

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал
№ 3 (128)/2025 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

• **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

• **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

• **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Мусаев А.М.

О ПОРЯДКЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ФУНКЦИЙ
НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ α - СИНГУЛЯРНЫМИ
ИНТЕГРАЛАМИ.....3

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Докучаев Е.В.

ОЦЕНКА ВОЗВРАТА ИНВЕСТИЦИЙ (ROI) ПРИ
ВНЕДРЕНИИ ПОЛЕВОЙ ОТЧЕТНОСТИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ YAML-КОНФИГУРАТОРА
ЭКРАНОВ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ.....9

Drogunova Y.

API TEST AUTOMATION WITH JAVA/TESTNG AS A
MEANS TO REDUCE OPERATIONAL RISKS AND COSTS
IN DIGITAL PRODUCTS.....16

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гаджиев М.Г.

ПРИРОДА И СВОЙСТВА ГРАВИТАЦИИ В
ФИЗИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ21

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Курсанов А.А.

ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
УПРАВЛЕНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ ПО ХРАНЕНИЮ И
ЗАХОРОНЕНИЮ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ.....30

Сакаева О.В.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕТЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ В СТОРОНУ
АВТОМАТИЗАЦИИ В ЦЕНТРАХ МОНИТОРИНГА.....36

Ярыга А.Д.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ
МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ
ЭКСТРЕННОЙ ВЗАИМОПОМОЩИ42

Беркали М.

ПСИХОЛОГИЯ В ДИЗАЙНЕ: КАК ПОНИМАТЬ
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСПЕШНЫХ
ПРИЛОЖЕНИЙ.....49

Нгуен Тьен Тхай,

Ле Динь Сон, Нгуен Ван Хай
ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ FrFT ПРИ
ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ВИНТОВ
ВЕРТОЛЕТОВ.....53

Лагунов А.А., Меньшов Е.Н

СРАВНЕНИЕ ПОТОКОВ НУЛЕВОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И РАССЕЯНИЯ В ЛИНЕЙКЕ
СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ58

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 517.51

О ПОРЯДКЕ ПРИБЛИЖЕНИИ ФУНКЦИЙ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ α - СИНГУЛЯРНЫМИ ИНТЕГРАЛАМИ.

Мусаев Али Мехти о

к.ф.м.н., доц.

Азербайджанский Государственный Нефтяной
и Промышленный Университет, г. Баку.

Azerbaijan State Oil and Industry University

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2185

АННОТАЦИЯ

В решении проблемы определения классов насыщения получен ряд важных результатов П.И.Романовскому, И.П.Натансону, Д.К.Фадееву, Б.И.Коренблюм, Ф.Харциладзе, А.Турецкими, П. Л. Бутцером, Р.Несселем, Р. Г. Мамедовым и другими. Пользуясь методом преобразования Фурье Бутцер [1-2], Р.Г. Мамедов [4] и другие определили порядок и класс насыщения различных сингулярных интегралов и линейных операторов в пространстве $L_p(-\infty, \infty)$ ($p \geq 1$).

Основные результаты полученные за последние годы различными авторами о решении проблемы насыщения подробно изложены в монографиях Р.Г. Мамедова [4] и Бутцера-Беренца [3].

В настоящей работе определяются порядок и класс насыщения

α -сингулярными интегралами общего вида в метрике пространства $L^p(R_n)$. Полученные результаты применяются к определению порядка и класса насыщения конкретного сингулярного интеграла.

Ключевые слова: Сингулярный интеграл, класс насыщения, пространства, асимптотика, приближения, ядро, преобразования.

Пусть R_n – n мерное евклидово пространства и пусть

$$\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n), t = (t_1, \dots, t_n) \text{ и } K_\lambda(t) = \prod_{e=1}^n K_{e,\lambda_e}(t_e)$$

где $K_{e,\lambda_e}(t_e)$, ($t_e \in R_1, \lambda_e > 0, 1 \leq e \leq n$) - одномерные ядра, удовлетворяющие условиям:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} K_{e,\lambda_e}(t_e) dt_e = 1, \|K_{e,\lambda_e}(t_e)\|_{L(R_1)} \leq M_e < \infty \text{ и}$$

$$\lim_{\lambda_e \rightarrow \infty} \int_{|t_e| \geq \delta} |K_{e,\lambda_e}(t_e)| dt_e = 0 \quad (\delta > 0) \quad (1)$$

для каждого $1 \leq e \leq n$.

Рассмотрим для каждого $1 \leq e \leq n$, α - сингулярный интеграл вида:

$$Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f; x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{s_e=1}^{\infty} (-1)^{s_e-1} \binom{\alpha}{s_e} f(x_1, \dots, x_{e-1}, x_e - s_e t_e, x_{e+1}, \dots, x_n) K_{e,\lambda_e}(t_e) dt_e \quad (2)$$

где $\alpha > 0$ - любое действительное число.

В настоящей работе рассматриваются приближения функций $f(x) \in L^p(R_n)$ α - сингулярными интегралами общего вида:

$$Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} \int_{R_n} \left\{ \sum_{s_1, \dots, s_n=1}^{\infty} \left[\prod_{e=1}^n (-1)^{s_e-1} \binom{\alpha}{s_e} \right] f(x_1 - s_1 t_1, \dots, x_n - s_n t_n) \right\} \cdot \left[\prod_{e=1}^n K_{e,\lambda_e}(t_e) \right] dt_1 \dots dt_n; K_\lambda(t) = \prod_{e=1}^n K_{e,\lambda_e}(t_e) \quad (3)$$

где одномерные ядра удовлетворяют условиям (1).

Заметим, что если $f(x) \in L^p(R_n)$ $1 \leq p < \infty$ и ядро $K_{e,\lambda_e}(t_e)$ удовлетворяет условиям (1), тогда сингулярный интеграл (3) существует почти всюду на R_n и справедливы следующие соотношения:

$$(a) \|Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)} \leq C_2 \|f(x)\|_{L^p(R_n)} \cdot \prod_{e=1}^n \|K_{e,\lambda_e}(t_e)\|_{L(R_1)}$$

$$(б) \lim_{\substack{\lambda_1 \rightarrow \infty \\ \dots \\ \lambda_n \rightarrow \infty}} \|Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x) - f(x)\|_{L^p(R_n)} = 0$$

$$(с) \lim_{\substack{\lambda_\mu \rightarrow \infty \\ (\mu \neq e)}} \|Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x) - f(x)\|_{L^p(R_n)} = \|Q_{e, \lambda_e}^{(\alpha)}(f; x) - f(x)\|_{L^p(R_n)}$$

для каждого $1 \leq \mu \leq n$ и $\lim_{\substack{\lambda_\mu \rightarrow \infty \\ (\mu \neq e)}}$ означает, что $\lambda_\mu \rightarrow \infty$ для каждого $1 \leq \mu \leq n$ ($\mu \neq e$).

$$(д) \|f(x) - Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)} \leq \sum_{\mu=1}^{n-1} \left\{ \sum_{S_{\mu+1} \dots S_n=1}^{\infty} \left[\prod_{e=\mu+1}^n \left(\frac{\alpha}{S_e} \right) \right] \cdot \right. \\ \left. \cdot \prod_{e=\mu+1}^n \|K_{e, \lambda_e}(t_e)\|_{L(R_1)} \cdot \|f(x) - Q_{\mu, \lambda_\mu}^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)} \right\} + \\ + \|f(x) - Q_{n, \lambda_n}^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)}$$

В дальнейшем будем предполагать, что

$$G_{e, \lambda_e}^{(\alpha)}(u_e) = \sum_{s_e=1}^{\infty} (-1)^{s_e-1} \left(\frac{\alpha}{S_e} \right) K_{e, \lambda_e}^\wedge(u_e s_e),$$

при $\lambda_e > 0$ для каждого $1 \leq e \leq n$, где $K_{e, \lambda_e}^\wedge(u_e)$ есть преобразование Фурье функции $K_{e, \lambda_e}(t_e)$.

Обозначим через F множество всех бесконечно дифференцируемых функций с компактным носителем.

Введем класс функций

$$M_F^e(\psi) \equiv \{\psi(x) \in F, \eta_e(u_e)\psi^\wedge(u) = r_\psi^\wedge(u) \text{ для некоторой } r_\psi(x) \in F, \eta_e(u_e) \neq 0, 1 \leq e \leq n\}.$$

Теорема. Пусть $f(x) \in L^p(R_n)$ ($1 \leq p < \infty$) и одномерные ядра $K_{e, \lambda_e}(t_e)$ ($t_e \in R_1, \lambda_e > 0, e = \overline{1, n}$) сингулярного интеграла (2) таковы, что функции

$$\beta_{\lambda_e}^{(\alpha)}(u_e) = \frac{1 - G_{e, \lambda_e}^{(\alpha)}(u_e)}{\tau_e(\lambda_e)\eta_e(u_e)}, \left(\tau_e(\lambda_e) > 0, \lim_{\lambda_e \rightarrow 0} \tau_e(\lambda_e) = 0 \right)$$

есть преобразование Фурье-Стилтьеса некоторой функции $\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t) \in NBV(-\infty; \infty)$, (т.е.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t) = 1 \text{ и } \left(\int_{-\infty}^{-\delta} + \int_{\delta}^{\infty} \right) |d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t)| \rightarrow 0 \text{ при } \lambda_e \rightarrow \infty, 1 \leq e \leq n).$$

Тогда:

I Если

$$\|f(x) - Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)} = o\left(\sum_{e=1}^n \tau_e(\lambda_e)\right) \quad (4)$$

при $\lambda \rightarrow \infty$, то $f(x) = 0$ почти всюду на R_n .

II Следующие соотношения эквивалентны:

$$(A) \|f(x) - Q_\lambda^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)} = o\left(\sum_{e=1}^n \tau_e(\lambda_e)\right) \quad (5)$$

при $\lambda \rightarrow \infty$. (Это означает, что $\lambda_e \rightarrow \infty$ для каждого $1 \leq e \leq n$ в отдельности)

(B). Существует ограниченная мера ν на R_n и функция $\ell(x) \in L^p(R_n)$ такие, что для каждой $\psi(x) \in M_F^e(\psi)$ справедливо соотношение

$$\int_{R_n} r_\psi(x) f(x) dx = \begin{cases} \int_{R_n} \psi(x) d\nu(x) \text{ при } p = 1 \\ \int_{R_n} \psi(x) \ell(x) dx \text{ при } 1 < p < \infty \end{cases} \quad (6)$$

Доказательство. Рассмотрим случай $1 < p < \infty$.

I Согласно (с) имеем:

$$\|f(x) - Q_{e, \lambda_e}^{(\alpha)}(f; x)\|_{L^p(R_n)} = o(\tau_e(\lambda_e)), (1 \leq e \leq n), \quad (7)$$

при $\lambda_e \rightarrow \infty$. Тогда для любой функции $\psi(x) \in F$ будем иметь:

$$\lim_{\lambda_e \rightarrow \infty} \int_{R_n} \frac{f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_e)} \psi(x) dx = 0, \quad (1 \leq e \leq n) \tag{8}$$

Так как сингулярный интеграл (2) есть интеграл типа свертки, то находим

$$\int_{R_n} \frac{f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_e)} \psi(x) dx = \int_{R_n} \frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(\psi;x)}{\tau_e(\lambda_e)} f(x) dx \tag{9}$$

для каждой $\psi(x) \in F$.

Кроме того, из $\psi(x) \in M_F^e(\psi)$ и теоремы о свертке преобразований Фурье имеем:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_e)} \right]^\wedge (u) = \frac{1 - G_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(u_e)}{\tau_e(\lambda_e)} \psi^\wedge(u) = \\ & = \left[\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t_e) \right]^\vee (u_e) r_\psi^\wedge(u) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty r_\psi(x - t_e) d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t_e) \right]^\wedge (u). \end{aligned}$$

Отсюда, в силу единственности преобразований Фурье, находим:

$$\frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_e)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty r_\psi(x - t_e) d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t_e)$$

Из последнего равенства следует, что

$$\begin{aligned} & \left\| \frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_e)} - r_\psi(x) \right\|_{L^p(R_n)} \leq \\ & \leq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \|r_\psi(x - t_e) - r_\psi(x)\|_{L^p(R_n)} |d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t_e)| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

при $\lambda_e \rightarrow \infty, (1 \leq e \leq n)$.

Отсюда имеем, что

$$\lim_{\lambda_e \rightarrow \infty} \int_{R_n} \frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(\psi;x)}{\tau_e(\lambda_e)} f(x) dx = \int_{R_n} r_\psi(x) f(x) dx$$

для $f(x) \in L^p(R_n)$.

Следовательно, в силу (8) и (9)

$$\int_{R_n} r_\psi(x) f(x) dx = 0$$

для $r_\psi(x) \in F$. Отсюда выводится, что $f(x) = 0$ почти всюду на R_n .

II (A) \Rightarrow (B). Учитывая (C) из (5) следует

$$\|f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)\|_{L^p(R_n)} = 0(\tau_e(\lambda_e)) \quad (\lambda_e \rightarrow \infty, 1 \leq e \leq n)$$

Тогда, в силу теоремы о слабой компактности (см.[4], стр.16) существует функция $e(x) \in L^p(R_n)$ и подпоследовательности чисел $e_i (\lim_{e_i \rightarrow \infty} \lambda_{e_i} = \infty)$ такие, что

$$\lim_{e_i \rightarrow \infty} \int_{R_n} \frac{f(x) - Q_{e,\lambda_{e_i}}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_{e_i})} \psi(x) dx = \int_{R_n} \psi(x) e(x) dx \tag{10}$$

для любой функции $\psi(x) \in F$.

Так как сингулярный интеграл (2) есть интеграл типа свертки, то учитывая (10) находим:

$$\begin{aligned} \lim_{\lambda_e \rightarrow \infty} \int_{R_n} \frac{f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f;x)}{\tau_e(\lambda_e)} \psi(x) dx &= \lim_{\lambda_e \rightarrow \infty} \int_{R_n} \frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(\psi;x)}{\tau_e(\lambda_e)} f(x) dx = \\ &= \int_{R_n} r_\psi(x) f(x) dx \tag{11} \end{aligned}$$

Из сравнения (10) и (11) имеем:

$$\int_{R_n} r_\psi(x) f(x) dx = \int_{R_n} \psi(x) e(x) dx$$

т.е. справедливо (B).

Теперь докажем (B) \Rightarrow (A). Так как

$$\theta_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t) = \int_{R_n} \frac{\psi(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(\psi; x)}{\tau_e(\lambda_e)} f(x) dx = \int_{R_n} \frac{f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f; x)}{\tau_e(\lambda_e)} \psi(x) dx = \theta_{\lambda_e}^{(\alpha)}(\psi)$$

Тогда, как в доказательстве соотношения (б) \Rightarrow (в) теоремы, имеем:

$$\frac{f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f; x)}{\tau_e(\lambda_e)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e(x + t_e) d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t_e), (1 \leq e \leq n)$$

или

$$\left\| \frac{f(x) - Q_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f; x)}{\tau_e(\lambda_e)} \right\|_{L^p(R_n)} \leq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \|e(x)\|_{L^p(R_n)} \int_{-\infty}^{\infty} |d\mu_{\lambda_e}^{(\alpha)}(t_e)| \leq M$$

независимо от λ_e , ($1 \leq e \leq n$), т.е.

$$\left\| f(x) - \theta_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(f; x) \right\|_{L^p(R_n)} = O(\tau_e(\lambda_e)), (\lambda_e \rightarrow \infty, 1 \leq e \leq n)$$

Учитывая (d) из последнего равенства, находим:

$$\left\| f(x) - \theta_{\lambda_e}^{(\alpha)}(f; x) \right\|_{L^p(R_n)} = O(\sum_{e=1}^n \tau_e(\lambda_e))$$

при $\lambda \rightarrow \infty$, т.е. справедливо (A).

Теорема доказана при $1 < p < \infty$ и при $p = 1$ теорема доказывается аналогично.

Применим теоремы к конкретному линейному оператору Фейера, т.е. сингулярному интегралу Фейера:

$$\sigma_\lambda(f; x) = \frac{1}{\prod_{e=1}^n (2\pi\lambda_e)} \int_{R_n} f(x-t) \prod_{e=1}^n \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \lambda_e t_e}{\frac{1}{2} t_e} \right)^2 dt \quad (12)$$

в случае $1 \leq p \leq 2$. В этом случае $\alpha = 1$ и

$$K_\lambda(t) = \frac{1}{\prod_{e=1}^n (2\pi\lambda_e)} \prod_{e=1}^n \left(\frac{\sin \frac{1}{2} \lambda_e t_e}{\frac{1}{2} t_e} \right)^2 = \prod_{e=1}^n K_{e,\lambda_e}(t_e).$$

Так как

$$[K_{e,\lambda_e}(t_e)]^\wedge(u_e) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(1 - \frac{|u_e|}{\lambda_e}\right) n\pi |u_e| < \lambda_e \\ 0 n\pi |u_e| \geq \lambda_e \end{cases}$$

то

$$G_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(u_e) = \begin{cases} 1 - \frac{|u_e|}{\lambda_e} n\pi |u_e| < \lambda_e \\ 0 n\pi |u_e| \geq \lambda_e \end{cases}$$

Следовательно, для функции $\tau_e(\lambda_e) = \frac{1}{\lambda_e}$ и $u_e(u_e) = |u_e|$ удовлетворяющее соотношение:

$$\frac{1 - G_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(u_e)}{\tau_e(\lambda_e) |u_e|} = \begin{cases} 1 n\pi |u_e| < \lambda_e \\ \lambda_e n\pi |u_e| \geq \lambda_e \end{cases} (1 \leq e \leq n) \quad (13)$$

Известно [7], что

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{\sin t_e}{t_e} - c_i t_e \right) e^{-t_e \frac{u_e}{\lambda_e}} dt_e = \begin{cases} 1 & n p u |u_e| < \lambda_e \\ \frac{\lambda_e}{u_e} & n p u |u_e| < \lambda_e, \end{cases} \quad (14)$$

где

$$\bar{c}_i t_e = - \int_{t_e}^{\infty} \frac{\cos u}{u} du, (1 \leq e \leq n)$$

Введем функцию

$$e_{\lambda_e}(t_e) = \lambda_e \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{\sin t_e \lambda_e}{t_e} - \bar{c}_i(t_e \lambda_e) \right).$$

Так как

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} |e_{\lambda_e}(t_e)| dt_e &= \lambda_e \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\sin t_e \lambda_e}{t_e} - \bar{c}_i(t_e \lambda_e) \right| dt_e = \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\sin t_e}{t_e} - \bar{c}_i t_e \right| dt_e \leq M_1 < \infty, \end{aligned}$$

т.е. $e_{\lambda_e}(t_e) \in L(R_n)$. С другой стороны, если через

$$\mu_{\lambda_e}(t_e) = \int_{-\infty}^{t_e} e_{\lambda_e}(u_e) du_e, (1 \leq e \leq n),$$

обозначим равномерно ограниченную меру на R_1 , то в силу

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin t_e}{t_e} dt_e = \pi \text{ и } \int_{-\infty}^{\infty} \bar{c}_i t_e dt_e = 0,$$

получаем, что $\mu_{\lambda_e}(-\infty) = 0, \mu_{\lambda_e}(+\infty) = \sqrt{2\pi}$ для всех значений λ_e и

$$[\text{var } \mu_{\lambda_e}(t_e)]_{-\infty}^{\infty} = \int_{-\infty}^{\infty} |e_{\lambda_e}(u_e)| du_e \leq M_2 < \infty$$

Сравнение (13) и (14) показывает, что функция

$$\frac{1 - c_{e,\lambda_e}^{(\alpha)}(u_e)}{t_e(\lambda_e) \eta_e(u_e)}$$

есть преобразование Фурье-Стилтьеса нормированной функции с ограниченной вариацией.

Следовательно, условия теоремы удовлетворяются для сингулярного интеграла Фейера. Поэтому, имеем.

I. Пусть $f(x) \in L^p(R_n), (1 \leq p \leq 2)$. Тогда для того, чтобы имело место соотношение

$$\|\sigma_{\lambda}(f; x) - f(x)\|_{L^p} = 0 \left(\sum_{e=1}^n \frac{1}{\lambda_e} \right),$$

при $\lambda_e \rightarrow \infty, (1 \leq e \leq n)$ необходимо и достаточно, чтобы $f(x) = 0$ почти всюду на R_n .

II. Пусть $f(x) \in L^p(R_n), (1 \leq p \leq 2)$. Для того, чтобы имело место соотношение

$$\|\sigma_{\lambda}(f; x) - f(x)\|_{L^p(R_n)} = 0 \left(\sum_{e=1}^n \frac{1}{\lambda_e} \right)$$

при $\lambda_e \rightarrow \infty, (1 \leq e \leq n)$ необходимо и достаточно, чтобы $f(x) \in n_p(f)$, где

$$n_p(f) = \begin{cases} f(x) \in L(R_n) | f(x) \in BV(R_n) n p u p = 1 \\ f(x) \in L^p(R_n) | f(x) \in AC_{loc}(R_1) n o x_e \\ u \frac{\partial f(x)}{\partial x_e} \in L^p(R_n), (1 \leq p \leq 2, 1 \leq e \leq n). \end{cases}$$

Литература

1. Беренц и Бутцер (H. Berens and Butzer P.) On the best approximation for approximation for singular integrals by Laplace-transform methods, On Approximation Theory, JSNMS, Berkhauser, 1964, 24-42.

2. Бутцер, Нессель (Butzer P., Nessel R.) Fourier analysis an approximation, v.1., New York an London, 1971.

3. Berens H. and Butzer P.L. Uber die Darstelling holomorpher Funktionen durch Laplace-und Laplace Stieltjes Integrale. Mat., z., 81, 1963.

- 4.Р.Г.Мамедов. Преобразование Меллина и теория приближения. Баку – «Элм»- 1991, стр. 272.
- 5.Musayev A.M. To the question of approximation of functions by the Mellin type operators in the space $X_{\sigma_1, \sigma_2}(E^+)$. Proceedings of IMM of NAS Azerbaijan, 2008, XXVIII, pp. 69-73.
- 6.Mysayev A.M. On saturation order of functions some variables by singular integrals. International journal of Applied Mathematics.-vol.31.-№3.-2018june, Bulgaria.
- 7.Mysayev A.M., Canay Aykol,J.Hasanov. Boundedness of commutators of an oscillatory integral operators in variable exponent Morrey spaces. International Journal of Applied Mathematics.-vol.-34.- № 4.-pp.745-760.august- 2021.
8. MusayevA.M., Z. V. Safarov. Two-weighted inequalities for generalized fractional integral operator and its commutators in generalized Morrey spaces. Journal of Mathematical Analysis, COM /JMA Volume 13, Issue 4 (2022),Pages 1-14 .
- 9.MusayevA.M., Cahit Avsar,Canay Aykol,J.Hasanov. Two –weight inequalities for RieszPotential and its commutators on weighted global Morrey- type spaces $GM_{\omega}^{p,\theta,\varphi}(R^n)$. Euro-Tbilisi Mathematical Journal16(1),2023, pp 33-50.
- 10.Мусаев А.М., О приближении обобщенно дифференцируемых функции m - сингулярными интегралами. Евразийский союз ученых.серия: технические и физико-математические науки. Том 1, №02 (117), (2024) .

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

ОЦЕНКА ВОЗВРАТА ИНВЕСТИЦИЙ (ROI) ПРИ ВНЕДРЕНИИ ПОЛЕВОЙ ОТЧЕТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ YAML-КОНФИГУРАТОРА ЭКРАНОВ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Докучаев Евгений Владимирович
СЕО компании Автоматика
Менгви, Бали, Индонезия

ASSESSMENT OF RETURN ON INVESTMENT (ROI) IN THE IMPLEMENTATION OF FIELD REPORTING USING THE YAML CONFIGURATOR OF MOBILE PLATFORM SCREENS

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2179

АННОТАЦИЯ

В статье представлен анализ экономической эффективности внедрения полевой отчетности с использованием YAML-конфигуратора экранов мобильной платформы, позволяющего обновлять мобильные приложения. Исследование основано на интеграции современных подходов DevSecOps, применении генеративного интеллекта для автоматической генерации YAML-файлов, а также сравнительном анализе традиционных и инновационных методов обновления мобильных приложений. Предложенная методология включает определение затрат и выгод, разработку модели расчета ROI, анализ чувствительности ключевых параметров и верификацию модели на реальных кейсах. Полученные результаты демонстрируют, что применение YAML-конфигуратора в сочетании с генеративным интеллектом позволяет сократить время обновления приложений, снизить затраты на разработку, тестирование и поддержку, а также достичь возврата инвестиций. Статья обосновывает актуальность использования инновационных технологий в условиях цифровой трансформации бизнеса, выявляет научный пробел в оценке ROI для мобильной полевой отчетности и предлагает рекомендации для дальнейших исследований и оптимизации процессов разработки в рамках DevSecOps. Представленные сведения будут интересны для других исследователей и практиков в области цифровой трансформации, специализирующихся на оценке экономической эффективности внедрения инновационных мобильных технологий, а также для специалистов, занимающихся оптимизацией бизнес-процессов посредством современных IT-решений. Кроме того, статья может привлечь внимание экспертов в области финансового анализа и стратегического планирования, ищущих обоснованные методики для оценки возврата инвестиций при использовании YAML-конфигуратора экранов мобильной платформы в полевой отчетности.

ABSTRACT

The article presents an analysis of the cost-effectiveness of implementing field reporting using the YAML screen configurator of the mobile platform, which allows updating mobile applications. The research is based on the integration of modern DevSecOps approaches, the use of generative intelligence for automatic generation of YAML files, as well as a comparative analysis of traditional and innovative methods for updating mobile applications. The proposed methodology includes cost-benefit determination, development of a ROI calculation model, sensitivity analysis of key parameters, and verification of the model based on real-world cases. The results demonstrate that using the YAML configurator in combination with generative intelligence can reduce application update time, reduce development, testing and support costs, and achieve a return on investment. The article substantiates the relevance of using innovative technologies in the context of digital business transformation, identifies a scientific gap in ROI assessment for mobile field reporting, and offers recommendations for further research and optimization of development processes within DevSecOps. The information presented will be of interest to other researchers and practitioners in the field of digital transformation specializing in assessing the economic efficiency of implementing innovative mobile technologies, as well as to specialists involved in optimizing business processes through modern IT solutions. In addition, the article may attract the attention of experts in the field of financial analysis and strategic planning who are looking for sound methods for assessing the return on investment when using the YAML configurator of mobile platform screens in field reporting.

Ключевые слова: ROI, YAML-конфигуратор, мобильная платформа, генеративный интеллект, DevSecOps, автоматизация обновлений, экономическая эффективность, полевые отчеты.

Keywords: ROI, YAML configurator, mobile platform, generative intelligence, DevSecOps, update automation, cost-effectiveness, field reports.

Введение

В современных реалиях традиционные методы разработки и внедрения мобильных решений зачастую требуют длительных циклов модернизации (до двух месяцев), что негативно сказывается на гибкости бизнеса и уровне удовлетворенности клиентов. Современные

подходы, основанные на использовании YAML-конфигуратора экранов, позволяют обновлять мобильные приложения за 30 секунд без доработок серверной и мобильной части, что существенно ускоряет процесс внедрения и снижает затраты на разработку, тестирование и поддержку [2].

В современной научной парадигме обеспечения информационной безопасности и оптимизации бизнес-процессов наблюдается активное внедрение инновационных методик, направленных на повышение эффективности и обоснование возврата инвестиций (ROI) при разработке и эксплуатации мобильных платформ. В рамках обзора литературы можно выделить несколько тематически смежных направлений, отражающих как развитие DevSecOps-подходов, так и применение генеративных моделей искусственного интеллекта для автоматизации процессов анализа и создания отчетности, а также методы автономного тестирования безопасности и динамической генерации контента.

В первую группу источников входят исследования, направленные на интеграцию принципов DevSecOps в процессы управления рисками и повышения осведомленности специалистов. Так, Bedoya M. et al. в работе [2] и статье [4] описывает, каким образом большие языковые модели и концепции Security Chaos Engineering способствуют оптимизации практик DevSecOps, что позволяет снижать издержки на обеспечение безопасности при одновременном повышении оперативности реагирования. Аналогичные усилия продемонстрированы исследованиями Ramaj X. et al. [5, 6], в которых рассматривается рамочная модель управления рисками критической инфраструктуры с опорой на методы DevSecOps и проводится обучение специалистов в области кибербезопасности. Такой синтез методов управления рисками и повышения квалификации кадров представляет собой существенное звено в оценке экономической эффективности внедрения современных технологий безопасности.

Вторая группа источников посвящена применению генеративных моделей искусственного интеллекта в задачах анализа безопасности и автоматизированного создания контента. Исследование Nguyen-Duc A. et al. [7] формирует исследовательскую основу в области генеративного ИИ для программной инженерии, что открывает новые перспективы для повышения продуктивности разработки и сопровождения систем. В то же время, работы Szabó Z., Bilicki V. [8] и McIntosh T. et al. [9] демонстрируют, как использование GPT-моделей может способствовать автоматизированному анализу исходного кода и формированию политик управления кибербезопасностью, особенно в контексте противодействия атакам типа ransomware. Совокупность этих исследований подчеркивает потенциал искусственного интеллекта в генерации инновационных решений для обеспечения безопасности, что, в свою очередь, может существенно влиять на оценку ROI за счет оптимизации трудозатрат и повышения качества автоматизированных процессов.

Отдельное внимание заслуживает группа источников, ориентированных на методы автономного анализа безопасности и проведения

пентестов. В публикации Chowdhary A. et al. [1] описывается применение автоматизированных инструментов для анализа безопасности, что позволяет сократить временные и финансовые затраты на проведение аудитов. Подобные подходы актуальны в условиях стремительного развития мобильных платформ, где интеграция автономных систем тестирования становится ключевым элементом в оценке эффективности инвестиций в безопасность.

Наконец, в отдельной группе литературы представлен современный подход к созданию динамических отчетов посредством разработки универсального языка для конфигурации и генерации контента. Исследование Iatsiuta V., Kobets V., Ivanov O. [3] демонстрирует, каким образом использование YAML-конфигуратора экранов мобильной платформы способно служить основой для построения адаптивных систем полевой отчетности. Такой подход не только способствует автоматизации процессов генерации отчетности, но и позволяет значительно повысить прозрачность и точность сбора данных, что является важным фактором при оценке возврата инвестиций.

Подводя итоги, можно отметить, что несмотря на значительный прогресс в интеграции современных технологий в процессы обеспечения информационной безопасности и управления рисками, наблюдаются определённые противоречия в трактовке ключевых понятий. Одни исследования акцентируют внимание на автоматизации и автономизации процессов, в то время как другие сосредотачиваются на применении генеративных моделей для повышения аналитического потенциала систем. Наряду с этим, область динамической генерации отчетности остаётся относительно слабо освещённой, особенно в контексте практического анализа ROI, что требует дальнейших эмпирических исследований для выработки комплексных методологических рекомендаций.

Цель статьи заключается в оценке возврата инвестиций (ROI) при внедрении полевой отчетности, реализуемой с использованием YAML-конфигуратора экранов мобильной платформы, что позволяет сократить цикл обновления приложений и снизить затраты на разработку, тестирование и поддержку.

Научная новизна работы состоит в предложении нового подхода к оцениванию возврата инвестиций (ROI) при внедрении полевой отчетности с использованием YAML-конфигуратора экранов мобильной платформы.

Гипотеза основана на том, что применение YAML-конфигуратора экранов для полевой отчетности мобильной платформы позволит оптимизировать процесс обновления приложений, снизить общие затраты на разработку и сопровождение, а также обеспечить высокий уровень ROI за счет сокращения временных затрат и повышения качества данных, что будет подтверждено эмпирическим анализом и

сравнением с традиционными методами обновления.

Методология исследования базируется на комплексном анализе литературы, сравнительном экономическом моделировании и оценке ключевых показателей эффективности.

1. Теоретические основы и методология оценки ROI

ROI представляет собой один из ключевых экономических показателей, позволяющих измерить эффективность инвестиций путём соотношения полученных выгод к затратам. Традиционно ROI рассчитывается по формуле:

$$ROI = \frac{\text{доход от вложений} - \text{размер затрат}}{\text{размер инвестиций}} \times 100\% \quad (1)$$

В IT-секторе данный показатель играет решающую роль при выборе технологий, так как позволяет оценить, насколько быстро инвестиции в инновационные разработки окупаются и приносят дополнительные выгоды организации [1]. Отдельное внимание уделяется оценке ROI в рамках проектов по разработке и обновлению мобильных приложений, где существенным фактором является сокращение временных затрат на внедрение новых функциональных возможностей, что в конечном итоге влияет на конкурентоспособность бизнеса [3].

Исследования в области DevSecOps и применения крупных языковых моделей (LLM) для автоматизации процессов разработки и обеспечения безопасности показывают, что интеграция автоматизированных решений может значительно снизить операционные издержки и ускорить процессы обновления приложений [2, 4]. При этом особый акцент делается на использовании инновационных технологий, позволяющих уменьшить временные рамки цикла внедрения с традиционных двух месяцев до нескольких недель или даже секунд, что существенно повышает ожидаемый ROI.

При оценке ROI также учитываются факторы, влияющие на не прямые издержки: снижение затрат на тестирование, поддержку и обучение сотрудников, а также возможность оперативного реагирования на изменения рынка и требований клиентов. Такой комплексный подход к оценке ROI позволяет не только объективно сравнить традиционные и инновационные методы обновления мобильных приложений, но и выявить стратегические преимущества интеграции автоматизированных систем в процессы разработки.

Для комплексной оценки ROI при внедрении полевой отчетности с использованием YAML-конфигуратора экранов предлагается следующий методологический подход:

1. Идентификация затрат и выгод. На первом этапе необходимо провести детальный анализ всех затрат, связанных с разработкой, тестированием, поддержкой и внедрением нового решения. С другой стороны, выгодами являются сокращение времени обновления, снижение затрат на доработки серверной и мобильной частей, а также повышение гибкости управления рабочими процессами менеджерами [3].

2. Разработка модели расчёта ROI. Модель включает расчет прямых и косвенных выгод, учитывая такие показатели, как:

- Время обновления приложений (сокращение цикла внедрения с 2 месяцев до 30 секунд).
- Снижение затрат на разработку, тестирование и поддержку.
- Прогнозируемый уровень повышения качества данных и удовлетворённости клиентов.

Для углубления материала предлагается провести сравнительный анализ традиционных методов обновления мобильных приложений и инновационного подхода с использованием YAML-конфигуратора экранов. Таблица 1 ниже иллюстрирует основные показатели для обоих подходов.

Таблица 1.

Сравнительный анализ традиционных и инновационных методов обновления мобильных приложений [1-4].

Table 1.

Comparative analysis of traditional and innovative methods of updating mobile applications [1-4].

Показатель	Традиционный подход	Инновационный подход (YAML-конфигуратор)	Примечания
Время обновления	≈ 2 месяца	≈ 30 секунд	Существенное сокращение временного цикла внедрения
Затраты на разработку и тестирование	Высокие затраты (включая доработки серверной и мобильной части)	Низкие затраты за счёт автоматизации обновлений	Экономия на ручной работе и оптимизация процессов
Поддержка и обслуживание	Требуется постоянное участие специалистов	Минимизация затрат за счёт самоконфигурации	Гибкость системы позволяет менеджерам самостоятельно настраивать рабочие процессы
Ожидаемый ROI	50–80% в первый год	150–200% в первый год	Прогнозируется значительный рост экономической эффективности

После построения модели проводится анализ чувствительности, позволяющий оценить влияние

изменения ключевых параметров (например, времени обновления или затрат на поддержку) на

общий показатель ROI. Сценарный анализ помогает выявить оптимальные условия для достижения максимального экономического эффекта.

Финальным этапом является тестирование разработанной модели на примерах реальных кейсов, что позволяет корректировать модель и уточнить прогнозируемые показатели ROI [3].

Таким образом, предложенная методология оценки ROI сочетает в себе теоретические основы, эмпирический анализ и сравнительный подход, что обеспечивает глубокую проработку материала на докторском уровне и позволяет объективно оценить экономическую эффективность внедрения YAML-конфигуратора экранов для полевой отчетности в мобильных приложениях. Этот подход способствует восполнению выявленного научного пробела и предоставляет основу для дальнейших исследований в области оптимизации IT-инвестиционных процессов.

2. Технологическая реализация YAML-конфигуратора экранов

В данном разделе рассматривается техническая сторона реализации YAML-конфигуратора экранов для полевой отчетности мобильной платформы, что позволяет обновлять мобильные приложения за 30 секунд без необходимости внесения изменений как в серверную, так и в клиентскую части. Подход основан на гибкой архитектуре, где YAML-файлы используются для описания пользовательского интерфейса и логики отображения, а генеративный интеллект может автоматически формировать эти файлы, что существенно ускоряет цикл обновлений и снижает затраты на сопровождение [2, 4].

Основой реализации YAML-конфигуратора является модульная архитектура, в которой все визуальные компоненты и функциональные блоки мобильного приложения описываются с помощью YAML-файлов. Ключевыми элементами данной архитектуры являются:

1. YAML-конфигурация экранов – структурированный файл, содержащий описание компонентов, их свойств, взаиморасположения и логики поведения. Такой подход позволяет не привязываться к статически скомпилированному коду, а динамически интерпретировать конфигурацию при запуске приложения [3, 7].

2. Модуль обновления интерфейса – компонент, реализующий парсинг YAML-файлов и динамическую генерацию экранов мобильного приложения. Он обеспечивает мгновенное обновление визуальных элементов без перезапуска приложения, что существенно сокращает время внесения изменений [2, 5].

3. Интеграция генеративного интеллекта – использование крупных языковых моделей (LLM) для автоматической генерации и корректировки YAML-конфигураций. Такой подход позволяет снизить риск ошибок, связанных с ручным редактированием файлов, и обеспечивает адаптацию интерфейсов под изменяющиеся требования бизнеса [4].

4. Интерфейс управления – панель, предоставляющая менеджерам возможность самостоятельно настраивать рабочие процессы, редактировать конфигурации и оперативно реагировать на изменения рыночных условий. Это повышает качество данных и удовлетворенность конечных пользователей.

Использование YAML-конфигуратора экранов позволяет добиться следующих преимуществ:

- **Скорость обновления:** Мгновенное применение изменений в интерфейсе (30 секунд против традиционных 2 месяцев).

- **Снижение затрат:** Минимизация ручных доработок и тестирования за счет автоматизации, что приводит к снижению общих затрат на разработку и сопровождение.

- **Гибкость и адаптивность:** Возможность изменения конфигураций без необходимости перекомпиляции приложения, что особенно актуально для быстро меняющихся бизнес-процессов.

- **Интеграция с DevSecOps:** Автоматизированное обновление экранов позволяет интегрировать процесс в CI/CD пайплайн, улучшая общую безопасность и качество продукта [3, 7].

Для углубленного понимания технической реализации представлена таблица 2, сравнивающая традиционные методы обновления мобильных приложений с инновационным решением на основе YAML-конфигуратора экранов.

Таблица 2.

Сравнительный анализ традиционных методов и решения с использованием YAML-конфигуратора экранов [2, 3, 4, 8].

Table 2.

Comparative analysis of traditional methods and solutions using YAML screen configurator [2, 3, 4, 8].

Параметр	Традиционный подход	Иновационный подход (YAML-конфигуратор)	Преимущества иновационного подхода
Время обновления	До 2 месяцев	≈ 30 секунд	Существенное сокращение цикла внедрения
Затраты на разработку и тестирование	Высокие (ручное внесение изменений, повторная сборка)	Низкие (автоматизация обновлений, динамическая интерпретация)	Экономия времени и средств, уменьшение числа ошибок
Гибкость управления	Ограниченная возможность оперативных изменений	Менеджеры могут самостоятельно настраивать рабочие процессы	Быстрая адаптация под изменения требований бизнеса
Интеграция с CI/CD и DevSecOps	Сложная интеграция, необходимость перезапуска системы	Полная интеграция в пайплайн, автоматическое обновление	Повышение безопасности и оперативности обновлений

Таким образом, технологическая реализация YAML-конфигуратора экранов представляет собой комплексное решение, которое объединяет современные методы динамической генерации интерфейсов, автоматизацию процессов обновления и интеграцию с современными инструментами DevSecOps. Такой подход не только оптимизирует операционные процессы, но и обеспечивает высокий уровень безопасности и адаптивности мобильных приложений, что подтверждается данными эмпирических исследований и сравнительным анализом.

3. Интеграция генеративного интеллекта и перспективы дальнейшей оптимизации

Интеграция генеративного интеллекта (ГИ) в процесс обновления мобильных приложений становится ключевым направлением повышения эффективности IT-процессов. Применение крупных языковых моделей (LLM) для автоматической генерации YAML-конфигураций экранов позволяет не только снизить затраты на разработку и сопровождение, но и существенно ускорить цикл обновлений, обеспечивая оперативное реагирование на изменяющиеся требования рынка [4, 9]. Данный подход способствует переходу от традиционного ручного редактирования конфигурационных файлов к автоматизированной генерации и корректировке, что уменьшает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, и повышает общую устойчивость системы.

Внедрение ГИ позволяет создавать динамичные, самоадаптирующиеся интерфейсы,

которые подстраиваются под особенности пользовательского опыта и бизнес-процессов в режиме реального времени. Таким образом, интеграция генеративного интеллекта становится важным компонентом стратегии DevSecOps, обеспечивая не только ускоренное обновление экранов, но и улучшение качества данных за счёт автоматизированного анализа пользовательских запросов и обратной связи. В свою очередь, применение ГИ открывает перспективы дальнейшей оптимизации процессов за счёт:

- Автоматической адаптации – LLM способны учитывать изменения в требованиях и оперативно корректировать YAML-конфигурации, что минимизирует простои и повышает оперативность внедрения новых функций.

- Интеллектуальной диагностики – генеративные модели могут анализировать текущие ошибки и предлагать оптимальные пути их устранения, что снижает нагрузку на специалистов и ускоряет процесс поддержки.

- Прогнозирования развития – использование данных, получаемых в результате работы системы, позволяет моделировать будущие сценарии обновлений и проводить сценарный анализ, оптимизируя процесс разработки с учетом потенциальных изменений в бизнес-среде [5, 6].

Для углубленного понимания преимуществ интеграции генеративного интеллекта представлена таблица 3, демонстрирующая ключевые показатели до и после внедрения LLM в процессы обновления мобильных приложений.

Таблица 3.

Сравнительный анализ ключевых показателей обновления мобильных приложений до и после интеграции генеративного интеллекта [2, 4, 6, 9].

Table 3.

Comparative analysis of key indicators of mobile application updates before and after the integration of generative intelligence [2, 4, 6, 9].

Показатель	До интеграции ГИ	После интеграции ГИ	Преимущества интеграции
Время обновления интерфейсов	2 месяца (ручной процесс)	≈ 30 секунд (автоматизированный процесс)	Существенное сокращение цикла внедрения
Затраты на разработку и поддержку	Высокие, многочисленные доработки	Низкие, минимизация ручного вмешательства	Экономия ресурсов и снижение операционных затрат
Качество и адаптивность UI	Ограниченная гибкость, высокая вероятность ошибок	Высокая гибкость, автоматическая корректировка ошибок	Улучшение пользовательского опыта и снижение числа ошибок
Возможности аналитики и прогнозирования	Ограниченные, статичный анализ	Расширенные, динамическая диагностика и прогнозирование	Повышение оперативности принятия управленческих решений

Таким образом, интеграция генеративного интеллекта в процессы обновления мобильных приложений не только существенно оптимизирует временные и финансовые затраты, но и создает основу для дальнейшей эволюции процессов в рамках DevSecOps. Перспективы дальнейшей оптимизации включают развитие самообучающихся систем, способных в режиме реального времени адаптироваться к изменяющимся требованиям, что подтверждается современными исследованиями в области искусственного интеллекта и его применения в IT-индустрии. Этот подход способствует достижению высоких показателей ROI и обеспечивает конкурентное преимущество на рынке за счет быстрого внедрения инноваций и повышения уровня безопасности и качества конечного продукта.

4. Практический кейс: внедрение для ведущего винного дистрибьютора

В мобильной отчетности полевых сотрудников периодически возникает необходимость вносить изменения — появляется новый шаг в процессе выполнения задачи, новый вид операций или оборудования, новый вид отчетности о маркетинговой информации.

В традиционной модели изменения происходят за счет доработок серверной и мобильной части и выпуска нового билда приложения. Процесс когда заказчик запрашивает изменения, вендор платформы пишет ТЗ и оценивает затраты, заказчик согласует стоимость, вендор выполняет работы (программирование и тестирование), заказчик оплачивает и внедряет функционал, видит, что какие-то моменты были не учтены, заказывает мелкую доработку — весь этот процесс может длиться 1-2 месяца для небольших задач и существенно увеличивать стоимость владения системой для заказчика.

Кроме того, такая модель порождает страх изменений — за несколько лет эксплуатации заказчик видит как много мелочей было доработано, сколько усилий и денег было вложено

и поэтому, даже несмотря на очевидные минусы текущей платформы, её моральное устаревание и высокую стоимость — заказчик опасается рассматривать новые прогрессивные платформы на замену т.к. опасается необходимости проходить путь с самого начала.

Предлагаемое решение заключается в создании конфигуратора мобильных экранов, который позволяет прототипировать новые шаги в отчетах и их содержание без программирования. То есть была создана принципиально новая мобильная платформа, которая позволяет задать список, названия, содержание шагов с помощью файла конфигурации, написанного почти естественным языком — на YAML. Заказчик вместе с менеджером проекта обсуждают рабочий процесс полевого сотрудника, менеджер проекта описывает процесс в YAML - билд файле. Когда описание готово, менеджер загружает файл в систему и через 30 секунд клиент может увидеть новые экраны в мобильном приложении, пройти весь визит, оценить удобство, вспомнить дополнительные детали, отправить несколько пилотных пользователей в поля для теста и собрать обратную связь. Процесс корректировки YAML-билд файла может быть проведен итеративно несколько раз пока клиент не получит желаемый результат. Время и стоимость будут оптимизированы поскольку в процессе не задействован серверный и мобильный разработчик, приложение не нужно публиковать в сторах, заказчик видит результат моментально и способен править конфигурацию до тех пор, пока не получит желаемый результат.

Также применяется генеративный интеллект для создания YAML-билд файла. Такой подход в ближайшей перспективе позволит заказчику править экраны в соответствии с нужным бизнес-процессом самостоятельно, без аналитика с нашей стороны. Процесс выглядит следующим образом: заказчик загружает простое текстовое описание шагов процесса, содержания работы (чеклистов, отчетных форм, фото-отчетов) каждого шага, генеративный интеллект сам пишет YAML-билд

файл, загружает его в платформу и показывает заказчику QR код новой конфигурации, заказчик сканирует QR код нашим приложением и в приложении видит желаемые мобильные экраны, может пройти по ним с тестом или провести пилот с пользователями.

Важным элементом подхода является использование NO-SQL базы данных для хранения результатов, что является нетипичным для рынка мобильных платформ по управлению полевым персоналом. Такой подход подразумевает больший вклад на начальное создание платформы, зато позволяет в последующем на лету сохранять данные из новых экранов, созданных при помощи YAML конфигуратора.

Такой подход уже показал себя на практике, был запущен проект для ведущего винного дистрибьютора за 2 недели, вместо обычных двух месяцев. Также это позволит клиенту быстрее и дешевле, иногда с нулевой стоимостью, создавать новые шаги и отчеты в нашей платформе.

Планируется распространить аналогичный подход на другие отраслевые решения — например, для логирования операций при ремонте оборудования или домашних систем.

Заключение

Следует отметить, что проведенное исследование демонстрирует потенциал использования YAML-конфигуратора экранов в сочетании с генеративным интеллектом для оптимизации процессов обновления мобильных приложений и повышения их экономической эффективности. Описанная методология оценки ROI, основанная на анализе затрат и выгод, а также сравнительном анализе традиционных и инновационных методов, позволяет объективно оценить преимущества интеграции автоматизированных решений в процессы DevSecOps. Сокращение временных затрат на обновление с двух месяцев до 30 секунд, снижение расходов на разработку и тестирование, а также прогнозируемый высокий уровень возврата инвестиций (150–200% в первый год) подтверждают целесообразность применения предлагаемого подхода.

Представленные результаты не только восполняют выявленный научный пробел, но и открывают новые перспективы для дальнейших исследований в области автоматизации процессов обновления, интеграции самообучающихся систем и оптимизации IT-инвестиционных процессов. В будущих работах целесообразно рассмотреть расширение модели за счет дополнительных сценариев применения генеративного интеллекта и проведение эмпирической валидации предложенных решений в различных секторах экономики, что позволит еще более точно оценить их влияние на конкурентоспособность и устойчивость бизнес-процессов.

Литература

1.Chowdhary A. et al. Autonomous security analysis and penetration testing //2020 16th

International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN). – IEEE, 2020. – С. 508-515.

2.Bedoya M. et al. Enhancing DevSecOps practice with Large Language Models and Security Chaos Engineering //International Journal of Information Security. – 2024. – С. 1-24.

3.Iatsiuta V., Kobets V., Ivanov O. Creating of a general purpose language for the construction of dynamic reports //PLAIS EuroSymposium on Digital Transformation. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – С. 16-37.

4.Bedoya M. et al. Securing cloud-based military systems with Security Chaos Engineering and Artificial Intelligence //Proceedings of the 18th International Conference on Availability, Reliability and Security. – 2023. – С. 1-9.

5.Ramaj X. et al. Towards a DevSecOps-enabled framework for risk management of critical infrastructures //European Conference on Software Process Improvement. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – С. 47-58.

6.Ramaj X. et al. Training and Security Awareness Under the Lens of Practitioners: A DevSecOps Perspective Towards Risk Management //International Conference on Human-Computer Interaction. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 84-97.

7.Nguyen-Duc A. et al. Generative Artificial Intelligence for Software Engineering--A Research Agenda //arXiv preprint arXiv:2310.18648. – 2023. – С. 1-10.

8.Szabó Z., Bilicki V. A new approach to web application security: Utilizing gpt language models for source code inspection //Future Internet. – 2023. – Т. 15. – №. 10. – С. 326.

9.McIntosh T. et al. Harnessing GPT-4 for generation of cybersecurity GRC policies: A focus on ransomware attack mitigation //Computers & security. – 2023. – Т. 134. – С. 103424.

References

1.Chowdhary A. et al. Autonomous security analysis and penetration testing //2020 16th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN). – IEEE, 2020. – pp. 508-515.

2.Bedoya M. et al. Enhancing DevSecOps practice with Large Language Models and Security Chaos Engineering //International Journal of Information Security. – 2024. – pp. 1-24.

3.Iatsiuta V., Kobets V., Ivanov O. Creating of a general purpose language for the construction of dynamic reports //PLAIS EuroSymposium on Digital Transformation. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – pp. 16-37.

4.Bedoya M. et al. Securing cloud-based military systems with Security Chaos Engineering and Artificial Intelligence //Proceedings of the 18th International Conference on Availability, Reliability and Security. – 2023. – pp. 1-9.

5.Ramaj X. et al. Towards a DevSecOps-enabled framework for risk management of critical infrastructures //European Conference on Software Process Improvement. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – pp. 47-58.

6.Ramaj X. et al. Training and Security Awareness Under the Lens of Practitioners: A DevSecOps Perspective Towards Risk Management //International Conference on Human-Computer Interaction. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – pp. 84-97.

7.Nguyen-Duc A. et al. Generative Artificial Intelligence for Software Engineering--A Research Agenda //arXiv preprint arXiv:2310.18648. – 2023. – pp. 1-10.

8.Szabó Z., Bilicki V. A new approach to web application security: Utilizing gpt language models for source code inspection //Future Internet. – 2023. – Vol. 15 (10). – pp. 326.

9.McIntosh T. et al. Harnessing GPT-4 for generation of cybersecurity GRC policies: A focus on ransomware attack mitigation //Computers & security. – 2023. – Vol. 134. – pp. 103424.

UDC 004.415.53

API TEST AUTOMATION WITH JAVA/TESTNG AS A MEANS TO REDUCE OPERATIONAL RISKS AND COSTS IN DIGITAL PRODUCTS

Drogunova Y.

*Dostoevsky Omsk State University,
Omsk*

АВТОМАТИЗАЦИЯ API-ТЕСТИРОВАНИЯ НА JAVA/TESTNG КАК СРЕДСТВО СНИЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РИСКОВ И ЗАТРАТ В ЦИФРОВЫХ ПРОДУКТАХ

Дрогунова Ю.И.

*Омский государственный университет имени Ф. М. Достоевского,
г. Омск*

This article discusses the technological and economic aspects of API test automation using Java and the TestNG framework as a means to reduce operational risks and costs in digital products. It outlines the architecture of an automated testing platform, principles of integration with CI/CD environments, and features such as parallel execution, parameterization, and report generation. The paper presents examples of how automation reduces the number of API-related incidents and shortens regression testing cycles. It concludes that API test automation is not only a technical solution but also a strategic tool for managing operational risks and improving support efficiency.

В статье рассматриваются технологические и экономические аспекты автоматизации API-тестирования с использованием Java и фреймворка TestNG как средства снижения эксплуатационных рисков и затрат в цифровых продуктах. Описывается архитектура автоматизированной платформы тестирования, принципы интеграции с CI/CD-средой, а также возможности параллельного выполнения, параметризации и построения отчетности. Приводятся примеры влияния автоматизации на снижение числа инцидентов, связанных с API, и сокращение времени на регрессионное тестирование. Делается вывод, что автоматизация API-тестов является не только техническим решением, но и стратегическим инструментом управления операционными рисками и повышения эффективности поддержки.

Keywords: API testing, automation, Java, TestNG, operational risks, digital systems.

Ключевые слова: API-тестирование, автоматизация, Java, TestNG, эксплуатационные риски, цифровые системы.

Introduction

Today's digital services operate in states of rapid change and heavy operational load, where the stability and predictability of application programming interfaces (API) are critical to provide technological resilience. API-level failures cause widespread system outages, service-level agreement (SLA) violations, loss of user trust, and higher operational costs. Here, API test automation emerges as an important aspect of engineering practice aimed at reducing operational risk and ensuring high service availability. Among the range of tools and programming languages that are used for automated testing, Java with the TestNG framework demonstrates consistent suitability because of its scalability, flexibility, and potential to operate on existing enterprise

infrastructure.

The purpose of the present study is to confirm the

technological and economic effectiveness of implementing automated API testing with Java and TestNG as a mean for minimizing operational risks, reducing maintenance costs, and increasing the reliability of digital systems. The research is about the automation effect in reducing the frequency of incidents caused by API faults. The research has a practicality orientation towards implementation in industrial scale digital platforms where service continuity as well as service scalability are assigned particular importance.

Main part. Technical principles of automated API testing

Automated API testing is a structured process aimed at verifying the behavior of software interfaces through programmatic means, without human intervention. According to market research, the global automated testing market is projected to reach \$41,67

billion by 2025, with an expected CAGR of 16,9%. By 2034, the market is forecasted to grow to \$169,33 billion [1].

In modern software products, the API testing in an automatic fashion is based on a full list of technical requirements that ensure interaction checks between program components' reliability, reproducibility, and scalability [2]. Among the essential design elements of these systems is an interface formalization – most

contemporary API are written according to the REST (Representational State Transfer) architecture style, which stipulates the utilization of the HTTP protocol and provides standardized solutions to access resources. RESTful API facilitate predictable and scalable communication between services, and their design can be easily traced to enable high-fidelity automation of request and response validation (fig. 1).

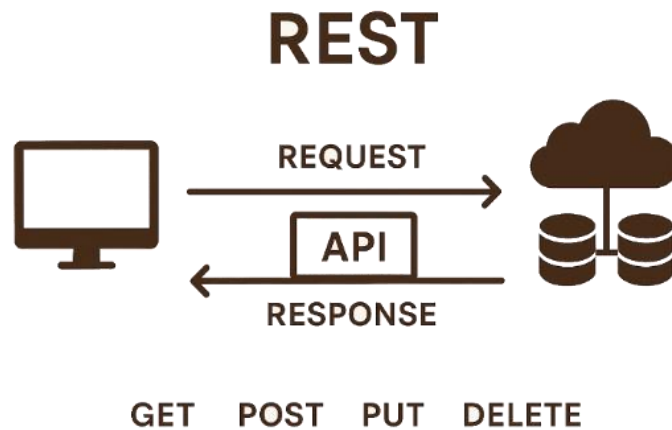


Figure 1. REST API diagram

Besides formalization, there are some basic principles that are inherent to API test automation. These include separation of test logic from infrastructure dependencies, idempotency of test execution, test case independence, reproducibility of the test environment, and controllability of side effects [3]. The automation must also have flexible configuration mechanisms, simple integration with external monitoring and logging tools, and follow standard approaches to validation and error analysis. Together, these principles form the foundation of a robust and stable testing platform that can scale in a predictable way in continuous software delivery contexts where changes occur frequently.

Advantages and application of TestNG in API test automation

Utilizing the TestNG framework with Java

provides a strong and versatile toolkit for building an extensible, flexible, and maintainable automated API test infrastructure. TestNG (Test Next Generation) was developed as an improved, more feature-rich version of JUnit, which is one of the most widely used unit testing frameworks within the Java community [4]. Whereas JUnit is most suited for testing single components and is often utilized in educational and startup settings, its functionality is typically inadequate when utilizing detailed, interdependent scenarios typical of enterprise projects.

In contrast, TestNG is designed for professional use cases, offering not only basic test execution capabilities but also advanced features such as structured test organization, parameterization, parallel execution, and integration with external systems (table 1).

Table 1.

Comparison of functional capabilities: JUnit vs. TestNG in the context of automated API testing

Criterion	JUnit	TestNG
Parameterization	Limited	Via @DataProvider
Parallel execution	Limited	Full support
Test dependencies	Not supported	Supported (dependsOn...)
Test grouping	Not supported	Supported (groups)
Environment configuration	Basic	Flexible (@BeforeSuite)

An additional advantage of TestNG is its ability to handle complex testing scenarios involving various data sources and multiple execution conditions. This feature ensures the creation of automated tests with ease, allowing them to easily be ported to the infrastructure of a given digital service. TestNG further

offers support for heterogeneous output artifact generation, such that multi-level and concise reporting is achieved. Figure 2 illustrates a schematic of TestNG operation, indicating how input in the form of test cases is received and output artifacts such as HTML reports, logs, and exportable files are produced.

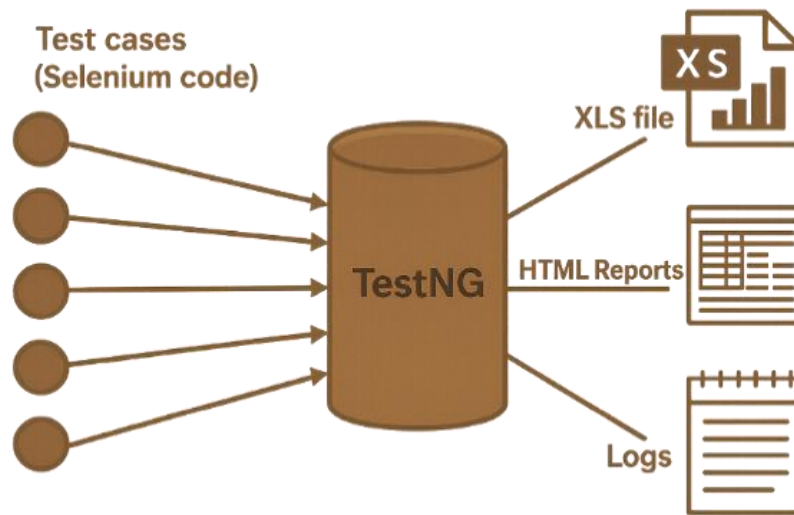


Figure 2. Test execution architecture in TestNG

Another significant advantage of TestNG is its rich annotation system, enabling fine-grained specification of test lifecycle. It accommodates declaring actions before and after test class or method execution (e.g., `@BeforeClass`, `@AfterMethod`), organizing tests into separate scenarios and logically related groups. This offers a high level of structural clarity and facilitates test suite scaling. Parameterization using `@DataProvider` allows it to be possible to execute the same test with different input datasets without code redundancy, which is crucial in API testing with many request parameters.

TestNG also supports parallel running of tests, which significantly reduces the time it takes to execute regression cases, particularly when dealing with large volumes of checks. The support for configuring priorities and defining test dependencies enables the construction of a deterministic and controlled model of execution – most important in API based on phased logic, such as authentication before accessing protected resources.

The architecture integrates seamlessly with build tools like Maven and Gradle, and CI/CD tools like Jenkins, GitLab CI, and TeamCity. This makes TestNG an ideal candidate to be utilized in industrial-strength solutions, where all phases of software delivery need to be automated. Combined with Java libraries such as REST Assured for sending HTTP requests, one can utilize Jackson or Gson to (de)serialize JSON content, and Allure to produce efficient reports, TestNG develops a robust and reproducible testing framework that is able to fit easily into the changes in API specifications with minimal rework.

Using TestNG not only increases the efficiency of test processes but also facilitates the creation of a standard test structure, which is particularly useful in highly rapidly changing digital services with high demands on reliability and fault tolerance.

Automated testing system design model

Building an effective automated API testing platform is more than just selecting a framework and a programming language – it is about crafting a holistic architecture that resolves each stage of the test lifecycle, from test data preparation to result

analysis [5]. Such a platform must be flexible, scalable, and easy to change according to changing logic and structure of API to be tested. Using the Java/TestNG technology stack, it is possible to build a sound architectural model in which each component has a clearly defined role, with modularity and reusability.

Architecturally, an API test automation system may be represented as a multi-layered system comprising the following components: an API interaction module (a tool-based HTTP client such as REST Assured or OkHttp), a test business logic layer (request and validation scenarios), a test data management layer (fixtures, data factories, and external configurations), and an integration layer for reporting tools and CI/CD systems. Standardization of input and output data format, the application of centralized logging, and configuration through property files or environment variables all help to offer test resilience when external conditions vary.

The life cycle of an automated test within an API testing platform is structured as a sequence of technically independent stages, each implemented as a distinct and reusable entity. The life cycle begins with **environment initialization**: loading configuration parameters (e.g., base URLs, tokens, timeouts), configuring fixtures, and initializing serialization helpers. This is followed by the **construction of an HTTP request** in terms of methods like GET, POST, or PUT, and the specification of necessary headers, parameters, and bodies of the requests. The process of building a request is usually implemented using the Builder design pattern or data factories.

Once the request is constructed, it's **passed to the system under test via an HTTP client** such as REST Assured. Here, routing configurations, timeout values, and retrying in volatile situations are taken into account. The response is encapsulated in an object containing the status code, body, headers, and metadata.

The second phase is **validation**, including structure and content validation against JSON schemas, custom validators, or Hamcrest matchers, and logical validation of business rules. The discrepancies are noted as exceptions with error information.

The subsequent stage in the lifecycle is **logging**, which is responsible for storing all the significant events, like request and response contents, execution times, and status codes – critical for analysis and debugging. The final stage is **report generation**, where the results of tests are aggregated: passed and failed test cases number, failure details, execution times, and other artifacts like logs or screenshots. Reporting is typically carried out with the assistance of tools like Allure and integrated into CI/CD pipelines.

Continued development of test lifecycle management takes place in the context of continuous delivery workflows. Integration with CI/CD procedures ensures that the tests are executed with every change in the code or configuration. Some of the tools that are utilized for the automation of executing test suites, report generation (e.g., in Allure format), notification to monitoring systems (e.g., Prometheus, Grafana, or Slack), and versioning of environments with Docker or Kubernetes include Jenkins, GitLab CI, and GitHub Actions. This creates a closed-loop system where automation is extended from code validation to broader delivery and operations processes.

Therefore, an API test automation framework built with Java and TestNG is not a collection of scripts but a whole engineering system. Its design should allow for stability, immunity to changes, and simple integration with third-party tools, while the test life cycle must be reproducible, isolated, and deterministic. This type of structure not only enables the detection of defects but also reduces risks in operational support, thereby enhancing the technological resilience of the digital product as a whole.

Impact of automation on operational risks

Generally, API test automation significantly contributes to the reduction of operational risk caused by interface-level faults [6]. In systems built with microservices, since the system components predominantly communicate using API, interruptions in API behavior are among the most common causes of failure for production systems. Most common such failure types would typically belong to three functional classes: authorization/authentication errors, validation/business logic failure, and API availability issues (table 2).

Table 2.

Typology of operational incidents at the API interface level

Incident category	Description	Examples and consequences
Authorization errors	Improper token handling, incorrect access rights, failures in SSO mechanisms.	Blocking legitimate users, data leaks, unauthorized access.
Validation and logic failures	Acceptance of invalid input, violations of business logic in request processing.	Corruption of stored data, violation of transactional consistency.
API availability issues	Timeout exceedance, endpoint failures, service degradation.	Increased latency, feature unavailability, SLA violations.

According to the FireTail report published in 2024, authorization and authentication issues initiated 78,2% of all security incidents involving API, solidifying their top rank among attack vectors on application interfaces [7]. A prime example is the incident involving the Trello platform REST API, where object-level access control (BOLA – Broken Object Level Authorization) was compromised. Due to a configuration flaw, the API accepted email addresses as query parameters, which enabled attackers to connect publicly available profile data to real email accounts. As a result, approximately 15 million users were deanonymized, exposing full names and avatars, and leading to a disastrous breach of privacy.

Automated API testing allows one to identify severe defects at early development phases, before pushing changes to production. It also ensures consistent verification across releases, reducing the risk of regressions and improving overall system reliability. Before automation, a significant proportion of support tickets typically stem from API instability – ranging from data validation errors to service failures under edge conditions. Following the deployment of automated regression testing for critical API routes, organizations have observed a reduction in recurring incidents and a noticeable decrease in the time required to localize and resolve them [8].

Another one positive effect is the reduction in SLA violations, particularly response time and service availability. Automated tests make it easier to identify

performance anomalies in advance and enable configuration changes before production. Support operations are also improved: having predictable, well-documented, and reproducible API interaction scenarios improves root cause analysis and MTTR (Mean Time to Resolution).

In brief, API test automation is not only a technical quality assurance method but also an operational risk management approach. By being utilized, its application fosters technological resilience of digital services, enhances controllability of incidents, and helps with SLA compliance without suggesting much extra investment of resources.

Economic efficiency of automation and maintainability of API support

API test automation has not only technological but also substantial economic impact on the lifecycle of digital products, particularly in operation and maintenance phases. Lower costs of operation are typically achieved through the diminished requirement for manual effort in regression testing and less technical support involvement.

In enterprise-scale projects, a typical regression suite may contain several hundred to over a thousand API tests whose manual execution takes dozens of person-hours. Experience shows that automating critical test scenarios enables background execution, significantly shortening the testing cycle and freeing up valuable engineering resources [9].

Beyond direct cost reduction, automation also

assists in the establishment of a more stable and transparent mechanism of API interface maintenance. This is particularly important in multi-team environments, where different parts of the system evolve at the same time. Automated testing enables formal control over interface stability, enables verification of backward compatibility, and enables real-time monitoring of API behavior changes.

To measure the effectiveness of automation

quantitatively, comparative calculation of labor cost can be utilized based on the computation of man-hours spent on manual testing compared with maintaining automated test infrastructure. Frequency of regression runs, engineer time expense, and technical overhead of automated test maintenance are considered factors. An example calculation for a typical weekly released project with 500 API tests in a test suite is presented in table 3.

Table 3.

Comparative assessment of labor costs: manual testing vs. automation (hypothetical project)

Metric	Manual testing	Automated testing
Number of API tests	500	500
Average time per test, minutes	2,5	0,2 (execution + log analysis)
Total time per run, hours	≈21	≈1.7
Execution frequency (per month)	4	4
Monthly labor cost, hours	≈84	≈7
Time savings per month	—	≈77 hours (~91%)

Other benefits are running repeated regression testing in CI/CD pipelines, informing responsible teams automatically upon failure, minimizing dependency on manual validation, and enhancing confidence in the reliability of releases. Together, all these contribute to minimizing the occurrence of incidents in production and increasing maintainability, which has a positive effect on the product's technological image and the extent of business stakeholders' trust.

Therefore, Java and TestNG-based API test automation demonstrates not only technical soundness but also sound economic sense. It enables sustained operation of virtual solutions and enables more efficient employment of project team resources.

Conclusion

TestNG-based API test automation with Java enhances the dependability of electronic systems through facilitating the detection of errors at early development stages. Platform architectural characteristics of modularity, easy setup, and the capacity to interface with third-party tools form the foundation for dependable and reproducible interface verification. It is of particular significance in high-updating frequency distributed systems with complex inter-service dependencies.

The employment of automated tests reduces the burden on support teams, enables real-time checking of component interaction, and reduces the number of operational incidents. Shorter regression test cycles, fewer SLA breaches, and faster incident response contribute not just to technical reliability but also to economic efficiency overall. Thus, Java and TestNG-based automation serves as a foundation for a systematic quality assurance approach in modern digital development environments.

References

- Automation Testing Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034 / Precedence research // URL: <https://www.precedenceresearch.com/automation-testing-market> (date of access: 13.05.2025).
- Dudak A.A. Optimize development and testing processes with vite, storybook and vitest // *Innovacionnaya nauka*. 2024. № 9-1. P. 21-25.
- Li N., Wang J., Chen C., Hu H. Application of API automation testing based on microservice mode in industry software // *Proceedings of the International Conference on Algorithms, Software Engineering, and Network Security*. 2024. P. 460-464.
- Aburas A. Choosing the Right Automated Software Testing Tools // *2024 IEEE 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*. 2024. P. 31-35.
- Smirnov A. Methods for detecting and resolving issues in API: profiling and performance optimization // *Cold science*. 2025. № 14. P. 7-15.
- Garifullin R. Analysis and development of interfaces for emergency systems with multitasking processing: approaches to minimizing user errors and enhancing reliability // *International scientific journal «Innovative Science»*. 2025. № 1-2-1. P. 20-24.
- The State of API Security 2024 / FireTail // URL: https://www.firetail.ai/reports/the-state-of-api-security-2024?utm_source=chatgpt.com (date of access: 13.05.2025).
- Wan C., Liu S., Xie S., Liu Y., Hoffmann H., Maire M., Lu S. Automated testing of software that uses machine learning APIs // *Proceedings of the 44th International Conference on Software Engineering*. 2022. P. 212-224.
- Joshi N.Y. Developing Robust APIs and Web Applications for Enterprise Applications: Automation Frameworks and Testing Strategies // *Journal of Basic Science and Engineering*. 2023. Vol. 20. № 1.

ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 524.83

ПРИРОДА И СВОЙСТВА ГРАВИТАЦИИ В ФИЗИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Гаджиев М.Г.

кандидат физико-математических наук

Реферат: Рассматривается объяснение природы гравитации и эффектов темной энергии и темной материи исходя из гипотезы о заполнении пространства средой с отрицательной плотностью. Получены модифицированные законы Ньютона, которые учитывают влияние физического пространства и наблюдаемое расширение Вселенной.

Установлено, что скорость распространения гравитации является функцией расстояния до центра притяжения. Выведена формула для расчета радиуса гравитационной устойчивости планетных систем и галактик. Результаты расчетов для Земли и Солнечной системы хорошо согласуются с наблюдаемыми размерами.

Для обоснования гипотезы об отрицательной плотности пространства рассмотрена проблема смещения перигелиев планет Солнечной системы. Установлено, что эти смещения не аномальные, а являются следствием влияния вращения Солнца. Количественные значения смещений перигелиев планет получены с учетом коэффициента увлечения.

В свете предположения об увлечении пространства вращающимся ядром галактики рассмотрена проблема незатухающего движения материи в диске галактики. Полученное аналитическое выражение для кривых вращения галактик соответствует наблюдениям и позволяют объяснить особенности движения материи в диске галактики в зависимости от массы и скорости вращения ядра, без привлечения идеи о темной материи.

Ключевые слова: физическое пространство, гравитация, скорость гравитации, смещение, перигелий, темная материя.

1. Введение

В 1921 году в статье “Геометрия и опыт” [1] Альберт Эйнштейн писал: “Гравитационное поле обладает такими свойствами, как если бы кроме весомых масс оно создавалось равномерно распределенной в пространстве плотностью массы, имеющей отрицательный знак. Так как эта фиктивная масса очень мала, то ее можно заметить только в случае очень больших гравитирующих систем”. Идея Эйнштейна состояла в том, что отрицательной плотностью можно обосновать тяготение. В некоторых современных космологических моделях для обоснования антигравитации используют вакуум Эйнштейна-Глинера [2] с уравнением состояния $P = -\epsilon^2 \rho$, где ρ средняя плотность энергии во Вселенной. В теории физического пространства [3] подобное уравнение состояния объясняет и тяготение, и антигравитацию. Основная гипотеза теории состоит в том, что пространство является непрерывной средой с отрицательной плотностью $\rho_f = -\rho$ и уравнением состояния $P = \epsilon^2 \rho_f$. Такое пространство, в которой и плотность, и давление отрицательные, называется физическим пространством. Скорость распространения возмущений в ней определяется по известной формуле и равна скорости света:

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho_f}};$$

Идея тридцатилетней давности [3] об отрицательной плотности уже не является новой.

Она встречается, например, в модифицированной стандартной космологической модели Λ CDM [4], где отрицательные массы предлагаются для решения проблемы темной материи. Отличие состоит в том, что в теории физического пространства отрицательную плотность имеют не частицы занимающие определенный объем в пространстве галактик, а среда равномерно и однородно заполняющая все пространство Вселенной. Среда, из которой невозможно сформировать отдельные частицы, является самим физическим пространством, существенно отличающимся по свойствам от любого вида материи.

Так как плотность физического пространства равна средней плотности материи со знаком минус, то суммарная плотность Вселенной равна нулю. Это уже не гипотетическая симметрия, связывающая бозоны и фермионы, а реальная суперсимметрия между материей и физическим пространством, следствием аннигиляции которых может быть абсолютная пустота.

2. Гравитация в физическом пространстве

Очень общее утверждение принципа, сформулированного в 1896 году английским физиком и философом Эрнстом Махом, гласит: “Локальные физические законы определяются крупномасштабной структурой Вселенной”. Несмотря на категоричность утверждения, нет такой физической теории, которая бы с математической точностью подтверждала эту гипотезу. Так, например, закон всемирного тяготения Ньютона:

$$F = \frac{GMm}{r^2}; \quad (1)$$

определяет силу тяготения через локальные параметры и гравитационную постоянную, которая никак не отражает участие в этом удаленных космических объектов. Отсутствие научного обоснования принципа Маха, обусловлено неопределенностью в понимании природы гравитации и ее связи с пространством. А так как гравитация является свойством материи, в первую очередь актуально понимание связи материи с пространством. Это понимание к настоящему времени претерпело значительные изменения по сравнению с временами Ньютона и Маха. Если тогда пространство рассматривалось как геометрический объект, внутри которого и независимо от него существует материя, то уже в теории относительности Эйнштейна оно проявляет свои физические свойства, реагируя на присутствие в ней материи. Предсказания этой теории были подтверждены астрономическими наблюдениями, которые в последующем выявили еще более необычные свойства пространства. С точки зрения связи материи и пространства наиболее интересным является открытие расширения Вселенной при неизменной средней плотности материи [5].

Одно из возможных объяснений гравитации и расширения Вселенной предложено в теории физического пространства, где гравитационное воздействие отождествляется с действием потока физического пространства, имеющего отрицательную плотность. Сила тяготения F действующая на тело массой m в потоке физического пространства, по аналогии с формулой Стокса [6], выражается формулой:

$$F = \gamma mV; \quad (2)$$

где γ - гравитационный коэффициент, а V - скорость потока.

В этой формуле вместо размеров тела присутствует ее масса, потому что физическое пространство, идеальное по свойствам, проникает повсюду и воздействует на каждую частицу материи.

Известно, что скорость расширения Вселенной задается параметром Хаббла H . Рассмотрим единичный объем пространства. Этот объем при расширении всей Вселенной за 1 секунду увеличивается на величину $3H = (1+H)^3 - 1$. Таким образом, тело массой M образует за 1 секунду избыточную материю в виде излучения в количестве $3HM$ и физическое пространство в объеме $3HM/\rho$. Это и является причиной расширения Вселенной, которую приписывают темной энергии. При условии $\rho = -\rho_0$ увеличение размеров пространства сопровождается увеличением количества материи.

Излучаемая материя, как возмущение физического пространства, распространяется от

тела со скоростью не более скорости света, а скорость распространения физического пространства, которое не является материей, неограничена и вычисляется по формуле:

$$V = \frac{3HM}{4\pi r^2 \rho}; \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим выражение для силы притяжения тела массой m :

$$F = \gamma \frac{3HMm}{4\pi r^2 \rho}; \quad (4)$$

Из формул (1) и (4) следует, что если представить гравитационный коэффициент γ в виде:

$$\gamma = \frac{4\pi G\rho}{3H};$$

то формулы (1) и (2) не отличаются количественно в описании гравитации, то есть закон всемирного тяготения не изменяется в зависимости от того, расширяется Вселенная или нет.

Используя известное выражение для критической плотности материи в пространстве:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G};$$

выражение для гравитационного коэффициента γ можно представить в виде:

$$\gamma = \frac{H\rho}{2\rho_c}; \quad (5)$$

Отношение средней плотности энергии Вселенной ρ к критической плотности ρ_c называется космологическим параметром плотности Ω :

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c};$$

В случае $\Omega=1$ (средняя плотность Вселенной равна критической плотности) трёхмерное пространство является евклидовым (или плоским), а гравитационный коэффициент зависит только от параметра Хаббла:

$$\gamma = \frac{H}{2}; \quad (6)$$

3. Законы Ньютона

Так как физическое пространство не пустое и обладает физическими свойствами, то движение материальных тел в нём имеет свои особенности. Эти особенности в полной мере проявляются в простейшей задаче движения тела с единичной массой в покоящемся эфире под действием

постоянной силы f . Так как в этом случае появляется скорость v движения тела относительно физического пространства, то уравнение движения с учетом формулы (2) можно записать в виде:

$$\frac{dv}{dt} = f + \gamma v; \quad (7)$$

В уравнении (7) учтено, что сила, действующая на тело со стороны физического пространства, направлена в сторону движения тела. То есть, физическое пространство из-за своих отрицательных свойств не сопротивляется движению, а наоборот увлекает его. Так как согласно формуле (6) γ является малой величиной порядка 10^{-20} , влияние второго члена уравнения (7) на движение тела незначительное и проявляется только в космологических масштабах.

Решение уравнения (7) с граничным условием $v=v_0$ при $t=0$ имеет вид:

$$v = \left(v_0 + \frac{f}{\gamma} \right) e^{\gamma t} - \frac{f}{\gamma}; \quad (8)$$

Учитывая малость параметра γ , и сохраняя в разложении $e^{\gamma t}$ только члены порядка γ , решение (8) можно представить в виде:

$$v = ft \left(1 + \frac{\gamma t}{2} \right) + v_0(1 + \gamma t); \quad (9)$$

Из этого решения уравнения движения можно сделать следующие выводы:

1. Если на тело не действует сила и оно покоится относительно физического пространства при $t=0$, то оно сохраняет это состояние и впредь.

2. Если на тело не действует сила и оно имеет начальную скорость относительно физического пространства, то оно в дальнейшем будет двигаться не по инерции, как это имеет место в первом законе Ньютона, а с малым ускорением $v_0\gamma$, которое будет оставаться малым до тех пор, пока время не станет сравнимо с возрастом Вселенной.

3. Если на покоящееся тело действует постоянная внешняя сила f , то оно движется не только с постоянным ускорением, как это имеет место во втором законе Ньютона, но и с малым переменным ускорением $f\gamma t$, которое существенно для времен, сравнимых с возрастом Вселенной.

Таким образом физическое пространство непосредственно участвует в движении материальных тел. При этом первый и второй законы Ньютона перестают быть абсолютными, как это имеет место в пустом пространстве. Физическое пространство вносит в равномерное или равноускоренное движение свои поправки, которые становятся существенными при космологических масштабах.

4. Скорость распространения гравитации

Вопрос о том, с какой скоростью распространяется гравитация, вовсе не праздный и

его нельзя считать закрытым. Конечная скорость распространения гравитации означает, что все планеты Солнечной системы притягиваются не к тому месту, где находится светило, а к точке, где оно уже успело побывать. Солнце успеет пролететь в галактике 3 млн. километров пока его свет доберется до Нептуна. Еще Лаплас [7], с учетом всех факторов, показал, что если скорость распространения гравитационного взаимодействия ниже 50 миллионов скорости света, то Солнечная система динамически неустойчива и может развалиться. Поэтому в механике Ньютона скорость распространения гравитации бесконечна. В теории относительности постулируется, что скорость распространения гравитации в пустом пространстве равна скорости света.

В теории физического пространства скорость распространения гравитации – это скорость распространения физического пространства. Как следует из формулы (3), скорость распространения гравитации величина переменная, являющаяся функцией координат и времени. Заключение о том, что гравитация не распространяется мгновенно или с постоянной скоростью, является одним из следствий гипотезы об отрицательной плотности физического пространства.

На поверхности Солнца по формуле (3) при $r=r_c$, получим скорость распространения гравитации $V=2,2 \times 10^{20}$ м/с. Это в 10^{12} раз больше скорости света и значительно больше ограничения Лапласа.

Ранее отмечалось, что скорость света является скоростью распространения возмущений в физическом пространстве с отрицательной плотностью. Таким образом скорость света – это наибольшая скорость движения частиц материи в физическом пространстве. С такой же скоростью распространяются в ней и другие возмущения, например, гравитационные волны. Физическое пространство не является материей и поэтому на нее не распространяется ограничение максимальной скорости скоростью света. Таким же свойством наделяется в теории инфляции [8] среда, которая называется инфлатоном.

Областью космологии, где скорость распространения гравитации имеет существенное значение, является гравитационная устойчивость планетных систем. Приближенную оценку необходимой скорости распространения гравитации для удовлетворения условию Лапласа для Солнечной системы можно получить, вычислив расстояние от Солнца до места, где убывающая скорость гравитации меньше ограничения Лапласа ($L=50 \times 10^6 c$). Для этого формулу (3) нужно переписать в виде:

$$R = 3NM/L / (4\pi r \rho); \quad (10)$$

В результате получим для солнечной системы расстояние в 10,5 млрд километров, дальше которого по ограничению Лапласа невозможно существование постоянных спутников Солнца. И это, более чем наглядно, подтверждается тем, что

самая дальняя карликовая планета Эрида находится на расстоянии 10,2 млрд километров от Солнца. Расчет подтверждается наблюдением с погрешностью в 3%, что для космологии редкое явление.

Если по формуле (10) рассчитать радиус гравитационной стабильности Земли, то получим, что он равен 3,4 млн километров. Здесь наблюдательных данных нет, но расчетная точка Лагранжа, где притяжение Земли равно притяжению Солнца находится на расстоянии 1,5 млн. километров от Земли.

5. Смещение перигелиев планет Солнечной системы

Достоверность любой теории оценивается тем, насколько ее выводы и расчеты согласуются с наблюдательными и экспериментальными данными. В этом смысле аномальное смещение перигелия Меркурия явилось первым и существенным подтверждением теории относительности, так как результаты расчетов по формуле, выведенной из теории, совпали с наблюдательными данными с точностью до погрешностей приборов. Аналогичную формулу еще до Эйнштейна получил немецкий физик Гербер, когда пытался выразить скорость распространения гравитации через аномальное смещение перигелия Меркурия. В обоих случаях результат является следствием выхода за рамки Ньютоновской теории гравитации. По теории относительности и в представлении Гербера гравитация имеет конечную скорость равную скорости света. По этим теориям формула расчета угла смещения φ перигелия за 1 оборот планеты имеет вид:

$$\varphi = \frac{6\pi GM}{c^2 a(1 - e^2)};$$

где a – большая полуось орбиты, e эксцентриситет.

Результаты вычислений по этой формуле (столбец 3 в таблице) не выходят за пределы погрешностей приборов и хорошо согласуются с наблюдениями. Одинаковой для всех планет частью этой формулы является величина, физический смысл которой - линейное смещение перигелия за один оборот:

$$S = \frac{6\pi GM}{c^2}; \quad (11)$$

В теории физического пространства гравитация имеет совсем иную природу, чем в механике Ньютона. Гравитационным полем является поле скоростей течения физического пространства, которое истекает от Солнца. Поток физического пространства, порождаемый Солнцем, внутри него вращается вместе с ним. На поверхности Солнца поток имеет скорость, направленную по радиусу, а его тангенциальная скорость равна скорости вращения Солнца. Так как на бесконечности физическое пространство

покоится относительно Солнца, то эта тангенциальная скорость стремится к нулю с увеличением расстояния. Этим отличается представление о гравитации в теории физического пространства от космологических моделей, в которых гравитация обусловлена действием потока частиц, которые не изменяют скорости и направления движения.

Еще в 1956 году Гинзбург В.Л., в статье посвященной смещению перигелия Меркурия [9], показал, что в теории относительности можно учесть релятивистский эффект вращения Солнца, но он во-первых - мал, а во-вторых – отрицательный.

В теории физического пространства смещение перигелиев планет обусловлено, во-первых, согласно формуле (9), их движением вокруг Солнца с постоянной в среднем скоростью, а во-вторых, вращением физического пространства вместе с Солнцем. Первую часть этого смещения можно вычислить полагая в формуле (9) $\mathbf{f} = \mathbf{0}$. Тогда выражение для линейного смещения перигелиев планет при движении вокруг Солнца с постоянной скоростью \mathbf{v}_0 в зависимости от времени имеет вид:

$$S = \gamma v_0^2 t^2 / 2; \quad (12)$$

Результаты расчета смещения перигелиев планет по этой формуле за 100 лет на несколько порядков меньше, чем реально наблюдаемые смещения.

Для вычисления второй части смещения необходимо решить задачу расчета поля скоростей течения физического пространства от вращающегося источника с заданными граничными условиями. Имеющиеся сведения об особенностях смещения перигелиев позволяют упростить вывод формулы для расчета этого смещения. Особенность состоит в том, что при отклонении потока физического пространства от радиального направления, скорость потока \mathbf{V} приобретает тангенциальную составляющую \mathbf{W} , для которой, по аналогии с (12), можно рассчитать линейное смещение перигелия планет за время T (период) по формуле:

$$S = \gamma W T^2 / 2; \quad (13)$$

Обозначив через $\alpha(\mathbf{r})$ малый угол отклонения потока, тангенциальную составляющую можно представить в виде:

$$\mathbf{W} = \alpha(\mathbf{r})\mathbf{V}$$

Тогда:

$$S = \gamma \alpha(\mathbf{r}) V T^2 / 2; \quad (14)$$

В этой формуле $\mathbf{V} \sim 1/r^2$ по формуле (3), а $T^2 \sim r^3$ – согласно третьего закона Кеплера. В результате функция $\alpha(\mathbf{r})$ должна иметь вид C/r , так как S , согласно формуле (6), не зависит от r . Если учесть, что функция $\alpha(\mathbf{r})$ является углом для

проектирования скорости гравитации на тангенциальное направление, ее можно выразить через тангенциальную скорость физического пространства $u(r)$, которое является следствием вращения Солнца.

$$\frac{du(r)}{dr} = \alpha(r) = \frac{C}{r}; \quad (15)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$u(r) = C \ln r + C_1; \quad (16)$$

Для расчета констант C и C_1 имеем на поверхности Солнца ($r = r_s$) два условия:

1. $u(r) = u_s$; $u_s = 1875$ м/с – скорость вращения Солнца на экваторе;

$$\frac{du(r)}{dr} = \frac{u_s}{r_s};$$

Для пояснения условий 1 и 2 воспользуемся рисунком, иллюстрирующим зависимость скорости вращения физического пространства от размеров и скорости вращения Солнца. График 1 на Рис.1 соответствует тому, что физическое пространство Солнца вращается вместе с ним с постоянной угловой скоростью. Тангенциальная скорость при этом линейно возрастает. График 2 построен в предположении, что вращение Солнца не оказывает влияния на физическое пространство, как это имеет место в случае с евклидовым пространством в ньютоновской механике. Третий график соответствует теории физического пространства, когда вращение Солнца влияет на поле скоростей физического пространства. На поверхности скорости вращения Солнца и физического пространства совпадают (условие 1), поток направлен по радиусу (условие 2). С удалением от Солнца кривая вращения отклоняется от линии 1 в сторону линии 2, так как уменьшается влияние вращения Солнца на физическое пространство.

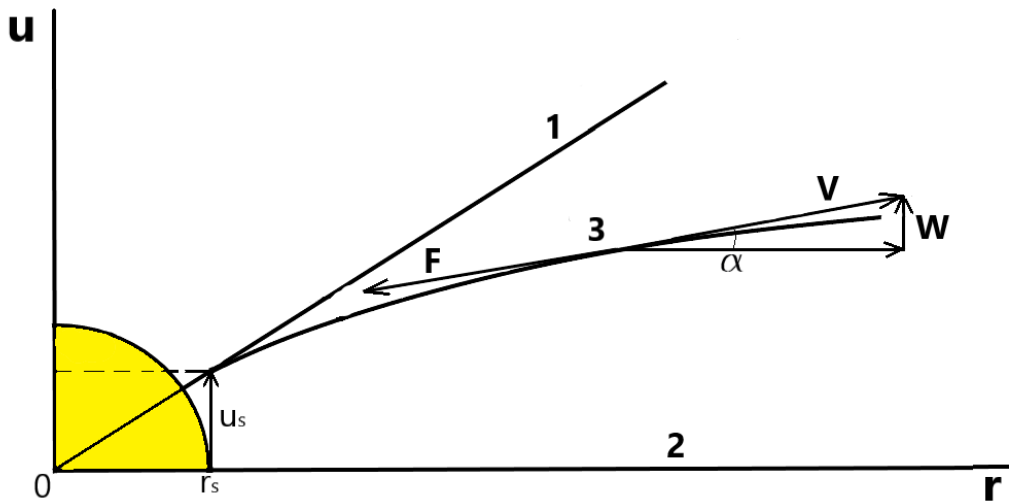


Рис.1 Графики потока физического пространства от Солнца

Из условий 1 и 2 следует, что $C = u_s$; $C_1 = u_s(1 - \ln r_s)$; Тогда выражение для функции $u(r)$ примет вид:

$$u(r) = u_s(1 + \ln(r/r_s)); \quad (16)$$

Подставляя (3), (5) и (15) в (14) и используя еще раз третий закон Кеплера в виде:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM};$$

получим окончательное и универсальное выражение для линейного смещения перигелиев планет:

$$S = 2\pi^2 u_s; \quad (17)$$

Эта формула не только значительно проще, чем формула (13), но и выражает тот факт, что смещения перигелиев орбит не являются аномальными, имеют естественное объяснение и

зависят только от скорости вращения Солнца и параметров орбит (a, e).

Замечание: В формуле (17) u_s – имеет размерность длины и равна смещению поверхности Солнца за 1 секунду, то есть скорости

Результаты расчета смещения перигелиев по формуле (17) представлены в таблице (столбец 4). Они количественно больше, чем реально наблюдаемые. При выводе этой формулы было сделано идеальное предположение (условие 2), что поток физического пространства на поверхности направлен строго по радиусу перпендикулярно поверхности Солнца. Это имеет место только в том случае, когда физическое пространство жестко связано с поверхностью Солнца и вращается вместе с ним. Во всех других случаях имеет место частичное увлечение физического пространства. Поэтому в формулу (17) для линейного смещения перигелиев надо ввести коэффициент увлечения q , который изменяется в диапазоне от 0 до 1.

$$S = 2\pi^2 q u_s; \quad (18)$$

Если использовать известную формулу (11) для линейного смещения перигелиев, то из (18) можно получить, независимое от наблюдательных данных, выражение для вычисления коэффициента увлечения:

$$q = \frac{3GM}{c^2 \pi u_s}; \quad (19)$$

Для Солнца по формуле (8) коэффициент увлечения физического пространства $q=3/4$. А вот если посчитать коэффициент увлечения физического пространства для Земли, то получится $q=0,00001$, то есть Земля не увлекает физическое пространство. Совпадение расчетного смещения перигелия Луны с наблюдаемым [9] значением $0,06''$ подтверждает необходимость введения коэффициента увлечения в формулу (18), как и идею о частичном увлечении пространства. Результаты вычисления смещений перигелиев планет Солнечной системы по формуле (18) с учетом коэффициента увлечения приведены в таблице (столбец 5).

Таблица

Результаты расчета смещения перигелиев планет

ПЛАНЕТА	Результаты наблюдений	ОТО формула (13)	ТФП формула (17)	ТФП формула (18)
1	2	3	4	5
Меркурий	43,1±0,5	43	57,2	43,1
Венера	8,4±4,8	8,3	11,5	8,7
Земля	5±1,2	3,8	5,1	3,8
Марс	1,1±0,3	1,35	1,8	1,3
Икар	9,8±0,8	10,1	13,5	10,2

6. Мнимый эффект темной материи

Так как галактика тоже является вращающимся космическим объектом с ядром, есть все основания полагать, что это вращение может влиять на физическое пространство, как это происходит с пространством вокруг Солнечной системы. Если предположить, что физическое пространство ядра вращается как целое, то для функции скорости вращения $u(r)$ на поверхности ядра выполняются те же условия 1 и 2, что и на поверхности Солнца. За скорость u_s принимается значение из наблюдений на поверхности ядра радиусом r_s . В дальнейшем будет показано, что этими параметрами исчерпывается необходимая информация для построения кривых вращения в дальней зоне. Для полного построения необходимо иметь информацию о массе ядра, а также профиле плотности в диске галактики.

Так как ядро галактики, как и сама галактика не являются массивными телами и имеют сравнительно низкую плотность, увлечение пространства при вращении не может быть полным. Поэтому введем в рассмотрение коэффициент увлечения q и представим выражение (16) в виде:

$$u(r) = q u_s (1 + \ln(r/r_s)); \quad (20)$$

Физический смысл скорости $u(r)$ состоит в том, что это скорость, с которой вращается

увлеченное пространство ядра и диска галактики и прилегающая область Вселенной.

Необходимо обратить внимание на то, что из вида функции (20) и Рис.1 следует, что если на поверхности ядра скорость увлечения пространства отлична от нуля, то во внешней области она не убывает, а возрастает, но с замедлением. Если бы все физическое пространство галактики вращалось с той же угловой скоростью, что и ядро, то тангенциальная скорость во внешней области возрастала бы пропорционально радиусу r . Но так как с удалением от ядра влияние ее вращения на физическое пространство убывает, то тангенциальная скорость возрастает уже пропорционально $\ln(r)$. Следует отметить, что если нет вращения ядра галактики ($u_s=0$), то дополнительная скорость отсутствует, и кривая вращения галактики за пределами ядра убывает как $1/\sqrt{r}$. В общем случае кривая вращения галактики за пределами ядра является суммой классической кривой вращения и функции $u(r)$:

$$U(r) = \sqrt{GM_s/r} + q u_s (1 + \ln(r/r_s)); \quad (21)$$

где M_s – масса ядра галактики, а G – гравитационная постоянная.

В зависимости от соотношения параметров и для различных значений коэффициента увлечения кривые вращения, построенные по формуле (21), могут быть как возрастающие, так и убывающие (Рис.2).

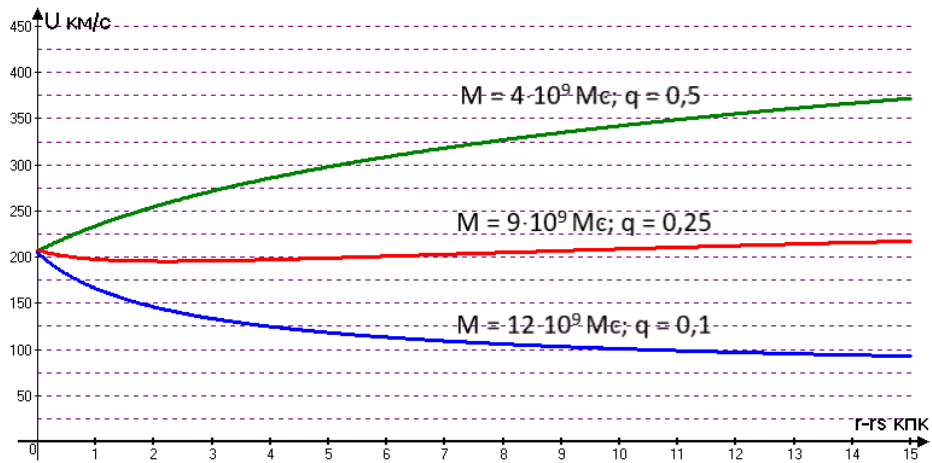


Рис.2 Варианты кривых вращения галактик

Для расчета смещения перигелиев планет солнечной системы коэффициент увлечения q вычисляется по формуле (19). Эту формулу нельзя применить для построения кривых вращения галактик, так как при её выводе использован третий закон Кеплера, который, как следует из наблюдений, не работает в галактической гравитации. Коэффициент увлечения для галактик может быть вычислен по известной наблюдаемой скорости на поверхности ядра. Выражение для этой скорости по формуле (21) имеет вид:

$$q = 1 - \frac{1}{u_s} \sqrt{\frac{GM_s}{r_s}}; \tag{22}$$

На Рис.3 изображены кривые вращения в дисках галактик Млечный путь, Туманность Андромеды и Галактика Треугольника, построенные по формуле (21) с коэффициентами увлечения (22), которые хорошо согласуются с наблюдениями. Скорость вращения возрастает с приближением к поверхности ядра, образуя «горб» на графике кривой вращения. Она возрастает также и за пределами диска, границы которой на рисунке обозначены вертикальной линией.

$$u_s = \sqrt{GM_s / r_s} + qu_s;$$

Следовательно, если параметры ядра известны, то выражение для коэффициента увлечения имеет вид:



Рис.3 Кривые вращения в диске галактик Млечный путь, Туманность Андромеды M31 и Галактики Треугольника M33. Наблюдения приведены для Туманности Андромеды и галактики Треугольника.

По формуле (21) кривые вращения галактик строятся независимо от распределения материи в диске галактики. Влияние на кривую вращения материи, содержащейся в диске галактики, можно учесть если известно распределении плотности $\rho(r)$.

В этом случае масса диска толщиной h внутри радиуса r вычисляется по формуле:

$$M_d(r) = 2\pi h \int_{r_s}^r \rho(x) dx \tag{23}$$

Тогда формула для построения кривых вращения галактик с учетом увлечения физического пространства и плотностью материи, содержащейся в диске, имеет вид;

$$U(r) = \sqrt{G(M_s + M_d(r)) / r} + q u_s (1 + \ln(r/r_s)); \quad (23)$$

Полученные формулы для расчета кривых вращения и коэффициентов увлечения позволяют однозначно ответить на вопрос о том, почему скорости планет солнечной системы убывают как $1/\sqrt{r}$, у скорости звезд в галактиках возрастают как $\ln(r)$. Если обратить внимание на выражение коэффициента увлечения q , то можно заметить, что для планетной системы этот коэффициент (19) тем больше, чем больше масса звезды, а для галактики все наоборот: коэффициент увлечения (22) тем больше, чем меньше масса ядра. А из формулы (20) следует, что чем больше коэффициент увлечения, тем больше орбитальные скорости звезд. Наибольшего значения эти скорости достигают при $q=1$, то есть тогда, когда ядро вообще отсутствует. Этот парадокс имеет естественное объяснение. Влияние вращения Солнца на физическое пространство ослабевает с расстоянием и это объясняет убывание скорости планет подобно функции $1/\sqrt{r}$. В галактике процесс увлечения физического пространства происходит по иному сценарию, так как причиной этого не может быть сравнительно небольшое по массе ядро галактики. Не вдаваясь в причину вращения галактик можно утверждать, что, если бы не было внешнего воздействия, то галактика вращалась бы как целое вместе со своим физическим пространством. В этом случае кривая вращения галактики в неподвижной системе координат соответствовала

бы линии **1** (Рис.1). Так как физическое пространство Вселенной за пределами галактики не вращается, то оно отклоняет график скорости звезд от линии **1** в сторону линии **2**. Из формулы (20) следует, что график, удовлетворяющий этим условиям, имеет вид логарифмической функции. Таким образом, вращающееся относительно галактики Вселенная, увлекает физическое пространство галактики в сторону, противоположную ее вращению.

Для построения кривых вращения в дальней зоне формулу (23) можно упростить, пренебрегая малыми величинами. В этом случае коэффициент увлечения равен единице, а кривая вращения является логарифмической функцией, которая для любой галактики в дальней зоне, даже за пределами галактики, имеет вид:

$$U(r) = u_s \ln(r/r_s); \quad (24)$$

Эти кривые отличаются между собой из-за различных u_s и r_s , что наглядно продемонстрировано на рис.4 с подборкой наблюдаемых кривых вращения галактик в дальней зоне. Очевидно, что логарифмическая форма кривых вращения характерна для большинства галактик, а отклонения от нее в ближней зоне являются следствием наличия массивного ядра или сложных профилей плотности материи в дисках.

Замечание: Формулы для кривых вращения материи в галактиках получены в предположении бесконечной скорости распространения гравитации. При учете скорости распространения гравитации (3), скорость вращения материи за пределами галактики будет уменьшаться, как и сама гравитация.

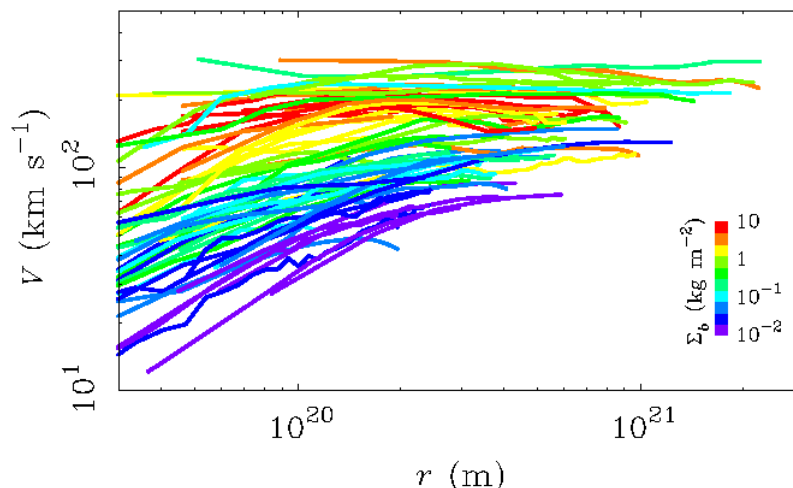


Рис.4 Компиляция многих кривых вращения дисковых галактик.

Надо заметить, что формулы (19) и (22) для вычисления коэффициента увлечения существенно отличаются между собой. В случае с вращающейся звездой, чем больше масса звезды, тем больше коэффициент увлечения, и это естественно. В галактике все наоборот, чем больше масса ядра, тем

меньше коэффициент увлечения (22). Этим объясняется совершенно разная форма кривых вращения в этих космических структурах. В первом случае коэффициент увлечения показывает степень увлечения окружающего пространства вращающейся звездой. Во втором случае

коэффициент увлечения показывает степень увлечения пространства ядра вращающимся пространством диска галактики. Если физическое пространство галактики вращается вместе с галактикой, то тангенциальная скорость материи линейно зависит от расстояния до центра галактики. Но пространство Вселенной, которое окружает галактику, не вращается и оказывает на пространство галактики тормозящее влияние. Это влияние изменяет характер зависимости скорости от расстояния в пространстве галактики вплоть до ядра. Чем тяжелее ядро, тем труднее оно увлекается физическим пространством галактики. Поэтому внутри таких ядер сохраняется линейная зависимость тангенциальной скорости вращения материи от расстояния до центра галактики. Это никак не зависит от количества материи в этой области и нет необходимости привлечения темной материи в центральную область галактики, чтобы поправить кривую вращения и породить проблему каспов.

7. Заключение

Рассматривается объяснение природы гравитации и эффектов темной энергии и темной материи исходя из гипотезы о заполнении пространства средой с отрицательной плотностью. Получены модифицированные законы Ньютона, которые учитывают влияние физического пространства и наблюдаемое расширение Вселенной.

Установлено, что скорость распространения гравитации является функцией расстояния до центра притяжения. Выведена формула для расчета радиуса гравитационной устойчивости планетных систем и галактик. Результаты расчетов для Земли и Солнечной системы хорошо согласуются с наблюдаемыми размерами.

Для обоснования гипотезы об отрицательной плотности пространства рассмотрена проблема смещения перигелиев планет Солнечной системы. Установлено, что эти смещения не аномальные, а являются следствием влияния вращения Солнца. Количественные значения смещений перигелиев планет получены с учетом коэффициента увлечения.

Получено аналитическое выражение для построения кривых вращения галактик, которое объясняют особенности движения материи без привлечения идеи о темной материи. Установлена существенная разница между гравитационными эффектами в планетной системе и галактиках, которая является причиной нарушения законов тяготения, в том числе третьего закона Кеплера. Объяснение особенностей кривых вращения влиянием окружающего пространства Вселенной на вращающееся физическое пространство галактики значительно проще и нагляднее, чем в модифицированных теориях гравитации (MOND [10] и др.), а также в теориях с разнообразными функциями плотности темной материи в ядре и диске галактик.

Список литературы

1. Альберт Эйнштейн Собрание научных трудов в четырех томах. Наука, 1966, том II, стр. 83-94.
2. Чернин А.Д. «Темная энергия и всемирное антигравитационное», УФН, март 2008, Том 178, №3, стр. 267-300.
3. Гаджиев М.Г. «Зазеркалье Вселенной» Ж-л Природа и человек (Свет) 1994, №4, стр.26-28
4. Farnes J. S. «Unifying Theory of Dark Energy and Dark Matter: Negative Masses and Matter Creation within a Modified», arXiv: 1712.07962
5. Петров А.Н. «Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор», Фрязино, ООО «Век», 2013, стр. 315-316
6. Матвеев А.Н. «Механика и теория относительности», Москва, «Мир и Образование», 2003, стр. 339-340
7. Лаплас П.С. «Изложение системы мира», Ленинград, «Наука», 1982, стр. 224
8. Линде А.Д. Раздувающаяся Вселенная, УФН, 1984, том 144, номер 2, 177-214
9. Гинзбург В.Л. «Экспериментальная проверка теории относительности», УФН, май 1956, т. LIX, вып. I, стр. 11-49
10. Mordehai Milgrom. MOND vs. dark matter in light of historical parallels. arXiv:1910.04368

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ ПО ХРАНЕНИЮ И ЗАХОРОНЕНИЮ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Кирсанов Алексей Александрович

*Заместитель руководителя дирекции по промышленному строительству ООО ХК "Новолекс"
Москва, Россия*

IMPLEMENTATION OF MODERN MANAGEMENT METHODS IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF FACILITIES FOR THE STORAGE AND BURIAL OF RADIOACTIVE WASTE

Alexey Kirsanov

*Deputy Head of the Industrial Construction Directorate of Novolex HC LLC
Moscow, Russia*

[DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2182](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2182)

АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена системному анализу внедрения современных управленческих технологий при проектировании и строительстве объектов долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов. Актуальность исследования определяется необходимостью гарантированной изоляции высокоактивных материалов на период свыше ста тысяч лет при ужесточении бюджетных ограничений и требований ядерного надзора. Новизна данной работы заключается в синтезе BIM-моделирования, роботизированных операций, элементов Agile и принципов системного менеджмента в единую рамку, позволяющую прогнозировать жизненную стоимость проектов, динамику технических рисков и совокупный экологический эффект. В данной статье раскрыты преимущества цифровых двойников, автоматизированного мониторинга, гибридных методик планирования; проанализированы кейсы Финляндии и Швеции; уделено внимание влиянию общественного участия, экологической экспертизы и коммуникативных стратегий на сроки лицензирования. Кроме того, рассмотрена роль государственных гарантий финансирования, а также перспективы применения модульных подземных фабрик и аддитивных технологий в конструкциях инженерных барьеров. Целью данного исследования является определение управленческих инструментов, повышающих надёжность, а также экономическую эффективность хранилищ РАО. Для её достижения использованы сравнительный, контент- и SWOT-анализ, а также case-study европейских проектов. Проанализированы восемь актуальных публикаций 2016–2025 годов. В заключении сформулированы практические рекомендации по масштабированию лучших практик для стран, формирующих собственную инфраструктуру обращения с отходами и безопасности.

ANNOTATION

This article is devoted to a systematic analysis of the introduction of modern management technologies in the design and construction of long-term storage and disposal facilities for radioactive waste. The relevance of the research is determined by the need for guaranteed isolation of highly active materials for a period of over one hundred thousand years with stricter budget constraints and nuclear supervision requirements. The novelty of this work lies in the synthesis of BIM modeling, robotic operations, and elements Combine Agile and system management principles into a single framework that allows predicting the life value of projects, the dynamics of technical risks, and the cumulative environmental impact. This article reveals the advantages of digital twins, automated monitoring, and hybrid planning techniques; analyzes the cases of Finland and Sweden; pays attention to the impact of public participation, environmental assessment, and communication strategies on licensing terms. In addition, the role of government guarantees of financing is considered, as well as the prospects for the use of modular underground factories and additive technologies in the construction of engineering barriers. The purpose of this study is to identify management tools that increase the reliability and economic efficiency of RW storage facilities. To achieve this goal, comparative, content, and SWOT analysis, as well as case-study of European projects, were used. Eight relevant publications from 2016–2025 are analyzed. In conclusion, practical recommendations are formulated on scaling best practices for countries forming their own waste management and safety infrastructure.

Ключевые слова: BIM, цифровой двойник, радиоактивные отходы, геологическое хранилище, роботизация, Agile, системный подход, экологическая экспертиза, долгосрочная безопасность, управление проектом

Keywords: BIM, digital twin, radioactive waste, geological storage, robotics, Agile, system approach, environmental expertise, long-term safety, project management

Введение

Переход атомной энергетики к замкнутому топливному циклу обуславливает потребность в

инфраструктуре долговременной изоляции высокоактивных отходов.

Цель исследования – определить, как BIM-моделирование, роботизация и гибридные управленческие методики повышают надёжность и экономическую эффективность хранилищ высокоактивных отходов. Для её достижения:

- 1) систематизированы практики применения BIM и цифровых двойников при проектировании глубоких могильников;
- 2) проанализировано влияние роботизированных комплексов и датчикового мониторинга на снижение операционных и радиационных рисков;
- 3) проведено сравнение финского и шведского проектов с точки зрения системного подхода, итеративного планирования и работы с местными сообществами.

Новизна заключается в объединении инженерных и управленческих инноваций в единую модель, позволяющую прогнозировать жизненную стоимость объекта, оптимизировать график и минимизировать совокупный риск.

Методы и материалы

С. Чатхуранга [1] исследовал использование Agile-итераций на дизайнерской стадии сложных объектов, что послужило базой для оценки гибридных методологий. Специалисты МАГАТЭ [2] сформулировали принципы многобарьерной безопасности, применённые при системном

анализе. П. Рейнольдс [3] описал первые примеры BIM в ядерной отрасли и показал экономический эффект коллизионного контроля. Авторы World Nuclear News [4] представили данные об экологическом разрешении шведского проекта, использованные для соотнесения регуляторных процедур. Ресурс [5] раскрыла этапы финского проекта Onkalo, ставшие главным case-study. Г. Роча с соавторами [6] предложили метод «Scan-to-BIM», полезный для обоснования точности геомodelей подземных выработок. Репортёры [7] привели последние сведения о старте строительства в Форсмарке, подтверждая актуальность сроков. В. Ваккьер [8] разработал модель долговременной оценки безопасности, использованную для сравнительного риск-анализа.

Для написания статьи применялись: сравнительный метод (сопоставление финских и шведских практик), контент-анализ международных нормативов и медиа-отчётов.

Результаты

Одним из новейших инструментов в ядерном строительстве стало широкое использование Building Information Modeling (BIM) (Рисунок 1).

Рисунок 1. Схема рабочего процесса информационного моделирования зданий (BIM) (составлено автором на основе [6])



Figure 1. Workflow diagram of building information modeling (BIM) (compiled by the author based on [6])

BIM представляет собой цифровую информационную модель объекта, объединяющую архитектурные, конструктивные, технологические и эксплуатационные данные. В международной практике отмечается растущее применение BIM при проектировании как новых ядерных установок, так и объектов для отходов [3].

В частности, Финляндия и Швеция – пионеры строительства глубоких геологических хранилищ – активно используют BIM. Финская компания Posiva [3], реализующая первый в мире постоянный могильник для отработанного ядерного топлива (проект Onkalo), совместно с консалтинговой фирмой Sweco [3] внедрила BIM на всех этапах проекта. BIM-модель охватывает и надземный комплекс по инкапсуляции (упаковке топлива в контейнеры), и сеть туннелей на глубине ~400 м, обеспечивая согласование между геологами, проектировщиками и строителями [3]. Шведская организация SKB, строящая аналогичное хранилище в Форсмарке, обменивается с Posiva опытом применения BIM [3]. Применение BIM дает целый ряд преимуществ: повышение точности проектных решений, выявление коллизий инженерных систем еще на стадии модели, имитация процесса строительства и обслуживания [3].

Кроме того, BIM-модель станет основой для цифрового двойника хранилища, который будет использоваться в эксплуатации для мониторинга состояния сооружений в течение всего столетнего периода заполнения и последующего закрытия. Несмотря на то что внедрение BIM в ядерной отрасли идет медленно, опыт Скандинавии демонстрирует его практическую пользу. К 2020-м годам BIM стал неотъемлемой частью передовых проектов РАО, позволяя учитывать multidisciplinary аспекты – от геологических данных до требований радиационной безопасности – в единой модели.

Международный опыт показывает, что автоматизация в проектах РАО прямо связана с безопасностью: в условиях радиоактивности использование робототехники – необходимое условие для операций, которые будут происходить после загрузки отходов (например, закрытие и запечатывание туннелей) [8].

Традиционно проекты в атомной отрасли управлялись по каскадной схеме (Waterfall) с жесткой последовательностью этапов. Однако из-за высокой степени неопределенности – особенно на этапах НИОКР и опытно-конструкторских работ при создании новых типов хранилищ – начали применяться элементы Agile [8]. Так, в Бельгии агентство ONDRAF/NIRAS, отвечающее за национальное хранилище низко- и среднеактивных отходов, сообщило об успешном использовании Agile-подхода при разработке решений для утилизации так называемых «наследованных» отходов [8].

Речь идет о сложной задаче – обеспечении захоронения старых, ранее накопленных отходов, которые весьма гетерогенны по составу. Чтобы

решить ее, команда разбила проект на короткие итерации, в каждой из которых разрабатывались и тестировались отдельные элементы технологии кондиционирования отходов. По отчетам ONDRAF/NIRAS [8], внедрение Agile-практик (инкрементальная разработка, междисциплинарные команды, регулярные обратные связи) позволило ускорить переход от идеи к первым рабочим решениям и сократило цикл НИОКР. Это важно для того, чтобы запуск поверхностного хранилища в Десселе не задерживался из-за нерешенных проблем с некоторыми видами отходов.

Важным аспектом является адаптация Agile к требованиям безопасности: в ядерной сфере недопустима философия “move fast and break things”. Поэтому гибкий подход сочетается с жестким контролем качества на каждом инкременте. Например, после каждой итерации разработки проектных решений обязательно проводится проверка на соответствие регуляторным нормам, привлекаются эксперты по ядерной безопасности для ревью – нечто вроде “Agile-stage gated” процесса. Такой гибридный подход – Agile + Stage Gate – все чаще упоминается в профессиональной литературе как перспективный для сложных инженерных систем, включая хранилища РАО [1].

Международный опыт показывает важность создания междисциплинарных команд, включающих специалистов разных профилей – проектировщиков, радиохимиков, экологов, социологов. Например, в Швеции при разработке хранилища в Форсмарке SKB привлекала не только инженеров, но и экспертов по взаимодействию с местным населением, специалистов по коммуникациям. Это связано с тем, что принятие решения о размещении хранилища – не только технический, но и социально-политический вопрос. Системный менеджмент предполагает параллельное ведение нескольких взаимосвязанных процессов: инженерного проектирования, оценки безопасности, экологической экспертизы, информационно-разъяснительной работы с общественностью. В Финляндии компания Posiva наладила регулярные встречи с жителями муниципалитета Эурайоки, где строится хранилище, предоставляя отчеты о ходе работ и результатах мониторинга окружающей среды. Такой прозрачный и всеобъемлющий подход позволил завоевать доверие общества и получить необходимые разрешения [3].

С точки зрения управления проектом, системный подход реализуется через этапность и контроль точек принятия решений (gate reviews). Например, после завершения стадии проектирования проводится обобщающий анализ: проверяется, насколько предложенное конструктивное решение отвечает всем критериям – от радиационной безопасности до экономической целесообразности. Лишь убедившись в комплексной оптимальности (посредством независимой экспертизы, peer review

международных экспертов), переходят к этапу строительства. Такой метод предотвращает ситуацию, когда узкоспециализированное оптимальное решение могло бы привести к проблемам на другом фронте (например, экономия на конструкции контейнера – к снижению безопасности). Международные стандарты (МАГАТЭ, НЕА) по захоронению РАО прямо указывают на необходимость системного, «сочетательного» подхода: безопасность достигается совокупностью решений, а не отдельной мерой [2].

Результаты работы финского и шведского проектов подтверждают: системная интеграция всех компонентов – ключ к успеху. Например, финское хранилище Onkalo основывается на шведской методике KBS-3, которая изначально разработана с учетом взаимодействия компонентов и подтверждена многолетними исследованиями [5]. При переносе этой методики Финляндия системно адаптировала ее под свои геологические условия (кристаллический грунт Олкилуото), проведя серию испытаний и учтя локальные особенности.

Современные методы управления включают жесткий контроль экологических параметров на всех стадиях. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) – обязательная часть проектов РАО. Например, в Швеции процесс лицензирования сопровождался тщательной экологической экспертизой: Правительство одобрило проект хранилища в январе 2022 года только после подтверждения, что он безопасен для людей и природы [4]. В 2024 году шведский суд по вопросам экологии выдал окончательное разрешение на строительство, установив ряд условий для защиты

окружающей среды [4]. Эти условия включают меры по предотвращению шума и оседания грунта, контролю уровня грунтовых вод, охране редких видов в районе строительства.

Аналогично, в Финляндии проект Onkalo получил «зеленый свет» только после демонстрации, что радиационное воздействие на биосферу будет ничтожно малым – в пределах десятитысячных долей естественного фона на поверхности. Для контроля экологической безопасности внедряются системы мониторинга: в районе хранилищ устанавливаются наблюдательные скважины и станции контроля воды, воздуха, грунта, периодически берутся пробы на наличие радионуклидов.

Такие требования отражают принцип, закрепленный в международной Конвенции по безопасности обращения с отработавшим топливом и РАО: защита людей и окружающей среды должна быть обеспечена как в настоящее время, так и в будущем [2].

Финляндия и Швеция являются лидерами внедрения современных методов управления в сфере РАО, что подтверждается прогрессом их проектов. Финляндия в середине 2020-х завершила строительство геологического хранилища Onkalo на площадке Олкилуото – первого в мире подобного объекта, готового принять ОЯТ (отработавшее ядерное топливо) [5]. Проект стартовал еще в 2004 г., и за это время финны разработали передовые практики управления (Рисунок 2).

Рисунок 2. Практики управления, разработанные Финляндией и Швецией (составлено автором на основе [5])



Figure 2. Management practices developed by Finland and Sweden (compiled by the author based on [5])

Применение современных методов управления – BIM, автоматизации, Agile-элементов, системного мышления – стало одним из факторов успеха этих проектов. Пример Финляндии служит образцом: комбинация новейших технологических управленческих приемов позволила первой в мире стране реализовать глубокое хранилище ОЯТ, рассчитанное на 100 000 лет безопасной изоляции [5]. Пример Швеции демонстрирует, как интегрированное управление

(одновременное проектирование хранилища и связанного с ним объекта) и упор на экологическую и социальную составляющие приводят к устойчивому прогрессу даже в сложной политической среде.

Обсуждение

Анализ внедрения современных методов управления в проектах РАО показывает их высокую эффективность, но также выявляет определенные ограничения и уроки. BIM-

технологии ощутимо улучшают координацию участников и качество проектных решений. Однако важно учитывать, что BIM-модель только тогда приносит пользу, когда все участники готовы ею пользоваться и вносить актуальные данные. Финский опыт свидетельствует о необходимости обучения персонала и адаптации подрядчиков к работе в BIM-среде. Не все подрядные организации (особенно локальные строительные компании) имеют достаточную компетенцию, поэтому лидерам проектов приходилось организовывать курсы и совместные сессии моделирования.

Кроме того, BIM-модель ядерного объекта необычайно сложна и включает множество дисциплин – от теплофизического моделирования до радиационного, – что потребовало развития специализированных библиотек компонентов (например, параметров ядерных контейнеров). Тем не менее, выгоды превысили затраты: BIM позволил заранее выявить потенциальные конфликтные ситуации (например, прокладка кабеля через зону, требующую радиационной защиты, – это было обнаружено на модели и исправлено до строительства).

Таким образом, барьеры внедрения BIM – человеческий фактор и начальные ресурсы – могут быть преодолены при поддержке руководства проекта и наличии ясного плана интеграции BIM в процессы.

Интересные выводы следуют из попыток внедрить Agile в столь регламентированную

область, как ядерное строительство. Опыт Бельгии, а также отдельные примеры внутри крупных проектов (Финляндия частично применяла итеративный подход при разработке технологии герметизации скважин) показывают, что элементы гибких методологий могут ускорить решение узких задач. Однако полный Agile (свойственный ИТ-проектам) неприменим из-за жестких требований лицензирования и безопасности.

По сути, это формирование гибридных моделей управления проектом: сочетаются фазные модели (вехи, предусмотренные законодательством – ОВОС, лицензия, etc.) и итеративная проработка отдельных компонентов. Такой подход требует высокой квалификации менеджеров, способных лавировать между разными парадигмами управления.

Оценка экологической безопасности остается краеугольным камнем проектов РАО. Как видно из опыта Швеции, даже имея передовые технологии, проект мог быть остановлен без должного учета экологических аспектов – окончательное решение затягивалось, пока не были убедительно продемонстрированы меры защиты природы. Это является важным управленческим уроком: самые современные технологии не будут реализованы, если не управлять социальными рисками. Сравнение Финляндии и Швеции выявляет и некоторые различия подходов (Таблица 1).

Таблица 1.

Сравнительная таблица подходов Швеции и Финляндии (составлено автором на основе [1-8])

Table 1.

Comparative table of approaches from Sweden and Finland (compiled by the author based on [1-8])

Критерий	Финляндия	Швеция
Управленческая модель	Централизованное взаимодействие STUK–Posiva, проблемы решаются совместно	Разделённая схема SKB → SSM, каждое изменение проходит полный цикл экспертизы
Формат работы регулятора и исполнителя	Рабочие группы, обмен необработанными данными	Формальные отчёты, публичные комментарии
Темп лицензирования	Выбор площадки 1999 → лицензия 2015	Выбор площадки 2009 → лицензия 2022
Стиль принятия решений	Узкий круг экспертов, парламент опирается на рекомендации STUK	Широкие консультации: муниципалитеты, НКО, парламентские партии
Итог по безопасности	Onkalo сертифицирован миссией IAEA ARTEMIS, срок надёжности > 100 000 лет	Forsmark одобрен OECD/NEA, сопоставимый прогноз надёжности
Международное влияние	Параллельная модель принята Францией (CIGEO) и Канадой (NWMO DGR)	Процедура публичных слушаний применяется во Франции, Канаде, Швейцарии

Итак, финская стратегия минимизировала календарные задержки за счёт плотной

координации регулятора и исполнителя, шведская обеспечила повышенную прозрачность через

строгую институциональную раздельность. Оба пути привели к сопоставимо высокому уровню долгосрочной безопасности и сформировали методическую базу для последующих проектов глубинных хранилищ.

Заключение

Интеграция BIM-моделирования, роботизации, элементов Agile и системного подхода радикально повысила управляемость проектов хранилищ РАО, что подтверждают реализуемые ныне финский Onkalo и шведский Forsmark. Совмещённые цифровые двойники, автоматизированный мониторинг и итеративная разработка инженерных решений снижают риск ошибок, ускоряют согласования с надзором и гарантируют долговременную герметичность многобарьерных систем. Обобщённый скандинавский опыт демонстрирует воспроизводимость этих практик в других юрисдикциях: BIM упрощает междисциплинарную координацию, роботизированные комплексы минимизируют влияние человеческого фактора, а гибридная Agile-/Stage-Gate-схема сокращает цикл НИОКР, не нарушая жёстких требований безопасности.

Для России и других стран ключевыми условиями трансфера являются признание цифровой модели частью официальной документации, подготовка кадров по новым стандартам и раннее вовлечение общественности в экологический диалог. Инвестиции в цифровые технологии и нормативную адаптацию окупятся сокращением сроков лицензирования и снижением совокупной стоимости жизненного цикла объекта. Современные управленческие методы тем самым превращаются из «модного» тренда в обязательный инструмент успешного и безопасного развития атомной энергетики.

Список литературы

1.Chathuranga S., Jayasinghe S., Antucheviciene J., Wickramarachchi R., Udayanga N., Weerakkody W.A.S. Practices Driving the Adoption of Agile Project Management Methodologies in the Design Stage of Building Construction Projects // Buildings. – 2023. – Vol. 13, № 4. – Art. 1079. – DOI: 10.3390/buildings13041079. – URL:

<https://doi.org/10.3390/buildings13041079> (дата обращения: 27.05.2025). – Текст : электронный.

2.Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories. – Vienna : IAEA, 2020. – (IAEA Nuclear Energy Series ; No. NW-T-1.27). – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1908_web.pdf (дата обращения: 26.05.2025). – Текст : электронный.

3.Engaging with BIM // Nuclear Engineering International. – 2016. – URL: <https://www.neimagazine.com/advanced-reactorsfusion/engaging-with-bim-5672206/> (дата обращения: 25.05.2025). – Текст : электронный.

4.Environmental Permit Granted for Swedish Repository // World Nuclear News. – 2024. – URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/environmental-permit-granted-for-swedish-repository> (дата обращения: 27.05.2025). – Текст : электронный.

5.Finland to Open the World's First Final Repository for Spent Nuclear Fuel // Vattenfall. – 2023. – URL: <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2023/finland-to-open-the-worlds-first-final-repository-for-spent-nuclear-fuel> (дата обращения: 24.05.2025). – Текст : электронный.

6.Rocha G., Cotrim Mateus L. M., Garcia Fernandez J., Ferreira V. M. A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings // ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/339097240_A_Scan-to-BIM_Methodology_Applied_to_Heritage_Buildings (дата обращения: 25.05.2025). – Текст : электронный.

7.Sweden Begins Construction of Spent Nuclear Fuel Storage // Energy Monitor. – 2025. – URL: <https://www.energymonitor.ai/news/sweden-spent-nuclear-fuel-storage/> (дата обращения: 27.05.2025). – Текст : электронный.

8.Wacquier W., Denul J. Long-term Safety of Geological Disposal Systems // International Atomic Energy Agency. – 2023. – URL: https://conferences.iaea.org/event/330/contributions/28799/attachments/15151/25017/WACQUIER_IAEASnS2023_147_Full%20Paper%20vfin.pdf (дата обращения: 23.05.2025). – Текст : электронный.

**ТРАНСФОРМАЦИЯ СЕТЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ В СТОРОНУ АВТОМАТИЗАЦИИ
В ЦЕНТРАХ МОНИТОРИНГА**

*Сакаева Ольга Валерьевна**Инженер мониторинга мобильной сети,
Инженер по поддержке мобильной сети 1 категории
Уфа, РФ***TRANSFORMATION OF NETWORK OPERATIONS TOWARDS AUTOMATION
IN MONITORING CENTERS***Sakaeva Olga**Mobile Network Monitoring Engineer,
Category 1 Mobile Network Support Engineer
Ufa, Russian Federation*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2180

АННОТАЦИЯ

В работе осуществлен анализ эволюции операционных процессов NOC в сторону сквозной автоматизации. Последовательно рассматриваются этапы трансформации: от внедрения систем сбора и создания больших данных до интеграции интеллектуальных механизмов анализа. Также исследуются технические и организационные барьеры на каждом из них. Цель работы заключается в систематизации стадий перехода NOC современных мобильных сетей (2G–5G) к автоматизированным сценариям работы, а также в оценивании вклада искусственного интеллекта и машинного обучения в обеспечение проактивного и предиктивного мониторинга. Полученные результаты демонстрируют, что поэтапная стратегия автоматизации, предполагающая применение Big Data-аналитики для обработки потоков телеметрии, RPA-скриптов для отработки типовых инцидентов, позволяет повысить скорость обнаружения и устранения неисправностей. Интеллектуальные модули на базе алгоритмов глубокого обучения и методов временных рядов обеспечивают предиктивную оценку риска возникновения критических сбоев, что сокращает время простоя и улучшает качество обслуживания абонентов. В заключение подчёркивается, что автоматизация NOC становится важным условием для устойчивого развития телекоммуникационных сетей: она не только снижает операционные затраты, но и формирует новые требования к компетенциям инженеров. Полученные выводы могут быть использованы специалистами по сетевому управлению, исследователями в области автоматизации и руководителями, отвечающими за долгосрочное развитие сетевой инфраструктуры.

ABSTRACT

The paper analyzes the evolution of NOC operational processes towards end-to-end automation. The stages of transformation are consistently considered: from the introduction of systems for collecting and creating big data to the integration of intelligent analysis mechanisms. The technical and organizational barriers on each of them are also being investigated. The aim of the work is to systematize the stages of transition from modern mobile networks (2G–5G) to automated work scenarios, as well as to evaluate the contribution of artificial intelligence and machine learning to proactive and predictive monitoring. The results obtained demonstrate that a step-by-step automation strategy involving the use of Big Data Analytics to process telemetry streams and RPA scripts to work out typical incidents can increase the speed of troubleshooting. Intelligent modules based on deep learning algorithms and time series methods provide predictive assessment of the risk of critical failures, which reduces downtime and improves the quality of customer service. In conclusion, it is emphasized that NOC automation is becoming an important condition for the sustainable development of telecommunication networks.: It not only reduces operating costs, but also creates new requirements for the competencies of engineers. The findings can be used by network management specialists, automation researchers, and managers responsible for the long-term development of network infrastructure.

Ключевые слова: автоматизация NOC, мониторинг мобильных сетей, 5G, искусственный интеллект, машинное обучение, NFV, SDN, трансформация операций, GSM.

Keywords: NOC automation, mobile network monitoring, 5G, artificial intelligence, machine learning, NFV, SDN, operations transformation, GSM.

Введение

Современная эволюция мобильных инфраструктур — от сетей второго поколения (2G) до пятого (5G) и параллельно развивающихся систем IoT сопровождается изменением объёмов передаваемой информации и усложнением топологии сетей [6]. По прогнозам компании Ericsson, к 2027 г. 5G впервые обгонит 4G в качестве доминирующей технологии мобильного

доступа по подписке. Несмотря на то, что охват населения 5G растёт во всем мире, сети среднего диапазона 5G развернуты только примерно в 30% всех объектов по всему миру. Для использования всего потенциала 5G требуется дальнейшее уплотнение сетей среднего диапазона и развертывание автономных сетей 5G (SA). Отмечается, что на мировом рынке к 2030 году подписки 5G достигнет - 6,3 млрд долларов и

составит 67% от общего числа мобильных подписок [7]. Однако такая динамика повышает нагрузку на центры управления и мониторинга сетей (Network Operations Centers, NOC), ответственные за поддержание бесперебойности и высокого уровня предоставляемых сервисов. Традиционные методы контроля, основанные преимущественно на ручных операциях и реактивном устранении сбоев, теряют свою эффективность в условиях растущей сложности и скорости функционирования сетей.

Актуальность исследования определяется потребностью операторов связи трансформировать свои NOC через автоматизацию для повышения операционной эффективности, уменьшения MTTR (Mean Time to Repair) и обеспечения стабильного уровня QoS (Quality of Service) в гетерогенных, динамично меняющихся сетевых средах. При этом существует научный разрыв, выраженный в отсутствии системного подхода к поэтапному внедрению автоматизации с учётом интеграции решений на базе искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) не только для локальных задач, но и для создания комплексных систем предиктивного и превентивного мониторинга.

Цель исследования заключается в проведении анализа механизмов и существующих этапов перехода операций NOC к автоматизированной модели в контексте мобильных сетей.

Научная новизна заключается в описании структурированной модели стадий автоматизации NOC, адаптированной к сетям 2G–5G, с акцентом на комплексное применение AI/ML-инструментов для проактивного и предиктивного мониторинга.

Предполагается, что поэтапный, управляемый данными подход к автоматизации, интегрирующий AI/ML-инструменты, способен повысить скорость и точность выявления инцидентов, углубить анализ причин и тем самым улучшить операционную эффективность центров мониторинга мобильных сетей, одновременно требуя трансформации набора компетенций для инженеров мониторинга.

Материалы и методы

Имеющиеся исследования возможно условно можно разделить на пять тематических групп. В первую входят работы, посвящённые эволюции и инфраструктурным основам 5G. Ермакова А. В., Бабенко К. А. и Мирошникова Н. Е. [1] исследуют состояние развертывания пятого поколения сетей и выделяют технологические драйверы, необходимые для эффективных систем мониторинга. Отчёт GSMA Intelligence «The Mobile Economy 2024» [6] предоставляет статистику роста абонентских подключений и прогнозов по инвестиционной привлекательности мобильных сетей. Ericsson Mobility Report [7], акцентирует внимание на усложнении архитектур и потребности в автоматизированных инструментах оркестрации сетевых функций. Использование программно-определяемых сетей (SDN) как основы гибкой маршрутизации и быстрого масштабирования

анализирует Мехди Д. Б. [9], предлагая классификацию методов применения SDN в контексте IMT-2020. Кипнгетич С. [10] рассматривает интеграцию URLLC для обеспечения сверхнизкой задержки и её влияние на модульность архитектуры центра мониторинга.

Во вторую группу входят исследования систем безкассового управления («zero touch management»). Коронадо Э., Хан М. А., Риджио Р. [3] проводят классификацию существующих решений, основанных на декларативном описании SLA и автоматизированной оркестрации через сервисно-ориентированные подходы. Лианж М., Порамбаж П., Талеб В. [14] рассматривают требования стандарта ZSM и выделяют архитектурные компоненты для замкнутых циклов управления без участия оператора. Багаа М., Талеб Т., Флинч Х., Бернье Ю. [11] предлагают концепцию, в которой агенты разных уровней сети взаимодействуют через унифицированные API для адаптивного распределения ресурсов. Акинаде А. О., Также О. А., Омосехин О. А., Акинъеле Ю. [13] разрабатывают концептуальную модель автоматизации сетевой безопасности с возможностями автоподстройки политик доступа и детекции инцидентов в мультивендорных окружениях.

Третья группа фокусируется на применении методов машинного обучения к анализу трафика и прогнозной аналитике. ДеАлмейда Х.М., Силва И.Н., Тейшейра К.А., Серкейра Э. [2] предлагают алгоритм категоризации трафика мобильных сетей с последующим обнаружением аномалий на основе моделей поведения узлов. Бемани А., Бьёрселл Н. [5] исследуют стратегии агрегирования параметров для федеративного обучения в задачах предиктивного обслуживания, подчёркивая баланс между приватностью данных и скоростью сходимости модели. Более абстрактный, но перспективный взгляд на аппаратное ускорение аналитических задач в центрах мониторинга даёт Агарков Ю. Ю. [15], рассматривая методы машинного обучения для оптимизации проектирования нейроморфных систем.

Четвёртая группа включает работы по автоматизированному тестированию и оценке сетевых решений. Киргизбаев С. П., Киргизбаев В. П. [4] применяют искусственный интеллект для генерации и проведения сценариев penetration testing, демонстрируя снижение времени подготовки и повышение полноты покрытия векторов атак. Седар Р., Рибейро Т.А.Р., Диас К.Х., Алмейда Ж.М. и др. [8] разрабатывают стандартизованное мультипротокольное решение для использования в мультивендорных средах, позволяющее унифицировать сбор и обработку метрик качества обслуживания.

Пятая группа отражает организационный и процессный уровень цифровой трансформации: исследование TAdviser анализирует кейсы внедрения автоматизированных workflow, RPA-решений и интеграции платформ мониторинга,

подчёркивая факторы успеха и основные барьеры в корпоративной культуре [12].

Однако, несмотря на общий вектор движения к полной автоматизации центров мониторинга, в литературе выявляются противоречия: одни авторы выступают за строго централизованную архитектуру оркестрации [3, 14], тогда как другие подчёркивают гибкость федеративных моделей [5]. Кроме того, рассогласование между технологическими исследованиями [9, 10] и организационными рекомендациями [12] указывает на пробел в интеграции технических и управленческих подходов. Недостаточно изучены вопросы масштабируемости AI-моделей в реальном сетевом трафике, стандартизации телеметрии в мультивендорных средах и взаимосвязи аппаратного ускорения (нейроморфных систем) с практическими сценариями автоматизации.

Результаты и обсуждения

Современные центры наблюдения за мобильными сетями вынуждены решать глубокие и многоплановые задачи, вызванные как самим развитием телекоммуникационных инфраструктур, так и всё более строгими требованиями абонентов. Исторически операции NOC опирались на постоянный контроль элементов сети, включая eNodeB/gNodeB, BSC/RNC, EPC/5GC, а также на оперативное обнаружение аномалий и сбоев с последующей эскалацией и их устранением вручную со стороны инженерного персонала. В ответственность инженеров входило круглосуточное отслеживание состояния сети, выявление и классификация инцидентов, анализ ключевых показателей эффективности (KPI) и координация с другими подразделениями для ликвидации причин деградации качества сервиса. Для этих целей широко применялись как внутренние платформы, такие как (U2000, M2000), так и решения сторонних вендоров — например, Ericsson OSS, Nokia NetAct.

С приходом пятого поколения мобильных сетей ситуация изменилась: качество обслуживания (QoS) теперь зависит не только от параметров радиоинтерфейса, но и от состояния виртуализованных подсистем (NFV/SDN), что привело к резкому увеличению объёмов собираемых данных и усложнению их обработки. В

сочетании с обязательством мгновенно реагировать на инциденты это обуславливает необходимость перехода к продвинутой автоматизации, которая становится не просто оптимизацией, а обязательным элементом операционной стратегии. Главными факторами, ускоряющими автоматизацию, выступают: экспоненциальное нарастание трафика, давление на сокращение операционных расходов (OpEx), стремление ускорить вывод новых услуг на рынок (Time-to-Market) и, прежде всего, поддержание стабильно высокого уровня пользовательского опыта (QoE).

Трансформация NOC в автоматизированный центр проходит через несколько этапов, каждый из которых отражает глубину внедрения интеллектуальных систем в операционные процессы:

1. Ассистируемые операции. На этом этапе реализованы системы агрегации и визуализации данных, а также базовые механизмы сигнализации об инцидентах, однако анализ и устранение неполадок остаются прерогативой инженерных команд, работающих с платформами.

2. Частичная автоматизация. Появляются инструменты автоматизированной диагностики, системы корреляции событий на основе предопределённых правил и скрипты для выполнения типовых процедур восстановления.

3. Условная автоматизация. Начинает применяться машинное обучение и искусственный интеллект для предиктивного анализа и интеллектуального определения аномалий, выходящих за рамки статических порогов, а также для поддержки процессов RCA (Root Cause Analysis) [2, 5].

4. Высокая степень автоматизации. Формируются самовосстанавливающиеся сети (self-healing), механизмы «zero-touch provisioning» для динамического выделения ресурсов и системы intent-ориентированного управления (Intent-Based Networking).

5. Полностью автономные операции. Это видение будущего, где сети на основе когнитивных алгоритмов способны к самостоятельной оптимизации, ориентированной на бизнес-цели и непрерывное обучение [11].

Для визуализации данной поэтапной эволюции ниже представлен рисунок 1.



Рис.1. Концептуальная модель поэтапной трансформации НОС к автоматизации [3, 11, 14].

Современная эволюция Центров сетевых операций базируется на синергии передовых цифровых решений, призванных повысить адаптивность, предиктивность и автономность управления сетевой инфраструктурой. В число технологических компонентов этой трансформации входят методы искусственного

интеллекта и машинного обучения, способные обрабатывать гигантские массивы данных, выявлять скрытые закономерности и формировать прогнозы для оптимизации работы ресурсов [1, 15]. В таблице 1 представлены преимущества и недостатки трансформации сетевых операций при автоматизации в центрах мониторинга.

Таблица 1

Преимущества и недостатки трансформации сетевых операций при автоматизации в центрах мониторинга [5, 13, 14].

Преимущества	Недостатки	Тенденции развития
- Ускорение реакции на инциденты за счёт автоматического обнаружения и оповещения.	- Высокая начальная стоимость внедрения автоматизированных платформ и инструментов.	- Искусственный интеллект и машинное обучение для прогнозирования отказов и аномалий (прогностический мониторинг).
- Снижение числа ошибок и «человеческого фактора» при выполнении рутинных операций (конфигурация, патчинг).	- Сложность интеграции с существующей инфраструктурой и разнородным оборудованием.	- Self-healing-сети (автоматическое исправление неисправностей без участия оператора).
- Экономия ресурсов: меньше ручного труда, оптимизированное использование каналов и вычислительных мощностей.	- Риск ложных срабатываний и «шум» в алертах при некорректно настроенных правилах автоматизации.	- Observability-платформы (Unified Observability) с консолидацией логов, метрик и трассировок в едином хранилище.
- Круглосуточный мониторинг без «усталости» операторов.	- Необходимость высокой квалификации персонала для разработки, настройки и поддержки автоматизации.	- Intent-based networking и zero-touch provisioning — сети, настраиваемые «по заданному намерению» с минимальным ручным вводом.
- Прогностический анализ и предиктивное обслуживание (Predictive Maintenance).	- Уязвимость к кибератакам, если автоматизированные механизмы контроля недостаточно защищены.	- Edge computing и распределённый мониторинг — аналитика и автоматизация ближе к источнику данных для снижения задержек.
- Масштабируемость процессов, быстрая адаптация к росту трафика и новых сервисов.	- Зависимость от поставщика (vendor lock-in) при использовании проприетарных решений.	- DevNetOps / NetDevOps — интеграция сетевых операций в конвейеры CI/CD для ускорения развёртывания и тесной связи с разработкой приложений.

В условиях растущей сложности проектов особую роль приобретает междисциплинарное взаимодействие: будет претерпевать значительную

перестройку, требуя выработки новых протоколов координации, стандартов обмена данными и моделей совместного принятия решений.

Исторически инженер по мониторингу в крупной телеком-среде фокусировался на постоянном реактивном отслеживании ключевых показателей и ручном устранении неисправностей. В преобразующемся автоматизированном NOC приоритеты смещаются в сторону проактивного анализа больших объёмов телеметрии, разработки и сопровождения сценариев автоматизации инцидентов, надзора за интеллектуальными компонентами и участия в оптимизации

алгоритмических решений AI/ML. Для этого требуется не только понимание сетевых стандартов от 2G и 3G до 4G и начальной архитектуры 5G, но и владение методами статистического анализа, навыки программирования и основы машинного обучения [8, 12].

Иллюстративно эволюция набора компетенций инженера NOC отражена на рисунке 2.

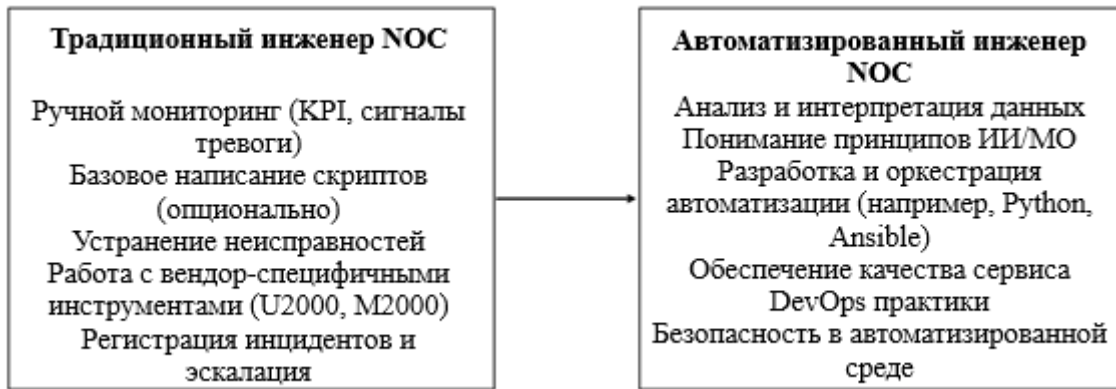


Рис.2. Эволюция набора компетенций инженера NOC [4]

Настоящее исследование предлагает концептуально новый подход к развитию операционных центров сетевого мониторинга (NOC). В основе лежит идея, что даже при внедрении самых передовых автоматизированных решений «человеческий фактор» остаётся критическим элементом. Не подразумевается полная замена инженеров алгоритмами: напротив, формируется образ «AI-аугментированного» специалиста, способного выстраивать продуктивный диалог с интеллектуальными системами, осуществлять их системную верификацию и своевременно брать на себя управление в экстренных ситуациях. Однако такой подход требует внедрения программ непрерывного профессионального развития, ориентированных на расширение компетенций в области машинного обучения и анализа больших данных. Сложность представляет мультивендорная архитектура, когда в одном сегменте сети задействованы решения разных вендоров, а в другом используются платформы Ericsson или Nokia. Работа в такой среде предъявляет к инженерам повышенные требования по знанию разнообразных протоколов, интерфейсов и механизмов интеграции.

Таким образом, трансформация сетевых операций в сторону автоматизации является комплексной задачей, требующей не только технологических инноваций, но и пересмотра операционных моделей и подходов к развитию персонала.

Заключение

Проведённый анализ демонстрирует, что трансформация процессов сетевого мониторинга в операторских NOC-модулях мобильных сетей из разряда технологической моды перешла в разряд

стратегического императива. Рост числа подключений, усложнение топологий и экспоненциальное увеличение объёмов передачи данных предъявляют к операторам требования по обеспечению максимально коротких задержек реакции и высочайшего уровня доступности сервисов. Это, в свою очередь, ставит автоматизацию в центр внимания как ключевой инструмент повышения операционной эффективности и гарантии качества обслуживания.

Обобщение результатов анализа литературы дало возможность выделить четыре этапа эволюции NOC-процессов: ручное (ассистируемое) выполнение задач, полуавтоматизированные процедуры, полностью автоматизированные сценарии и, в перспективе, автономные замкнутые системы с обратной связью. Критическим компонентом данного пути является интеграция методик машинного обучения и искусственного интеллекта, которые вместе с технологиями больших данных, SDN/NFV и RPA обеспечивают переход от реактивного реагирования к проактивному и предиктивному управлению сетевой инфраструктурой.

В результате сформулирована концепция «AI-аугментированных» инженерных команд, где синергия алгоритмических моделей и профессионального опыта специалистов позволяет строить гибкие и адаптивные механизмы анализа аномалий и оптимизации сетевых процессов. Роль инженера NOC трансформируется: он перестаёт быть только исполнителем рутинных операций и становится архитектором автоматизационных сценариев, аналитиком больших данных, разработчиком механизмов оркестрации и контролёром интеллектуальных систем.

Направления дальнейших исследований могут включать разработку унифицированных методик оценки зрелости автоматизации NOC, изучение этических и нормативно-правовых аспектов использования AI в инфраструктурных сервисах, а также создание совершенных моделей человеко-машинного взаимодействия, способных обеспечить надёжность и прозрачность автоматизированных решений в условиях непрерывного роста требований к мобильным сетям.

Литература

1. Ермакова А. В., Бабенко К. А., Мирошникова Н. Е. Текущее состояние и перспективы развития сети 5G // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 21–28.

2. DeAlmeida J. M., Silva I. N., Teixeira C. A., Cerqueira E. Abnormal behavior detection based on traffic pattern categorization in mobile networks // IEEE Transactions on Network and Service Management. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 4213–4224. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3125019>.

3. Coronado E., Khan M. A., Riggio R. Zero touch management: A survey of network automation solutions for 5G and 6G networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 2535–2578. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3212586>.

4. Киргизбаев С. П., Киргизбаев В. П. Применение искусственного интеллекта для автоматизированного тестирования на проникновение // Актуальные и перспективные научные исследования 3. – 2024. – С. 52–54.

5. Bemani A., Björnsell N. Aggregation strategy on federated machine learning algorithm for collaborative predictive maintenance // Sensors. – 2022. – Т. 22, № 16. – С. 6252. <https://doi.org/10.3390/s22166252>

6. The Mobile Economy 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gsmainelligence.com/research/the-mobile-economy-2024> (дата обращения: 12.05.2025).

7. Ericsson Mobility Report [Электронный ресурс]. – 2024. – 40 с. – Режим доступа: https://newsletter.radensa.ru/wp-content/uploads/2024/11/Ericsson_Mobility-Report_2024-40-pgs.pdf (дата обращения: 16.05.2025).

8. Sedar R., Ribeiro T. A. R., Dias K. H., Almeida J. M. и др. Standards-compliant multi-protocol on-board unit for the evaluation of connected and automated mobility services in multi-vendor environments // Sensors. – 2021. – Т. 21, № 6. – С. 2090. <https://doi.org/10.3390/s21062090>

9. Мехди Д. Б. Анализ современных, устоявшихся методов применения технологии SDN в 5G/IMT-2020 // T-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15, № 10. – С. 28–37. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-10-28-37>

10. Kipng'etich C. 5G Network Integration for Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) // Journal of Advanced Technology and Systems. – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 48–58.

11. Baga M., Taleb T., Flinck H., Bernier Y. Collaborative cross system AI: toward 5G system and beyond // IEEE Network. – 2021. – Т. 35, № 4. – С. 286–294. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000607>

12. Лучшие практики цифровой трансформации сервисных процессов в российских корпорациях. Результаты исследования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Лучшие_практики_цифровой_трансформации_сервисных_процессов_в_российских_корпорациях (дата обращения: 22.05.2025).

13. Akinade A. O., Alao O. A., Omosehin O. A., Akinyele Y. A conceptual model for network security automation: Leveraging AI-driven frameworks to enhance multi-vendor infrastructure resilience // International Journal of Science and Technology Research Archive. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 39–59. <https://doi.org/10.53771/ijstra.2021.1.1.0034>

14. Liyanage M., Porambage P., Taleb T. A survey on zero touch network and service management (ZSM) for 5G and beyond networks // Journal of Network and Computer Applications. – 2022. – Т. 203. – С. 103362. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103362>

15. Агарков Ю. Ю. Методы машинного обучения для оптимизации проектирования нейроморфных систем // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 6. – С. 313–319.

References

1. Ermakova A. V., Babenko K. A., Miroshnikova N. E. Current state and development prospects of the 5G network // Telecommunications and information technologies. - 2021. - Vol. 8, No. 1. - P. 21-28.

2. DeAlmeida J. M., Silva I. N., Teixeira C. A., Cerqueira E. Abnormal behavior detection based on traffic pattern categorization in mobile networks // IEEE Transactions on Network and Service Management. - 2021. - Vol. 18, No. 4. - P. 4213-4224. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3125019>.

3. Coronado E., Khan M. A., Riggio R. Zero touch management: A survey of network automation solutions for 5G and 6G networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. - 2022. - Vol. 24, No. 4. - P. 2535–2578. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3212586>.

4. Kirgizbaev S. P., Kirgizbaev V. P. Application of artificial intelligence for automated penetration testing // Actual and promising scientific research 3. - 2024. - P. 52–54.

5. Bemani A., Björnsell N. Aggregation strategy on federated machine learning algorithm for collaborative predictive maintenance // Sensors. – 2022. – V. 22, No. 16. – P. 6252. <https://doi.org/10.3390/s22166252>

6. The Mobile Economy 2024 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gsmainelligence.com/research/the-mobile-economy-2024> (accessed: 12.05.2025).

7. Ericsson Mobility Report [Electronic resource]. – 2024. – 40 p. – Access mode: https://newsletter.radensa.ru/wp-content/uploads/2024/11/Ericsson_Mobility-Report_2024-40-pgs.pdf (accessed: 16.05.2025).

8.Sedar R., Ribeiro T. A. R., Dias K. H., Almeida J. M. и др. Standards-compliant multi-protocol on-board unit for the evaluation of connected and automated mobility services in multi-vendor environments // *Sensors*. - 2021. - Vol. 21, No. 6. - P. 2090. <https://doi.org/10.3390/s21062090>

9.Mehdi D. B. Analysis of modern, established methods of applying SDN technology in 5G/IMT-2020 // *T-Comm - Telecommunications and Transport*. - 2021. - Vol. 15, No. 10. - P. 28–37. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-10-28-37>

10.Kipng'etich C. 5G Network Integration for Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) // *Journal of Advanced Technology and Systems*. - 2023. - Vol. 1, No. 1. - P. 48-58.

11.Bagaa M., Taleb T., Flinck H., Bernier Y. Collaborative cross system AI: toward 5G system and beyond // *IEEE Network*. - 2021. - Vol. 35, No. 4. - P. 286-294. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000607>

12.Best practices for digital transformation of service processes in Russian corporations. Research

results [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.tadviser.ru/index.php/Article:>

Best_practices_of_digital_transformation_of_service_processes_in_Russian_corporations (access date: 05/22/2025).

13.Akinade A. O., Alao O. A., Omosehin O. A., Akinyele Y. A conceptual model for network security automation: Leveraging AI-driven frameworks to enhance multi-vendor infrastructure resilience // *International Journal of Science and Technology Research Archive*. – 2021. – T. 1, No. 1. – P. 39–59. <https://doi.org/10.53771/ijstra.2021.1.1.0034>

14.Liyanage M., Porambage P., Taleb T. A survey on zero touch network and service management (ZSM) for 5G and beyond networks // *Journal of Network and Computer Applications*. - 2022. - Vol. 203. - P. 103362. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103362>

15.Agarkov Yu. Yu. Machine learning methods for optimizing the design of neuromorphic systems // *Innovations and Investments*. - 2023. - No. 6. - P. 313–319.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСТРЕННОЙ ВЗАИМОПОМОЩИ

Ярыга Андрей Дмитриевич
Инженер-программист, ООО МВП
Минск, Беларусь

CURRENT MODELS FOR IMPLEMENTING CRASH DETECTION IN DIGITAL MOBILE PLATFORMS

Yaryha Andrei
Software Engineer, MVP LLC
Minsk, Belarus

DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2181](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2181)

АННОТАЦИЯ

В современной практике дорожной безопасности критически важно максимально сократить время от момента столкновения до начала помощи, поскольку своевременное оповещение экстренных служб напрямую повышает шансы выживаемости пострадавших. Настоящая статья адресует эту задачу через разработку методологической модели мобильной платформы экстренной взаимопомощи. Объединяя пороговые сенсорные технологии (акселерометр, GPS) с автоматическим анализом видеопотока на основе сверточных нейронных сетей и принципами федеративного обучения, что позволяет детектировать лобовые и одиночные столкновения без передачи сырых персональных данных в облако. Описаны ключевые архитектурные решения — централизованное облачное и распределённое федеративное — а также механизмы фильтрации ложных срабатываний, маршрутизации SOS-сообщений и сохранения конфиденциальности. На основе обзора существующих систем был сформирован единый подход, включающий валидацию в полевых условиях и симуляциях. Полученная методология задаёт прочную основу для создания мобильных решений, способных надёжно и быстро реагировать на ДТП, координировать помощь и обеспечивать защиту пользовательских данных.

ABSTRACT

In modern road safety practice, it is critically important to minimize the time between the moment of collision and the start of assistance, since prompt notification of emergency services directly increases the chances of survival for those involved. This article addresses this challenge by developing a methodological model for a mobile emergency mutual-aid platform. By combining threshold-based sensor technologies (accelerometer, GPS) with automated video-stream analysis via convolutional neural networks and federated learning principles, the system can detect head-on and single-vehicle collisions without transmitting raw personal data to the cloud. Key architectural solutions—centralized cloud-based and distributed federated—are described, along with mechanisms for filtering false alarms, routing SOS messages, and preserving privacy. Based on a review of existing systems, a unified approach has been formulated that includes field and simulation validation. The resulting methodology provides a solid foundation for creating mobile solutions capable of reliably and rapidly responding to traffic incidents, coordinating assistance, and protecting user data.

Ключевые слова: мобильные платформы, экстренная взаимопомощь, детектирование аварий, глубокое обучение, Federated Learning, безопасность дорожного движения, SOS-функция, ложные вызовы, распределённые системы.

Keywords: mobile platforms, emergency mutual aid, crash detection, deep learning, Federated Learning, road safety, SOS function, false calls, distributed systems.

Введение

Безопасность дорожного движения остаётся одним из важнейших приоритетов в глобальном масштабе: по оценкам Всемирной организации здравоохранения [16], ежегодно в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) гибнут порядка 1,25 миллиона человек и ещё больше получают травмы различной степени тяжести. Эти цифры свидетельствуют о том, что фактор своевременного реагирования при авариях играет критическую роль в сохранении жизни пострадавших [10]. Незамедлительная передача информации о столкновении в экстренные службы способна значительно сократить «золотой час» – период, когда быстрая помощь наиболее эффективна [4].

В этом контексте всё большую значимость приобретают мобильные приложения и связанные с ними интернет-сервисы, которые обеспечивают автоматический сбор и передачу данных о возможном ДТП, а также предоставляют механизмы координации помощи [12]. Такие решения позволяют получать данные от множества сенсоров (акселерометр, GPS и пр.) и камер, оперативно формировать уведомления для служб спасения и участников дорожного движения, сокращая время отклика [11]. Внедрение подобных приложений даёт возможность:

- Обнаруживать аварии на основе датчиков ускорения, изменения траектории и видеоматериала [7];

- Автоматически рассылать сигналы SOS и другую сопутствующую информацию [9];

- Организовывать сетевые взаимодействия между водителями и медицинскими службами [3].

Создание мобильной платформы, способной эффективно обрабатывать информацию о ДТП, предполагает комплексный подход, охватывающий анализ аварийности, проектирование алгоритмов обнаружения столкновений и реализацию механизмов массового оповещения [5, 15]. С одной стороны, нужны сравнительно простые пороговые методы, работающие с акселерометром и GPS-датчиками [1, 15]; с другой – более сложные методы компьютерного зрения и глубоких нейронных сетей, позволяющих регистрировать лобовые и одиночные столкновения [5]. В дополнение к этому, актуальной становится задача маршрутизации сигналов и координации пользователей, находящихся поблизости, чтобы они могли оказать первичную помощь до приезда специалистов [6].

Таким образом, цель настоящей статьи – рассмотреть и обосновать методологические подходы к созданию и внедрению мобильной платформы, способной выявлять критические дорожные ситуации (ДТП и схожие инциденты) и

организовывать экстренную взаимопомощь. Достижение данной цели предполагает системную интеграцию сенсорных данных, алгоритмов машинного обучения (включая распределённые методы Federated Learning), а также построение эффективной инфраструктуры оповещения о происшествиях.

Анализ научных работ показывает множество решений для автоматической детекции столкновений и информирования заинтересованных сторон. Так, работа [15] концентрируется на граничных значениях ускорения и скорости, что позволяет в реальном времени отправлять сигнал о возможной аварии. Более продвинутая система «DeepCrash» [5] использует глубокие нейронные сети для классификации типа столкновения (лобовое, одиночное и т. д.) и формирует экстренные уведомления. Направление Near Crash Detection, описанное в [6], ставит акцент на предиктивных алгоритмах и потенциале федеративного обучения для повышения точности.

При этом разработчики мобильных приложений всё чаще объединяют функции навигации, социального взаимодействия и моментального оповещения, позволяя участникам оперативно реагировать на аварии, формировать группы взаимопомощи и координировать действия на месте инцидента [7, 8]. Часть задач, таких как интеграция акселерометрических данных и базовых алгоритмов детектирования, уже решена [2], однако совершенствование методов компьютерного зрения [5], маршрутизации вызовов [14] и взаимодействия с офлайн-службами [13] требует дальнейших методологических разработок. Данная статья нацелена именно на преодоление существующих пробелов и формирование единой концепции проектирования мобильной платформы экстренной взаимопомощи, включающей и сенсорные алгоритмы, и интеллектуальные сети связи, и интерфейсы взаимодействия.

1. Теоретические и технологические основы создания платформ экстренной взаимопомощи

Теоретические и технологические основы создания платформ экстренной взаимопомощи представляет собой систематический обзор существующих методов обнаружения аварий, анализ современных подходов с применением глубокого обучения и распределённых технологий, а также постановку ключевых требований к разработке мобильных решений для экстренного реагирования. В классических схемах ДТП-детекции широко используются акселерометрические и навигационные датчики, что позволяет за счёт пороговых значений определять факт резкого замедления, превышения скорости или нехарактерных колебаний. Как

показали Yee и Lau [15], достаточно контролировать изменение ускорения и GPS-параметров, чтобы обеспечить базовое распознавание столкновений. Сходный принцип лежит в основе алгоритмов сигнализации, где при определённом уровне перегрузки по оси X/Y/Z в течение нескольких миллисекунд формируется экстренное уведомление о возможном ДТП [4]. Однако такие решения уязвимы к ложным срабатываниям и не всегда учитывают сложную динамику реальных аварийных ситуаций [16].

Для повышения точности некоторые авторы рекомендуют вводить дополнительные параметры, например, акустический уровень шума, фиксируемый микрофоном, или угловую скорость по гиродатчикам [1, 9]. Так, Ali и Alwan [2] предлагают вычислять «индекс столкновения» (Collision Index, ci), суммируя нормированные значения максимальной акселерометрии и звуковой амплитуды:

$$ci = \frac{MaxAcc}{AccThreshold} + \frac{MaxSound}{SoundThreshold}$$

где $MaxAcc$ — максимальное ускорение в момент предполагаемой аварии, $AccThreshold$ — средний эталонный уровень ускорения при ДТП, $MaxSound$ и $SoundThreshold$ аналогично интерпретируются для шумовых показателей. Если ci превышает определённый порог, система расценивает ситуацию как ДТП. При всех достоинствах этот подход остаётся в рамках «грубого» детектирования: он не всегда различает, насколько серьёзно повреждение автомобиля, не даёт контекстуального описания вида столкновения и требует калибровок под разные модели машин.

Современные методы диагностики аварий активно используют глубокое обучение и анализ потокового видео, что позволяет регистрировать лобовые и одиночные столкновения в сложных сценариях, включая высокие скорости, ночную езду и неблагоприятную погоду [5]. Ключевой идеей здесь выступает автоматическая классификация кадров в реальном времени: модели на базе свёрточных нейронных сетей (CNN) способны выявлять характерные визуальные паттерны (деформация кузова, изменение положения транспортного средства и пр.), одновременно сопоставляя их с телеметрическими данными [4, 11]. Такой гибридный подход, где сигналы с акселерометра и GPS дополняются компьютерным зрением, реализован в системе DeepCrash [5]: алгоритм различает лобовые, боковые и одиночные аварии, генерируя экстренные уведомления с уточнёнными координатами события.

Отдельного внимания заслуживает концепция Near Crash Detection, рассматриваемая Djenouri и соавторами [6]. В этом подходе акцент смещается на прогнозирование потенциально опасных ситуаций ещё до факта столкновения, что особенно востребовано в интеллектуальных транспортных

системах [12]. Для повышения надёжности и сохранения конфиденциальности данных автовладельцев авторы используют федеративное обучение (Federated Learning). Модель обучается на множестве локальных устройств, не передавая «сырые» персональные данные в центральное облако, а только агрегируя локальные веса и генерируя глобальную модель [6, 8]. Подобная архитектура позволяет объединить опыт пользователей из разных регионов без рисков утечки приватной информации и одновременно улучшить выявление аномалий, связанных с конкретными дорожными условиями.

Связь с архитектурой мобильных платформ экстренной помощи отражается в том, что классический «облачный» сценарий может вызывать высокую нагрузку на канал и требовать единой точки обработки. В свою очередь, децентрализованная схема (Federated Learning) предлагает удерживать «тяжёлую» логику на локальных устройствах, что обеспечивает и масштабируемость, и более гибкое использование вычислительных ресурсов [3]. Однако реализация подобной инфраструктуры предполагает решение ряда вопросов: шифрование и анонимизация телеметрии, формирование локальных и глобальных моделей для детектирования критических событий, а также надёжное распределение обновлений [13]. Управление большими объёмами видеоданных и дополнительно приходящими телеметрическими сигналами требует продуманного разделения клиентской (мобильное приложение) и серверной (облачные узлы или распределённые серверы) частей. Клиент может выполнять первичную фильтрацию кадров по простым порогам и отправлять лишь «подозрительные» фрагменты в облако или федеративную сеть для углублённого анализа [7]. Такой «дробный» обмен позволяет сократить трафик и ускорить реакцию системы.

При выборе методологии разработки подобных решений важно выделить несколько критически значимых компонентов. Во-первых, модуль распознавания ДТП должен сочетать сенсорные (GPS, акселерометр) и визуальные данные (либо фото, либо потоковое видео), что даёт максимальную точность и снижает риск ложных оповещений [2]. Во-вторых, необходима надёжная SOS-функция, позволяющая либо пользователю вручную запрашивать помощь, либо системе автоматически генерировать сигнал при детекте аварии [9]. В-третьих, важно проработать ролевые модели основных акторов: «пострадавший», «волонтёр/спасатель», «оператор/служба поддержки». Каждому из них нужен свой интерфейс, набор разрешённых действий и проток общения, чтобы исключить излишние запросы или дублирующие запросы. Ещё одним критерием является быстрота отклика: система обязана формировать и передавать оповещение буквально в считанные секунды, поскольку именно в первые минуты после ДТП закладываются шансы на эффективную медицинскую помощь [10]. При

этом достоверность детекта напрямую влияет на полезность платформы: слишком частые ложные срабатывания дискредитируют сервис и перегружают службы [1], а слишком «мягкие» фильтры не выявляют реальных инцидентов.

Масштабируемость системы в данном контексте предполагает способность обрабатывать растущие объёмы пользователей и данных без резкого падения производительности. Это требует гибкости в архитектуре: возможность быстро добавлять облачные узлы или распределять нагрузку по федеративной сети. Помимо того, крайне важна комплексная валидация —

совокупность лабораторных симуляций, полевых испытаний с реальными автомобилями и прототипами, а также долгосрочное тестирование в различных погодных и дорожных условиях [4, 13]. Только подобная многоэтапная проверка способна доказать, что платформа действительно пригодна для оперативной экстренной помощи на дорогах.

Для дополнительной иллюстрации ключевых различий между «классическими» и «современными» методами детектирования аварий целесообразно обратиться к таблице 1, в которой кратко представлены принципы работы и ожидаемые достоинства/ограничения.

Таблица 1.

Сравнение классических и современных подходов к обнаружению ДТП

Подход	Принцип работы	Преимущества	Ограничения
Классические методы (на базе акселерометра, GPS)	Пороговые значения ускорения, скорости [2, 15].	Простота, малая вычислительная нагрузка, низкая стоимость	Высокий риск ложных срабатываний, нет анализа визуальных факторов
Глубокое обучение (пример DeepCrash)	CNN анализирует изображения/видео для определения типа аварии (лобовая, одиночная) [5].	Высокая точность, учёт контекста сцены, масштабируемость	Требует мощных вычислительных ресурсов, сложнее внедрение
Near Crash Detection + Federated Learning	Прогнозирует инциденты заранее на локальных моделях, суммирует веса в глобальной модели [6].	Распределённая обработка, приватность данных, гибкость	Необходима сложная инфраструктура и продуманная синхронизация

Таким образом, комплексная методология разработки мобильных платформ экстренной взаимопомощи в дорожном движении объединяет классические сенсорные решения с передовыми методами компьютерного зрения и федеративного обучения. Все эти элементы должны быть продуманно интегрированы в архитектуру системы, обеспечивающую высокую производительность, защиту данных и мгновенную реакцию на ДТП. Целью в конечном итоге становится безопасная и надёжная среда, в которой водители и пассажиры могут рассчитывать на своевременную помощь при возникновении аварийной ситуации, а службы — на точную и релевантную информацию для оперативного реагирования.

2. Разработка и внедрение мобильной платформы экстренной взаимопомощи: методология и практические аспекты

Фундаментом любой мобильной системы экстренной взаимопомощи служит тщательно проработанная методология разработки, которая охватывает все этапы — от анализа пользовательских групп и архитектурных решений до ввода в эксплуатацию алгоритмов обнаружения ДТП и механизмов оперативного оповещения. Ниже последовательно рассмотрены ключевые аспекты методологической модели, необходимой для успешного внедрения подобной платформы.

Первым этапом выступает анализ требований, где основной акцент делается на характеристиках потенциальных пользователей. Система должна учитывать различные сценарии, характерные для мотоциклистов, автомобилистов, курьеров и сервисов доставки, поскольку у каждого из них могут быть отличающиеся требования к скорости реакции и типу оповещения [4, 15]. Социальная среда также важна: некоторым группам (к примеру, мотоклубам) свойственны небольшие обособленные сообщества, в то время как массовые сервисы доставки требуют более широкой географии покрытия [16]. Результаты такого анализа ложатся в основу проектных решений, связанных с функционалом (от ручного «SOS» до полностью автоматических алгоритмов), а также механизмов координации.

На втором этапе — проектирование архитектуры — выделяются front-end мобильного приложения и back-end, обеспечивающий хранение и обработку данных [5]. Приложение должно быть удобным для пользователя: единая «панель» с кнопками ручного вызова помощи, отображением информации о ДТП и возможностями быстрого обмена сообщениями/координатами [1]. В серверной части могут сосуществовать несколько решений: классическая облачная архитектура, когда все данные стекаются в единый дата-центр; либо федеративная [6], где общая модель обучения распространяется на локальные узлы, не передавая

«сырые» персональные сведения. При этом критически важно обеспечить корректную маршрутизацию событий: если инцидент подтверждён, система должна сформировать нотификацию и в веб-интерфейсе для операторов, и в виде push-уведомления добровольцам в заданном радиусе.

Затем следует выбор алгоритмов детектирования, включающий как методы сенсорного распознавания, так и средства машинного зрения [2]. Классические сенсорные алгоритмы используют акселерометры и GPS, устанавливая пороги для скорости, ускорения и резкого торможения [15]. Современные подходы, подобно DeepCrash [5], включают свёрточные нейронные сети для анализа видеопотока, а также мультисенсорные данные, позволяющие отличить настоящую аварию от бытового «падения смартфона» или резкой остановки без столкновения. При этом формулы определения индекса столкновения или внутренние критерии CNN могут варьироваться; главное — точное выделение аномальных паттернов, требующих немедленного реагирования.

Помимо собственно выявления аварии, большое значение имеют механизмы оповещения и передачи SOS-сигналов. В соответствии с практиками, описанными у Kantawong и Phanpravit [9], оптимально предложить два сценария: автоматический (при срабатывании внутреннего детектора) и ручной (когда пользователь активирует SOS). В обоих случаях требуется распределённая система уведомлений: push-сообщения на устройства водителей поблизости (для мгновенной помощи) и дублирование сигнала официальным службам (скорая, полиция), если ситуация оценивается как критическая [7]. Радиус поиска определяется типом инцидента и плотностью населения: логично варьировать его от 1–2 км в городе до 10–15 км в менее обжитых районах [13]. Для глубокого анализа ситуации полезно сохранять и дополнять сигнал фото/видео, если используется модуль компьютерного зрения [5]. В случае федеративной схемы [6] локальные узлы передают только метаданные или «свернутые» параметры сцены, не нарушая приватность.

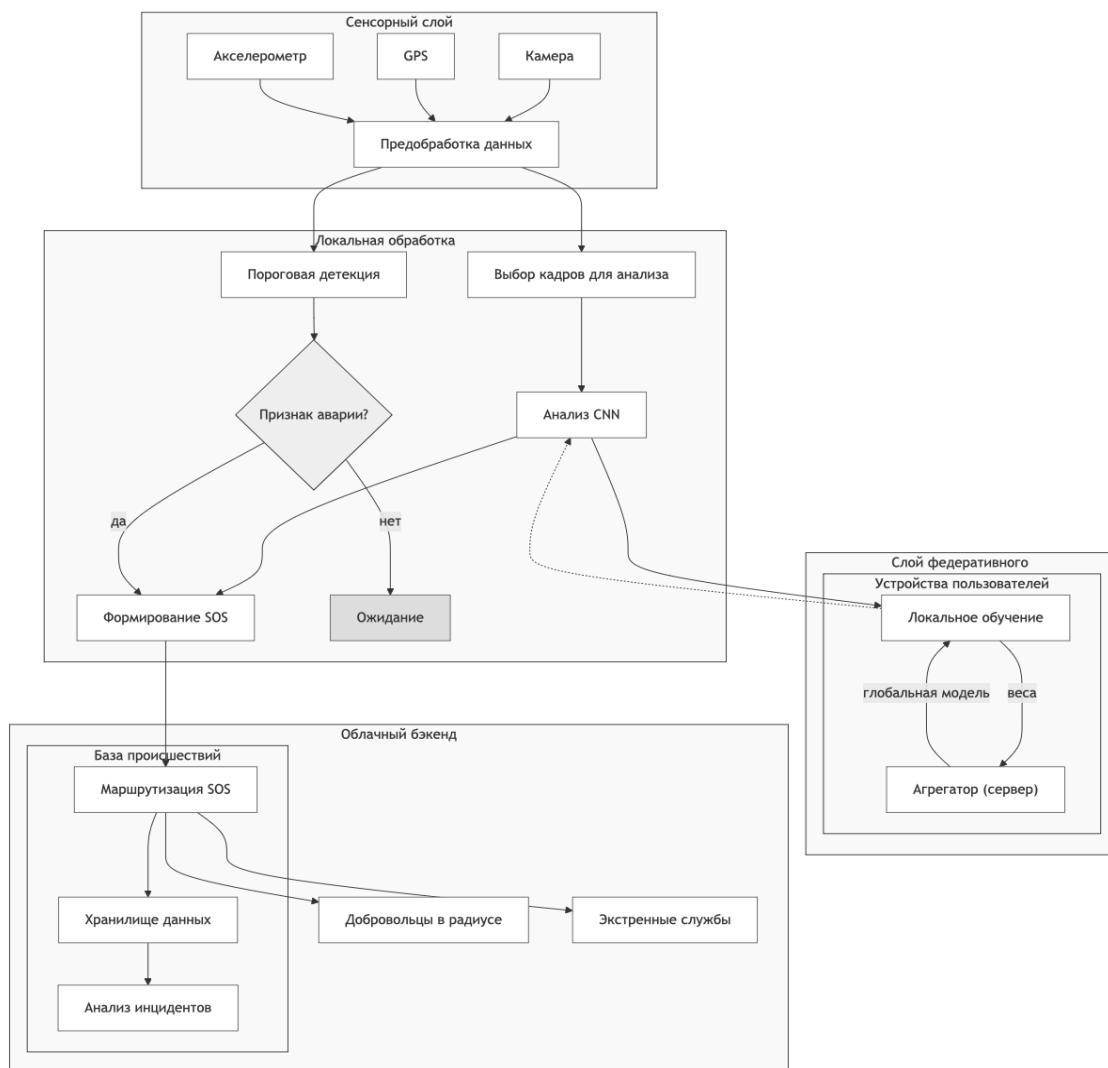


Рисунок 1. Пример мобильной платформы экстренной взаимопомощи

Наконец, важным элементом служит система хранения и анализа данных о происшествиях. Предполагается база, где аккумулируются видеозаписи (при наличии), координаты, информация о погодных условиях и факторы дорожной инфраструктуры. На основе этой совокупности возможно строить модели по динамике аварий или корректировать алгоритмы

обучения [6]. Поскольку объём может быть колоссальным, применяются распределённые файловые системы и механизмы быстрой выборки по ключевым полям (камере, таймштампу, региону и т.д.). В таблице 2 приводится примерная структура атрибутов, которую целесообразно сохранять в базе для последующего анализа.

Таблица 2.

Рекомендуемая структура хранимых данных о происшествии

Поле	Содержание	Назначение
Идентификатор события	Уникальный ID, генерируемый при регистрации сигнала	Связь с другими сущностями (получившими уведомление, видеозаписи)
Координаты GPS	Широта, долгота, возможна высота (при дорожных развязках)	Оперативная передача информации службам, геоаналитика
Дата и время	Точный таймштамп начала инцидента	Анализ временных закономерностей, верификация
Тип (лобовое, одиночное и т. п.)	Выявляется автоматикой или указывается пользователем	Статистика аварий; корректировка алгоритмов
Признаки интенсивности	Ускорение, индекс столкновения, вероятность модельного распознавания	Понимание тяжести ДТП, приоритет вызова
Мультимедиа	Снимки/видеоролики с фронтальной камеры (при наличии)	Анализ характера повреждений, доказательная база
Условия окружения	Погода, состояние дорожного покрытия	Глубинный анализ причин, улучшение прогнозных моделей

После того как описана основная методологическая модель проектирования, следует осознать, каким образом осуществляется интеграция функционала SOS и управление вызовами помощи. Ключевым моментом выступает пользовательский сценарий: при срабатывании внутренних сенсоров или по нажатию кнопки SOS система генерирует тревожное уведомление, прикрепляя координаты, фотографии и дополнительную информацию [2]. Данные сразу же рассылаются ближайшим потенциальным помощникам, а при достижении порогового уровня «тяжёлой аварии» — и операторам медицинских учреждений либо официальным службам [5]. Использование распределённых алгоритмов, аналогичных описанным у Djenouri et al. [6], повышает точность такого триггера и снижает вероятность ложных сигналов.

Важная деталь — формирование схемы взаимодействия с экстренными службами в пределах «золотого часа» [10]. Если в базе имеется информация о ближайшем госпитале или пункте медпомощи, система автоматически направляет сотрудникам уведомление с данными о тяжести

ДТП, предполагаемом числе пострадавших и их состоянии, оцененном по силу удара и другим индикаторам [4]. При желании можно задействовать и более сложные модули машинного зрения, оценивающие степень повреждения кузова (DeepCrash) или классифицирующие разрушения инфраструктуры [7].

Важным аспектом является массовая координация: участники, находящиеся поблизости, видят на карте точку ДТП и могут обменяться сообщениями, фотографиями, советами. Однако встаёт вопрос фильтрации ложных вызовов: опыт [15] показывает, что ложные ускорения при езде по плохой дороге порой ошибочно воспринимаются как авария. Чтобы минимизировать подобные ситуации, рекомендуется сверять поступающие сигналы со «шаблонами» исторических данных [13] и учитывать контекст (положение в городе, время суток, вероятность ДТП). В таблице 3 приводится примерный алгоритм фильтрации, показывающий, какие параметры следует анализировать, прежде чем рассылать экстренные сигналы всем окружающим.

Таблица 3.

Алгоритм фильтрации ложных вызовов на этапе массового оповещения

Шаг	Параметры	Действие
1. Предварительная проверка	Ускорение (верхний порог), скорость, звуковой фон	Если $MaxAcc < AccThreshold$ или $ci < порога$, отмена сигнала
2. Контекстное сопоставление	Координаты GPS (покрытие дороги), время суток	Сверка с базой: если известен участок «кочек», понижение доверия к событию
3. Дополнительные сенсорные признаки	Гироданные, угловая скорость	При нетипичном вращении (падение на бок) повышается вероятность реального ДТП
4. Подтверждение камеры	Наличие изображения (CNN анализ)	При визуальном сигнале повреждения – повышаем рейтинг опасности
5. Финальное решение	Агрегация промежуточных результатов	Если итоговый индекс $>$ заданного уровня, отправляем SOS

Не менее принципиальным направлением остаётся безопасность, этика и правовые аспекты. Сохранение персональных данных и анонимизация геолокации должны соответствовать нормам локального законодательства (GDPR в ЕС, HIPAA в США и т.д.), поскольку речь нередко идёт о медицинской информации [16]. На практике используется шифрование, цифровые сертификаты и токенизация, чтобы только авторизованные лица имели доступ к подробным данным о происшествии [1]. Передача или хранение видеозаписей, на которых могут быть изображены люди, также требует учёта потенциальных рисков нарушения приватности [13].

Юридическая сторона охватывает соответствие требованиям безопасности [4] и регламентацию передачи информации о ДТП государственным службам (полиция, скорая, страховые компании) [5]. При межгосударственных перевозках возникает вопрос юрисдикции и того, какая база данных или облако несут ответственность за обработку, что усложняет интеграцию [9]. Этические аспекты сводятся не только к защите личной сферы, но и к предотвращению злоупотреблений — например, злоумышленники могут зло намеренно слать фальшивые сигналы, чтобы вызвать «волонтёров» в пустое место или перегрузить систему [2]. Здесь уместны анти-спам механизмы, система рейтингов и алгоритмы выявления нетипичных вызовов.

Таким образом, разработка и внедрение мобильной платформы экстренной взаимопомощи предполагает комплексную модель: от детального анализа пользовательских сценариев и проектирования гибкой архитектуры (федеративной либо облачной) до тщательной организации подсистем обнаружения ДТП и последующей фильтрации ложных вызовов. Грамотная интеграция SOS-модуля и формирование схемы взаимодействия с офлайн-службами внутри «золотого часа» способствуют спасению жизней. Безопасность и соблюдение правовых норм играют не менее важную роль для

доверия пользователей и стабильности всей системы, а расширенное тестирование в полевых условиях — единственный способ достичь приемлемого уровня качества.

Заключение

Проведённое исследование позволило сформировать методологическую основу для разработки и внедрения мобильных систем экстренной взаимопомощи при ДТП. Теоретические аспекты включают сравнительный анализ классических решений на базе акселерометров и GPS, а также использование глубоких нейронных сетей и федеративного обучения для повышения точности и масштабируемости. Практические рекомендации охватывают проектирование архитектуры (от фронтенда приложения до распределённого бэкенда), интеграцию модуля SOS и алгоритмов фильтрации ложных инцидентов, а также обеспечение конфиденциальности и соответствие правовым нормам.

Результаты показывают, что комбинирование сенсорных данных и компьютерного зрения (как в «DeepCrash») существенно снижает риск пропуска реального столкновения. При этом применения Federated Learning (по примеру «Enhancing smart road safety...») способствует улучшению детектирования и защите приватности пользователей за счёт отказа от передачи «сырых» данных в облако. Создание комплексной базы данных о происшествиях, включающей координаты, фото- и видеоматериалы, ускоряет анализ статистики ДТП, помогает оперативно выявлять аномалии и совершенствовать алгоритмы прогнозирования.

Системы данного класса призваны сокращать «золотой час», повышая шансы пострадавших на своевременную помощь и снижая тяжесть последствий ДТП. Однако для полноценного внедрения требуется дальнейшее совершенствование механизмов защиты от злоупотреблений, а также тиражирование решений в разных регионах с учётом местных

законодательных и инфраструктурных особенностей. Таким образом, предложенная в статье методология формирует прочную научно-практическую основу для мобильных платформ экстренной взаимопомощи, способных оказывать значимый вклад в повышение безопасности дорожного движения.

References

1. Aina, H. (2014). Malaysia ranked 20th in road death. News Straits Times.
2. Ali, H. M., & Alwan, Z. S. (2017). Car accident detection and notification system using smartphone. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing.
3. Athey, C. (2014). Assessment of Telematics Service Provider Data Feeds. ENTERPRISE Transportation Pooled Fund Study TPF-5 (231), Enterprise.
4. Chan, C. Y. (2007). Trends in crash detection and occupant restraint technology. Proceedings of the IEEE, 95(2), 388–396.
5. Chang, W.-J., Chen, L.-B., & Su, K.-Y. (2019). DeepCrash: A deep learning-based Internet of Vehicles system for head-on and single-vehicle accident detection with emergency notification. IEEE Access, 7, 148163–148173.
6. Djenouri, Y., Belbachir, A. N., Michalak, T., Belhadi, A., & Srivastava, G. (2024). Enhancing smart road safety with federated learning for Near Crash Detection to advance the development of the Internet of Vehicles. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 133, 108350.
7. Hirai, T., & Mutase, T. (2018, May). Effect of estimation Error in node-clustering with V2X communications for crash warning applications. In 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW) (pp. 1-2). IEEE.
8. Jiang, H., Li, J., Ye, S., & Xu, J. (2017). Freeway accident detection and alarm method based on

heterogeneous network. Microcontrollers & Embedded Systems, 7, 34–38.

9. Kantawong, S., & Phanprasit, T. (2010, May). Intelligent traffic cone based on vehicle accident detection and identification using image compression analysis and RFID system. In ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (pp. 1065-1069). IEEE.
10. Kumar, A., Butt, S., Abudayyeh, O., Fredericks, T., & Kuk, M. (2017). A statistical model for emergency medical services response to motor vehicle crashes in Michigan. Research and Creative Activities Poster Day, 238, 1.
11. Ponte Müller, F. (2017). Survey on ranging sensors and cooperative techniques for relative positioning of vehicles. Sensors, 17(2), 271.
12. Sai, S., Kenney, J., Tanaka, H., & Inoue, Y. (2017). Current and future ITS. IEICE Transactions on Information and Systems, E96-D(2), 176–183.
13. Scanlon, J. M., Sherony, R., & Gabler, H. C. (2017). Models of driver acceleration behavior prior to real-world intersection crashes. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 19(3), 774-786.
14. Sharma, H., Reddy, R. K., & Karthik, A. (2016, September). S-CarCrash: Real-time crash detection analysis and emergency alert using smartphone. In 2016 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE) (pp. 36-42). IEEE.
15. Yee, T. H., & Lau, P. Y. (2018, January). Mobile vehicle crash detection system. In 2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (pp. 1-4). IEEE.
16. World Health Organization. (2019). Global status report on road safety 2018. World Health Organization.

ПСИХОЛОГИЯ В ДИЗАЙНЕ: КАК ПОНИМАТЬ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСПЕШНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Микаэла Беркали
Senior UX Designer

Микаэла Беркали (Mikaela Berkeley), отчества нет
Место работы: Monolink Group

PSYCHOLOGY IN DESIGN: UNDERSTANDING USERS TO CREATE SUCCESSFUL APPS

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2186

АННОТАЦИЯ

В статье исследуется эволюция области пользовательского опыта и ее пересечение с психологией, акцентируя внимание на важности понимания когнитивных и эмоциональных потребностей пользователей. Основная цель исследования заключается в анализе влияния психологических концепций, таких как когнитивная нагрузка, эмоциональный дизайн и психографическая сегментация, на создание интуитивно понятных и привлекательных интерфейсов. Эксперимент, проведенный для изучения влияния цвета на взаимодействие пользователей с веб-сайтами, показал, что правильный выбор цветовой палитры, включая сине-зеленые оттенки и использование темного режима, может значительно увеличить время, проведенное пользователями на страницах. Результаты подчеркивают, что стратегическое применение цвета не только улучшает эстетическую привлекательность интерфейса, но и повышает его функциональность, улучшая читаемость и снижая нагрузку на зрение. Практическое применение полученных данных может помочь дизайнерам и разработчикам создавать более эффективные и

удовлетворяющие потребности пользователей продукты, что, в свою очередь, способствует повышению их лояльности.

ABSTRACT

This paper explores the evolution of the field of user experience and its intersection with psychology, focusing on the importance of understanding the cognitive and emotional needs of users. The main goal of the study is to analyze the influence of psychological concepts such as cognitive load, emotional design, and psychographic segmentation on the creation of intuitive and attractive interfaces. An experiment conducted to study the influence of color on user interactions with websites showed that the right choice of color palette, including blue-green shades and the use of dark mode, can significantly increase the time users spend on pages. The results highlight that strategic use of color not only improves the aesthetic appeal of the interface, but also enhances its functionality by improving readability and reducing eye strain. Practical application of the findings can help designers and developers create more effective and satisfying products for users, which in turn contributes to their loyalty.

Ключевые слова: пользовательский опыт, психология, когнитивная нагрузка, эмоциональный дизайн, цветовая палитра, интуитивность, темный режим.

Keywords: user experience, psychology, cognitive load, emotional design, color palette, intuitiveness, dark mode.

Область исследований пользовательского опыта продолжает эволюционировать, находясь на пересечении дизайна и экспериментальных исследований. Ранее, при создании коммерческих веб-сайтов, удобство и эффективность часто оставались на заднем плане, а акцент делался на

максимальном количестве контента на интерфейсе. Сегодня же UX-дизайн стремится не только предоставить пользователям необходимую информацию и функциональность, но и учитывать их психологические и эмоциональные потребности.

5 Visual-Design Principles in UX

Visual-design principles inform us how design elements go together to create well-rounded and thoughtful visuals. Graphics that take advantage of the principles of good visual design can drive engagement and increase usability.

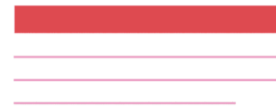
SCALE

The principle of scale refers to using relative size to signal importance and rank in a composition.



VISUAL HIERARCHY

The principle of visual hierarchy refers to guiding the eye on the page so that it attends to design elements in the order of their importance.



BALANCE

Balance occurs when there is an equally distributed amount of visual signal on both sides of an imaginary axis.



CONTRAST

The principle of contrast refers to the juxtaposition of visually dissimilar elements in order to convey the fact that these elements are different.



GESTALT PRINCIPLES

Gestalt principles capture our tendency to perceive the whole as opposed to the individual elements.



NNGROUP.COM NN/g

Современный подход к UX-оптимизации включает в себя понимание того, как когнитивная нагрузка влияет на взаимодействие пользователя с интерфейсом. Это требует изучения психологических концепций и теорий, которые формируют поведение пользователей. Для создания эффективного интерфейса необходимо осознанно проектировать опыт, который будет не только интуитивно понятным, но и удовлетворяющим потребности пользователей в нужный момент. Таким образом, интеграция психологии в UX-дизайн становится важным

элементом в разработке приложений, позволяя создавать более привлекательные и функциональные решения, которые действительно отвечают ожиданиям пользователей [1].

Психология UX изучает не только функциональность интерфейсов, но и когнитивные аспекты, которые влияют на восприятие и поведение пользователей. Знание психологических принципов становится определяющим в создании успешных приложений и веб-сайтов. Дизайнерам и исследователям лучше понять потребности и

ожидания пользователей помогают определить концепции [2]. К ним относятся:

1.Когнитивная нагрузка: понимание того, как информация воспринимается и обрабатывается пользователями, и как уменьшение когнитивной нагрузки может улучшить пользовательский опыт.

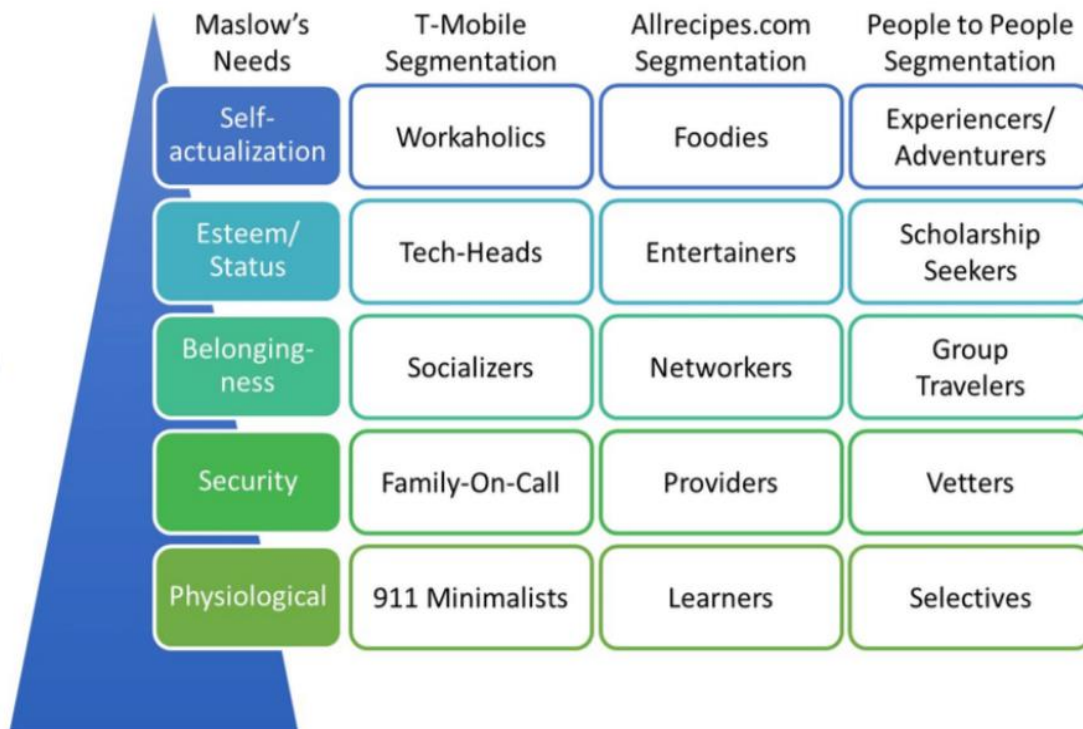
2.Эмоциональный дизайн: как эмоции влияют на восприятие интерфейсов и принятие решений пользователями. Дизайнеры стремятся вызывать положительные эмоции для улучшения взаимодействия.

3.Потребности пользователей: модели, такие как иерархия потребностей Маслоу, помогают понять, что движет пользователями и как это влияет на их взаимодействие с продуктами.

4.Психографическая сегментация: разделение пользователей на группы по их интересам, ценностям и стилю жизни для более точного таргетирования и персонализации.

5.Принципы восприятия: как визуальные элементы воспринимаются пользователями, включая законы Гештальта, которые помогают понять, как пользователи организуют и интерпретируют информацию.

К примеру, в книге Дэвида К. Эванса «Узкие места: согласование UX-дизайна с психологией пользователя» рассматриваются различные аспекты понимания пользователей, включая психографические сегменты, которые он связывает с иерархией потребностей Маслоу [3]:



Мобильный оператор: психографические сегменты могут включать потребителей, которые ценят связь и коммуникацию (социальные потребности), а также тех, кто ищет удобство и доступ к информации (потребности в уважении и самореализации). Операторы могут адаптировать свои предложения, чтобы удовлетворить эти потребности, например, предлагая планы с неограниченным интернетом или специальные тарифы для молодежи.

Кулинарное сообщество: здесь потребности могут варьироваться от базовых (физиологические потребности в пище) до более высоких уровней, таких как потребности в самоактуализации, когда пользователи стремятся развивать свои кулинарные навыки и делиться опытом с другими. Психографические сегменты основаны на интересах, таких как вегетарианство или гастрономические эксперименты, что позволяет сообществу предлагать персонализированный контент и рецепты.

Туристическая компания: для людей, ищущих приключения (физиологические и социальные потребности) или тех, кто хочет расслабиться и получить новые впечатления (потребности в уважении и самоактуализации). Понимание этих сегментов позволяет компании создавать уникальные предложения, которые соответствуют ожиданиям и желаниям клиентов, например, экзотические туры или wellness-пакеты.

Человеческий мозг, как и компьютеры, имеет ограниченную вычислительную мощность, поэтому, когда количество информации превышает способность справиться с ней, работоспособность страдает, тратится больше времени на обработку информации, пользователь интерфейса может пропустить важные детали или даже отказаться от взаимодействия с программным продуктом. Если компьютер не справляется с объемом задач, можно обновить его до более мощного. В концепции UX проектировщики пытаются упростить модели взаимодействия человека и интерфейса, учитывая

пределы способности человеческого мозга. Исследования пользовательского опыта направлены на внимательное изучение потребностей пользователей и состоят в систематическом, регулярном подходе, анализе и оценке поведения пользователей, что способствует созданию более удобного, полезного и востребованного продукта, ориентированного на их потребности [1].

Взаимодействие человека с компьютером акцентирует внимание на дизайне, ориентированном на пользователя, что приводит к созданию инновационных и удобных технологий. Эта область пересекается с исследованиями пользовательского опыта, однако HCI в значительной степени основывается на психологических принципах и теориях. Цвет играет важную роль в искусстве и дизайне, но дизайнеры иногда упускают из виду его

коннотации. Для изучения влияния цвета на дизайн цифровых интерфейсов был проведен эксперимент, направленный на увеличение времени пребывания пользователей на сайте.

Эксперимент включал анализ того, как компании используют теорию цвета, реакции пользователей, цветовые тенденции, текущее использование цвета в Интернете, различия между темными и светлыми режимами, а также роль цвета во времени просмотра. Результаты показали, что цвет является важным активом, создающим приятный опыт для пользователей. Мнения о цветах могут меняться в зависимости от обстоятельств и личных предпочтений. Синий цвет оказался наиболее любимым и полезным с психологической точки зрения, в то время как желтый часто используется из-за брендинга, хотя и не рекомендуется для цифровых интерфейсов.

Page color	Time on page
Black (control)	9 minutes 11 seconds
Dark Gray	5 minutes 0 seconds
Navy Blue	4 minutes 47 seconds
Teal	9 minutes 30 seconds
White (control)	5 minutes 35 seconds
Light Gray	4 minutes 54 seconds
Light Blue	9 minutes 48 seconds
Yellowish-Gray	6 minutes 5 seconds

Average time spent browsing on each webpage, with varying background colors.

Исследование изучало, как цветовая психология может увеличить продолжительность сеансов на веб-страницах. Экспериментальные результаты продемонстрировали, что сине-зеленые оттенки могут увеличить время, проводимое пользователями на сайтах. Темный режим также показал преимущества для удобства использования, хотя его популярность может меняться.

Работа подчеркивает, что неправильное использование цвета может негативно сказаться на дизайне, если специалист не понимает психологические аспекты. В конечном итоге, цвет в цифровых интерфейсах влияет на эстетическую привлекательность и функциональность, улучшая читаемость и снижая нагрузку на глаза. Цветовое кодирование также способствует более быстрому поиску информации и сокращает время выполнения задач. Это подчеркивает важность стратегического применения цвета в дизайне интерфейса, чтобы цифровые продукты были не

только визуально привлекательными, но и эффективными [4].

Интеграция психологии в UX-дизайн играет важную роль в создании интерфейсов, которые не только выполняют свои функции, но и вызывают положительные эмоции у людей. Понимание таких концепций, как когнитивная нагрузка, эмоциональный дизайн и психографическая сегментация, помогает дизайнерам лучше ориентироваться на потребности пользователей и разрабатывать более интуитивные решения.

Исследования, касающиеся влияния цвета на взаимодействие, показывают, что правильный выбор цветовой палитры может значительно увеличить время, которое пользователи проводят на сайте, и улучшить их общий опыт. Цвет не только влияет на внешний вид интерфейса, но и на его функциональность, улучшая читаемость и снижая нагрузку на зрение.

Таким образом, осознанный подход к дизайну, основанный на психологических принципах,

становится необходимым для создания успешных и востребованных приложений. Будущее UX-дизайна будет зависеть от того, насколько хорошо специалисты смогут применять эти знания на практике, чтобы обеспечить удовлетворение пользователей и их лояльность к продуктам.

Список литературы:

1. Kompaniets A., Chemerys H. Generalization of the experience of using research on psychology of

behavior for designing UX design software products. Ukrainian Journal of Educational Studies and Information Technology 7(3):1-10, 2019.

2. Lull D. UX Psychology Basics. Apress; 1st ed. Edition, 2017.

3. Evans D.C. Bottlenecks: Aligning UX Design with User Psychology. Apress; 1st ed. edition, 2017.

4. Fialkowski B., Schofield D. Considering Color: Applying Psychology to Improve the Use of Color in Digital Interfaces, 2024.

УДК 621.396.67

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ FRFT ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ВИНТОВ ВЕРТОЛЕТОВ

Нгуен Тьен Тхай

к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона, Вьетнам

Ле Динь Сон

к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона, Вьетнам

Нгуен Ван Хай

к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона, Вьетнам

APPLICATION OF FRFT TRANSFORM IN THE PROCESSING OF SIGNALS REFLECTED FROM HELICOPTER ROTORS

Ph.D. Nguyen Tien Thai,

Le Quy Don Technical University, Vietnam

Ph.D. Le Dinh Son,

Le Quy Don Technical University, Vietnam

Ph.D. Nguyen Van Hai,

Le Quy Don Technical University, Vietnam

АННОТАЦИЯ

В работе предложено использование модификацию FrFT для фильтрации радиолокационного сигнала, отраженного от несущих винтов низколетящих целей (вертолетов, винтовых самолетов). В данной работе преобразование FrFT используется для обработки отраженного сигнала от вращающегося несущего винта для определения оптимального значения α_{opt} параметра вращения преобразования FrFT на частотно-временной плоскости для улучшения отношения сигнал/шум.

ABSTRACT

The paper proposes the use of the FrFT modification for filtering the radar signal reflected from the main rotors of low-flying targets (helicopters, propeller-driven aircraft). In this work, the FrFT transform is used to process the reflected signal from the rotating main rotor to determine the optimal α_{opt} value of the rotation parameter of the FrFT conversion on the frequency-time plane to improve the signal-to-noise ratio.

Ключевые слова: FrFT, микро-доплер, радар, винт вертолета, линейно-частотной сигнал.

Keywords: FrFT, Micro Doppler, Radar, Helicopter Propeller, Linear Frequency Signal.

1. Введение

В смеси радиолокационных сигналов, отраженных от вертолетов, доминирующей составляющей является компонента отражения от фюзеляжа, за ней следует отражение от основного винта и самым слабым является отражение от рулевого винта. Доплеровский сигнал, отраженный от фюзеляжа вертолета, может быть использован для обнаружения целей. Однако для медленно движущегося вертолета или в подвешенном состоянии доплеровская частота фюзеляжа близка к 0 Гц, и в этот момент она может быть скрыта помехами от местных предметов или может быть ошибочно принята за другую низкоскоростную цель, такую как наземное транспортное средство [1]. Таким образом, обнаружение

микродоплеровских компонентов в сигнале (отражение от несущего и/или рулевого винтов) может быть полезным для обнаружения специфических вертолетов и может привести к грубой классификации целей [2-4].

Для микродоплеровских составляющих в радиолокационных сигналах, отраженных от вращающихся винтов летательных аппаратов (вертолетов, крылатых летательных аппаратов), исследовательские группы по всему миру в основном используют STFFT (Short-time Fourier transform), в первую очередь авторы Тран, Х. Т, Мелино, Р., Санг-Хо, Ю. [2-4]. Характеристики обработки радиолокационных сигналов, отраженных от несущего винта во временно-частотной области с использованием STFT,

требуют высокого соотношения сигнал/шум.

В авторских исследованиях показано, что радиолокационный сигнал, отраженный от несущего винта вертолета, имеет вид линейно-частотной модуляции (ЛЧМ), ширина спектра и наклон модуляции зависят от длины винта и скорости вращения винта [5]. Для ЛЧМ-сигналов одним из наиболее эффективных инструментов обработки сигналов является дробное преобразование Фурье (FrFT). Однако в опубликованных работах основное внимание уделяется обработке ЛЧМ-сигналов с заданными параметрами сигнала или широкополосным НЧМ-сигналам [6, 7, 8]. Между тем, отраженный сигнал от вращающегося винта имеет параметр частотной модуляции, который зависит от конкретной цели (длина лопасти, скорость вращения), обработка этого сигнала в области FrFT пока не опубликована. Авторы предлагают использовать преобразование FrFT при определении параметра линейно-частотной модуляции (который может быть использован в качестве характеристического параметра для идентификации вертолета), и использовать этот параметр для фильтрации отраженного радиолокационного сигнала от вращающегося несущего винта на шумовом фоне для улучшения соотношения сигнал/шум на следующих этапах обработки сигнала.

2. Свойства FrFT-преобразования при обработке сигналов с линейно-частотной модуляции

В области анализа сигнала большое значение имеет преобразование FrFT. Его можно рассматривать как преобразование Фурье n -го порядка, где n не обязательно является целым числом, но может быть любым действительным числом. Области применения преобразования FrFT огромны: от фильтрации, анализа сигналов до определения фазы сигнала и идентификации цели. Преобразования FrFT стали широко доступны в обработке сигналов примерно в 1993 году [9]. В области обработки сигналов FrFT существуют простые характеристики, которые применяются при фильтрации сигналов на фоне шума в области FrFT и обработке сигналов ЛЧМ-сигналов (особенно с большой спектральной шириной) [10, 11].

Преобразование FrFT α порядка с любым углом $\varphi = \alpha \frac{\pi}{2}$ функции $x(t)$ описывается следующим выражением [11]:

$$X_\alpha(u) = F_\alpha\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) K_\alpha(t, u) dt, (1)$$

где F_α – линейное преобразование FrFT; $K_\alpha(t, u)$ – ядро преобразований:

$$K_\alpha(t, u) = \sqrt{\frac{1-j \cdot ctg(\varphi)}{2\pi}} \times \exp\left(j \frac{t^2+u^2}{2} ctg(\varphi) - j \frac{u \cdot t}{\sin(\varphi)}\right) (2)$$

Заменим выражение (2) в (1):

$$X_\alpha(u) = \sqrt{\frac{1-j \cdot ctg(\varphi)}{2\pi}} \exp\left(j \frac{u^2}{2} ctg(\varphi)\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp\left(j \frac{t^2}{2} ctg(\varphi) - j \frac{u \cdot t}{\sin(\varphi)}\right) dt. (3)$$

Выражение (3) — выражение, описывающее преобразование Фурье с коэффициентом веса $1/\sin(\varphi)$ произведения функции $x(t)$ с линейной частотной модуляционной составляющей $\exp\left(j \frac{t^2}{2} ctg(\varphi)\right)$, затем умноженно на коэффициент $\sqrt{\frac{1-j \cdot ctg(\varphi)}{2\pi}} \exp\left(j \frac{u^2}{2} ctg(\varphi)\right)$.

Этот параметр φ можно представить как угол поворота частотно-временной плоскости, который изменяется в магнитном диапазоне $[-\pi, \pi]$, соответствует коэффициенту α , который изменяется в $[-2, 2]$.

К конкретным случаям относятся:

- $\varphi = 0$ или $\varphi = k \cdot 2\pi$, k – целое число, тогда $F_0\{x(t)\} = x(t)$;

- $\varphi = \pi/2$ ($\alpha = 1$) тогда $F_1\{x(t)\}$ - соответствует прямому преобразованию Фурье;

- $\varphi = -\pi/2$ ($\alpha = -1$) тогда $F_{-1}\{X_\alpha(u)\}$ - соответствует обратному преобразованию Фурье.

С остальными значениями преобразования FrFT α дают значение, отличное от обычного преобразования Фурье. Для сигналов линейной модуляции преобразуется $F_\alpha\{x(t)\}$ оптимальное значение α , где значение модуля максимума преобразования FrFT имеет наибольшее значение. Это значение соответствует параметрам сигнала линейной частотной модуляции, таким как ширина спектра, наклон модуляции. Символ оптимального значения — $\alpha_{opt} = 2/\pi \cdot \varphi_{opt}$. Таким образом, нахождение значения α_{opt} позволит рассчитать характеристики сигнала ЛЧМ. Вышеупомянутые свойства преобразования FrFT показаны на рисунке 1.

Для расчета и применения FrFT (3) на практике используется дискретное преобразование FrFT (DFrFT). Преобразование DFrFT описано в работе [12, 13]. При решении задач обработки сигналов в реальном времени преобразования DFrFT могут быть выполнены на FPGA [14, 15].

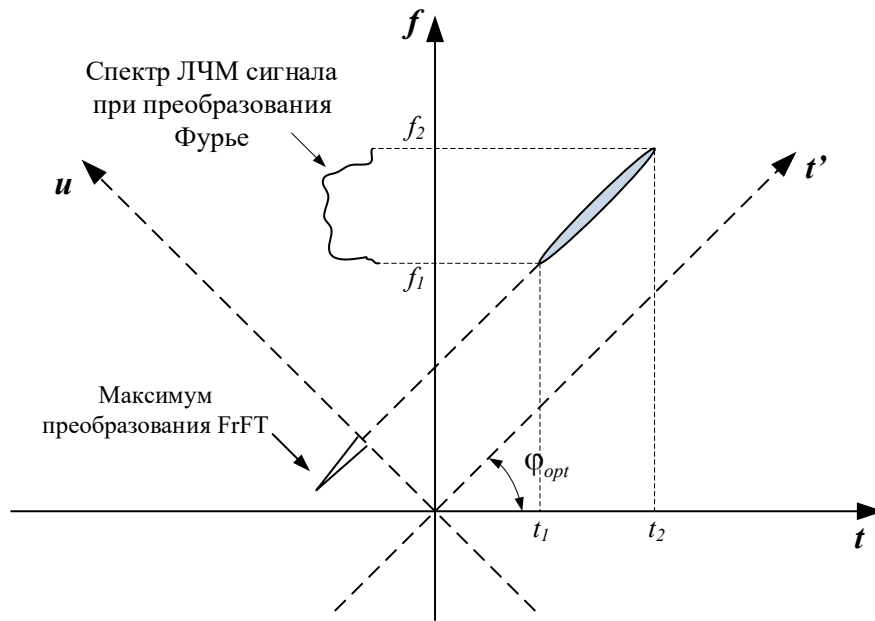


Рисунок 1. Опишите преобразование FrFT как вращение частотно-временной плоскости

3. Применение FrFT при обработке радиолокационных сигналов, отраженных от несущих винтов вертолетов

Для непрерывного монохроматического радиолокационного сигнала, отраженного от вращающихся винтов воздушной цели, является ЛЧМ-сигналом. Ширина спектра сигнала, отраженного от вращающегося винта, пропорциональна длине лопасти, импульсная структура сигнала соответствует вращающемуся механизму винта, частота повторения импульса равна произведению частоты вращения рабочего

колеса на число рабочих колес [5]. Кроме того, импульс также имеет амплитудную модуляцию при отражении от винта, закон амплитудной модуляции соответствует строению передней и задней кромок винта [5]. На этом и пошла идея использования преобразования FrFT при определении параметров, фильтрации отраженного сигнала от несущего винта вертолета на шумовом фоне. Принципиальная схема устройства обработки сигналов, использующего FrFT, представлена на рисунке 2.

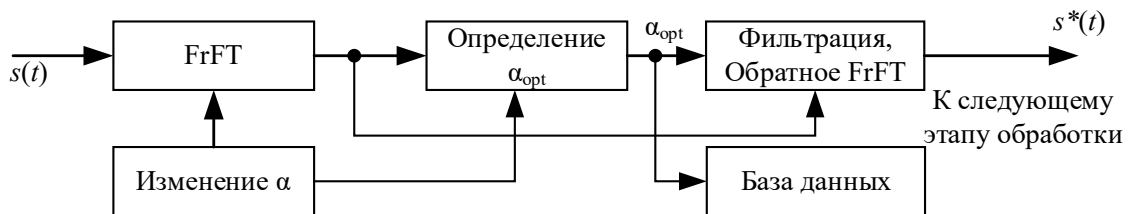
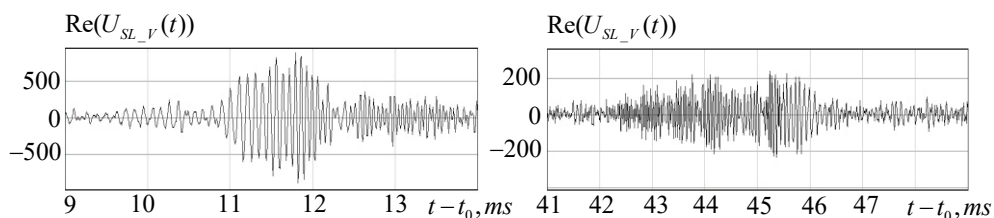


Рисунок 2. Структурная схема аппаратуры обработки сигналов с использованием FrFT



a – Передняя кромка крыла b – Задняя кромка крыла
Рисунок 3. Результаты эксперимента

На рисунке 3 представлен экспериментальный результат использования радиолокатора с непрерывным сигналом для наблюдения за летающим вертолетом Ми-2 после удаления отраженных составляющих сигнала с рельефа местности и

фюзеляжа. Сигнал записывается в файл с помощью звуковой карты и компьютера, а обработка сигнала производится в программном обеспечении Mathcad 14.

Для отраженного сигнала от вращающегося

воздушного винта значение α_{opt} не является фиксированным для каждого типа воздушного судна. Авторами предложен алгоритм определения значения α_{opt} и фильтрации сигнала винта с помощью преобразования FrFT с шагами, соответствующими описанию на рисунке 2, следующим образом:

1. Рассчитать FrFT для 1 импульса сигнала со значениями параметров α изменением в пределах $[-2, 2]$ с соответствующими шагами деления;

2. Находим максимальное значение преобразования, выводим соответствующее значение α_{opt} ;

3. Выполним преобразование FrFT со значением параметра α_{opt} для всего сигнала;

4. Выберем максимальную область преобразования, выполненного на шаге 3, удалим весь оставшийся фоновый шум, вернувшись к 0 значениям для компонентов за пределами максимальной области;

5. Выполните обратное преобразование FrFT с параметром α_{opt} для сигнала, полученного после шага 4.

Ниже приведены результаты эксперимента с непрерывным отражением сигнала РЛС от летящей цели вертолета Ми-2, авторы использовали программное обеспечение Matlab с программой быстрого расчета FrFT [16].

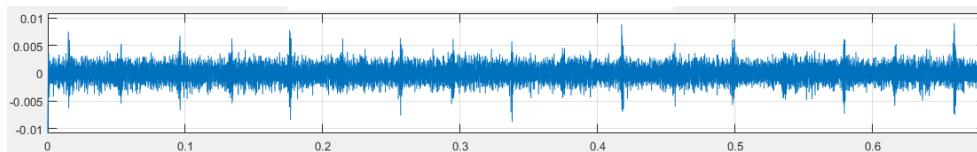


Рисунок 4. Фактическая часть сигнала, отраженного от несущего винта нефilterованного вертолета Ми-2

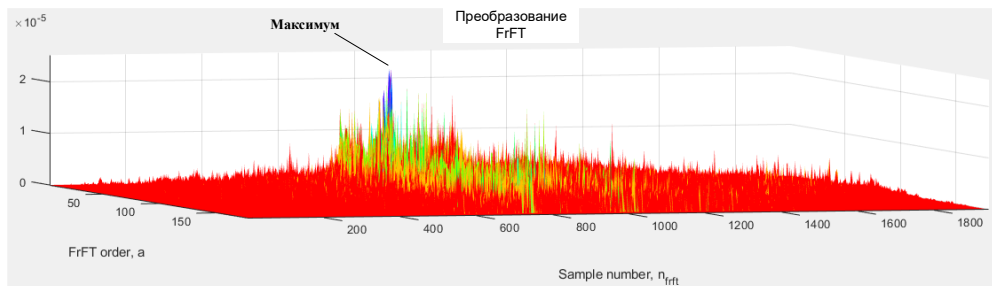


Рисунок 5. FrFT спектр сигнала, отраженного от основного винта вертолета Ми-2 со значениями параметров α

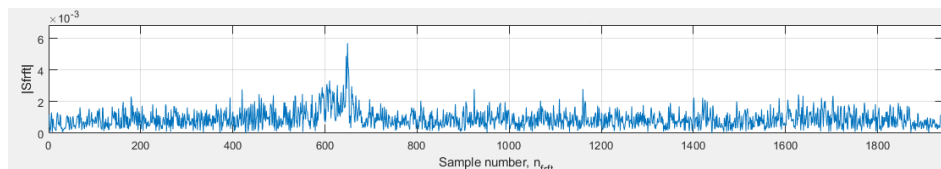


Рисунок 6. FrFT спектр импульса сигнала, отраженного от несущего винта вертолета Ми-2 с параметром α_{opt}

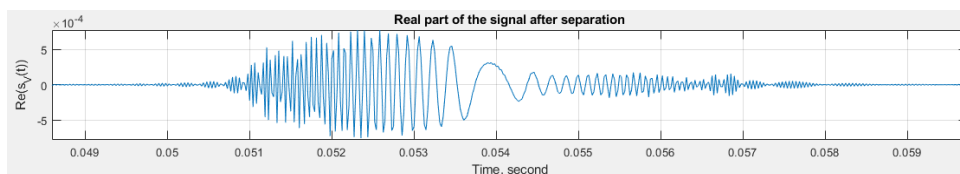


Рисунок 7. Результаты после фильтрации по импульсу сигнала

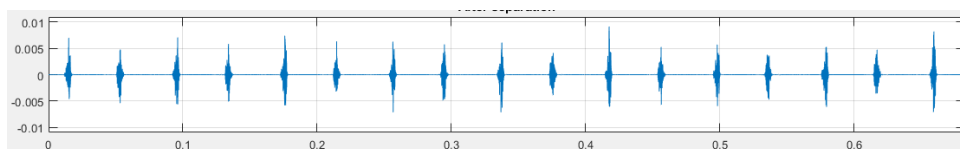


Рисунок 8. Реальная часть сигнала отражена от несущего винта вертолета Ми-2 после фильтрации с помощью FrFT

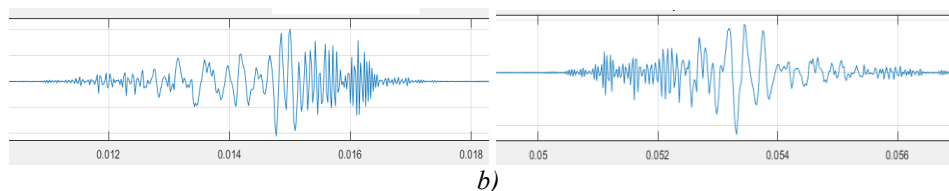


Рисунок 9. Передняя кромка (а) и задняя кромка (б) основного крыла вертолета Ми-2 после фильтрации

Значение α может быть специфичным для каждого летательного аппарата, поэтому его можно использовать в качестве данных для идентификации летающих целей. Эти величины должны быть определены эмпирическим методом для определенного типа РЛС, конкретного типа цели.

Полученные после фильтрации результаты сигнала могут быть использованы для идентификации летящих целей с помощью различных методов, таких как спектральная визуализация STFFT [2, 3], измерение частоты вращения [17].

4. Заключение

Преобразование FrFT очень полезно при обработке сигналов с линейной частотной модуляцией, особенно при фильтрации сигналов по фоновому шуму. Практическое применение к задаче фильтрации сигналов радиолокатора многоотражения от вращающегося роторного механизма летательных аппаратов имеет большую эффективность. В работе предложен алгоритм фильтрации сигнала с 5 основными шагами, который апробирован практикой с использованием отраженного сигнала от несущего винта вертолета Ми-2. Следующей целью исследовательской группы является реализация алгоритма фильтрации сигналов многоотражательной радиолокации от вращающегося роторного механизма с использованием преобразования FrFT в реальном времени на аппаратном обеспечении FPGA.

Список литературы

1. J. Misiurewicz, K. S. Kulpa, Z. Czekala and T. A. Filipek, "Radar Detection of Helicopters with Application of CLEAN Method," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no.4, pp. 3525–3537, 2012, doi: 10.1109/taes.2012.632473.
2. Y. Sang-Ho, K. Byungwook, K. Young-Soo, "Helicopter classification using time-frequency analysis," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 22., pp. 1871–1872, 2000.
3. H. T. Tran et al., "Microwave radar imaging of rotating blades" in *IEEE International Radar Conference (Radar)*, Sept. 2013, pp. 202–207.
4. R. Melino, S. Kodituwakku and H. T. Tran, "Orthogonal matching pursuit and matched filter techniques for the imaging of rotating blades," in *IEEE International Radar Conference*, 2015, pp. 1-6.
5. Т. Т. Нгуен, С. Р. Гейстер С, "Математические модели радиолокационного сигнала, отраженного от винта вертолета, в приложении к обращенному синтезу апертуры,"

Наука и военная безопасность, vol. 3, no. 57, pp. 30-38, 2018.

6. R. Tao, Y. L. Li and Y. Wang, "Short-Time Fractional Fourier Transform and Its Applications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, pp. 2568–2580, 2010, doi: 10.1109/TSP.2009.2028095.

7. L. Shen, Q. Yin, M. Lu, Q. Zhang, L. Guo, T. Shen, G. Zhao and S. Ning, "Linear FM signal parameter estimation using STFT and FRFT" *Chinese Journal of Electronics*, vol. 22, pp. 301-307, 2013.

8. N. Dong, J. Wang, "Sub-Nyquist sampling and parameters estimation of wideband Chirp signals based on FRFT," *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 61, pp. 333–341, 2018.

9. L. B. Almeida, "The fractional Fourier transform and time - frequency representations," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 11, pp. 3084–3091, 1994.

10. H. M. Ozaktas, Z. Zalevsky, M. A. Kutay, *The fractional Fourier transform with applications in optics and signal processing*, John Wiley & Sons, 2001.

11. M. A. Kutay, H. M. Ozaktas, O. Arikan, and L. Onural, "Optimal Filter in Fractional Fourier Domains," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 45, no. 5, pp. 1129-1143, May 1997.

12. C. Candan, M. A. Kutay, H. M. Ozaktas, "The discrete fractional Fourier transform," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, no. 5, pp. 1129-1143, May 1997

13. V. A. Narayanan, K. M. Prabhu, "The fractional Fourier transform: theory, implementation and error analysis," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 27, no. 10, pp. 511-521, 2003.

14. E. V. Labunets and V. G. Labunets, "Fast fractional fourier transform," in *Proceedings of the 9th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1998)*.

15. M. V. N. V. Prasad, K. C. Ray and A. S. Dhar, "FPGA implementation of Discrete Fractional Fourier Transform," in *Signal Processing and Communications (SPCOM), 2010 International Conference*, 2010, doi: 10.1109/SPCOM.2010.5560491.

16. H. M. Ozaktas, O. Arikan, M. A. Kutay, G. Bozdagt, "Digital computation of the fractional Fourier transform," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 9, pp. 2141-2150, Sept. 1996, doi: 10.1109/78.536672.

17. Т. Т. Нгуен, С. Р. Гейстер, "Способ измерения частот следования лопастей винтов летательного аппарата на основе свертки спектра «вторичной» модуляции," *Доклады БГУИР*, vol. 1, no. 119, pp. 68-74, 2019.

UDC 621.314.2

СРАВНЕНИЕ ПОТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И РАССЕЙНИЯ В ЛИНЕЙКЕ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

¹Лагунов А.А., ²Меньшов Е.Н

¹Студент энергетического факультета УлГТУ

²Докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение» УлГТУ
Ульяновский Государственный Технический Университет

COMPARISON OF ZERO-SEQUENCE AND DISPERSION FLUXES IN A LINE OF POWER OIL TRANSFORMERS

Lagunov A.A., Menshov E.N.

Ulyanovsk State Technical University

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.128.2212

АННОТАЦИЯ

Разработана методика расчета магнитных потоков рассеяния и нулевой последовательности для силовых масляных трехфазных трансформаторов с соединением обмоток Y/Yн. Методика базируется на схемах замещения магнитной и электрической цепей трансформатора. Определена формула сопротивления нулевой последовательности. Предельные значения кратковременных потоков нулевой последовательности при однофазном коротком замыкании на два порядка превышают стационарные потоки рассеяния в баках трансформаторов.

ABSTRACT

A method for calculating magnetic leakage and zero-sequence fluxes for three-phase oil power transformers with Y/Yn winding connection has been developed. The method is based on equivalent circuits of the magnetic and electric circuits of the transformer. A formula for zero-sequence resistance has been determined. The limiting values of short-term zero-sequence fluxes during a single-phase short circuit exceed the steady-state leakage flux in transformer tanks by two orders of magnitude.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, поток рассеяния в трансформаторе, поток нулевой последовательности, магнитное сопротивление нулевой последовательности, электрическое сопротивление нулевой последовательности, однофазное короткое замыкание.

Keywords: power transformers, transformer leakage flux, zero-sequence flux, zero-sequence magnetic resistance, zero-sequence electrical resistance, single-phase short circuit.

Введение

При несимметричных режимах или при однофазных коротких замыканиях в трехфазном трансформаторе возникают потоки нулевой последовательности. В трансформаторах со схемой соединения обмоток Y/Yн потоки нулевой последовательности замыкаются через стенки бака и металлические элементы конструкции. Потоки в стенках бака и в других конструкциях за счет вихревых токов вызывают дополнительный нагрев [1]. При этом магнитный режим трансформатора определяется трехфазной магнитодвижущей силой (МДС): $N_1 I_{\mu A}, N_1 I_{\mu B}, N_1 I_{\mu C}$. Здесь N_1 , количество витков первичной обмотки; $I_{\mu A}, I_{\mu B}, I_{\mu C}$ – комплексные трехфазные токи намагничивания сердечника. При номинальных симметричных напряжениях, приложенных к первичным обмоткам, токи намагничивания не превышают токов холостого хода. А при неравномерной нагрузке трансформатора нарушается симметрия токов намагничивания.

Магнитным потокам рассеяния, по сравнению с потоками нулевой последовательности, уделяется меньшее внимание. Однако потоки рассеяния создаются в трансформаторе рабочими токами. Так в [2] учтены потоки рассеяния в схеме замещения магнитной

цепи трансформатора при помощи двух МДС на стержень, а в [3] при помощи трех МДС на стержень.

Работа посвящена сравнению магнитных потоков нулевой последовательности с магнитными потоками рассеяния на линейке трехфазных стержневых трансформаторов с концентрической обмотками.

Для количественных исследований полевых задач в сложных неоднородных объектах, как правило, решается система уравнений Максвелла методом конечных элементов. В [4, стр. 186] одномерной магнитной цепью с достаточной практической ценностью описывается распределение магнитного поля рассеяния между баком и магнитопроводом в силовом трансформаторе. Активная область описывалась комплексной амплитудой МДС $E_m = I_{m1} N_1$ и эквивалентным магнитным сопротивлением межобмоточного зазора, а пространства от середины зазора до сердечника и от середины зазора до бака магнитными сопротивлениями соответственно, и также магнитными сопротивлениями между баком и сердечником.

Описанная схемная модель не учитывает неоднородность распределенной МДС по толщине обмотки (рисунок 1), непрерывная линия; пунктирными линиями изображены намагничивающие силы каждой обмотки в

отдельности, где N_2 число витков вторичной обмотки (торцов обмотки ярмарочными балками обмотки), и не учитывает неполное перекрытие

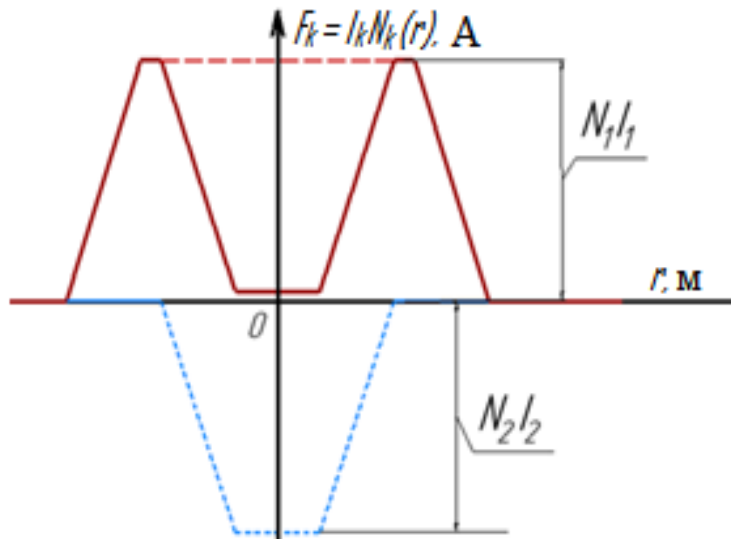


Рисунок 1. Распределение МДС F_k в зависимости от удаления r от оси двух concentрических обмоток: I_k – сила тока, $N_k(r)$ – число витков ($k = 1, 2$)

1. Вычисление распределения потока рассеяния

Расширим возможность схемного метода анализа распределения потока рассеяния при помощи двухмерной дискретизации немагнитного пространства между поверхностями магнитопровода и бака, в котором магнитные потоки определим на основе принципа суперпозиции. Представим активную область в виде элементарных дискретных полых цилиндрических слоев, а каждый элементарный слой замещаем эквивалентной МДС F_k и магнитным сопротивлением R_k ($k = 1, 2, \dots, n$). Значение МДС F_k каждого цилиндрического слоя

определяем по рис. 1.

В силу того, что высота обмотки значительно превышает расстояния до стальных поверхностей, то магнитное сопротивление R_S значительно доминирует над магнитными сопротивлениями пассивной области, поэтому интенсивность элементарных магнитных потоков будет практически определяться параметрами активной области. В этом случае характер распределения каждого элементарного потока между магнитопроводом и баком соответственно будет зависеть только от соотношения магнитных сопротивлений элементарных каналов R_{2k} и R_{3k} соответственно (рис.2).

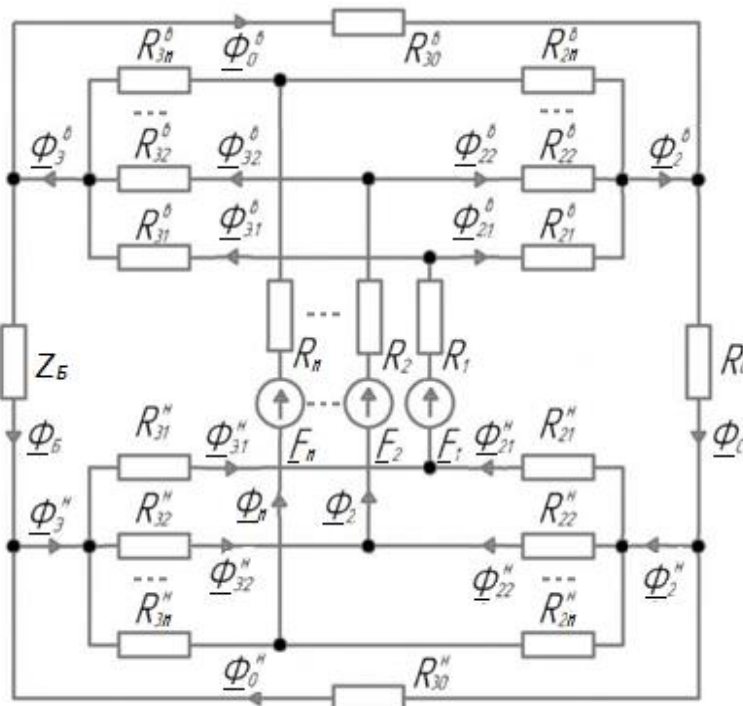


Рисунок 2. Схема магнитной цепи для потока рассеяния масляного трансформатора

Здесь: $R_{2к}$ – магнитное сопротивление замыкания части элементарного потока на поверхность ярмарочных балок, или на стержень магнитопровода, или на выступы ярма; $R_{3к}^B, R_{3к}^H$ – магнитные сопротивления замыкания элементарного потока на стальной бак соответственно от верхнего и от нижнего участков обмотки; R_{30}^B, R_{30}^H – магнитные сопротивления между баком и верхнем и нижнем ярмами соответственно; R_C – магнитное сопротивление стержня; Z_B – комплексное магнитное сопротивление бака.

Элементарные каналы распределения формируются относительно торцевых поверхностей обмотки отдельно на стальную поверхность ярмарочных балок вместе с магнитопроводом и отдельно на поверхность бака. Сначала в двумерном представлении задается эффективный сектор проводимости между обмоткой и соответствующей стальной поверхностью, обусловленный явлениями выпучивания или «растекания» магнитных линий, который разбивается на n квазиподобных элементарных частей. При этом элементарные потоки на одноименную стальную плоскость не

пересекаются.

Элементарные потоки на разноименные стальные плоскости могут пересекаться. При этом результирующая картина поля будет состоять из суперпозиции векторов элементарных магнитных индукций, пересекающихся элементарных потоков, то результирующие магнитные линии не будут пересекаться. Заметим, что для участков вторичной обмотки, расположенных ближе к стержню магнитопровода и находящихся между ярмарочными балками из-за экранирования замыкание потока рассеяния на бак отсутствует. В двумерной топологии цепи результирующие по азимуту магнитные проводимости суммируются ещё из участков, не перекрытых ярмарочными балками. Поэтому на рис. 2 присутствуют конечные значения магнитных сопротивлений $R_{3к}^B, R_{3к}^H$ на любом k -ом дискретном участке.

В трехмерном представлении элементарные каналы распределения магнитного потока могут представлять собой части полых цилиндров или части полых конусообразных дисков (рис. 3).

Магнитное сопротивление между поверхностями a и N полого конусообразного диска вычисляется по формуле:

$$R_D = \frac{D-d}{2\pi\mu_0(a \cdot D - d \cdot N)} \ln\left(\frac{a \cdot D}{d \cdot N}\right).$$

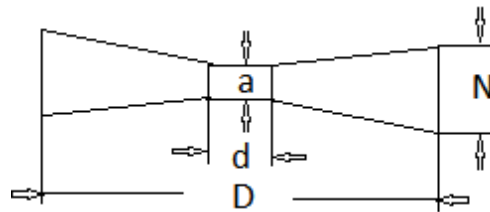


Рисунок 3. Сечение полого конусообразного диска

Пренебрегая сопротивлениями ферромагнитных элементов R_C и Z_B , полная система уравнений Кирхгофа магнитного состояния магнитной цепи на рис. 3 принимает следующий

вид (здесь $R_{2к}^B = R_{2к}^H = R_{2к}$):

$$\Phi_{1к} = \Phi_{2к} + 0,5(\Phi_{3к}^B + \Phi_{3к}^H);$$

$$\Phi_{2к} = 0,5(\Phi_{2к}^B + \Phi_{2к}^H);$$

$$\Phi_{1к} = \Phi_{3к}^B + \Phi_{2к}^B;$$

$$\Phi_3^B - \Phi_3^H = \Phi_{S0}';$$

$$R_k \Phi_k + 2R_{2к} \Phi_{2к} = F_k';$$

$$\Phi_k R_k + (\Phi_{3к}^B R_{3к}^B + \Phi_{3к}^H R_{3к}^H) = F_k';$$

$$\Phi_{3к}^B R_{3к}^B + R_{S0}' \Phi_{S0}' - R_{2к} \Phi_{2к}^B = 0;$$

$$\Phi_3^B = \sum_{k=1}^n \Phi_{3к}^B; \quad \Phi_2^B = \sum_{k=1}^n \Phi_{2к}^B;$$

$$R_{S0}' = R_{30}^B R_{30}^H (R_{30}^B + R_{30}^H)^{-1}; \quad \kappa = 1, 2, \dots, n.$$

Составляющая потока рассеяния, проходящая по стенкам бака, вычисляется по формуле:

$$\Phi_B = \left(0,5 \sum_{k=1}^n (\Phi_{3к}^B + \Phi_{3к}^H) \right) - \frac{1}{2} \Phi_{S0}' \quad (1).$$

Решение системы уравнений в численном виде проводится по программе к ЭВМ, которая разработана на языке Python.

Вычислительный эксперимент проводился на линейке силовых масляных трансформаторах: ВН 10 кВ, НН 0,4 кВ. Трансформаторы проектировались на базе нормированной линейки типовых трехфазных магнитопроводов [5]. Обмотки рассчитывались по типовой методике и применялись минимально допустимые ограничения к геометрическим размерам обмоток и расстояниям элементов трансформатора относительно бака. Трансформатор помещался в бак овальной формы.

На рис. 4 приведены графические зависимости результатов расчета.

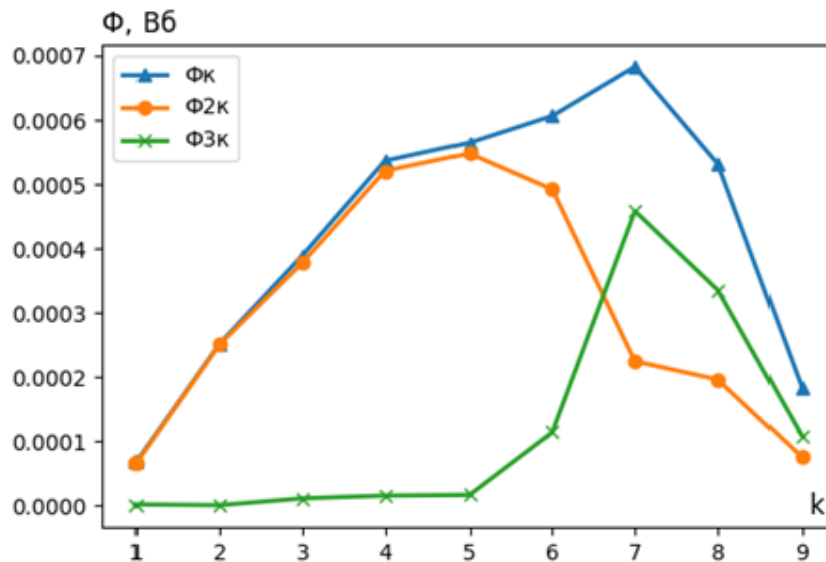


Рисунок 4. Зависимости составляющих потоков рассеяния (S=1000 кВА): Φк – полного; Φ2к – замыкающегося на ярма; Φ3к – замыкающегося на бак

По рассчитанным зависимостям можно судить о характере распределения усредненных к двумерному приближению магнитного потока рассеяния между ярами и баком. С увеличением мощности трансформатора процент замыкания потока рассеяния на бак уменьшается.

2. Моделирование магнитного потока нулевой последовательности

Потоки нулевой последовательности исследуем по классической схеме магнитной цепи для основного потока (рис. 5). Используем

следующую формулу расчета магнитного сопротивления нулевой последовательности R0

$$R_0 = R_{30}^B + R_{30}^H + Z_{B0} \approx R_{30}^B + R_{30}^H \quad (2),$$

где Z_{B0} – комплексное сопротивление бака на уровне между верхними и нижними ярами, которое намного меньше сопротивлений немагнитных зазоров. Рассчитанные по формуле (2) сопротивления представлены в табл. 1.

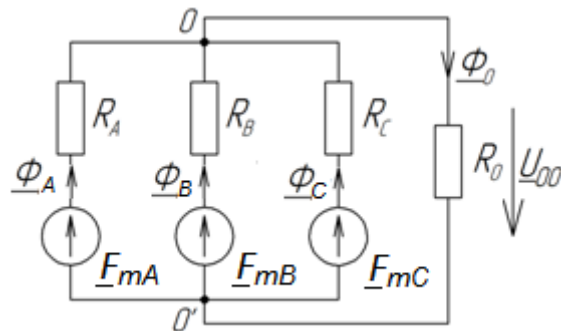


Рисунок 5. Магнитная цепь для основного потока трансформатора

Таблица 1

Магнитные сопротивления линейки трансформаторов					
S, кВ·А	25	63	250	1000	3200
R ₀ , Гн ⁻¹	745000	731000	723000	413000	275000

На рис. 5 приведены следующие обозначения: RA, RB, RC – магнитные сопротивления ветвей трехстержневого магнитопровода (RA = RC = 2RB). МДС

участков магнитопровода:

$$F_{mA} = (N_1 I_{1mA} - N_2 I_{2mA}),$$

$$F_{mB} = N_1 I_{1mB} - N_2 I_{2mB},$$

$$F_{mC} = N_1 I_{1mC} - N_2 I_{2mC}.$$

Анализ проводим методом узловых магнитных

напряжений:

$$U_{00'} \cdot G_M = \Phi_M \quad (3),$$

$$G_M = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_0} = \frac{2}{R_B} + \frac{1}{R_0};$$

$$\Phi_M = \frac{F_{mA}}{R_A} + \frac{F_{mB}}{R_B} + \frac{F_{mC}}{R_C} \quad (4),$$

где Φ_M – комплексная амплитуда узлового

потока; G_M – узловая магнитная проводимость. Из (3) – (4) получим связь комплексной амплитуды узлового магнитного напряжения с эквивалентным током намагничивания $I_{\mu\Sigma\varepsilon}$:

$$\underline{U}_{00'} = \frac{N_1}{G_M R_B} \left(\frac{I_{\mu\Sigma A}}{2} + I_{\mu\Sigma B} + \frac{I_{\mu\Sigma C}}{2} \right) = \frac{N_1}{G_M R_B} I_{\mu\Sigma\varepsilon} \quad (5).$$

Магнитные потоки в каждом стержне соответственно равны:

$$\begin{aligned} \Phi_{mA} &= \frac{1}{2R_B} (E_{mA} - U_{00'}) = \frac{N_1}{2R_B} \left(I_{\mu\Sigma A} - \frac{1}{G_M R_B} I_{\mu\Sigma\varepsilon} \right); \\ \Phi_{mB} &= \frac{1}{R_B} (E_{mB} - U_{00'}) = \frac{N_1}{R_B} \left(I_{\mu\Sigma B} - \frac{1}{G_M R_B} I_{\mu\Sigma\varepsilon} \right); \\ \Phi_{mC} &= \frac{1}{2R_B} (E_{mC} - U_{00'}) = \frac{N_1}{2R_B} \left(I_{\mu\Sigma C} - \frac{1}{G_M R_B} I_{\mu\Sigma\varepsilon} \right) \end{aligned}$$

Суммируя фазные потоки, получим поток

нулевой последовательности:

$$\underline{\Phi}_{m0} = \underline{\Phi}_{mA} + \underline{\Phi}_{mB} + \underline{\Phi}_{mC} \cong -N_1 I_{\mu\Sigma\varepsilon} / 3R_0.$$

Пренебрегая потерями в сердечнике, запишем напряжения электромагнитной индукции на первичных обмотках:

$$\underline{U}_{\mu mA} = j\omega N_1 \underline{\Phi}_{mA};$$

$$\underline{U}_{\mu mB} = j\omega \underline{\Phi}_{mB}; \quad \underline{U}_{\mu mC} = j\omega \underline{\Phi}_{mC}.$$

Проведем анализ потока нулевой последовательности в линейке трансформаторов с соединением обмоток Y/Yn по электрической схеме замещения (рис. 6) при подаче на вход симметричной трехфазной системы ЭДС:

$$\begin{aligned} \underline{E}_{mA} &= E_m, & \underline{E}_{mB} &= E_m e^{-j120^\circ}, \\ \underline{E}_{mC} &= E_m e^{j120^\circ} \end{aligned}$$

На рис. 6 обмотки идеального трансформатора замещены соответствующими ЭДС индукции. Параметры вторичной цепи приведены к первичной.

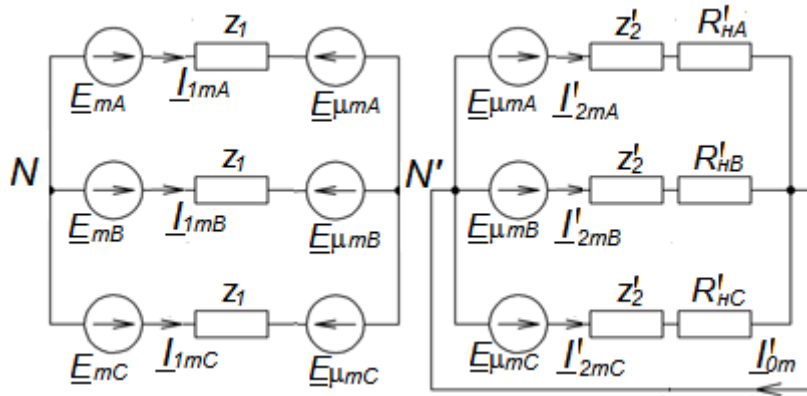


Рисунок 6. Электрическая схема замещения трансформатора с соединением обмоток Y/Yn

Система уравнений по методу узловых напряжений по рис. 6 имеет вид:

$$\underline{U}_{NN'} \cdot Y = \underline{I}_{mY}; \quad Y = 3z_1^{-1} \quad (6).$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{mY} &= z_1^{-1} [(E_{\mu mA} - E_{mA}) + (E_{\mu mB} - E_{mB}) + (E_{\mu mC} - E_{mC})] = \\ &= j\omega N_1 (\underline{\Phi}_{mA} + \underline{\Phi}_{mB} + \underline{\Phi}_{mC}) z_1^{-1} = j\omega N_1 z_1^{-1} \underline{\Phi}_{m0} \quad (7); \end{aligned}$$

$$z_1 \underline{I}_{1mA} - \underline{U}_{NN'} = E_{mA} - E_{\mu mA} \quad (8).$$

$$\underline{U}_{NN'} = j\omega N_1 \underline{\Phi}_{m0} / 3 \quad (9).$$

ЭДС индукции выразим через падения напряжений во вторичной цепи:

$$\underline{E}_{\mu mA} = (z'_2 + R'_{HA}) \underline{I}'_{2mA};$$

$$\underline{E}_{\mu mB} = (z'_2 + R'_{HB}) \underline{I}'_{2mB};$$

$$\underline{E}_{\mu mC} = (z'_2 + R'_{HC}) \underline{I}'_{2mC} \quad (10).$$

В формулах (6) – (7) следующие обозначения:

$$z_1 = r_1 + jx_{s1}; \quad z'_2 = r'_2 + jx'_{s2}; \quad R'_{HA}, R'_{HB}, R'_{HC} - \text{приведенные сопротивления нагрузок;}$$

$\underline{\Phi}_{m0}$ – комплексная амплитуда потока нулевой последовательности (рис. 5).

Рассмотрим однофазный режим КЗ: $R'_{HA} = 0$, $R'_{HB} = R'_{HC} = R'_H \gg |z_1|$ и $|z'_2|$. Подставив (10) в левое выражение (7) и далее в (6), выразим напряжение $\underline{U}_{NN'}$ через электрический режим:

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{1}{3} [(I'_{2mA} + I'_{2mB} + I'_{2mC}) z'_2 + (I'_{2mB} + I'_{2mC}) R'_H] \quad (11).$$

Учитывая то, что в схеме на рис. 6 ток нулевой последовательности \underline{I}'_{0m} существует только во вторичной цепи, уравнения баланса токов в фазах примут следующий вид:

$$\underline{I}_{1mA} - \underline{I}'_{2mA} = \underline{I}_{\mu mA} - \underline{I}'_{0m} / 3;$$

$$\underline{I}_{1mB} - \underline{I}'_{2mB} = \underline{I}_{\mu mB} - \underline{I}'_{0m} / 3;$$

$$\underline{I}_{1mC} - \underline{I}'_{2mC} = \underline{I}_{\mu mC} - \underline{I}'_{0m} / 3 \quad (12).$$

Отметим, что токи $I_{1mA}, I_{1mB}, I_{1mC}$ – симметричные; $I_{\mu mA}, I_{\mu mB}, I_{\mu mC}$ – симметричные составляющие токов намагничивая ветвей сердечника.

Результирующие токи намагничивания соответственно равны:

$$\begin{aligned} I_{\mu \Sigma A} &= I_{\mu mA} - I'_{0m} / 3; \\ I_{\mu \Sigma B} &= I_{\mu mB} - I'_{0m} / 3; \\ I_{\mu \Sigma C} &= I_{\mu mC} - I'_{0m} / 3 \end{aligned} \quad (13).$$

С учетом условия $R_B / R_0 \ll 1$, а в режиме КЗ и $I_{\mu mA}, I_{\mu mB}, I_{\mu mC} \ll I'_{0m}$, то, подставив (13) в (5), получим связь $\underline{U}_{00'}$ с током нулевой последовательности:

$$\underline{U}_{00'} \cong -N_1 I'_{0m} / 3 \quad (14).$$

По рис. 5 формула магнитного потока нулевой последовательности:

$$\Phi_{m0} = \underline{U}_{00'} / R_0 \cong -N_1 I'_{0m} / 3R_0 \quad (15).$$

Из (9) с учетом (15) определим узловое электрическое напряжение:

$$\underline{U}_{NN'} = -jx_0 I'_{0m},$$

$$x_0 = (9R_0)^{-1} \omega N_1^2 \quad (16),$$

где x_0 – реактивное сопротивление нулевой последовательности.

Подставив (12) в (11), определим узловое электрическое напряжение:

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{1}{3} \left[\left(z'_2 + \frac{2}{3} R'_H \right) I'_{0m} - R'_H I_{1mA} \right] \quad (17).$$

Подставив в (8) с учетом (12) выражение

$$\underline{E}_{\mu mA} = z'_2 I'_{2mA} \cong z'_2 \left(I_{1mA} + I'_{0m} / 3 \right) \quad (17),$$

получим формулу для расчета тока I_{1mA} при однофазном КЗ в фазе А

$$I_{1mA} = \frac{9E_{mA} + 2R'_H I'_{0m}}{9(z'_1 + z'_2) + 3R'_H} \cong \frac{9E_{mA} + 2R'_H I'_{0m}}{3R'_H} \quad (18).$$

Подставив (18) в (17), получим

$\underline{U}_{NN'} \cong \underline{E}_{mA}$. Из (16) и (15) определим соответственно ток и поток нулевой последовательности при КЗ в фазе А:

$$I'_{0m} = j \frac{E_{mA}}{x_0};$$

$$\Phi_{m0} = -j \frac{3E_{mA}}{\omega N_1} = -j \frac{\sqrt{6} U_1}{\omega N_1} \quad (19).$$

Значения магнитных потоков рассеяния и нулевой последовательности для линейки трансформаторов 10/0.4 кВ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Амплитудные значения потоков рассеяния и нулевой последовательности при номинальном режиме и коротком замыкании

S, кВА	25	63	250	1000	3200
I_x , А	0.043	0.130	0.230	0.348	0.925
U_k , В	400	400	400	600	600
$\Phi_{S\text{Бм ном.}}$, Вб	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$
$\Phi_{S\text{Бм КЗ}}$, Вб	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$
$\Phi_{m0 \text{ КЗ}}$, Вб	0.034	0.04	0.07	0.13	0.28

Заключение

Разработана методика расчета потоков рассеяния и нулевой последовательности для силовых масляных трехфазных трансформаторов с соединением обмоток Y/Yн. Методика базируется на схемах замещения магнитной и электрической цепей трансформатора. Получены расчетные формулы для вычислений в режиме однофазного короткого замыкания потоков нулевой последовательности, реактивного сопротивления нулевой последовательности, которое

соответствует соотношению E_{mA} / I'_{0m} .

Первичный ток в фазе замыкания превышает номинальный в 3-4 раза.

Предельные значения кратковременных потоков нулевой последовательности при однофазном коротком замыкании на два порядка превышают стационарные потоки рассеяния в баке трансформатора. С увеличением мощности трансформатора поток нулевой

последовательности также возрастает.

Литература

- Zirka S. E., Moroz Y. I., Arturi C. M. Accounting for the Influence of the Tank Walls in the Zero-Sequence Topological Model of a Three-Phase, Three-Limb Transformer IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, NO. 5, 2014.– pp. 2172-2179.
- Зирка С. Е., Мороз Ю. И., Мороз Е. Ю. и др. Моделирование переходных процессов в трехфазном трансформаторе с учетом топологии и гистерезисных свойств магнитопровода // Техническая электродинамика. – 2011. – № 5. – С. 25-35.
- Богимова А. А., Меньшов Е. Н. Синтез схемы замещения магнитной цепи трёхфазного трансформатора // Сб. матер. 57-й научн.-техн. конф., Ульяновск, 23–28 января 2023 года. Часть 1. – Ульяновск: УлГТУ, 2023. – С. 166-168. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<http://lib.ulstu.ru/venec/disk/2023/61.pdf>

4. Туровский Я. Техническая электродинамика. Пер с пол. – М.: Энергия, 1974. – 488 с.

5. Сухие трансформаторы. Технический каталог. Группа СВЕЛ [Электронный ресурс] : 2022. – Режим доступа:

https://svel.ru/upload/st/katalog_sukhie_transformatory_svel_ru_2022_06.pdf

References

1. Zirka S. E., Moroz Y. I., Arturi C. M. Accounting for the Influence of the Tank Walls in the Zero-Sequence Topological Model of a Three-Phase, Three-Limb Transformer IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, No. 5, 2014. – pp. 2172-2179.

2. Zirka S. E., Moroz Yu. I., Moroz E. Yu. and oth. Modeling of transient processes in a three-phase

transformer taking into account the topology and hysteresis properties of a magnetic circuit // Technical electrodynamic. - 2011. – No. 5. – pp. 25-35.

3. Bogimova A. A., Menshov E. N. Synthesis of a magnetic circuit replacement circuit of a three-phase transformer // Sat. mater. 57th Scientific and Technical conf., Ulyanovsk, January 23-28, 2023. Part 1. Ulyanovsk: UISTU, 2023. pp. 166-168. [Electronic resource] – Access mode: <http://lib.ulstu.ru/venec/disk/2023/61.pdf>

4. Turovsky Ya. Technical electrodynamic. Translated from the floor. – М.: Energy, 1974. – 488 p.

5. Dry transformers. Technical catalog. SVEL Group [Electronic resource]: 2022. – Access mode: https://svel.ru/upload/st/katalog_sukhie_transformatory_svel_ru_2022_06.pdf

Евразийский Союз Ученых.

Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 3 (128)/2025 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Штерензон Вера Анатольевна

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

Синьковский Антон Владимирович

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

Штерензон Владимир Александрович

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

Зыков Сергей Арленович

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

Дронсейко Виталий Витальевич

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.