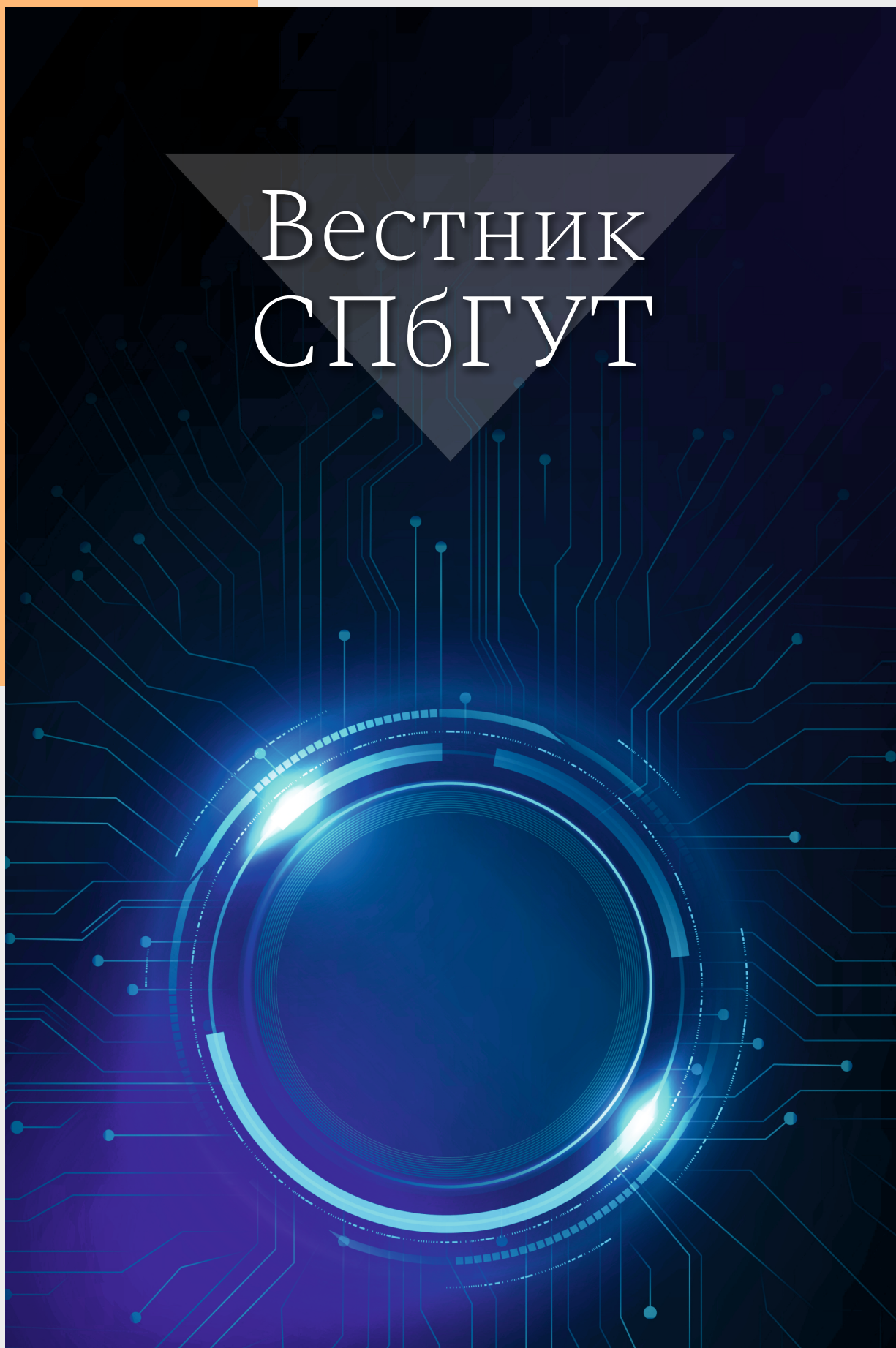


ISSN 3034-2201

Вестник СПбГУТ

Том 3. № 1. 2025



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Научный журнал

Вестник СПбГУТ

Том 3. № 1

Herald of SPbSUT

Vol. 3. Iss. 1

Санкт-Петербург

2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Editorial Board

Главный редактор *Editor-in-Chief*

Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)
Vladyko A.G. (St. Petersburg)

Гехт А.Б. (Санкт-Петербург)
Gekht A.B. (St. Petersburg)

Дунайцев Р.А. (Санкт-Петербург)
Dunaytsev R.A. (St. Petersburg)

Зикратов И.А. (Санкт-Петербург)
Zikratov I.A. (St. Petersburg)

Калимуллина О.В. (Санкт-Петербург)
Kalimullina O.V. (St. Petersburg)

Литвинов В.Л. (Санкт-Петербург)
Litvinov V.L. (St. Petersburg)

Маколкина М.А. (Санкт-Петербург)
Makolkina M.A. (St. Petersburg)

Симонина О.А. (Санкт-Петербург)
Simonina O.A. (St. Petersburg)

Сотников А.Д. (Санкт-Петербург)
Sotnikov A.D. (St. Petersburg)

Фокин Г.А. (Санкт-Петербург)
Fokin G.A. (St. Petersburg)

Шутман Д.В. (Санкт-Петербург)
Shutman D.V. (St. Petersburg)

Юрова В.А. (Санкт-Петербург)
Yurova V.A. (St. Petersburg)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Инвестиционные проекты
и альтернативные вложения капитала
Котов В. И.

1

*Investment Projects and Alternative
Capital Investments*
Kotov V.

Анализ модельных расчетов
системы водород–ванадий–хром
методом функционала плотности
Буланов В. Н.

2

*Analysis of Model Calculations of the
Hydrogen–Vanadium–Chromium System
by the Density Functional Method*
Bulanov V.

Исследование усечения сферой
электродинамической модели
«корпус автомобиля –
низкопрофильная антенна»
Лянгузов Д. А.

3

*Study of Sphere Truncation
of the Electrodynamical Model
“Car Body – Low-Profile Antenna”*
Lyanguzov D.

Практическая реализация дробного
нониусного тракта приведения
умножающего кольца импульсно-фазовой
автоподстройки частоты
Тихонов Я. А.

4

*Practical Implementation of a Fractional
Vernier Frequency Translation Loop
in a Multiplying Phase-Locked Loop
System*
Tikhonov I.

Разработка пользовательско-
ориентированной системы
умной парковки
Матвеев А. С., Парамонов А. И.

5

*Development of a User-Oriented
Smart Parking System*
Matveev A., Paramonov A.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций: Эл № ФС77-85553 от 28 июня 2023 г.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Учредитель Федеральное государственное бюджетное образовательное
и издатель: учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

Адрес 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки,
учредителя: д. 61, литера А

Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2
Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022,

E-mail: vestnik@sut.ru
Web: <http://vestnik-sut.ru>

УДК 338.28
EDN: ZHOFVD

Инвестиционные проекты и альтернативные вложения капитала

Котов В. И.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: сравнить доходность вложения в реальный инвестиционный проект, представленный показателями, рассчитанными на основе динамической модели денежных потоков, с альтернативными вложениями капитала, например, в ценные бумаги. **Целью работы** является определение критерия выбора направления вложений для инвестора и построение модели для сравнительной оценки этих вложений. **Используемые методы:** динамическая модель денежных потоков Cash-Flow, генерирующая показатели инвестиционного проекта в пределах заданного горизонта планирования, метод функций чувствительности для оценки рисков и расчет динамики доходности альтернативных вложений с учетом инфляции. **Новизна:** разработан критерий принятия решения инвестором о выборе наиболее прибыльного вложения капитала с учетом динамики сравниваемых показателей. **Результаты:** предложена методика и модель определения границы доходности альтернативных вложений по сравнению с доходностью инвестиционного проекта.

Ключевые слова: инвестиции, инвестиционный проект, чистая текущая стоимость, номинальная доходность, чистая доходность, инфляция, горизонт планирования, риски.

Актуальность исследования

Перед любым инвестором, желающим вложить свои денежные средства с максимальной прибылью, возникает проблема выбора варианта инвестирования. Таковым может быть реальный инвестиционный проект, представленный соответствующим бизнес-планом, или альтернативные вложения в какие-либо ценные бумаги (например, акции публичных компаний) с известной нормой доходности. Факторами, влияющими на принятие инвестиционного решения, обычно являются: горизонт планирования инвестора, срок окупаемости проекта, объем инвестиций, прогноз темпов инфляции и риски.

Показатели эффективности инвестиционных проектов и методы их расчета хорошо известны и описаны в литературе [1–4]. Часто в качестве основного показателя доходности выбирают чистую текущую стоимость проекта NPV (аббр. от англ. Net Present Value). В подавляющем числе публикаций при сравнении проектов между собой этот показатель рассматривается лишь на горизонте планирования, что может привести к неверной оценке прогноза доходности проекта. В наших работах [1, 2] этот показатель рассчитывается с помощью динамической модели Cash-Flow как функция времени в пределах всего горизонта планирования, а именно:

$$NPV_T = \sum_{t=0}^T \frac{\Delta NCF_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{\Delta I_t}{(1+d)^t},$$

Библиографическая ссылка на статью:

Котов В. И. Инвестиционные проекты и альтернативные вложения капитала // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 1. С. 1. EDN: ZHOFVD

Reference for citation:

Kotov V. Investment Projects and Alternative Capital Investments // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 1. P. 1. EDN: ZHOFVD

где t — номер текущего периода (шага) планирования; T — номер периода, для которого производится расчет показателя, включая горизонт планирования; ΔNCF_t — прирост чистого денежного потока от реализации данного проекта в периоде t , включающий чистую прибыль и амортизационные отчисления; ΔI_t — прирост инвестиций в периоде t , связанных с данным проектом; d — ставка дисконтирования, учитывающая влияние инфляции i и рисков проекта R , а именно: $1 + d = (1 + i)(1 + R)$.

Во многих публикациях по финансовому менеджменту и инвестиционным проектам, например в [3], рекомендуют оценивать эффективность проекта по внутренней норме возврата (доходности) IRR (аббр. от англ. Internal Rate of Return), по определению равной ставке дисконтирования, при которой $NPV = 0$. Однако этот показатель не дает возможности оценить ни доходность проекта, ни масштаб его инвестиций. В работе [5] авторы дают весьма обоснованную критику применения этого показателя и не рекомендуют его для сравнительной оценки доходности проектов.

На решение инвестора может влиять не только будущая доходность проекта, но и риски таких инвестиций. Для оценки рискованности любого проекта в наших работах [1, 2] представлена методика риск-анализа, которая с помощью функций чувствительности и теории нечетких множеств позволяет рассчитать рисковую поправку R в ставке дисконтирования для конкретного проекта. Эта ставка влияет на динамику $NPV(T)$ в пределах всего горизонта планирования. Указанная методика риск-анализа позволяет избавиться от субъективности в определении ставки дисконтирования и дает интегральные показатели степени рискованности для инвестиционного проекта при воздействии на него различных совокупностей рисков. Если имеются несколько инвестиционных проектов с одинаковой степенью рискованности, из которых инвестору нужно выбрать наиболее предпочтительный по прибыльности, сроку окупаемости и объему инвестиций, то показатель $NPV(T)$ позволяет сделать обоснованный выбор. Для принятия решения необходимо сравнить прибыльность выбранного инвестиционного проекта с возможными альтернативными вложениями в ценные бумаги или иные инструменты инвестирования.

Постановка задачи

Полагаем, что у инвестора имеется подходящий инвестиционный проект и возможности альтернативных вложений с известной нормой доходности D в год. Кроме того, известен прогноз темпа инфляции в пределах выбранного горизонта планирования, который учитывался при расчете показателя $NPV(T)$ инвестиционного проекта и должен учитываться при оценке альтернативных вложений. Динамику показателя $NPV(T)$ проекта необходимо сравнивать с динамикой доходности любых альтернативных вложений денежных средств инвестора. Для этого следует построить модель расчета динамики чистой доходности (с учетом инфляции) этих альтернативных вложений в пределах всего горизонта планирования. Для корректности сравнения объем альтернативных вложений должен совпадать с объемом и темпом вложений в инвестиционный проект, выбранный для сравнения.

Методика сравнительного анализа доходности различных вариантов инвестирования

В дальнейшем будем различать номинальный будущий доход от вложений и чистый доход с учетом известного темпа инфляции i . Для построения динамической модели оценки чистого дохода альтернативных вложений при известной норме доходности D рассмотрим основные соотношения. Будущие номинальные доходы FV_T (аббр. от англ. Future Value — будущая стоимость) при единовременном вложении PV_0 (аббр. от англ. Present Value — текущая стоимость) без учета инфляции:

$$FV_T = PV_0(1 + D)^T,$$

где T — здесь и далее «к моменту T ».

Единовременные вложения с учетом инфляции дают в будущем чистый доход:

$$\frac{FV_T}{(1+i)^T} = PV_0 \left(\frac{1+D}{1+i} \right)^T = PV_0(1 + ND)^T = NFV_T,$$

откуда следует известная формула Ирвинга Фишера для чистой нормы доходности с учетом инфляции:

$$ND = \frac{D-i}{1+i}.$$

При вложениях вначале разных периодов t с постоянной доходностью D суммарный номинальный будущий доход на горизонте планирования T будет рассчитываться по формуле:

$$FV_T = \sum_{t=0}^T PV_t(1+D)^{T-t}.$$

Для каждого отдельного вложения в момент k имеем динамику будущего номинального дохода, который нарастает от момента вложения вплоть до горизонта T :

$$FV_{t,k} = PV_k(1+D)^{t-k}, \quad (1)$$

где $k \leq t \leq T$ и $0 \leq k \leq T$; t – здесь и далее «в момент t ».

При вложениях в начале разных периодов t , с постоянной доходностью D , с учетом инфляции чистый суммарный будущий доход на горизонте планирования T будет рассчитываться по формуле:

$$NFV_T = \sum_{t=0}^T PV_t \left(\frac{1+D}{1+i} \right)^{T-t}.$$

Если k – любой период вложения от 0 до N , где N соответствует горизонту планирования T , тогда получаем динамику чистого суммарного будущего дохода $NFV_{t,k}$ во времени для каждого отдельного вложения PV_k :

$$NFV_{t,k} = PV_k \left(\frac{1+D}{1+i} \right)^{t-k}, \quad (2)$$

где $k \leq t \leq T$ и $0 \leq k \leq T$, если $k > t$, то $NFV_{t,k} = 0$. Далее суммируем в каждый момент времени t все результаты вложений, т. е. $NFV_{t,k}$:

$$NFV_t = \sum_{k=0}^N NFV_{t,k} = \sum_{k=0}^N PV_k \left(\frac{1+D}{1+i} \right)^{t-k}. \quad (3)$$

Ниже (рисунок 1) показан фрагмент EXCEL-модели (Cash-Flow), описанной в [1], для расчета динамики будущего номинального дохода, рассчитанного по формуле (1). Здесь вложения инвесторов такие же по объемам и темпам, как в инвестиционном проекте.

Наименование	Период	0	1	2	3	4	5	24
	Кварт.Год	0.2025	1.2025	2.2025	3.2025	4.2025	1.2026	4.2030
Вложения инвесторов и кредиторов в основные и оборотные средства за период	тыс. руб.	455	1 832	877	-	-	-	-
Накопленные вложения инвесторов и кредиторов в основные и оборотные средства к периоду	тыс. руб.	455	2 287	3 164	3 164	3 164	3 164	3 164
Доля кредитора	%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
NPV с учетом инвестиций в ОС и оборотные средства	тыс. руб.	(455)	(4 012)	(5 666)	(5 638)	(4 597)	(3 018)	22 288
Альтернативная доходность вложений (D) за год	%	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%	54.7%
Альтернативная доходность вложений (D) за период	%	11.53%	11.53%	11.53%	11.53%	11.53%	11.53%	11.53%
FV(t)0	тыс. руб.	455	508	566	632	704	786	6 249
FV(t)1	тыс. руб.		1 832	2 043	2 279	2 541	2 834	22 542
FV(t)2	тыс. руб.			877	978	1 091	1 217	9 678
FV(t)3	тыс. руб.				-	-	-	-
FV(t)24	тыс. руб.							-
Всего доходов от вложений FV(t)	тыс. руб.	455	2 340	3 486	3 889	4 337	4 837	38 469

Рис. 1. Будущие номинальные доходы от альтернативных вложений

Здесь же представлена динамика $NPV(T)$ инвестиционного проекта, рассчитанная с помощью модели Cash-Flow. Период (шаг) планирования — квартал, а горизонт планирования — 24 периода (6 лет). Годовой темп инфляции — 10 %, а ставка дисконтирования с учетом риска проекта — 12,55 %.

На рисунке 2 показан фрагмент EXCEL-модели для расчета динамики будущего чистого дохода, рассчитанного по формулам (2) и (3).

Чистые альтернативные доходы NFV с учетом инфляции	Период	0	1	2	3	4	5	24
Темп инфляции за год	%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%
Темп инфляции за период	%	2.41%	2.41%	2.41%	2.41%	2.41%	2.41%	2.41%
$NFV(t)0$	тыс. руб.	455	496	540	588	640	697	3 527
$NFV(t)1$	тыс. руб.		1 832	1 995	2 173	2 366	2 577	13 031
$NFV(t)2$	тыс. руб.			877	955	1 040	1 133	5 730
$NFV(t)3$	тыс. руб.				-	-	-	-
$NFV(t)24$	тыс. руб.							-
Всего чистых доходов от вложений $NFV(T)$ с учетом инфляции	тыс. руб.	455	2 328	3 412	3 716	4 047	4 407	22 288
$NPV(T) - NFV(T)$	тыс. руб.	(911)	(6 340)	(9 078)	(9 354)	(8 643)	(7 425)	(0)

Рис. 2. Будущие чистые альтернативные доходы с учетом инфляции

В последней строке таблицы (рисунок 2) для сравнения доходности вложений представлена разность между $NPV(T)$ проекта и чистой доходностью $NFV(T)$ от альтернативных вложений.

Альтернативная годовая доходность D , при которой чистые доходы от вложений в инвестиционный проект, а именно $NPV(24) = 22\,288\,000$ руб. (см. рисунок 1), сравниваются с суммарными чистыми доходами от альтернативных вложений $NFV(24) = 22\,288\,000$ руб. в том же 24-м периоде, находится с помощью EXCEL-опции «Подбор параметра». Целевой функцией при этом должна быть $NFV(24)$, а варьируемым параметром — альтернативная доходность D (в желтой строке значение доходности повторяется во всех периодах). На рисунке 3 показано окно опции «Подбор параметра».

Подбор параметра

Установить в ячейке: [$NFV(24)$]

Значение: [$NPV(24) = 22\,288$]

Изменяя значение ячейки: [D]

OK

Отмена

Рис. 3. Окно опции «Подбор параметра»

В результате после запуска итерационного процесса «Подбор параметра» получаем значение альтернативной доходности $D = 54,7\%$ в год. Это означает, что при такой доходности на границе горизонта планирования чистые доходы инвестиционного проекта сравниваются с чистыми доходами от альтернативных вложений. Объемы и темп вложений денежных средств в обоих случаях были одинаковыми: 455 000 руб. в нулевом периоде, 1 832 000 тыс. руб. в 1-м периоде и 877 000 руб. во 2-м периоде, соответственно (рисунок 1).

Если доходность от альтернативных вложений будет меньше чем 54,7 %, то вложения в инвестиционный проект будут выгоднее. В противном случае от проекта следует отказаться в пользу альтернативных вложений. На рисунке 4 показана динамика чистой текущей стоимости проекта $NPV(T)$. Как видно из графика, срок окупаемости проекта наступает в 7-м периоде, когда $NPV = 0$.

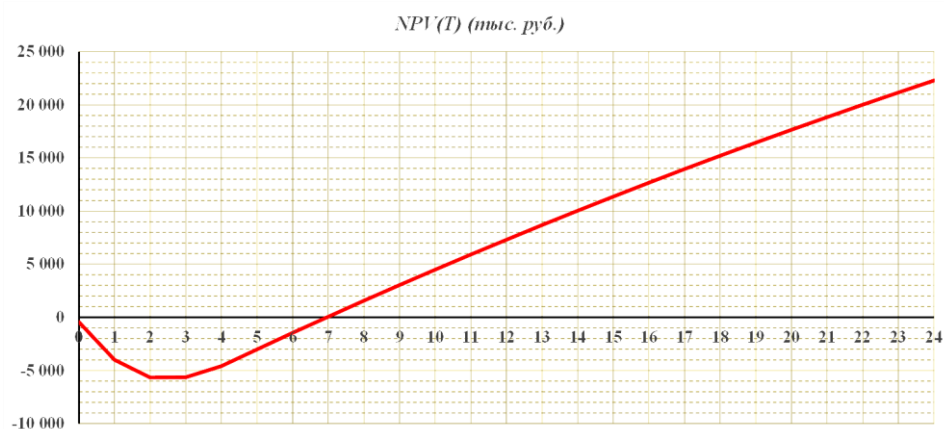


Рис. 4. Динамика чистой текущей стоимости инвестиционного проекта

На рисунке 5 показана динамика чистой доходности альтернативных вложений с учетом инфляции.

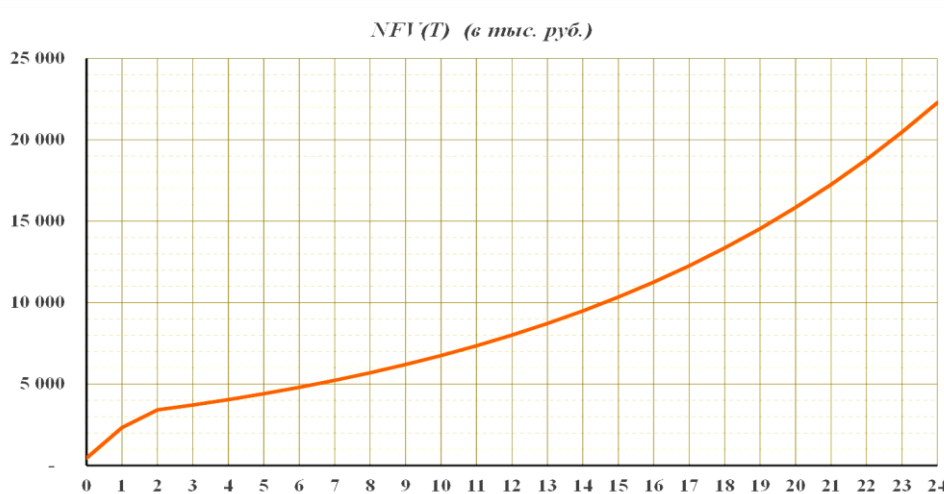


Рис. 5. Динамика чистых доходов от альтернативных вложений

Если в каждом периоде из динамики значений $NPV(T)$ вычесть динамику значений $NFV(T)$, как видно из последней строки таблицы на рисунке 2, то получим следующий график (рисунок 6), из которого видно, что вложения в инвестиционный проект при доходности альтернативных вложений, равной 54,7 %, становятся выгоднее, начиная с 13-го периода, так как здесь чистая текущая стоимость превышает суммарный доход от альтернативных вложений.

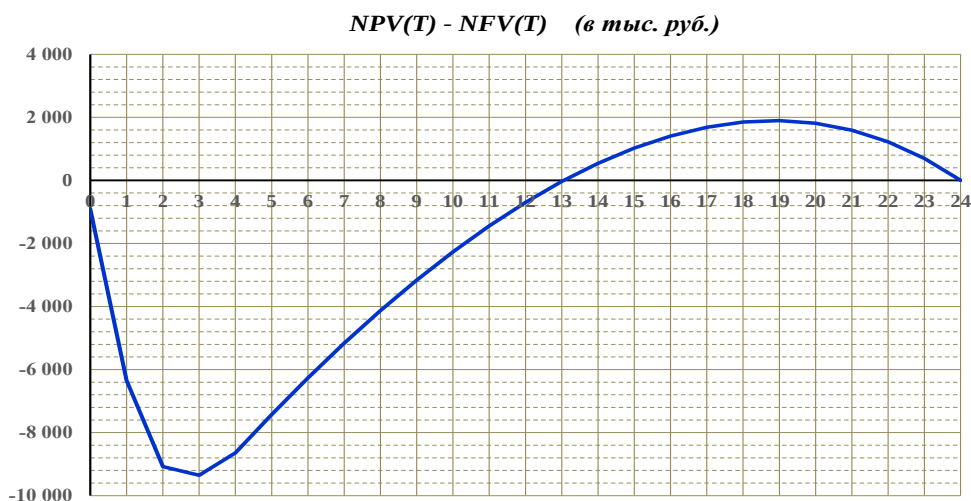


Рис. 6. Динамика выгоды инвестиционного проекта по сравнению с альтернативными вложениями

Выводы

Для сравнительной оценки доходности инвестиционного проекта и альтернативных вложений необходимо иметь динамическую модель Cash-Flow финансовых показателей проекта. В качестве критерия выбора направления денежных вложений целесообразно использовать динамику показателя $NPV(T)$ в пределах всего горизонта планирования, рассчитанную с учетом инфляции и рисков данного проекта.

На основе чистых доходов альтернативных вложений, представленных формулами (2) и (3), строим EXCEL-модель динамики этих доходов при варьируемых показателях доходности D , но при тех же объемах и темпе инвестиций, как и в проекте, выбранном для сравнения. С помощью опции «Подбор параметра» находим граничное значение доходности D . Если доходность альтернативных вложений будет меньше граничного значения, то вложения в проект будут выгоднее, чем альтернативные вложения. В противном случае от вложений в проект следует отказаться.

При использовании данной методики предполагается, что степень рискованности проекта и альтернативных вложений примерно одинакова. Если это не так, то при выборе инвестиционного решения инвестору следует сделать соответствующую поправку на риск. Как правило, чем выше доходность, тем выше рискованность вложений. Эту дилемму каждый инвестор решает с учетом своего отношения к риску и доходности вложений.

Литература

1. Котов В. И. Инвестиционные проекты. Риск-анализ и оценка эффективности: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2024. 180 с.
2. Котов В. И. Риск-анализ инвестиционных проектов на основе функций чувствительности и теории нечетких множеств. СПб.: Астерион, 2019. 350 с. EDN: EHYONX
3. Бригхем Ю., Гапенски Л. Финансовый менеджмент. Полный курс: в 2-х томах / Пер. с англ. под ред. В. В. Ковалева. СПб.: Экономическая школа, 1998. Т. 1. 497 с.; Т. 2. 669 с.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. 2-я редакция. Утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21.06.1999 г. / Рук. авт. коллектива: Косов В. В., Лившиц В. Н., Шахназаров А. Г. М.: Экономика, 2000. 421 с.
5. Келлехер Дж., МакКормак Дж. Внутренняя норма рентабельности: поучительная история // Вестник McKinsey. 2004. № 3 (8).

Статья поступила 11 февраля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 20 февраля 2025 г.
Принята к публикации 24 февраля 2025 г.

Информация об авторе

Котов Виктор Иванович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экономики данных факультета социальных технологий и экономики данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: kotov-vi@yandex.ru, kotov.vi@sut.ru

Investment Projects and Alternative Capital Investments

V. Kotov

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Statement of the problem: to compare the return on investment in a real investment project, presented by indicators calculated on the basis of a dynamic cash flow model, with alternative capital investments, for example, in securities. **The purpose of the work** is to determine the criterion for choosing the direction of investments for the investor and to build a model for comparative assessment of these investments. **The methods used:** the dynamic cash flow model Cash-Flow, generating investment project indicators within a given planning horizon, the sensitivity function method for risk assessment and calculating the dynamics of the return on alternative investments taking into account inflation. **Novelty:** a criterion has been developed for making an investor's decision on choosing the most profitable capital investment taking into account the dynamics of the compared indicators. **Results:** a methodology and a model for determining the profitability boundary of alternative investments in comparison with the return on the investment project have been proposed.

Key words: investments, investment project, net present value, nominal yield, net profitability, inflation, planning horizon, risks

Information about Author

Kotov Viktor — Ph. D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Data Economics of the Faculty of Social Technologies and Data Economics (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: kotov-vi@yandex.ru, kotov.vi@sut.ru

УДК 53.05
EDN: UFBTMJ

Анализ модельных расчетов системы водород–ванадий–хром методом функционала плотности

Буланов В. Н.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: исследования взаимодействий водорода со сплавами открывают новые горизонты для разработки инновационных материалов, способствующих эффективному хранению и использованию водорода в энергетическом секторе. Изучение системы водород–ванадий–хром способствует пониманию взаимодействий водорода с данной системой и его влияния на свойства сплава, что **актуально** для разработки материалов для хранения водорода. Для исследования системы водород–ванадий–хром использовался **метод** функционала плотности (DFT). **Цель** работы состоит в оценке влияния водорода на электронные и механические характеристики сплава ванадия и хрома. **Новизна:** расчеты, выполненные с применением метода функционала плотности, указывают на то, что водород повышает проводимость и стабильность сплава, а также способствует увеличению потенциала сплава для хранения водорода. **Результат:** увеличение скорости диффузии и механической стабильности сплава в водородной среде может быть связано с изменениями в электронной структуре материала; повышение свойств полученного материала для хранения водорода делает данный сплав перспективным для энергетической отрасли, особенно в контексте поиска альтернативных источников энергии. **Теоретическая / Практическая значимость:** результаты исследования могут быть применены для создания новых материалов, предназначенных для хранения водорода и использования в энергетической отрасли.

Ключевые слова: функционал плотности, система водород–ванадий–хром, электронная запрещенная зона, связывающая энергия, механическая стабильность, энергетические материалы

Введение

Для удовлетворения растущих потребностей водородной энергетики, решения задач микроэлектроники по получению сверхчистого водорода и других областей все большее внимание уделяется поиску материалов со свойствами близкими к палладию, чьи уникальные свойства по взаимодействию с водородом широко известны. Одним из решений является использование сплавов на основе ванадия [1, 2]. Хотя авторы указанных работ получили сплав с уникальными свойствами, решающими поставленные практические задачи, механизмы диффузии водорода в кристаллической решетке сплавов мало изучены. Одним из способов решения этой задачи может стать использование метода функционала плотности (DFT, аббр. от англ. Density Functional Theory – теория функционала плотности).

Одной из важнейших областей исследования в материаловедении стало изучение систем металл–водород [3]. Взаимодействие между водородом и переходными металлами, такими как ванадий и хром, представляет особый интерес благодаря возможности их применения в хранении и катализе во-

Библиографическая ссылка на статью:

Буланов В. Н. Анализ модельных расчетов системы водород–ванадий–хром методом функционала плотности // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 1. С. 2. EDN: UFBTMJ

Reference for citation:

Bulanov V. Analysis of Model Calculations of the Hydrogen–Vanadium–Chromium System by the Density Functional Method // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 1. P. 2. EDN: UFBTMJ

дорода. Ванадий (10 %) и хром (20 %), известные своими исключительными структурными и электронными свойствами, представляют собой интересный случай при объединении в сплав, взаимодействующий с водородом.

Целью исследования является анализ модельных расчетов системы водород–ванадий–хром методом функционала плотности на основе нескольких работ [4, 5]. Несмотря на подробное рассмотрение отдельных взаимодействий водорода с ванадием и хромом объединенная система не была тщательно изучена [6], что дает уникальную возможность внести свой вклад в эту область путем исследования синергетических эффектов в процессах адсорбции и десорбции водорода, которые имеют решающее значение для практического применения. Данное исследование, использующее расширенные расчеты методом DFT, направлено на то, чтобы изучить действующие микроскопические механизмы и предсказать поведение металлов в различных условиях, тем самым прокладывая путь для разработки более эффективных и надежных материалов для хранения водорода.

Методы исследования

В данном исследовании применялась теория функционала плотности для изучения взаимодействий внутри системы водород–ванадий–хром с использованием вычислительных возможностей Венского пакета моделирования *ab initio* (VASP, аббр. от англ. the Vienna Ab initio Simulation Package) – программного комплекса для проведения первопринципных квантово-механических расчетов. Метод DFT выбран из-за его точности в прогнозировании свойств материала на квантово-механическом уровне, что имеет решающее значение для анализа сложных взаимодействий металл–водород. В расчетах преимущественно применяется обобщенное градиентное приближение Пердью – Берка – Эрнцерхофа (PBE) для обменно-корреляционных энергий, известное своим балансом вычислительной эффективности и точности [6]. Перекрестная проверка ключевых свойств осуществляется посредством гибридного функционала Хейда – Скузерии – Эрнцерхофа (HSE), обеспечивающего надежность выводов.

Компьютерное моделирование представляет собой моделирование кристаллических структур ванадия и хрома в их стабильных фазах с включением атомов водорода в межузельные позиции для изучения различных стехиометрий и конфигураций.

Для получения подробных и надежных результатов зона Бриллюэна отбирается с помощью специальной сетки Монкхорста – Пака с учетом симметрии и размера каждой системы. Энергия отсечки плоской волны 500 эВ выбрана для обеспечения сходимости расчетов полной энергии, при этом критерии сходимости электронной релаксации установлены на уровне 10^{-5} эВ, а ионная релаксация требует силы менее 0,01 эВ / Å на каждый атом.

Исследование, основанное на теории функционала плотности, представляет собой сложный подход к изучению взаимодействий в системе водород–ванадий–хром. Метод DFT является высоко ценной техникой в материаловедении из-за своей способности предсказывать свойства материалов на квантово-механическом уровне с большой точностью, что особенно важно для анализа металл-водородных систем.

Вычислительные расчеты выполнены с использованием VASP, который широко применяется благодаря его эффективности и точности в моделировании кристаллических структур и их электронных свойств. Обобщенное градиентное приближение используется для расчета обменно-корреляционных энергий, что позволяет достигать баланса между вычислительной эффективностью и точностью. Для усиления надежности результатов также применяется гибридный функционал HSE, который позволяет провести перекрестную проверку ключевых характеристик системы [7]. Расчеты включают моделирование стабильных фаз ванадия и хрома с внедрением водорода в межузельные позиции, что дает возможность изучать различные стехиометрические отношения и конфигурации. Это детальное исследование зоны Бриллюэна с помощью сетки Монкхорста – Пака и установленной энергии отсечки в 500 эВ дополнительно укрепляет валидность моделирования [8].

Энергия абсорбции водорода в системе водород–ванадий–хром рассчитывается по следующей формуле, что существенно для оценки ее устойчивости и возможностей использования в энергетике:

$$E_{abs} = E_{H-V-Cr} - (E_{V-Cr} + E_H).$$

Для расчета электронной поляризуемости системы водород–ванадий–хром используется выражение, важное для понимания ее квантово-химических свойств:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial \epsilon^2} \right).$$

Для оптимизации структуры системы водород–ванадий–хром применяется формула, которая определяет изменение энергии системы после оптимизации ее структуры, что позволяет выявить наиболее стабильные конфигурации атомов водорода в матрице ванадия и хрома:

$$\Delta E_{opt} = E_{optimized} - E_{ads}.$$

В исследовании системы водород–ванадий–хром особое внимание уделяется взаимодействиям водорода с атомами ванадия и хрома, определяющими ключевые структурные и энергетические характеристики системы. Влияние других возможных примесей или дефектов структуры в данной работе не рассматривается. В системе моделируется металлическая решетка, в которой атомы водорода занимают специфические позиции.

Для количественной оценки энергии взаимодействия водорода с металлической матрицей используется следующая формула:

$$E_{ads} = E_{H-V-Cr} - (E_{V-Cr} + E_H),$$

где E_{ads} — энергия адсорбции водорода; E_{H-V-Cr} — полная энергия системы водород–ванадий–хром; E_{V-Cr} — энергия чистой металлической матрицы (ванадий–хром); E_H — энергия изолированного атома водорода. Выражение позволяет определить, как сильно водород удерживается в металлической матрице и как его присутствие влияет на стабильность и механические свойства системы.

Рассматривается влияние водорода на электронные свойства системы, такие как поляризуемость и энергия связи. Эти параметры играют ключевую роль в определении поведения системы при внешних воздействиях, включая эксплуатацию в высокотехнологичных приложениях. В работе анализируются только однофазные системы, что позволяет сосредоточиться на изучении основополагающих взаимодействий в чистой металлической матрице.

Для расчета поляризуемости системы водород–ванадий–хром можно использовать формулу:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial \epsilon^2} \right),$$

где α — поляризуемость системы; E — энергия системы в электрическом поле ϵ . Здесь показано, как электронная структура системы реагирует на приложенное электрическое поле, что важно для материалов, используемых в электронике и оптоэлектронике.

Для исследования системы водород–ванадий–хром изучены ее квантово-химические характеристики, такие как поляризуемость и энергия взаимодействия водорода с металлической матрицей. Эти параметры имеют решающее значение для понимания поведения системы при различных условиях. Для моделирования этих взаимодействий использован метод DFT, что позволило получить точные данные о свойствах системы.

Дополнительно можно рассчитать энергию адсорбции водорода на поверхности металлической матрицы, что помогает понять, насколько водород «прилипает» к поверхности и как это влияет на свойства системы:

$$E_{ads} = E_{surf+H} - E_{surf} - E_H,$$

где E_{surf+H} — энергия системы с водородом, адсорбированным на поверхности; E_{surf} — энергия чистой поверхности.

Анализ проведенного исследования

Данные, приведенные ниже (таблица 1, рисунок 1), дают подробное представление о влиянии водорода на электронные и структурные свойства сплава.

Энергия связи водорода с ванадием составляет $-1,85$ эВ, что свидетельствует о значительной силе взаимодействия между этими атомами и указывает на возможность эффективного удержания водорода ванадием. В то же время энергия связи водорода с хромом меньше и составляет $-1,40$ эВ, что говорит о сравнительно более слабом взаимодействии.

Таблица 1. Количественные результаты расчетов методом DFT для системы водород–ванадий–хром

Свойство	Значение	Примечание
Энергия связи (водород–ванадий), эВ	$-1,85$	Указывает на сильную близость
Энергия связи (водород–хром), эВ	$-1,40$	Сравнительно более слабое родство
Электронная запрещенная зона (чистый сплав), эВ	2,1	До введения водорода в чистый сплав. В наивысшем положении поры
Электронная запрещенная зона (гидрированный сплав), эВ	1,8	После введения водорода
Доля хранения водорода, %	до 4,5	Максимум при содержании Cr 30 %
Объемный модуль (первичный сплав), ГПа	140	Отражает механическую стабильность
Объемный модуль (сплав, насыщенный водородом), ГПа	132	С водородом наблюдается уменьшение значения

Перед введением водорода электронная запрещенная зона чистого сплава равна от 1,3 до 2,1 эВ, но после гидрирования сплава наблюдаем снижение с 0,9 до 1,8 эВ, которое может способствовать увеличению электропроводности, что актуально для определенных технологических применений (таблица 2, рисунок 1).

Доля хранения водорода (содержание растворенного водорода) в сплаве достигает максимального значения в 4,5 % при содержании хрома 30 % (см. таблицу 1), что показывает потенциал сплава как материала для хранения водорода. Объемный модуль первичного сплава составляет 140 ГПа, что отражает его механическую стабильность, но с введением водорода наблюдается его небольшое уменьшение до 132 ГПа.

Таблица 2. Результаты расчетов стабильности сплава для системы водород–ванадий–хром методом DFT в зависимости от наличия водорода

Наличие водорода	Электронный запрещенный промежуток, эВ	Модуль упругости, ГПа
Без водорода	1,3	79
Без водорода	1,8	108
Без водорода	2,1	140
С водородом	0,9	68
С водородом	1,3	101
С водородом	1,8	132

Анализируя данные таблицы 2 и рисунка 1, можно сказать, что плотность заряда на сплаве водород–ванадий показывает более высокую локальную плотность электронов, что свидетельствует об улучшенном металлическом соединении в присутствии водорода. Это может способствовать усилению связывающих свойств сплава и его стабильности при высоких концентрациях водорода.

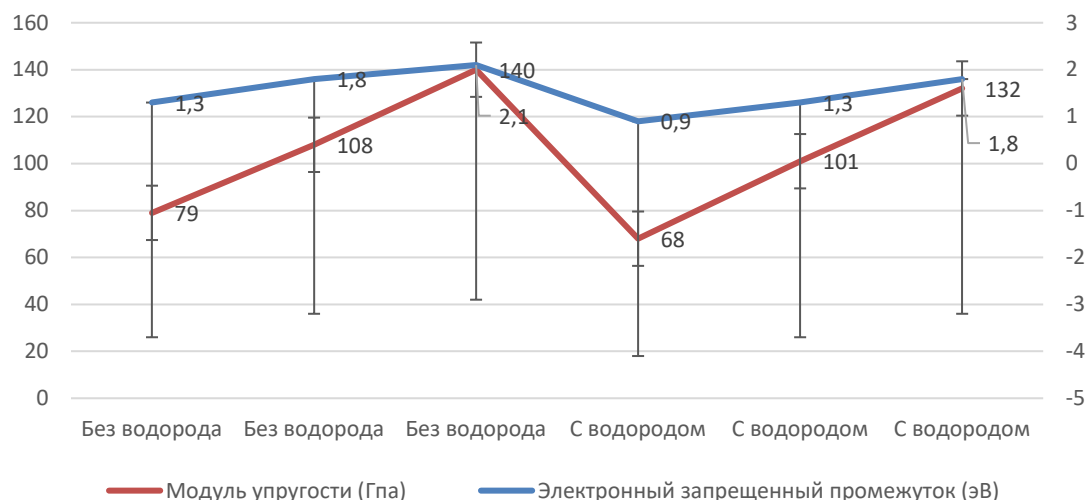


Рис. 1. Результаты расчетов стабильности сплава для системы водород–ванадий–хром методом DFT

На основе проведенного анализа модельных расчетов и литературы по теме была получена следующая информация о системе водород–ванадий–хром.

Во-первых, в работе [9] использовались методы молекулярной динамики для моделирования гранецентрированной кубической решетки металлов (Pd, Ag, Al), что показало значительное влияние водорода на механические свойства этих металлов. Это исследование применимо к системе водород–ванадий–хром из-за сходных реакций металлов на внедрение водорода.

Во-вторых, разработанная в [10] реологическая модель для описания процессов разрушения водородосодержащих материалов демонстрирует значительное изменение механической устойчивости системы при изменении состояния водорода. Данный подход помогает предсказать устойчивость системы водород–ванадий–хром.

В-третьих, в статье [11] показано, как с использованием метода DFT поляризуемость системы водород–ванадий–хром влияет на ее квантово-химические свойства. Это подтверждает высокую точность метода DFT в предсказании электронных и энергетических характеристик исследуемой системы.

Эти результаты подчеркивают важность дальнейших исследований системы водород–ванадий–хром для оптимизации свойств сплава в приложениях, связанных с хранением и использованием водорода.

Заключение

Исходя из анализа данных, было установлено, что присутствие водорода снижает электронную запрещенную зону, что может способствовать повышению электропроводности. Максимальная доля хранения водорода достигается при содержании хрома 30 %, что указывает на возможность оптимизации состава сплава для улучшения его функциональных характеристик. Также было обнаружено, что содержание водорода (4,5 %) не снижает механическую стабильность сплава, сохраняя приемлемые значения объемного модуля. Эти результаты могут послужить основой для дальнейших экспериментальных исследований и разработки новых материалов.

Приведенные в литературе результаты расчетов методом DFT демонстрируют значительное влияние водорода на электронные и механические характеристики системы водород–ванадий–хром. Эти выводы подтверждаются результатами других исследований, в которых применялись аналогичные методы анализа взаимодействия водорода с металлами. Добавление водорода приводит к снижению электронной запрещенной зоны и увеличению электропроводности сплава (водород повышает проводимость и стабильность сплава), что открывает перспективы для его применения в системах хранения водорода. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию состава сплава для повышения его эффективности.

Литература

1. Alimov V. N., Busnyuk A. O., Kolgatin S. N., Peredistov E. Y., Livshits A. I. et al. Fuel Processor with Vanadium Alloy Membranes for Converting CH₄ into Ultrapure Hydrogen to Generate Electricity Via Fuel Cell // *Applied Energy*. 2020. Vol. 269. P. 115148. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115148. EDN: CZEEZZ
2. Kuzenov S. R., Alimov V. N., Busnyuk A. O., Peredistov E. Yu., Livshits A. I. Hydrogen Transport through V-Fe Alloy Membranes: Permeation, Diffusion, Effects of Deviation from Sieverts' Law // *Journal of Membrane Science*. 2023. Vol. 674. P. 121504. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.121504. EDN: MKVUOE
3. Химия твердого тела и функциональные материалы – 2022 и XIV Симпозиум по термодинамике и материаловедению: Материалы XII Всероссийской конференции (10–13 октября 2022 г., Екатеринбург). Екатеринбург: ООО «ДжиЛайм», 2022. 452 с. EDN: HXIRAE
4. Sun L., Jin S., Lu G. H., Wang L. High Hydrogen Retention in the Sub-Surfaces of Tungsten Plasma Facing Materials // *Scripta Materialia*. 2019. Vol. 122. PP. 14–17. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.05.007
5. Liu P., Xing W., Cheng X., Li D., Chen X.-Q. Effects of Dilute Solutes on Interstitial Carbon in α -Fe: Interactions from First-Principles Calculations // *Physical Review B*. 2014. 90. PP. 125–134. DOI: 10.1103/PhysRevB.90.024103
6. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple // *Physical Review Letters* 1996. Vol. 77. Iss. 1396. PP. 3865–3868. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.3865
7. Heyd J., Scuseria G.E., Ernzerhof M. Hybrid Functionals Based on a Screened Coulomb Potential // *Journal of Chemical Physics* 2003. Vol. 118. Iss. 18. P. 8207. DOI: 10.1063/1.1564060
8. Иванов К. Л., Маслов Н. А., Цибульская Е. О. Физика и химия атомов и молекул в задачах с решениями: учебное пособие. Новосибирск: ИПЦНГУ, 2017. 172 с.
9. Huang G. Y., Juslin N., Wirth B. D. First-Principles Study of Vacancy, Interstitial Noble Gas Atom Clusters in BCC-W // *Computational Materials Science*. 2019. Vol. 123. PP. 121–130. DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.06.022
10. Гельд П. В., Рябов Р. А. Водород в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 2019. 272 с.
11. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special Points for Brillouin-Zone Integrations // *Physical Review B*. 1976. Vol. 13. Iss. 12. PP. 5188–5192. DOI: 10.1103/PhysRevB.13.5188

Статья поступила 14 января 2025 г.
Одобрена после рецензирования 02 февраля 2025 г.
Принята к публикации 28 февраля 2025 г.

Информация об авторе

Буланов Владислав Николаевич – аспирант 3-го курса кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: bulanov.vn@sut.ru; bvn1998@yandex.ru

Analysis of Model Calculations of the Hydrogen–Vanadium–Chromium System by the Density Functional Method

Bulanov V.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement: using the density functional method, it is necessary to solve the problem of obtaining ultrapure hydrogen by analyzing the available literature. **Methods used:** the hydrogen–vanadium–chromium system was studied using the density functional (DFT) method. **The purpose of the work** is to evaluate the effect of hydrogen on the electronic and mechanical characteristics of a vanadium and chromium alloy. **The results obtained:** the changes in the electronic band gap, the binding energies of hydrogen with vanadium and chromium, as well as in the ability of the alloy to accumulate hydrogen and its mechanical stability are considered. **Novelty:** calculations performed using the density functional method indicate that hydrogen increases the conductivity and stability of the alloy, as well as increases the alloy's potential for hydrogen storage. **Theoretical/Practical significance:** the research results can be applied to create new materials intended for hydrogen storage and use in the energy industry.

Keywords: density functional, hydrogen-vanadium-chromium, electronic band gap, binding energy, mechanical stability, energy materials

Information about Author

Bulanov Vladislav — a 3rd Year Postgraduate Student at the Department of Physics (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: bulanov.vn@sut.ru; bvn1998@yandex.ru

УДК 621.396.676.2
EDN: RCCYNK

Исследование усечения сферой электродинамической модели «корпус автомобиля – низкопрофильная антенна»

Лянгузов Д. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Для анализа электродинамических моделей и синтеза низкопрофильных антенн возникает необходимость в серии однотипных вычислений электрических характеристик антенн. В данной работе предлагается подход, основанный на модификации электродинамической модели с целью повышения скорости вычислений. Задачей является исследование усечения электродинамической модели «корпус автомобиля – низкопрофильная антенна» сферой. **Цель работы:** сформулировать правила усечения электродинамических моделей для повышения скорости вычислений с незначительными потерями в точности расчетов (до 10 %). **Используемые методы:** в качестве численного метода электродинамики использован метод конечных элементов с тетраэдральной формой ячеек; для пересчета токов из ближней зоны в дальнюю выбран метод Стреттона – Чу. **Новизна работы** заключается в подходе к анализу электродинамических моделей в виде усечения сферой. **Результат:** разработаны практические рекомендации по обоснованному преобразованию электродинамической модели для повышения скорости вычислений с приемлемой точностью расчетов. **Практическая значимость:** представленные результаты работы позволяют значительно сократить время вычислений электрических характеристик антенны и анализировать сложные электродинамические модели на персональном компьютере, снижая требования к вычислительному ресурсу при решении итерационных задач.

Ключевые слова: антенна, электродинамическая модель, усечение, сфера, рекомендации

Введение

В практических задачах конструкционного синтеза антенн важное место занимает этап определения электрических характеристик антенны. При разработке крышевых антенн следует учитывать влияние корпуса объекта, на который установлена антенна. Для анализа электродинамических моделей «антенна – подвижный объект» с помощью численных методов (в данном случае рассмотрим метод конечных элементов как наиболее точный для представления произвольных структур сложной формы) требуется значительный вычислительный ресурс. Так, в таблице 1 представлены результаты сравнительного анализа количества конечных элементов для фургона и легкового автомобиля, внешний вид моделей приведен в таблице 2. Анализируется электродинамическая модель низкопрофильной широкополосной антенны с рабочим диапазоном частот 27–520 МГц, и круговой диаграммой направленности (ДН) [1, 2].

В рамках исследования был проведен анализ современных научных публикаций на тему конструкционного синтеза низкопрофильных антенн. В статье [3] авторами разработана низкопрофильная самолетная антенна, в конструкции которой применены излучатель сложной формы и группы шунтов

Библиографическая ссылка на статью:

Лянгузов Д. А. Исследование усечения сферой электродинамической модели «корпус автомобиля – низкопрофильная антенна» // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 1. С. 3. EDN: RCCYNK

Reference for citation:

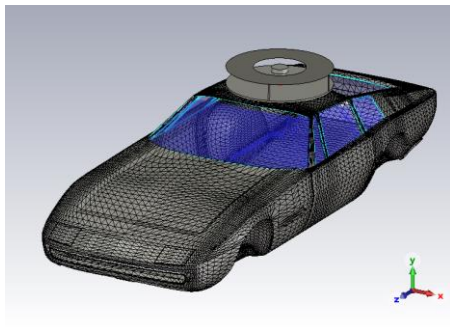
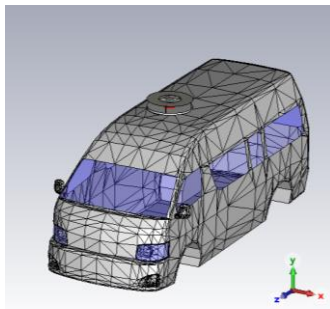
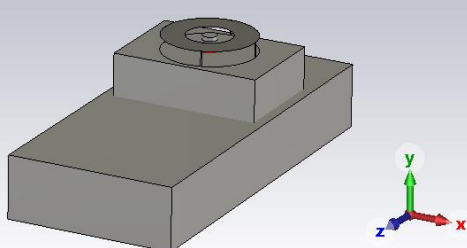
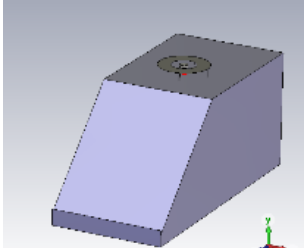
Lyanguzov D. Study of Sphere Truncation of the Electrodynamical Model "Car Body – Low-Profile Antenna" // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 1. P. 3. EDN: RCCYNK

(по 2 и 8 единиц). В работе [4] широкополосность достигается благодаря вырезам в металлической части антенны, что позволяет изменить поверхностное распределение токов на определенных частотах. Авторы работ [5, 6] использовали интегрированный в подложку волновод и емкостную нагрузку плеч антенны на распределенные элементы. В статье [7] бортовая антенна разработана с учетом расположения над металлическим экраном; в работе [8] описан метод модификации конечно-элементной сетки. Приемы снижения размерности модели без значительной потери точности для повышения вычислительной эффективности описаны в [9]: авторами достигнуто уменьшение вычислительной сложности задачи в 4 раза с понижением точности на 5 %. В работе [10] анализируемая структура представлена в виде эквивалентной схемы; проведен сравнительный анализ с полной моделью.

Таблица 1. Количество конечных элементов в электродинамических моделях автомобилей

Тип кузова	Количество конечных тетраэдральных элементов
Фургон (полная модель)	23 328 864
Фургон (упрощенная модель)	73 174
Легковой автомобиль (полная модель)	38 895 024
Легковой автомобиль (упрощенная модель)	4 145 544
Идеально проводящая плоскость	123 648

Таблица 2. Внешний вид полных и упрощенных моделей автомобилей

	Легковой автомобиль	Фургон
Полная модель		
Используемые материалы корпуса	Стекло, алюминий	Стекло, сталь
Упрощенная модель		
Используемые материалы корпуса	Идеально проводящий материал (ПЕС, аббр. от англ. Perfect Electronic Conductor)	

Во всех рассмотренных работах влияние корпуса подвижного объекта, на который установлена антенна, не учитывается. Временные затраты на расчет не описываются, электрические характеристики определяются для полной модели антенны, повторить и воспроизвести результаты в рамках одиночного исследования затруднительно.

В данной работе предлагается вариант определения электрических характеристик антенн с учетом влияния корпуса подвижного объекта, отличающийся от классического снижением вычислительных затрат, особенно для задачи итерационного синтеза излучателя.

Результаты анализа электродинамической модели

В задачах синтеза антенн объем вычислений обусловлен необходимостью многократного определения электрических характеристик антенны. Учитывая современные условия производства со сжатыми сроками, процесс разработки готового изделия может занимать до нескольких месяцев. Анализ полной модели на современном персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 9 7900X 12-Core Processor и объемом оперативной памяти 64 Гб может занимать несколько часов. Опираясь на результаты успешного конструкционного синтеза антенн, необходимо осуществить около 200 итераций для определения квазиоптимального решения задачи (на это потребуется около 250 ч.) [11, 12]. В качестве способа снижения временных затрат на расчеты выполним усечение модели сферой, центр которой совпадает с геометрическим центром антенны (рисунок 1).

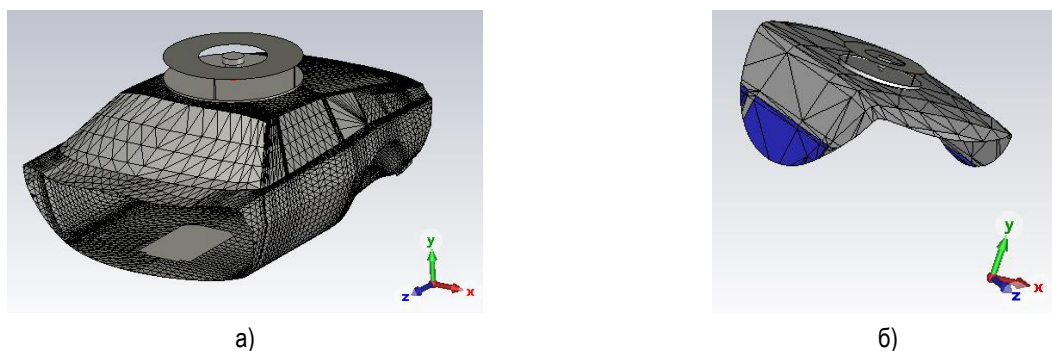


Рис. 1. Внешний вид усеченных моделей легкового автомобиля (а) и фургона (б)

При усечении сферой количество конечных элементов в полных точных моделях сокращается в 6 раз для фургона и в 1,5 раза для легкового автомобиля. Разница в размере моделей обусловлена формой: кабина легкового автомобиля, на которой установлена антенна, обладает более сложной формой по сравнению с остальным кузовом. У фургона, напротив, весь кузов однородной формы. По сравнению с полной упрощенной моделью, усеченная модель более точно описывает полную точную модель автомобиля, в особенности неоднородности корпуса и различия в материалах кузова, попадающие в ближнюю зону антенны. На диаграмме представлен сравнительный анализ размерности полных и усеченных моделей по количеству элементарных ячеек (рисунок 2).

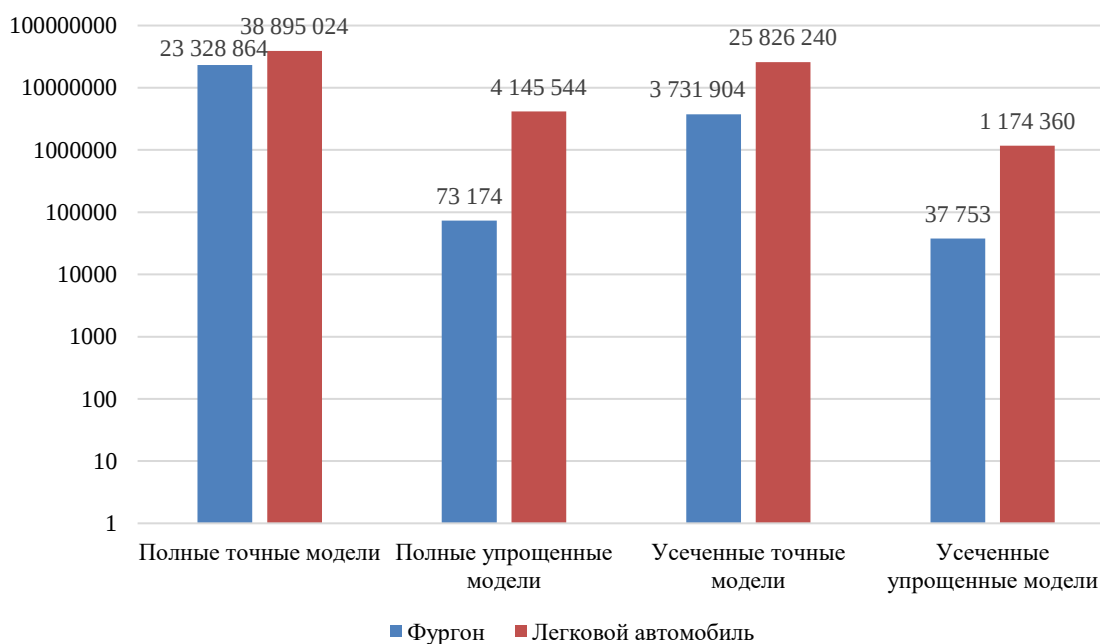


Рис. 2. Размерность моделей фургона и легкового автомобиля

Сравним результаты вычисления электрических характеристик антенн методом конечных элементов для полной и усеченной моделей при условии, что структура антенны не оптимизирована под данный тип кузова (таблица 3).

Таблица 3. Результаты вычисления электрических характеристик антенны

	f , МГц	27	150	250	350	450	520
	λ , м	11,1	2,0	1,2	0,9	0,7	0,6
$R_{сф}$, м	0,6	19,5	3,5	2,1	1,5	1,2	1,0
	0,7	15,9	2,9	1,7	1,2	1,0	0,8
	0,9	12,3	2,2	1,3	1,0	0,7	0,6
	1,3	8,3	1,5	0,9	0,6	0,5	0,4
	2,4	4,6	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2

Из полученных данных можно сделать вывод, что частотное распределение коэффициента стоячей волны (КСВ) слабо изменилось при усечении модели антенны сферой, разница составляет не более 6 % (рисунок 3).

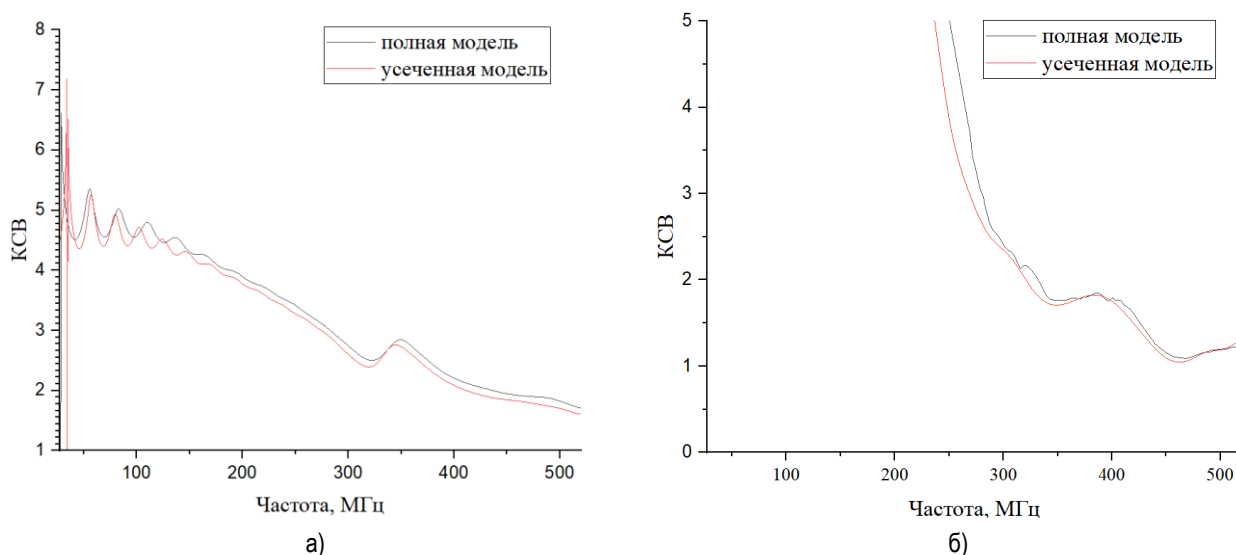


Рис. 3. Частотное распределение КСВ для моделей фургона (а) и легкового автомобиля (б)

Что касается формы ДН, различия в значениях полной и усеченной сферой точной моделей достигают 8 раз (рисунок 4). Исследуем зависимость электрических характеристик модели антенны от величины отношения радиуса сферы усечения $R_{сф}$ к длине волны λ (таблица 3). Предположим, что для значений $R_{сф}$, кратных λ , результаты будут схожи с полной моделью. Величины $R_{сф}/\lambda$, при которых значения ДН усеченной модели соответствуют полной (с незначительной погрешностью), выделены в таблице 3 курсивом.

Анализируя полученные результаты построения ДН антенны при различных величинах сферы усечения, можно сделать следующие выводы:

- на частотах 27 и 150 МГц (соответствующих нижней границе рассматриваемого диапазона) ДН усеченной модели не соответствует полной модели ни для одного варианта усечения сферой. Отношение $R_{сф} / \lambda$ принимает значение от 4,6 до 19,5;

- на частоте 250 МГц формы ДН усеченной сферой модели схожи с полной для $R_{сф} = 1,3$ м, что соответствует значению $R_{сф} / \lambda = 0,9$;

- на частоте 350 МГц подобное сходство наблюдается для $R_{сф} = 0,9$ м, что соответствует значению $R_{сф} / \lambda = 1,0$;

- на частоте 450 МГц ДН лишь одной усеченной модели ($R_{сф} = 1,3$ м) не соответствует полной, остальные результаты расчета ДН усеченных моделей близки к полной модели ($R_{сф} = 0,3; 0,7; 1,0; 1,2$ м);

– на частоте 520 МГц усеченная модель ($R_{сф} = 1,3$ м) также не соответствует полной, наиболее близкими к ней являются усеченные модели с радиусами усечения равными 0,9 и 2,4 м (значения $R_{сф} / \lambda$ составляют 0,2 и 0,6, соответственно). В остальных случаях имеются различия в результатах для угловых секторов 0–50°; 100–160°; 300–350°, что можно принять как ограниченное сходство с полной моделью.

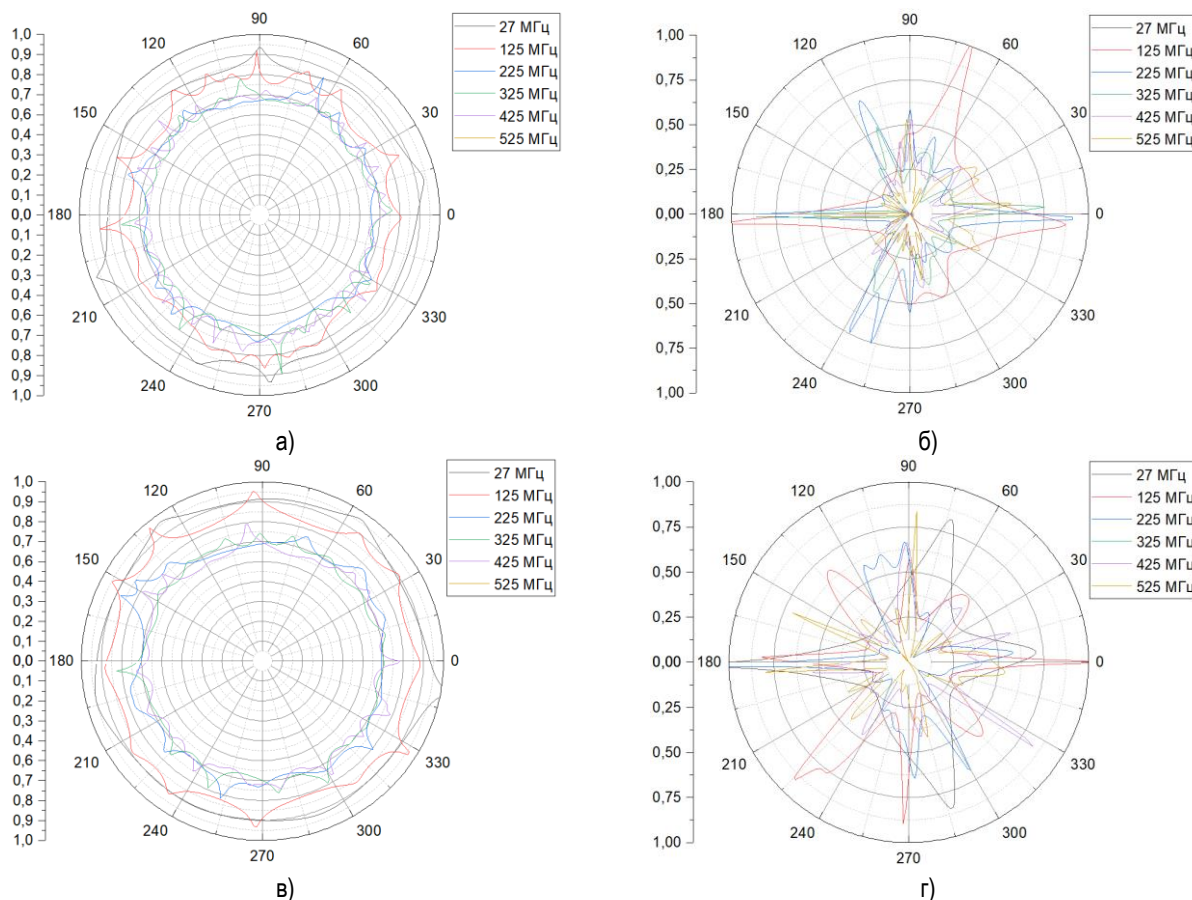


Рис. 4. Нормированные ДН моделей автомобилей (в горизонтальной плоскости):
а) полная модель, фургон; б) полная модель, легковой автомобиль;
в) усеченная модель, фургон; г) усеченная модель, легковой автомобиль

Заметна тенденция к увеличению количества соответствий усеченных моделей полной с повышением рабочей частоты. Предположим, что это обусловлено частотной зависимостью размера ближней зоны (БЗ) антенны. При рассмотрении БЗ на частотах 30–520 МГц размер усекающей сферы охватывал ее частично, при построении ДН часть токов не учитывалась. С ростом частоты размер БЗ изменяется в меньшую сторону. Усечение объекта сферой тех же размеров включало в себя основную часть токов БЗ, формирующих поверхностное распределение токов, которое, в свою очередь, определяет форму ДН. Проверим эту гипотезу, расширив границы исследования за верхнюю частоту рассматриваемого диапазона частот до 1 ГГц (рисунки 5–6). Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– лишь для сферы радиусом 0,5 м форма ДН отличается от остальных результатов (прочих размеров усечений и полной модели) – это объясняется тем, что при данном варианте усечения модель представляет собой антенну, расположенную на плоской окружности (не учитывает влияния неравномерностей корпуса объекта установки); подобные формы ДН соответствуют результатам предыдущих исследований [2];

– гипотеза о соответствии размера усечения модифицированных моделей в рамках диапазона 30–520 МГц размеру БЗ антенны подтвердилась: при возрастании частоты анализа до диапазона 520 МГц – 1 ГГц результаты полной и усеченной моделей сопоставимы, погрешность результатов составляет в среднем до 10 %;

– временные затраты на расчет полной модели фургона в диапазоне частот 30–520 МГц составили 4 ч. 32 мин., модели, усеченной сферой радиусом 0,9 м (как наиболее близкой к полной) – 44 мин. 19 с.; в данном случае погрешность результатов в некоторых направлениях превышает 20 % от полной модели (в диапазоне частот 30–250 МГц), а в диапазоне 250–520 МГц погрешность не превышает 10 %;

– временные затраты на расчет полной модели фургона в диапазоне частот 520–1000 МГц составили 2 ч. 47 мин., модели, усеченной сферой радиусом 0,9 м (как наиболее близкой к полной) – 21 мин. 27 с.

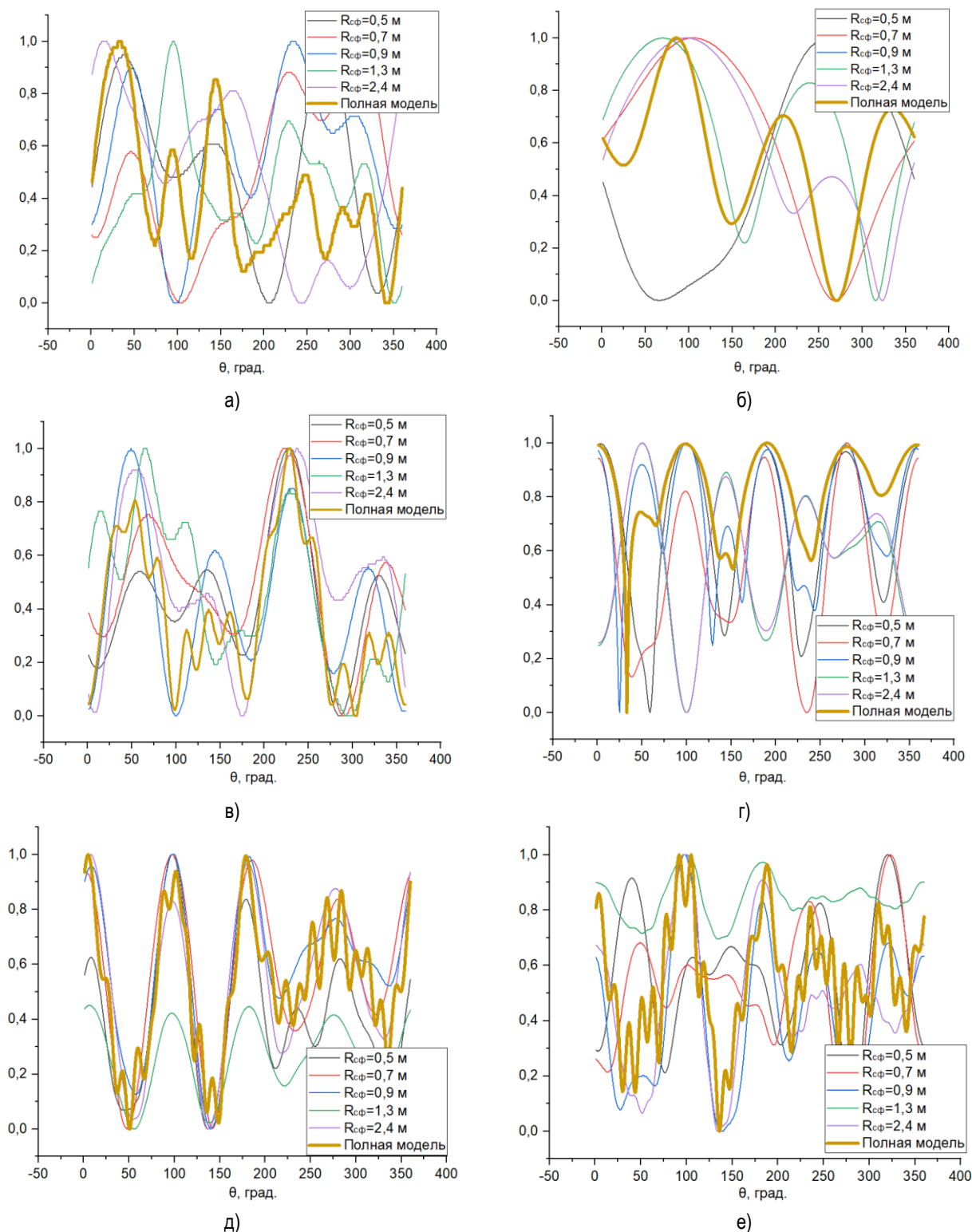


Рис. 5. Зависимость форм ДН антенны от радиуса сферы усечения на частоте:
а) 30 МГц; б) 150 МГц; в) 250 МГц; г) 350 МГц; д) 450 МГц; е) 520 МГц

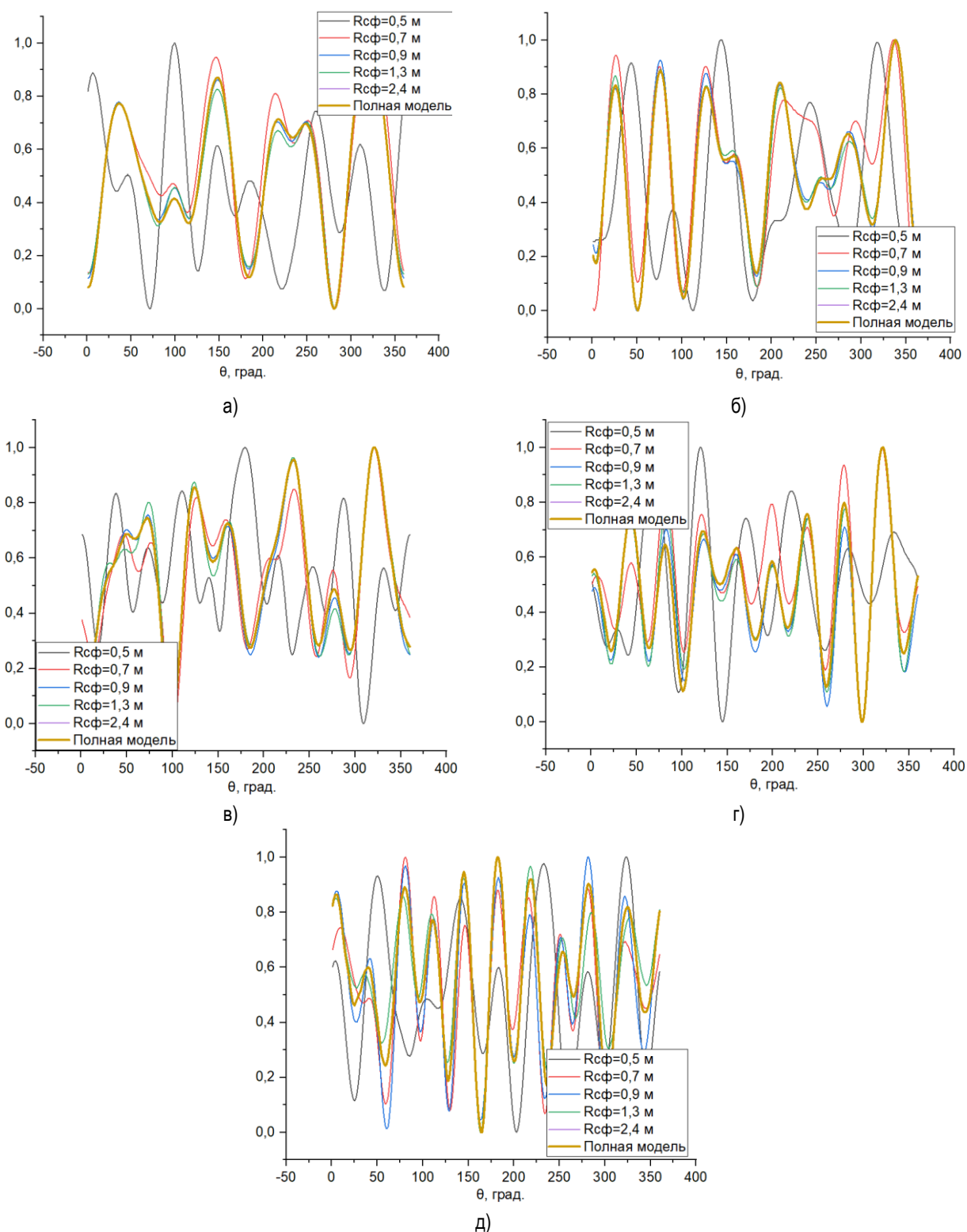


Рис. 6. Зависимость форм ДН антенны от радиуса сферы усечения на частоте:
а) 620 МГц; б) 720 МГц; в) 820 МГц; г) 920 МГц; д) 1 ГГц

Выводы

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

Во-первых, усечение полной модели «антенна – корпус подвижного объекта» сферой позволяет значительно (до 9 раз) уменьшить вычислительную сложность моделей. Этот прием может быть полезным с точки зрения сокращения временных ресурсов при решении итерационных вычислительных задач.

Во-вторых, усечение полной модели сферой предпочтительнее, чем использование полной упрощенной модели из-за точности представления граней (на которых появляются вторичные поверхностные токи) и возможности учета нескольких материалов в одной модели.

В-третьих, точность представления результатов зависит от размера сферы, радиус которой в общем случае должен быть кратным длине волны и превышать размеры ближней зоны антенны для данной длины волны.

Апробация полученных результатов на практике, а также определение их пригодности для антенн других типов — задачи дальнейшего исследования.

Литература

1. Лянгузов Д. А., Майбурд С. В., Худайназарова Д. Р. Диапазонный несимметричный вибратор. Патент на изобретение RU 2826482 C1. Опубл. 11.09.2024. Бюл. № 26. EDN: TRBUKK
2. Бородулин Р. Ю., Лянгузов Д. А. Модель низкопрофильной антенны для размещения на поверхности ограниченных размеров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 193–199. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-193-200. EDN: LEMJWJ
3. Hua C., Liu J., Yu Y., Ren W., Shen Z. Low-Profile and Wideband Surface-Wave Antenna of Conical Beam for UAV Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. Iss. 5. PP. 1548–1552. DOI: 10.1109/LAWP.2024.3362057
4. Wu Q., Li H., Wong S., Lin Y., He Y. A Low-Profile Dual-Polarized Dielectric Resonator Antenna for 2G/3G/4G Base Station Applications with Gain Enhancement // Proceedings of 2024 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies (iWRF&AT, 31 May – 03 June 2024, Shenzhen, China). 2024. PP. 486–488. DOI: 10.1109/iWRFAT61200.2024.10594368.
5. Yang Y., Ren J., Zhang B., Liu J., Wang H., Song D., Yin Y. Wideband Tripolarized MIMO Antenna With Pattern Diversity for 5G Application // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. Vol. 23. Iss. 1. PP. 349–353. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3324391
6. Демшевский В. В., Сидоренко С. С., Богачев И. А., Сергеев К. Д. Улучшенная низкопрофильная антенна вытекающей волны на основе ИПВ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2024. № 1. С. 334–336. EDN: QDVQDS
7. Илларионов И. А. Разработка низкопрофильной бортовой спиральной антенны L-диапазона // V научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021: Материалы XIX Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов-2021» (23–26 ноября 2021 г., Самара). Самара, 2021. С. 149–150. EDN: WIUQJD
8. Suzuki S., Kawase Y., Yamaguchi T., Toyama S., Kakami S. et al. Dynamic Analysis of Circuit Breaker with Oil Dashpot Using Multimesh Modification Method // IEEE Transactions of Magnetics. 2011. Vol. 47. Iss. 5. PP. 1002–1005. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2090652
9. Biyik E., D'Amato F., Subramaniyan A., Sun C. Reduced Order Modeling for Clearance Control in Turbomachinery // Proceedings of 2016 IEEE Conference on Control Applications (9–22 September 2016, Buenos Aires, Argentina). 2016. PP. 1143–1148. DOI: 10.1109/CCA.2016.7587960
10. Ziarati P., Kullukcu B., Beker L. Modeling Miniaturized Piezoelectric Ultrasound Transducers: Comparison of Lumped and Finite Element Models // Proceedings of 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (07–11 September 2020, Las Vegas, USA). 2022. DOI: 10.1109/IUS46767.2020.9251723
11. Дворников С. В., Власенко В. И., Русин А. А. Синтез низкопрофильных антенн методом фрактального анализа // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 4. С. 86–94. EDN: NTICPG
12. Соколов В. С., Степанов М. А. Синтез двухдиапазонной антенной решетки ММО 4×4 для сетей Wi-Fi // Современные проблемы радиоэлектроники: Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 127-й годовщине Дня радио. Красноярск, 2022. С. 294–299. EDN: JJTRO1

Статья поступила 8 февраля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 17 февраля 2025 г.
Принята к публикации 11 марта 2025 г.

Информация об авторе

Лянгузов Данила Андреевич — кандидат технических наук, инженер кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: lyanguzov.da@sut.ru; danilalgz@ya.ru

Study of Sphere Truncation of the Electrodynamic Model “Car Body – Low-Profile Antenna”

D. Lyanguzov

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Task statement. When solving the problems of analyzing electrodynamic models and synthesizing low-profile antennas, there is a need for a series of similar calculations of the electrical characteristics of antennas. In this paper, we propose an approach to modify the electrodynamic model in order to increase the speed of calculations. The objective of the study is to study the truncation of the electrodynamic model “car body – low-profile antenna” by a sphere. The purpose of the work: to formulate rules for truncating electrodynamic models to increase the speed. **The purpose** of the work is to formulate rules for truncating electrodynamic models to increase the speed of calculations with minor (up to 10 %) losses in calculation accuracy. **Methods used:** determination of near-field surface currents using the finite element method, construction of a radiation pattern using the Stretton-Chu method. **Novelty** of the work lies in the approach to the analysis of electric-dynamic models in the form of truncation by a sphere. **Result:** practical recommendations for a reasonable transformation of the electrodynamic model to increase the speed of calculations with acceptable calculation accuracy. **Practical significance:** the presented results of the work allow to reduce the time of calculation of the electrical characteristics of the antenna up to 9 times, allowing to analyze complex electrodynamic models on a personal computer, reducing the requirements for the computing resource when solving iterative problems.

Key words: antenna, electrodynamic model, truncation, sphere, recommendations

Information about Author

Lyanguzov Danila — Ph.D. of Engineering Sciences, Engineer of the Department of Radio Engineering (The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: lyanguzov.da@sut.ru; danilalgz@ya.ru

УДК 621.374.42
EDN: TMWESU

Практическая реализация дробного нониусного тракта приведения умножающего кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты

Тихонов Я. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи. Современные радиотехнические устройства требуют высокой точности, стабильности и низкого уровня фазового шума, особенно в микроволновом диапазоне. Умножение частоты в традиционных схемах импульсно-фазовой автоподстройки частоты приводит к увеличению фазовых шумов, что ограничивает возможности применения таких систем. **Целью работы** является исследование и практическая реализация нониусного тракта приведения частоты перестраиваемого генератора к частоте опорного колебания в системе импульсно-фазовой автоподстройки частоты для минимизации фазовых шумов при умножении частоты. **Используемые методы:** в работе использовано моделирование схемы в пакете MicroCap, макетирование нониусного делителя частоты, а также экспериментальное измерение его характеристик. **Новизна:** предложен и реализован макет нониусного тракта приведения с дробным коэффициентом деления, позволяющий снизить уровень фазовых шумов в сравнении с традиционными методами умножения частоты в системе импульсно-фазовой автоподстройки частоты. **Результат:** экспериментально проверена работоспособность макета нониусного делителя частоты с коэффициентом деления $N = 200$, работающего в диапазоне до 150 МГц. **Теоретическая / Практическая значимость:** разработка нониусного тракта приведения с дробным коэффициентом деления позволяет улучшить характеристики фазового шума в ближней зоне отстройек от выходного колебания систем импульсно-фазовой автоподстройки частоты, что имеет значение для высокочастотных радиотехнических устройств, включая радиолокацию, спутниковую связь и системы 5G; практическое исследование подтверждает возможность применения данного метода в реальных схемах, хотя выявленные ограничения по рабочему диапазону требуют дальнейших доработок.

Ключевые слова: импульсно-фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум, нониусный тракт приведения, дробный коэффициент деления, делитель частоты, спектральные характеристики

Введение

Современные радиотехнические устройства находят применение в самых разных сферах человеческой деятельности. Радиолокационные станции обеспечивают безопасность воздушного пространства, спутниковая связь — непрерывный поток информации по всему миру, а системы радионавигации позволяют точно определять местоположение и ориентироваться в условиях ограниченной видимости. Кроме того, устройства радиосвязи и дистанционного управления играют ключевую роль в оборонной промышленности, беспилотных системах и Интернете вещей.

Библиографическая ссылка на статью:

Тихонов Я. А. Практическая реализация дробного нониусного тракта приведения умножающего кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 1. С. 4. EDN: TMWESU

Reference for citation:

Tikhonov I. Practical Implementation of a Fractional Vernier Frequency Translation Loop in a Multiplying Phase-Locked Loop System // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 1. P. 4. EDN: TMWESU

С ростом требований к точности, скорости и дальности работы таких систем необходимость перехода к более высоким частотам микроволнового диапазона (от единиц до сотен ГГц) становится неизбежной. Эти частоты предоставляют возможность увеличения скорости передачи информации и полосы пропускания, достижения высокой разрешающей способности. Однако вместе с этим возрастает сложность обеспечения необходимых характеристик сигналов, среди которых одним из ключевых является уровень фазового шума в ближней зоне отстройки от несущей [1]. Фазовый шум, выражающийся в нестабильности фазы несущей, особенно критичен для высоких частот, поскольку он напрямую влияет на точность, стабильность и помехоустойчивость радиотехнических систем.

Таблица 1. Влияние фазовых шумов на работу радиоэлектронных устройств

Область применения	Частота несущей, ГГц	Требуемый уровень шумов в полосе 1 Гц	Влияние шума
Радиолокация	3–10 (L- и X-диапазоны)	Не более –120 дБ/Гц при отстройке 10 кГц от несущей, чтобы обеспечить разрешение порядка нескольких метров и устойчивую работу в условиях низкого отношения сигнал / шум	В системах радиолокации фазовый шум определяет точность измерения дальности и скорости целей, особенно для радаров с синтезированной апертурой
Спутниковая связь	10–30 (K- и Ka-диапазоны)	На уровне –90... –100 дБ/Гц при отстройке 100 кГц, что позволяет избежать помех между каналами и потери данных	Высокая плотность передаваемой информации и использование сложных модуляционных схем (например, QPSK, 256-QAM) требуют стабильного фазового шума для минимизации ошибок при демодуляции
Радионавигация (GPS / ГЛОНАСС)	1,2 (L1 / L2-диапазоны)	Должен составлять не более –130 дБ/Гц при отстройке 1 кГц, чтобы обеспечить точность определения координат в диапазоне 1–5 м	Влияние фазового шума проявляется в ухудшении точности позиционирования, особенно в многолучевых условиях
5G и системы миллиметрового диапазона	24–100	Порядка –110... –115 дБ/Гц при отстройке 1 МГц обеспечивает надежность соединения и минимизирует влияние интерференции между каналами	Для стабильной работы высокоскоростных каналов и обеспечения точной синхронизации в условиях сложных модуляционных схем требуется минимальный фазовый шум

В зависимости от поставленной задачи для генерации СВЧ-сигналов могут применяться различные методы и устройства, такие как: кварцевые генераторы, диэлектрические резонаторы, синтезаторы частот на основе прямого цифрового синтеза (DDS, *аббр. от англ.* Direct Digital Synthesis), гетеродинные схемы с умножением частоты и, наконец, петля импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) (рисунок 1).



Рис. 1. Схема петли ИФАПЧ



Рис. 2. Профиль фазового шума на выходе петли

Последний вариант с реализацией петли ИФАПЧ кажется наиболее оптимальным для реализации мелкого шага сетки и высокого коэффициента умножения частоты N опорного генератора.

Профиль фазового шума при различных отстройках от несущей на выходе петли ИФАПЧ ($S_{\text{вых}}$) (рисунок 2) имеет синтетическую природу: вне полосы петлевого фильтра он определяется шумами перестраиваемого генератора ($S_{\text{гун}}$), а внутри полосы — шумами опорного генератора и техническими шумами фазового детектора ($S_{\text{фд}}$), умноженными в N раз ($S_{\text{ИФАПЧ}}$).

В петле ИФАПЧ при умножении частоты сигнала неизбежно происходит увеличение фазовых шумов опорного колебания на $20\log_{10} N$ дБ ($N = \frac{f_{\text{выхВЧ}}}{f_{\text{опНЧ}}}$). Это вызвано масштабированием флуктуаций фазы сигнала и приводит к тому, что с увеличением выходной частоты уровень фазовых шумов на выходе также увеличивается.

При использовании петли ИФАПЧ низкочастотный сигнал опорного генератора ($f_{\text{опНЧ}}$) кратно умножается до выходной частоты ($f_{\text{выхВЧ}}$), позволяя реализовать сетку частот выходного колебания с шагом сетки (F_s). Любую подобную петлю ИФАПЧ возможно охарактеризовать следующими параметрами:

- 1) эквивалентный коэффициент передачи: $N_{\text{э}} = \frac{f_{\text{выхВЧ}}}{F_s}$;
- 2) коэффициент умножения помех (шумов): $N_{\text{ш}} = \frac{f_{\text{выхВЧ}}}{f_{\text{опНЧ}}}$;
- 3) коэффициент качества тракта: $K = \frac{N_{\text{э}}}{N_{\text{ш}}}$.

Уменьшение коэффициента умножения шумов с сохранением эквивалентного коэффициента передачи позволит получить на выходе синтезатора высокочастотный малозумящий сигнал. Эта задача продолжает оставаться актуальной на сегодняшний день. Одним из возможных решений этой проблемы является применение понижающего преобразования частоты в цепи обратной связи ИФАПЧ с использованием смесителя [2] (рисунок 3а).

При таком подходе деление частоты импульсного сигнала, выполняемое цифровым делителем, заменяется на аналоговый способ переноса сигнала вниз по частоте. Таким образом, уменьшается целая часть коэффициента деления частоты (N) в тракте приведения частоты ко входу фазового детектора. Это позволяет минимизировать влияние фазовых шумов опорного сигнала, возникающее при умножении частоты в петле, и в некоторых случаях даже полностью исключить их ухудшение (при $N = 1$). При этом фазовые шумы сигнала промежуточной частоты, формируемого на выходе смесителя, будут зависеть от шумовых характеристик внешнего гетеродинного сигнала и технических шумов используемой элементной базы. Для его формирования можно использовать опорный сигнал с умножением частоты, однако такой подход значительно усложняет схему.

Более современный вариант построения петли ИФАПЧ — это использование дробного коэффициента деления в тракте приведения (рисунок 3б). За счет динамического переключения двух целочисленных коэффициентов деления на выходе подобного тракта приведения становится возможным получить усредненную частоту на периоде $T_s = 1/F_s$. Таким образом, становится возможным повысить частоту сравнения в петле и уменьшить фазовые шумы.

Альтернативным подходом может быть использование целочисленного нониусного тракта приведения в цепи обратной связи делителя частоты [3] (рисунок 3в). В данном случае сигналы на входах смесителя формируются путем деления одного и того же выходного сигнала на различные коэффициенты деления. Для минимизации умножения фазовых шумов опорного колебания коэффициенты деления желательно выбирать близкими и как можно меньшими, т. е. разность частот сигналов на входах смесителя должна быть минимальной, чтобы повысить коэффициент умножения частоты в тракте [4, 5].

Применение дробного коэффициента деления для одного из входов смесителя позволяет дополнительно повысить эффективность нониусного тракта приведения, увеличив общий коэффициент деления в тракте [6–8]. Таким образом, использование подобной схемы позволяет решить проблему поиска гетеродина с низким уровнем фазовых шумов (актуальную для схем со смесителем в обратной связи) и в то же время существенно увеличить кратность умножения частоты в кольце по сравнению со схемами с дробным коэффициентом деления (увеличив коэффициент умножения частоты с $10 \dots 10^2$ до $10^3 \dots 10^4$ и выше).

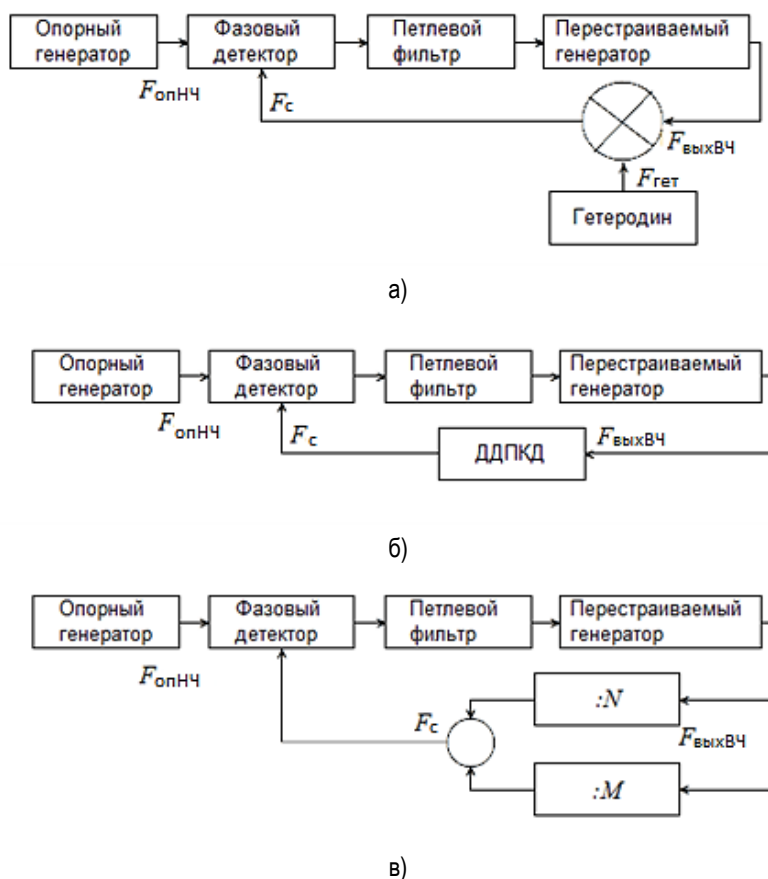


Рис. 3. Схема петли ИФАПЧ: а) с понижением по частоте; б) с делителем с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД); в) с делителем с целочисленным нониусным трактом приведения

Исследование макета нониусного тракта приведения

Попытка практической реализации нониусного тракта приведения уже была предпринята в [3, 9], однако некоторые более поздние работы ставили под сомнения полученные результаты [10].

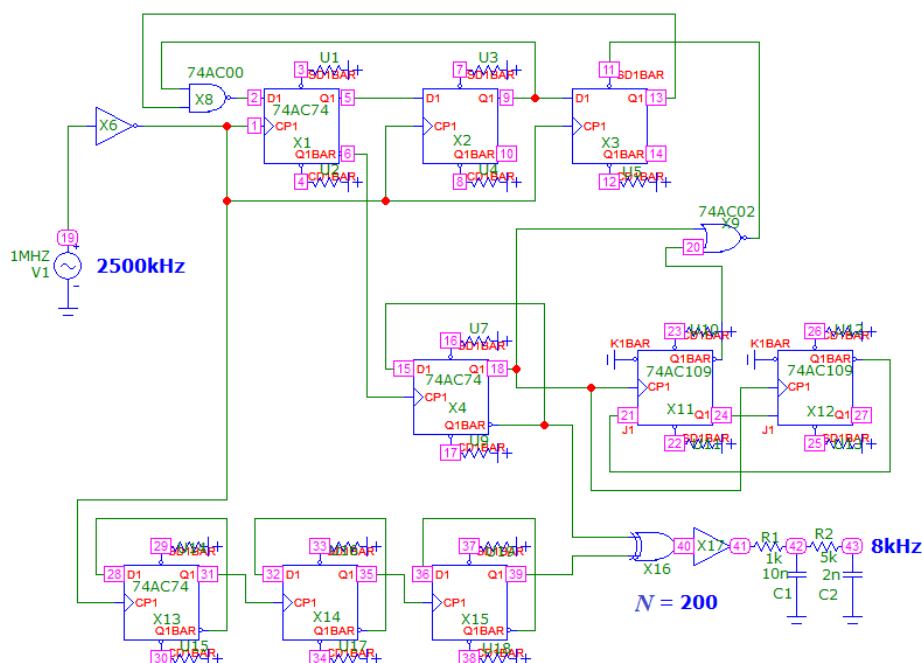


Рис. 4 Модель нониусного тракта приведения при $N = 200$

В данной статье приведено исследование макета нониусного тракта приведения, который является практической реализацией схемы, описанной в [5]. Предварительно было проведено моделирование исследуемой схемы в программе MicroCap. На основании анализа модели (рисунок 4) были получены графики переходного процесса (рисунок 5).

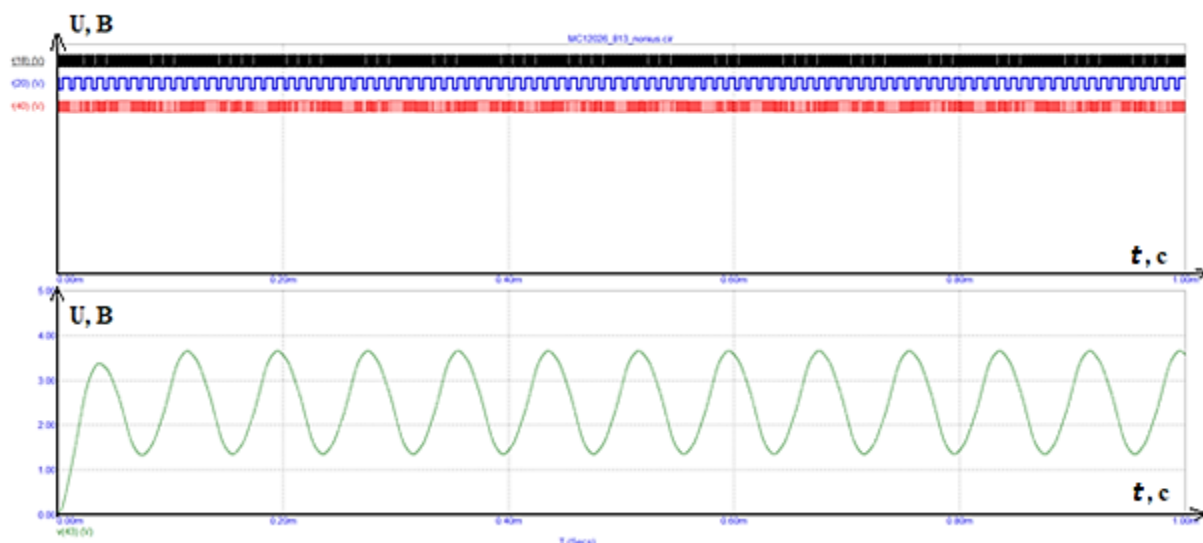


Рис. 5. Временные диаграммы работы нониусного тракта приведения

Принципиальная схема измерения макета представлена на рисунке 6, а фотография макета – на рисунке 7.

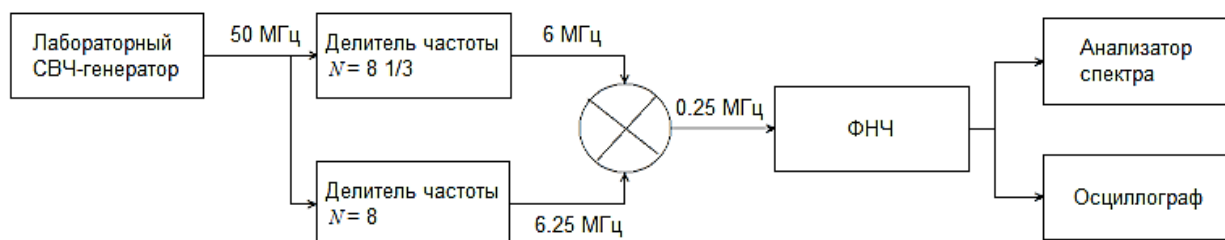


Рис. 6. Схема нониусного делителя частоты (Коэффициент деления $N = 200$)

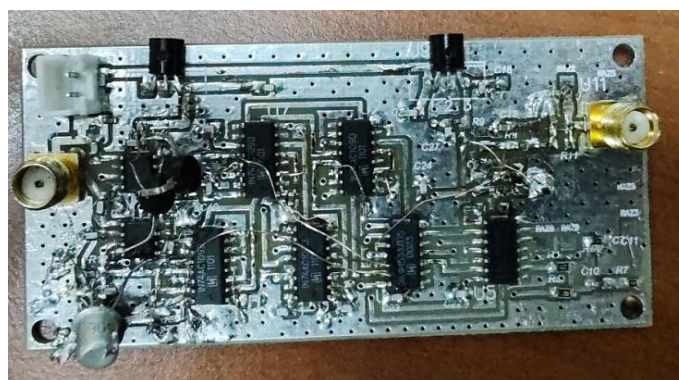
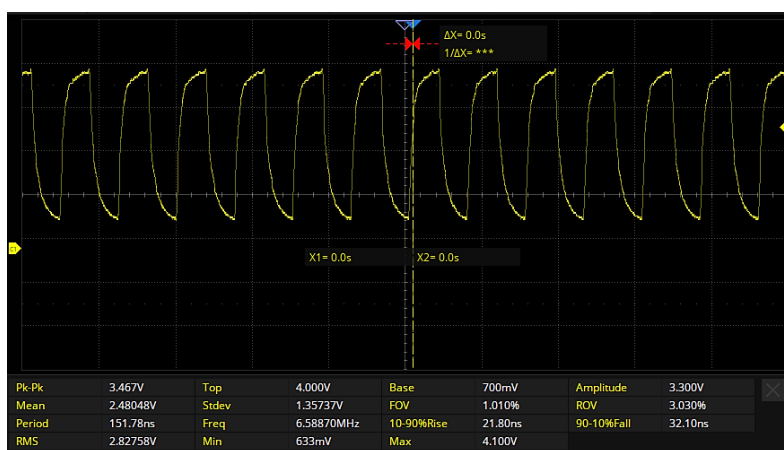


Рис. 7. Исследуемый макет нониусного делителя частоты

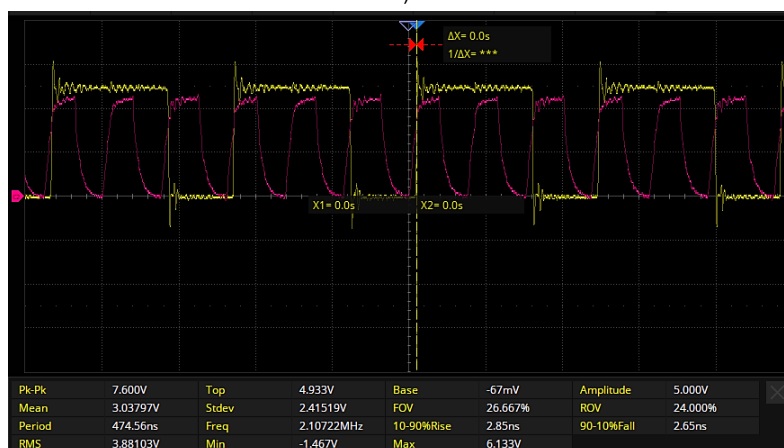
В качестве делителя на 8 используется микросхема MC12026. Поскольку она имеет отдельный вывод для переключения коэффициента деления (8/9), становится возможной реализация дробного коэффициента деления $8 + \frac{1}{3}$. Для этих целей использовался JK-триггер MC74AC109D. Таким образом,

сквозной коэффициент деления в цепи обратной связи можно вычислить: $N = \frac{8 \cdot 8^{\frac{1}{3}}}{8 - 8^{\frac{1}{3}}} = 200$. В качестве цифрового смесителя использовалась микросхема «Исключающее-ИЛИ» MC74AC86D.

При реализации макета возникла проблема с несоответствием уровней напряжения на выходе делителя MC12026 (эмиттерно-связанная логика), из-за чего не удавалось запустить логические микросхемы JK-триггера и смесителя (рисунок 8). Для устранения этой проблемы была применена схема на СВЧ p - n - p -транзисторах (КТ3109), при помощи которой удалось получить уровни сигнала, достаточные для срабатывания логических микросхем, работающих на транзисторно-транзисторной логике (рисунок 9). Однако использование транзисторов и схемы на JK-триггерах привело к увеличению времени переключения сигнала.



a)



б)

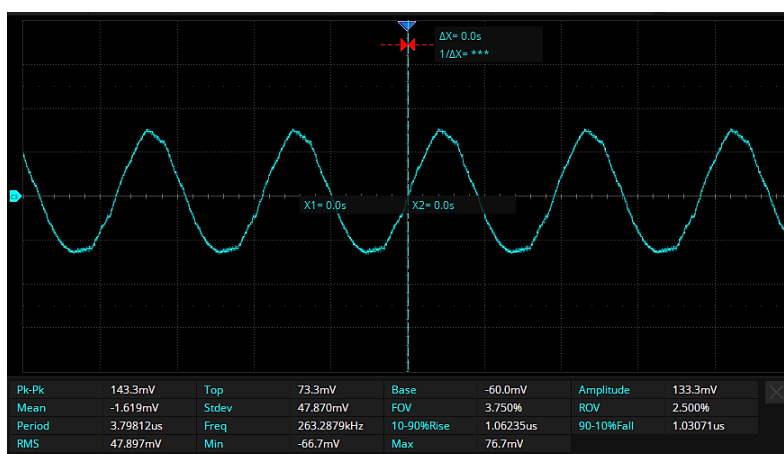
Рис. 8. Сигнал на выходе делителя частоты на 8 (а) и $8^{1/3}$ (б)

Рис. 9. Осциллограмма выходного сигнала после фильтрации

При работе макета на высоких частотах в спектре сигнала были заметны побочные гармоники, но, несмотря на обширный спектральный состав, они не должны оказать критическое влияние на работоспособность петли, так как являются кратными требуемой частоте (рисунок 10). Если частоту входного сигнала увеличивать выше определенного уровня, то в спектре сигнала возникают субгармонические компоненты с шагом $\frac{1}{2}$ исходной частоты (рисунок 11). Эти паразитные компоненты невозможно отфильтровать при помощи низкочастотного RC -фильтра, и тем самым они ограничивают диапазон рабочих частот: $f_{\max} \approx 150$ МГц.

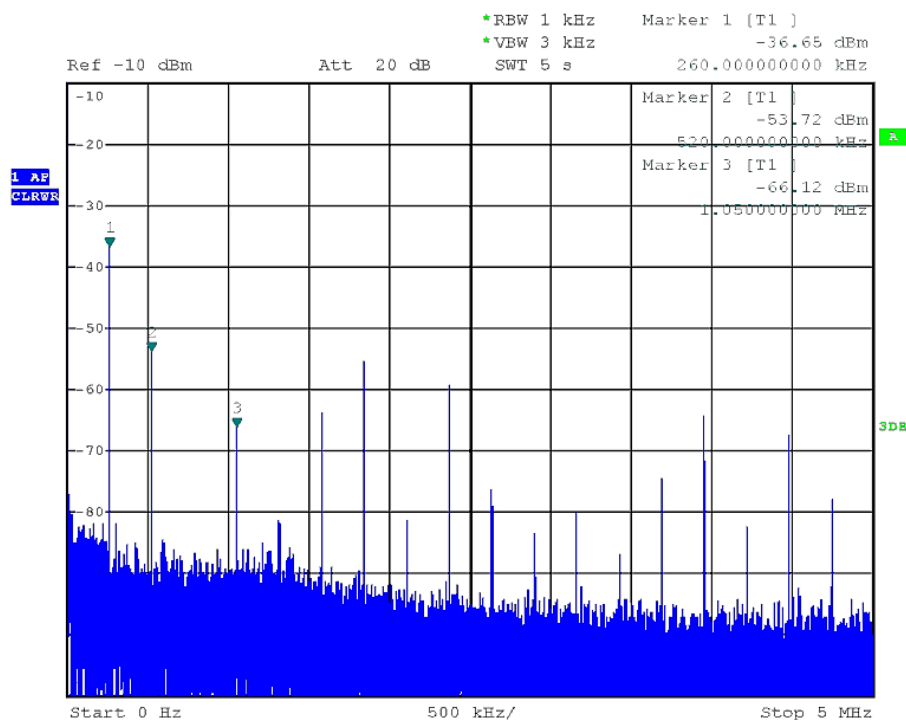


Рис. 10. Спектр сигнала на выходе тракта приведения после деления частоты на $N = 200$ и фильтрации двухзвенным RC -фильтром. Частота входного сигнала $f \approx 50$ МГц

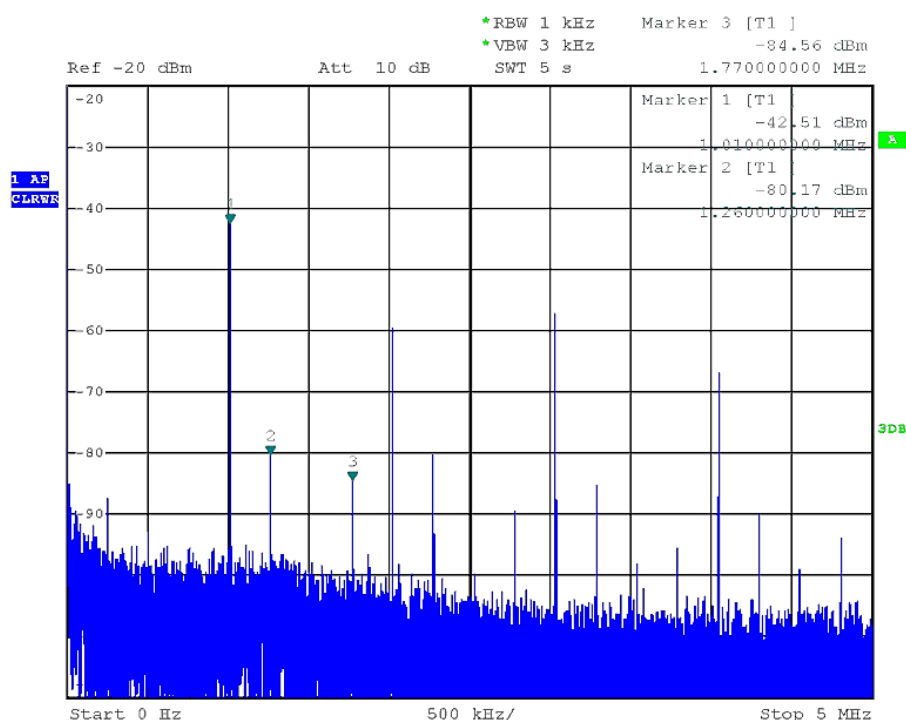


Рис. 11. Спектр сигнала после деления частоты на $N = 200$. Частота входного сигнала $f \approx 200$ МГц

Выводы

Использование нониусного тракта приведения с дробностью в одном из плеч является перспективным методом снижения фазового шума синтезируемого сигнала в ближней зоне отстроек от несущей.

Для экспериментальной проверки возможности построения нониусного тракта приведения по предложенной в [5] и реализованной на доступной компонентной базе схеме был собран макет с коэффициентом деления $N = 200$. Исследуемый макет позволяет эффективно делить выходную частоту перестраиваемого генератора в диапазоне до 150 МГц.

Дальнейшая работа по данной тематике предполагает построение полноценной петли ИФАПЧ и генерации сигналов СВЧ-диапазона с низким уровнем фазовых шумов в ближней зоне отстроек от несущей.

Литература

1. Никитин Ю. А., Тихонов Я. А. Исследование влияния уровня фазовых шумов синтезатора частот на точность плазменной диагностики // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики. Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей (ПКМ-2023, Санкт-Петербург, 5–7 декабря 2023): сборник лучших докладов: в 2-х тт. Т. 2. СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 37–39. EDN: URCSAA
2. Chenakin A., Ojha S., Nediyanath Sh. A 26.5 GHz PLL Synthesizer with Low Phase Noise Characteristics // Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference (Melbourne, Australia, 5–8 December 2011). 2011.
3. Sadowski B. A Self-offset Phase-locked Loop // Microwave Journal. 2008. Vol. 51. Iss. 4. PP. 116–124.
4. Никитин Ю. А. Построение тракта приведения активного синтезатора частот // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 3. С. 19–26. EDN: OXQAXD
5. Никитин Ю. А. Нониусное высокочастотное умножение частоты // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 93–104. EDN: YMHZMT
6. Никитин Ю. А. Анализ дробного нониусного тракта приведения умножающего кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. № 1. С. 31–37. EDN: OWNKKF
7. Никитин Ю. А. Анализ целочисленного нониусного тракта приведения умножающего кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2011. № 6. С. 58–65. EDN: OONIEB
8. Никитин Ю. А. Моделирование цифрового однополосного преобразования частоты в тракте приведения умножающего кольца ИФАП // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 1. С. 16–20. EDN: SERQVD
9. Wan M., Liao Zh., Wei P. Analysis of a Self-Offset Phase Locked Loop // Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology. 2013. Vol. 11. Iss. 1. (in Chinese)
10. Bao F., Guo W., Li Zh., Bao J. Analysis and Measurement of a Self-Offset Phase-Locked Loop // Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology. 2016. Vol. 14. Iss. 3. DOI: 10.11805/TKYDA201603.0421. (in Chinese)

Статья поступила 26 февраля 2025 г.

Одобрена после рецензирования 06 марта 2025 г.

Принята к публикации 21 марта 2025 г.

Информация об авторе

Тихонов Яков Александрович — аспирант кафедры электроники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: tihonov.ya@sut.ru

Practical Implementation of a Fractional Vernier Frequency Translation Loop in a Multiplying Phase-Locked Loop System

I. Tikhonov

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. Modern radio engineering devices require high precision, stability, and low phase noise levels, particularly in the microwave range. Frequency multiplication in traditional PLL (phase-locked loop) circuits leads to an increase in phase noise, which limits the applicability of such systems. The aim of this work is to investigate and practically implement a Vernier frequency conversion path to align the frequency of a tunable oscillator with a reference signal in a PLL system, minimizing phase noise during frequency multiplication. **Methods used:** the study employs circuit simulation in MicroCap, prototyping of a Vernier frequency divider, and experimental measurement of its characteristics. **Novelty:** a prototype of a Vernier frequency conversion path with a fractional division factor has been proposed and implemented, allowing for reduced phase noise levels compared to traditional frequency multiplication methods in PLLs. **Results:** experimental validation confirms the operation of the Vernier frequency divider in accordance with theoretical predictions, with a division factor of $N = 200$, functioning within a frequency range of up to 150 MHz. **Theoretical / Practical significance:** the development of a Vernier frequency conversion path with a fractional division factor improves phase noise characteristics in the close-in spectrum of PLL output signals. This is crucial for high-frequency radio engineering applications, including radar systems, satellite communications, and 5G networks. Practical research confirms the feasibility of this method in real-world circuits, though certain limitations in the operating range require further refinement.

Key words: phase-locked loop, phase noise, Vernier frequency conversion path, fractional division factor, frequency divider, spectral characteristics

Information about Author

Tikhonov Iakov – Postgraduate at the Department of Electronics (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: tihonov.ya@sut.ru

УДК 004.932.75'1
EDN: AGSYXF

Разработка пользовательско-ориентированной системы умной парковки

Матвеев А. С., Парамонов А. И. ✉

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка проблемы. Современные системы умных парковок в большинстве случаев ориентированы преимущественно на сбор и анализ данных о занятости парковочных мест, в то время как взаимодействие с конечным пользователем реализовано недостаточно эффективно. Отсутствие интуитивно понятных инструментов для водителей ограничивает практическую ценность таких систем. **Цель исследования** – повышение удобства и эффективности взаимодействия пользователей с системой умной парковки за счет разработки архитектурно и технологически усовершенствованного решения. **Методы.** Предложенная система разработана с использованием микросервисной архитектуры и интеграции компонентов Интернета вещей, включая камеры видеонаблюдения, датчики движения, а также сверточные нейронные сети для автоматического распознавания государственных регистрационных знаков транспортных средств. Обработка данных осуществляется на центральном сервере с последующим отображением результатов для пользователя через удобный интерфейс. **Новизна.** В отличие от существующих решений акцент в разработке сделан на взаимодействии с конечным пользователем. Применение нейросетевых технологий в сочетании с устройствами Интернета вещей в рамках микросервисной архитектуры позволяет объединить сбор данных, их интеллектуальную обработку и представление в единой адаптивной системе. **Результаты.** Разработанная система обеспечивает автоматизированный мониторинг и анализ данных о доступности парковочных мест, а также предоставляет пользователям адаптированный интерфейс с актуальной информацией о свободных местах. Реализация микросервисного подхода позволила достичь гибкости, масштабируемости и устойчивости системы при увеличении нагрузки. Интеграция нейронных сетей повысила точность распознавания номеров, что, в свою очередь, улучшило качество работы всей парковочной инфраструктуры. **Практическая значимость.** Разработанная система может быть использована при проектировании и модернизации городской парковочной инфраструктуры, а также адаптирована для внедрения в умные транспортные системы. Полученные результаты могут быть полезны муниципальным службам и частным операторам парковочных комплексов.

Ключевые слова: умные парковки, автоматизированные парковочные системы, нейронные сети

Введение

В последние годы урбанизация и рост числа автомобилей существенно повлияли на организацию городской инфраструктуры, в том числе на систему парковки. Множество городов сталкиваются с дефицитом парковочных мест, что затрудняет поиск свободных участков для автомобилей и увели-

Библиографическая ссылка на статью:

Матвеев А. С., Парамонов А. И. Разработка пользовательско-ориентированной системы умной парковки // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 1. С. 5. EDN: AGSYXF

Reference for citation:

Matveev A., Paramonov A. Development of a User-Oriented Smart Parking System // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 1. P. 5. EDN: AGSYXF

чивает время, которое водители тратят на парковку. Это создает дополнительную нагрузку на транспортные потоки и снижает уровень комфорта для автомобилистов. Решение проблемы парковки требует внедрения инновационных технологий, направленных на автоматизацию процессов учета и распределения парковочного пространства, что позволит снизить нагрузку на городские улицы и улучшить условия для водителей.

С развитием концепции умного города и внедрением технологий Интернета вещей (IoT, аббр. от англ. Internet of Things) в инфраструктуру появилась возможность значительно улучшить управление парковочными ресурсами. Система умной парковки является не только средством оптимизации парковочных процессов, но и важным элементом умной городской инфраструктуры. Использование IoT позволяет интегрировать различные устройства и датчики, которые взаимодействуют друг с другом и с городской инфраструктурой, предоставляя водителям актуальную информацию о доступных парковочных местах в реальном времени.

Одним из ключевых аспектов организации умной парковки является эффективная обработка данных с датчиков, которые фиксируют занятость парковочных мест и передают эту информацию в централизованную систему. Однако, несмотря на существование множества решений для управления парковочными системами, большинство из них не решают важную проблему недостаточной ориентированности на конечного пользователя. На сегодняшний день системы умной парковки в основном обеспечивают лишь сбор и обработку данных о занятости парковочных мест, не предлагая пользователям удобных и интуитивно понятных инструментов для взаимодействия. Для решения данной проблемы требуется разработка новых подходов, направленных на улучшение взаимодействия пользователя с системой умной парковки. Предлагаемые подходы должны не только обеспечивать сбор и обработку данных о занятости парковочных мест, но и предоставлять пользователям функциональные средства для взаимодействия с системой, включая интерфейсы для оперативного резервирования парковочных мест и получения актуальной информации в реальном времени.

Целью данного исследования является разработка системы умной парковки, ориентированной на конечного пользователя, с интеграцией элементов и алгоритмов для автоматического распознавания автомобильных номеров. Предлагаемая система направлена на устранение существующих недостатков в текущих решениях, обеспечивая эффективное управление парковочными местами и удобное взаимодействие пользователей с ней через мобильные интерфейсы. Разработка указанной системы способствует внедрению передовых технологий в области городского транспорта и парковки, ведет к повышению удобства и безопасности для пользователей.

Обзор подходов к построению умных парковок

Рассмотрим подходы к построению умных парковок, которые на данный момент наиболее часто используются в научных исследованиях и публикациях. В ходе анализа мы будем опираться на проведенный комплексный обзор существующих решений и технологий, применяемых при создании умных парковок [1].

Система умной парковки на основе беспроводной сенсорной сети (WSN, аббр. от англ. Wireless Sensor Network) представляет собой инновационную технологию, которая использует сеть датчиков для мониторинга занятости парковочных мест [2]. Каждый сенсор, установленный на парковочном месте, фиксирует наличие или отсутствие автомобиля и передает данные в центральную систему управления через беспроводную сеть. Такая система обеспечивает высокую гибкость и масштабируемость, позволяя интегрировать большое количество датчиков с минимальными затратами на инфраструктуру. Кроме того, беспроводные сенсоры обеспечивают оперативность сбора и передачи данных, что позволяет эффективно управлять парковочным пространством, информируя водителей о наличии свободных мест в реальном времени.

Система умной парковки на основе многоагентной системы (MAS, аббр. от англ. Multi Agent Systems) представляет собой подход, в котором различные автономные агенты взаимодействуют между собой для эффективного управления парковочным пространством. Каждый агент в системе может представлять собой отдельное устройство или компонент системы, например датчики или парковочные терминалы, которые обмениваются информацией и принимают решения о распределении парковоч-

ных мест. Взаимодействие агентов позволяет системе адаптироваться к изменениям в реальном времени, повышая эффективность и уменьшая время, затрачиваемое на поиск свободного места для парковки. Такой подход обеспечивает более высокую гибкость, динамичность и адаптивность системы в ответ на изменения условий парковки и движения [3].

Система умной парковки, основанная на компьютерном зрении, использует камеры и алгоритмы обработки изображений для мониторинга занятости парковочных мест [2]. Камеры, установленные в местах парковки, осуществляют анализ изображений в реальном времени, фиксируя присутствие или отсутствие автомобилей на соответствующих участках. Применение методов машинного зрения позволяет системе точно определить, занято ли парковочное место, и передать эту информацию в центральную систему управления. Этот подход позволяет эффективно управлять парковочным пространством, обеспечивая высокую точность и минимизируя вероятность ошибок, связанных с определением свободных мест. Полученная визуальная информация также может быть использована для выполнения дополнительных функций, таких как распознавание номеров транспортных средств.

Система умной парковки, основанная на сети транспортных средств (VANET, *аббр. от англ. Vehicular Ad-Hoc Network*), представляет собой инфраструктурное решение, при котором транспортные средства взаимодействуют друг с другом и с городской инфраструктурой, обмениваясь данными о доступности парковочных мест. В рамках VANET автомобили могут отправлять и получать информацию о свободных местах на парковках в реальном времени, что способствует быстрому нахождению доступных парковочных участков водителями. Интеграция с городской инфраструктурой позволяет более эффективно управлять парковочными ресурсами, минимизируя время поиска парковки и улучшая транспортную ситуацию в городе. Этот подход способствует созданию динамичной системы, автоматически адаптирующейся к изменениям в потоке автомобилей и загрузке парковок [2].

Система умной парковки, основанная на IoT, представляет собой комплексное решение, в котором физические устройства, такие как датчики и камеры, взаимодействуют с центральной системой через сеть Интернет, обеспечивая сбор и передачу данных о состоянии парковочных мест [4]. Каждый датчик фиксирует занятость парковочного места и передает информацию в реальном времени, что позволяет системе оперативно анализировать данные и информировать водителей о наличии свободных мест. Система IoT создает эффективную сеть взаимосвязанных устройств, что позволяет оптимизировать процессы поиска парковки, обеспечивая актуальную информацию для пользователей и улучшая управление городской инфраструктурой.

Система умной парковки, использующая методы машинного обучения (ML, *аббр. от англ. Machine Learning*), применяет алгоритмы машинного обучения для анализа данных, полученных от датчиков, камер и других устройств [5]. Эти алгоритмы способны предсказывать уровень занятости парковочных мест, анализируя накопленные данные о парковке, временные параметры и другие ключевые факторы. ML позволяет системе адаптироваться к изменениям в поведении водителей и автоматически оптимизировать процессы распределения парковочных мест. Такой подход способствует повышению точности прогнозирования, ускорению процесса поиска парковки и улучшению общей эффективности использования парковочного пространства.

Система умной парковки на основе глубокого обучения (DL, *аббр. от англ. Deep Learning*) является более продвинутым вариантом ML, использующим нейронные сети (NN, *аббр. от англ. Neural Networks*) для анализа больших объемов данных и распознавания сложных паттернов в поведении водителей и состоянии парковки [6]. DL позволяет системе не только предсказывать свободные места, но и совершенствовать методы распознавания объектов, таких как автомобили, с помощью анализа изображений и видеопотока. Использование DL в системе умной парковки позволяет улучшить точность распознавания, повысить эффективность работы системы и уровень автоматизации процессов.

Система умной парковки на основе NN использует их для обработки информации, полученной с парковочных датчиков, камер и из других источников. NN способны эффективно классифицировать данные, например, распознавать наличие автомобиля на парковочном месте и прогнозировать изменения в занятости мест. Эти системы могут адаптироваться к изменениям в реальном времени, улучшая качество обслуживания водителей и увеличивая эффективность использования парковочных ресурсов. Благодаря своей способности к обучению и самообучению, NN обеспечивают высокую степень точности и гибкости в управлении парковочными процессами [7].

Система умной парковки на основе нечеткой логики использует ее методы для оценки и обработки неопределенных или неточных данных, полученных от датчиков и других компонентов системы [8]. Этот подход позволяет учитывать различные факторы, такие как плотность трафика, погодные условия или предпочтения водителей, и принимать решения на основе неполной или неопределенной информации. Нечеткая логика помогает системе более гибко адаптироваться к изменениям в условиях парковки, обеспечивая более точное управление и минимизируя ошибки при определении свободных мест.

Система умной парковки на основе глобальной системы позиционирования (GPS, аббр. от англ. Global Positioning System) использует GPS-технологии для определения местоположения автомобилей и свободных парковочных мест [9]. Каждый автомобиль и парковочное место оснащаются GPS-датчиками, которые передают данные о местоположении в центральную систему. Эта информация позволяет эффективно управлять распределением парковочных мест, направлять водителей к ближайшим свободным местам и улучшать общую организацию парковки. Использование GPS в системе умной парковки помогает точно определить местоположение транспортных средств и увеличить точность процессов парковки.

Система умной парковки на основе глобальной системы мобильной связи (GSM, аббр. от англ. Global System for Mobile Communications) использует мобильные сети для передачи данных между устройствами на парковке и центральной системой управления [10]. GSM-системы обеспечивают связь между датчиками, камерами и мобильными приложениями водителей, позволяя им получать информацию о доступных местах и ориентироваться в процессе парковки. Мобильная связь помогает улучшить взаимодействие между системой и пользователями, делая процесс поиска парковки более удобным и быстрым.

Система умной парковки на основе технологии Bluetooth используется для передачи данных между устройствами на парковке и мобильными приложениями водителей. Bluetooth-датчики, установленные на парковочных местах, передают информацию о занятости мест на мобильные устройства водителей, что позволяет им получать актуальную информацию о доступных местах в реальном времени [1]. Технология Bluetooth предлагает удобное и недорогое решение для организации системы умной парковки, позволяя повысить эффективность поиска парковочных мест и оптимизировать взаимодействие между водителями и системой.

Ниже, в таблице 1 представлена сравнительная оценка описанных выше подходов к построению умных парковок на основании следующих критериев: сложность внедрения и инфраструктурные требования, точность и эффективность, гибкость и масштабируемость.

Таблица 1. Сравнение систем умной парковки

Система	Сложность внедрения и инфраструктурные требования	Точность и эффективность	Гибкость и масштабируемость
WSN	Внедрение системы требует установки датчиков на каждом парковочном месте и подключения к беспроводной сети. Инфраструктурные требования относительно низкие, однако необходимо хорошее покрытие сети	Система достаточно точна в определении занятости парковочных мест, так как каждый сенсор фиксирует наличие автомобиля. Эффективность зависит от качества сети и датчиков	Обеспечивается высокая гибкость благодаря простоте интеграции новых датчиков в систему и возможности масштабирования для расширения числа парковочных мест
MAS	Внедрение системы может быть сложным из-за необходимости разработки алгоритмов взаимодействия агентов и их интеграции в городскую инфраструктуру. Требуется высокоскоростная связь и вычислительные ресурсы для работы агентов	Точность системы зависит от качества взаимодействия агентов. В среднем она достаточно высокая для распределенного управления парковкой, однако сложные ситуации могут требовать дополнительной настройки	Очень высокая гибкость и масштабируемость. Система легко адаптируется к изменениям в городской инфраструктуре и может расширяться с увеличением количества парковочных мест

Система	Сложность внедрения и инфраструктурные требования	Точность и эффективность	Гибкость и масштабируемость
Компьютерное зрение	Внедрение требует установки камер и соответствующего программного обеспечения для обработки изображений. Инфраструктура может быть дорогой из-за необходимости использовать камеры высокого разрешения и вычислительные ресурсы	Очень высокая точность в определении занятости парковочных мест и распознавании автомобилей, однако эффективность может снижаться при плохом освещении или погодных условиях	Средняя гибкость, так как системы компьютерного зрения требуют качественного обслуживания и обновлений. Масштабируемость ограничена доступными вычислительными мощностями
VANET	Внедрение системы требует наличия сети транспортных средств и соответствующего оборудования. Потребности в инфраструктуре могут быть высокими из-за необходимого подключения транспортных средств и дорожных устройств	Точность системы зависит от наличия и качества связи между транспортными средствами. В идеальных условиях система может обеспечивать высокую точность, но на практике могут возникать помехи	Средняя гибкость, так как система зависит от плотности транспортного потока и связи между транспортными средствами. Масштабируемость ограничена сетевыми возможностями
IoT	Внедрение IoT-решений требует установки датчиков и подключения их к централизованным системам. Инфраструктурные требования могут быть значительными, особенно для создания сети, которая обеспечит полный охват города	Точность и эффективность системы зависят от качества используемых датчиков и сети. IoT-система может оперативно информировать о занятых и свободных местах, но также зависит от стабильности сети	Высокая гибкость и масштабируемость, так как система может легко расширяться за счет добавления новых датчиков и устройств
ML	Внедрение системы требует наличия вычислительных мощностей для обучения моделей, а также сбора и обработки большого объема данных. Инфраструктура включает в себя датчики и мощные серверы для обработки данных	ML может обеспечивать высокую точность в предсказаниях, например, в отношении оптимального использования парковки и предсказания свободных мест. Однако точность зависит от качества обучающих данных	Средняя гибкость, так как система требует постоянного обучения и адаптации. Масштабируемость ограничена мощностями для обработки данных
DL	Внедрение DL требует значительных вычислительных мощностей и специализированного оборудования, таких как графические процессоры для ускорения обработки данных	Высокая точность распознавания объектов и предсказания свободных мест, но требуется большое количество данных для обучения. Система может страдать от высокой нагрузки при большой плотности трафика	Средняя гибкость, так как требуется мощное оборудование и длительное обучение модели. Масштабируемость ограничена вычислительными возможностями
NN	Внедрение NN требует мощных серверов для обучения и обработки данных. Система может потребовать значительных усилий для адаптации и интеграции с городскими системами	Высокая точность в прогнозировании и распознавании объектов, включая анализ данных о движении и занятости парковочных мест	Средняя гибкость, так как система требует постоянного обучения и адаптации. Масштабируемость зависит от доступных вычислительных мощностей
Нечеткая логика	Внедрение системы не требует сложной инфраструктуры, так как используется математическое моделирование и принятие решений на основе неопределенных данных	Точность системы может быть зависимой от условий. Решения принимаются на основе нечетких данных, что не всегда позволяет достичь максимальной эффективности	Средняя гибкость, так как система требует настройки и адаптации в зависимости от условий, но не нуждается в больших вычислительных мощностях

Система	Сложность внедрения и инфраструктурные требования	Точность и эффективность	Гибкость и масштабируемость
GPS	Внедрение требует установки системы GPS на каждом парковочном месте или в транспортных средствах. Потребности в инфраструктуре средние, однако точность может зависеть от спутникового сигнала	Система может обеспечивать точность определения местоположения, но не всегда точна в случае плотной застройки или при наличии препятствий	Средняя гибкость, так как система зависит от наличия GPS-сигнала и доступных точек для парковки. Масштабируемость ограничена качеством спутниковой связи
GSM	Внедрение системы требует наличия мобильной связи и специальных датчиков, поддерживающих GSM-сигнал. Система может быть ограничена по покрытию в некоторых районах	Система может не обеспечивать высокой точности из-за ограничений по сигналу и помехам в городской среде	Средняя гибкость, так как система ограничена возможностями сети GSM и не может работать в условиях отсутствия связи
Bluetooth	Внедрение требует установки датчиков Bluetooth и соответствующего оборудования для связи. Инфраструктура ограничена небольшим радиусом действия Bluetooth	Точность системы может быть достаточно высокой на коротких расстояниях, но в условиях большого количества автомобилей или помех эффективность может снижаться	Средняя гибкость, так как система ограничена возможностями связи Bluetooth. Масштабируемость ограничена количеством поддерживаемых устройств и радиусом действия

Каждая из рассмотренных систем умной парковки обладает как преимуществами, так и недостатками. Основной проблемой всех представленных систем является их недостаточная ориентированность на конечного пользователя. В большинстве случаев эти системы обеспечивают лишь сбор и обработку данных о занятости парковочных мест, но не предлагают пользователям удобных инструментов для взаимодействия. Как правило, для получения информации о свободных местах водители должны полагаться на данные, предоставляемые системой, которые часто не могут быть представлены в доступной и понятной форме [11].

Системы на основе компьютерного зрения или ML могут иметь высокую точность распознавания, однако они часто требуют сложного оборудования, настройки и обслуживания, что также может ограничить их доступность для конечных пользователей. Возможные затруднения при интеграции этих систем с мобильными приложениями или интерфейсами в реальном времени могут оставлять пользователей без актуальной информации о наличии свободных мест, что снижает общую эффективность системы.

Подходы к решению задачи организации умной парковки

В связи с вышеизложенным предлагается решение, направленное на оптимизацию взаимодействия пользователя с системой умной парковки. Предлагаемая система основана на микросервисной архитектуре и сочетает в себе элементы IoT, включая датчики движения, камеры, и сверточные NN для автоматического распознавания автомобильных номеров. Это решение позволяет не только точно определять занятость парковочных мест, но и обеспечивает пользователям возможность быстро и удобно резервировать свободные места через мобильное приложение. Внедрение такой системы предоставляет водителям актуальную информацию о доступных местах в реальном времени, сокращая сроки поиска свободного места и снижая уровень дискомфорта, связанного с этим процессом.

Для взаимодействия между отдельными компонентами системы — сервисами — используется микросервисный подход к организации архитектуры системы. Организованная архитектура системы показана на рисунке 1. Пунктирными линиями обозначены области, находящиеся в одном контейнерном пространстве.

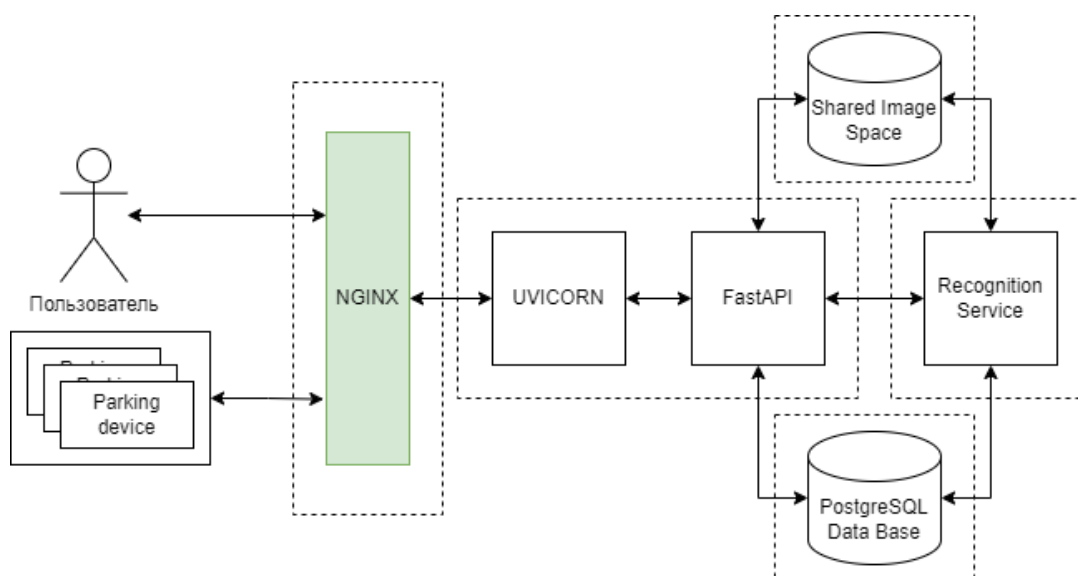


Рис. 1. Схема архитектуры системы умной парковки

Сервисами FastAPI (современный веб-фреймворк на языке Python, предназначенный для создания RESTful API) и Recognition Service (сервис распознавания) используется общая база данных для синхронизации информации и общее пространство для хранения изображений (Shared Image Space), откуда Recognition Service получает изображения для распознавания и куда впоследствии складывает изображения распознанных автомобильных номеров.

Пользователь взаимодействует с системой через веб-интерфейс или мобильное приложение, используя HTTP(S) (аббр. от англ. HyperText Transfer Protocol / HyperText Transfer Protocol Secure – протокол передачи гипертекста и его защищенная версия с использованием шифрования). Запросы пользователя проходят через веб-сервер NGINX (аббр. от англ. Engine X – высокопроизводительный веб-сервер и обратный прокси-сервер), который обрабатывает входящие подключения и маршрутизирует их на внутренние сервисы. NGINX выбран в силу своей высокой производительности и способности эффективно управлять большим числом одновременных подключений благодаря асинхронной архитектуре, что позволяет минимизировать задержки при обработке запросов.

Устройства парковки (Parking Device) передают данные о занятости мест, регистрационных номерах или других событиях, используя HTTP(S) и протокол двусторонней передачи данных в реальном времени между клиентом и сервером WebSocket (в случае передачи событий в реальном времени). Данные с устройств парковки поступают через NGINX, который передает их на внутренние API-сервисы (аббр. от англ. Application Programming Interface – интерфейс программирования приложений).

Веб-сервер NGINX перенаправляет запросы на ASGI-сервер UVICORN – высокопроизводительный сервер, реализующий стандарт ASGI (аббр. от англ. Asynchronous Server Gateway Interface – асинхронный шлюзовый интерфейс сервера) и обеспечивающий выполнение FastAPI-приложения с использованием HTTP(S). NGINX действует как обратный прокси для UVICORN, принимая внешние запросы и направляя их на FastAPI. UVICORN выбран благодаря его высокой эффективности в обработке асинхронных запросов, что достигается за счет неблокирующего ввода / вывода. Это позволяет минимизировать задержки при выполнении операций и обеспечивает оперативное реагирование системы на динамично изменяющуюся нагрузку.

UVICORN запускает FastAPI-приложение и обрабатывает запросы к API, используя протокол ASGI. Запросы маршрутизируются в FastAPI для обработки логики парковочного комплекса.

FastAPI взаимодействует с Shared Image Space, куда загружаются снимки для последующего распознавания. Для этого используются протоколы HTTP(S), FTP (аббр. от англ. File Transfer Protocol – протокол передачи файлов) или файловый доступ (например, NFS (аббр. от англ. Network File System – сетевая файловая система) или SMB (аббр. от англ. Server Message Block – протокол блочной передачи сообщений между клиентом и сервером), если пространство изображений доступно как сетевое хранилище). FastAPI может загрузить или запросить изображения, чтобы передать их в Recognition Service для анализа.

FastAPI направляет изображения или запросы на распознавание в Recognition Service. Для этого используются протоколы HTTP(S) с архитектурой REST API или gRPC (если требуется высокопроизводительное соединение). В свою очередь Recognition Service выполняет распознавание номеров и возвращает результаты обратно в FastAPI, такие как идентификаторы автомобилей.

FastAPI взаимодействует с базой данных PostgreSQL (*аббр. от англ. Post Ingres Structured Query Language* – объектно-реляционная система управления базами данных) для сохранения и получения данных о транспортных средствах, истории въезда / выезда и другой информации. Для этого используется протокол PostgreSQL. FastAPI осуществляет запросы на добавление, изменение или извлечение данных, связанных с парковочными событиями и учетными записями.

Recognition Service получает изображения из Shared Image Space для выполнения анализа. Для этого используются протоколы HTTP(S), FTP или прямой файловый доступ (например, через NFS или SMB). Recognition Service может запросить изображение для распознавания и получить его из Shared Image Space для дальнейшего анализа.

Основной акцент в предлагаемой системе сделан на улучшении пользовательского опыта, что достигается за счет автоматизации ключевых процессов взаимодействия с парковкой. Быстрое резервирование парковочных мест через мобильное приложение позволяет пользователю заранее узнать о наличии свободных мест на парковке, а также сэкономить время, что, в свою очередь, снижает уровень дискомфорта при поиске места для парковки. Такое решение отвечает основным потребностям целевой аудитории, включая стремление к удобству и сокращению времени, которое водитель тратит на поиски парковочного места. Внедрение такой системы не только повышает уровень удовлетворенности пользователей, но и способствует оптимизации городской инфраструктуры за счет рационального распределения транспортных потоков.

Выводы

Изучение подходов к организации умных парковок показало, что существует множество решений, основанных на использовании датчиков, анализе и обработке изображений, получаемых с видеокамер, использовании функциональности VANET и т. д. Все эти решения направлены в основном на получение информации о состоянии парковочных мест. В качестве их общего недостатка можно отметить недостаточно проработанный интерфейс для пользователя.

Именно пользовательский интерфейс во многом определяет эффективность системы умной парковки, поскольку в значительной степени влияет на поведение автомобилиста. Своевременность, доступность и качество представления информации обеспечивают оперативность и безошибочность действий пользователя, следовательно, и управляемость системы в целом.

Таким образом, предлагаемый подход направлен на устранение выявленного недостатка – слабой ориентированности на конечного пользователя. Реализация удобного и функционального интерфейса, обеспечивающего, в частности, возможность предварительного резервирования парковочных мест, способствует повышению эффективности взаимодействия пользователя с системой, снижает временные затраты и повышает общее качество обслуживания.

Литература

1. Fahim A., Chowdhury M. A., Hasan M. Smart Parking Systems: Comprehensive Review Based on Various Aspects // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. Iss. 5. P. e07050. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07050. EDN: HGOZWX
2. Channamallu S. S., Kermanshachi Sh., Rosenberger J. M., Pamidimukkala A. A Review of Smart Parking Systems // *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 73. PP. 289–296. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.920. EDN: OLJLNF
3. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-Agent Systems: A Survey // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. PP. 28573–28593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2831228. EDN: YGWJGH
4. Dheeven T. A., Kumar P. M., Venkatesh V., Sailaja K. A. I. IoT Based Sensor Enabled Vehicle Parking System // *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 31. P. 100953. DOI: 10.1016/j.measen.2023.100953. EDN: MSRPPN

5. Kamble Sh. J., Kounte M. R. Machine Learning Approach on Traffic Congestion Monitoring System in Internet of Vehicles // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171. PP. 2235–2241. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.241. EDN: TMMPJG
6. Neupane D., Bhattarai A., Aryal S., Bouadjenek M. R., Seok U. et al. Shine: A Deep Learning-Based Accessible Parking Management System // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 238. P. 122205. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122205. EDN: YVVJEM
7. Morgos J., Vorcak J., Hrudkay K. Parking Information System with Artificial Neural Network // *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 74. PP. 624–631. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.190. EDN: CRVCWN
8. Elomiya A., Křupka J., Jovčić S. A Smart Parking System Using Surveillance Cameras and Fuzzy Logic: A Case Study at Pardubice University's Campus // *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 225. PP. 4881–4890. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.488. EDN: KDUNRY
9. Saki S., Hagen T. Parking Search Identification in Vehicle GPS Traces // *Journal of Urban Mobility*. 2024. Vol. 6. P. 100083. DOI: 10.1016/j.urbmob.2024.100083. EDN: NTIOSG
10. Singh H., Anand Ch., Kumar V., Sharma A. Automated Parking System with Bluetooth Access // *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2014. Vol. 3. Iss. 5. PP. 5773–5775.
11. Santoso D., Hakim M., Rachfian M., Hidayat M., Spits Warnars H. L. H. Mobile Application for Smart Parking Systems // *Smart Data Intelligence: Proceedings of ICSMDI*. 2022. PP. 485–497. DOI: 10.1007/978-981-19-3311-0_41

Статья поступила 17 марта 2025 г.
Одобрена после рецензирования 31 марта 2025 г.
Принята к публикации 07 апреля 2025 г.

Информация об авторах

Матвеев Артем Сергеевич — студент 2-го курса магистратуры (группа ИКТИ-35м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Парамонов Александр Иванович — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: paramonov@sut.ru

Development of a User-Oriented Smart Parking System

A. Matveev, A. Paramonov ✉

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose. Modern smart parking systems are, in most cases, primarily focused on the collection and analysis of data regarding the occupancy of parking spaces, whereas interaction with end users is often implemented inefficiently. The lack of intuitive tools for drivers limits the practical value of such systems. **Research objective.** To enhance the convenience and effectiveness of user interaction with a smart parking system through the development of an architecturally and technologically advanced solution. **Methods.** The proposed system is developed using a microservice architecture and integrates Internet of Things components, including surveillance cameras, motion sensors, and convolutional neural networks for the automatic recognition of vehicle license plates. Data processing is performed on a central server, and the results are displayed to users through an intuitive interface. **Novelty.** Unlike existing solutions, the proposed system emphasizes interaction with the end user. The combination of neural network technologies with Internet of Things devices within a microservice architecture enables data collection, intelligent processing, and presentation to be integrated into a unified adaptive system. **Results.** The developed system enables automated monitoring and analysis of parking space availability, while providing users with a tailored interface displaying real-time information about vacant spots. The implementation of a microservice approach has ensured the system's flexibility, scalability, and resilience under increased loads. The integration of neural networks has improved license plate recognition accuracy, thereby enhancing the overall efficiency of the parking infrastructure. **Practical relevance.** The developed system can be applied in the design and modernization of urban parking infrastructure and can be adapted for implementation in intelligent transportation systems. The obtained results may be of practical use to municipal services and private parking facility operators.

Key words: smart parking systems, automated parking systems, neural networks

Information about Authors

Matveev Artem Sergeevich – 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Paramonov Aleksandr Ivanovich – Holder of an Advanced Doctorate in Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: paramonov@sut.ru

ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 16.04.2025

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Берзина Е.В.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**

Изображение на обложке с сайта <http://www.freepik.com>