицей для аэрокосмической техники / В.Н. Андреев, А.В. Чесноков, И.А. Тимофеев, В.А. Старцев, В.А. Перевезенцев // VII Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Суздаль. 1-5 октября 2018 г. / Сборник материалов. М: ИМЕТ РАН, 2018. С. 160-161.
32. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.icotec-industry.ch/home/>.
33. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ptonline.com/articles/new-twist-in-thermoplastic-composites-makes-high-strength-net-shape-fasteners>.
34. Патент РФ 2145547 Способ изготовления деталей из армированных волокном термопластов (варианты) и деталь, изготовленная этим способом. Публикация патента: 20.02.2000.
35. Kaerger Jens & M. Vodermayr, Albert. (2000). The new fibre reinforced thermoplastic composite SUPreM™ product range, processing and applications. pp. 575-580.
36. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chemis.co.jp/eng/page/kikaitekiseishitu>.
37. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://solidspot.com/>.
38. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mitsuboshi.co.jp/wp/english.html>.
39. Информация о продукте PEEK 90HMF40.
40. Saleem A., Frommann L. & Iqbal A. (2007). High performance thermoplastic composites: Study on the mechanical, thermal, and electrical resistivity properties of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone and polyethersulphone. *Polymer Composites*, 28(6). 785-796.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 17.06.2021
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 12,6
Тираж 500 экз.
Заказ № 91-02
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail :keyneslab@gmail.com
Site:www.n-ko.ru