

ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 3 (64)
ИЮЛЬ–СЕНТЯБРЬ
2024



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 №90-р):

Физико-математические науки

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Технические науки

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1.3.11 – Физика полупроводников

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу <http://journals.nstu.ru/doklady/rules>. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2024

июль – сентябрь

№ 3 (64)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)

Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)

А. Загоскин, PhD (Великобритания)

Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)

М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)

К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.

И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.

А.О. Давидов, д-р техн. наук

Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф.

В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.

С.Л. Елистратов, д-р техн. наук

А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф.

В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.

М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф.

О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.

В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф.

В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.

А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф.

С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.

С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г.
(свидетельство ПИ № ФС 77-81374 от 30.06.2021 г.)*

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346,
телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2024 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2024

July – September

№ 3 (64)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof.
O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073,
Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Туманова Е.И.,
Мункуева О.Б.*

Расчет электромагнитной совместимости радиооборудования
пункта управления беспилотной авиационной системы
со стационарными наземными радиоэлектронными
средствами7

Попов В.И.

Математические модели распространения радиоволн
в неоднородных средах для беспроводных сетей. Обзор25

**Филатова С.Г., Вострецов А.Г., Проценко Н.В.,
Гонжара Т.В.**

Определение потенциала развития микроэлектроники
в Новосибирской области на основе анализа
патентных портфелей организаций43

Щуров Н.И., Шабалин Р.В.

Моделирование силовой части электромобиля на базе
ездового цикла57

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

*Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I.,
Munkueva O.B.*

Calculations of electromagnetic compatibility between radio
equipment of a command and control point of unmanned aircraft
system and stationary land radio stations7

Popov V.I.

Mathematical models of radio wave propagation in heterogeneous
environments for wireless networks. Review.....25

Filatova S.G., Vostretsov A.G., Protsenko N.V., Gonzhara T.V.

Investigation of the potential for the development
of microelectronics in the Novosibirsk region based
on the analysis of patent portfolios of organizations.....43

Shchurov N.I., Shabalin R.V.

Modeling the power part of an electric vehicle based
on a driving cycle57

УДК 621.396.7

**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
РАДИООБОРУДОВАНИЯ ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ
АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СО СТАЦИОНАРНЫМИ НАЗЕМНЫМИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫМИ СРЕДСТВАМИ**

Б.М. Антипин, Е.М. Виноградов, Е.И. Туманова, О.Б. Мункуева
*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Рассмотрена процедура расчета электромагнитной совместимости радиооборудования пункта управления (ПУ) беспилотным воздушным судном (БВС), содержащим радиопередатчик (РПД) и радиоприемное устройство (РПУ), с окружением наземных стационарных радиоэлектронных средств (РЭС), в состав которых входят РПД и/или РПУ. Процедура включает анализ влияния помех от передатчиков окружения на прием сигнала БВС приемником ПУ и влияние излучения передатчика ПУ на прием сигналов приемниками РЭС, окружающими ПУ. Предполагается, что как в линии вверх, так и в линии вниз используются сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Для оценки влияния помех от передатчиков окружения на качество приема сигнала приемником ПУ используется защитное отношение. При оценке влияния излучений передатчика ПУ на работу радиоприемных устройств окружения оценивается ухудшение чувствительности приемника, вызванное помехой.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, электромагнитная совместимость, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, защитное отношение, ухудшение чувствительности приемника.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24

Введение

Беспилотная авиационная система (БАС) состоит из двух основных структурных элементов: беспилотного воздушного судна (БВС), которое называют также беспилотным летательным аппаратом (БЛА) [1], и пункта управления (ПУ). ПУ является стационарным элементом БАС, по крайней мере, в течение сеанса работы БАС. Основными задачами ПУ являются передача сигналов управления оборудованию БВС и прием информации, передаваемой на ПУ с борта БВС. Минимальный состав радиооборудования ПУ включает радиопередатчик (РПД) и радиоприемное устройство (РПУ), которые совместно решают эти задачи.

Работа радиотехнического оборудования БАС обычно происходит в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО), создаваемой излучениями электротехнического, радиоэлектронного и радиотехнического оборудования окружения. Однако для радиоприемника, осуществляющего прием сигналов от определенного передатчика, источником помехи обычно служит другой передатчик, особенно когда речь идет о полосах частот, используемых БАС. Гражданские БАС достаточно широко используют частоты в окрестности 2,4 и 5,8 ГГц. Причем одна из них (обычно 5,8 ГГц) используется на линии ПУ→БВС, а другая (2,4 ГГц) на линии БВС→ПУ. Полоса частот 5850–6425 МГц входит в состав официального частот-

Статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 124040300004-8 в ЕГИСУ НИОКТР.

© 2024 Б.М. Антипин, Е.М. Виноградов, Е.И. Туманова, О.Б. Мункуева

ного ресурса БАС в Российской Федерации. Полоса частот 2400–2483,5 МГц является нелицензированной полосой радиочастот, используемой БАС и рекомендованной ГКРЧ [2] для устройств малого радиуса действия, в том числе для устройств, использующих псевдослучайную перестройку рабочей частоты (ППРЧ). В БАС гражданского применения как в линии вверх, так и в линии вниз используются сигналы ППРЧ. Если обратиться к Таблице распределения полос частот [3], то можно обнаружить, что источниками помех в полосах в окрестности частоты 2,4 ГГц будут радиопередатчики, принадлежащие подвижной, радиолокационной и фиксированной службам. Соответственно в этих полосах частот располагаются и приемные устройства этих радиослужб. Что касается частоты 5,8 ГГц, то здесь источники радиопомех и приемники радиосигналов принадлежат также фиксированной и радиолокационной службам, а также фиксированной спутниковой службе.

Радиотехническое оборудование ПУ работает в окружении наземных радиоэлектронных средств (РЭС), в состав которых входят как радиопередатчики, так и радиоприемные устройства. Передатчики РЭС могут создавать помехи приемнику ПУ, а приемники РЭС могут испытывать помеху от передатчика ПУ. Возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) радиотехнического оборудования ПУ с окружением. Оценка ЭМС включает два этапа:

- анализ и оценка влияния помех от окружающих РПД на работу и качество приема полезного сигнала приемником ПУ;
- анализ и оценка влияния излучений передатчика ПУ на работу РПУ РЭС, окружающих ПУ.

Целью настоящей работы является процедура анализа ЭМС радиоаппаратуры ПУ с окружающими РЭС. Решение этой задачи рассмотрим при определенных ограничениях.

Гражданские БВС работают в условиях города, пригородной или сельской местности. При анализе ЭМС эти различия приводят к необходимости использовать разные модели для оценки потерь на трассах распространения как для полезного сигнала, так и для помех. В дальнейшем в окружении ПУ будем рассматривать только наземные стационарные РЭС в условиях сельской местности. При оценке влияния внешней помехи на качество приема полезного сигнала не рассматриваются нелинейные эффекты в РПУ ПУ и РЭС.

1. Анализ влияния помех от передатчиков РЭС, окружающих ПУ, на качество приема полезного сигнала приемником пункта управления

1.1. Исходные данные для анализа

По умолчанию координаты рассматриваемых объектов имеют северную широту и восточную долготу. Поэтому напрямую в обозначениях координат этот факт не отражается.

Координаты антенны приемника ПУ:

- широта η_R , град.;
- долгота α_R , град.;
- высота подъема антенны над землей h_R .

Координаты антенны i -го передатчика, источника помех:

- широта η_{Ti} , град.;
- долгота α_{Ti} , град.;
- высота подъема антенны над землей h_{Ti} .

Диаграмма направленности антенны (ДНА) разбивается на две области: область главного лепестка (ГЛ) и область боковых лепестков (БЛ), куда включена и задняя полусфера. В угловом выражении область ГЛ определена шириной ДНА по уровню -3 дБ. В этой области коэффициент усиления антенны принимаем равным максимальному значению усиления G_0 , указанному в спецификации антенны. Остальная область ДНА – это область БЛ.

Данные о положении ГЛ ДНА РПД и РПУ, окружающих ПУ:

- азимутальное направление ГЛ ДНА φ : $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$;
- угломестное направление ГЛ ДНА θ : $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$;
- ширина ГЛ ДНА в горизонтальной плоскости α ;
- ширина ГЛ ДНА в вертикальной плоскости β .

Угол φ отсчитывается от оси x , а θ от плоскости xOy .

Текущие координаты БВС (летательного аппарата):

- широта $\eta_{\text{ЛА}}$, град.;
- долгота $\alpha_{\text{ЛА}}$, град.;
- высота антенны БВС над землей $h_{\text{ЛА}}$.

Индексы параметров и переменных, используемые в дальнейших расчетах, указывают, к какому устройству или объекту относится данный параметр или переменная, а именно:

T – параметр или переменная относится к передатчику;

R – параметр или переменная относится к приемнику;

i – номер рассматриваемого объекта;

ЛА – параметр или переменная относится к БВС (летательному аппарату).

Значение других индексов в расчетных формулах поясняется по мере их появления.

Параметры РПУ ПУ:

- рабочая частота РПУ f_{0R} , МГц;
- вид модуляции сигнала БВС: ППРЧ;
- ширина полосы частот, занимаемая сигналом ППРЧ B_S , МГц;
- число каналов сигнала ППРЧ M ;
- ширина полосы пропускания тракта промежуточной частоты (ПЧ) РПУ B_R , МГц;
- коэффициент прямоугольности тракта ПЧ РПУ P_p по уровню ρ , дБ;
- коэффициент шума приемника NF , дБ.

Параметры РПД i -го РЭС:

- рабочая частота РПД f_{Ti} , МГц;
- мощность РПД P_{Ti} , дБм;
- ширина спектра излучения РПД B_{Ti} , МГц.

Защитное отношение $(S/I)_{\text{защ}}$, дБ.

Допустимое число пораженных частот (каналов) сигнала $J_{\text{доп}}$.

1.2. Отбор источников помех

Отбор выполняется по расстоянию от ПУ и по частоте [4].

Отбор по расстоянию. Источник помехи (передатчик РЭС) считается потенциально опасным, если он располагается в пределах радиогоризонта приемника ПУ. Предполагая Землю сферической, расстояние $d_{\text{Ррг}}$ до радиогоризонта РПУ пункта управления

$$d_{\text{Ррг}} = 4,12\sqrt{h_R}. \quad (1)$$

Угол, образованный в центре Земли трассой между ПУ и точками радиогоризонта,

$$\delta_R = \arctg(d_{R_{\text{пр}}} / R_{\text{Э}}),$$

где $R_{\text{Э}} = 8500$ км – эквивалентный радиус Земли.

Длина дуги большого круга между точкой, где размещается ПУ, и точками радиогоризонта

$$l_R = \delta_R R_{\text{Э}}.$$

Здесь $R_{\text{З}}$ – средний радиус Земли, $R_{\text{З}} = 6375$ км.

Угол, образованный в центре Земли трассой между ПУ и точкой размещения передатчика T_i ,

$$\delta_{T_i} = \arccos(\sin(\eta_{T_i}) \sin(\eta_R) + \cos(\eta_{T_i}) \cos(\eta_R) \cos(\alpha_{T_i} - \alpha_R)).$$

Углы δ_R и δ_{T_i} должны быть выражены в радианах. Расстояние между ПУ и передатчиком T_i по дуге большого круга

$$l_{T_i} = \delta_{T_i} R_{\text{З}}.$$

Излучение передатчика T_i подлежит анализу по критерию расстояния между ПУ и РПД T_i , если

$$l_{T_i} \leq l_R. \quad (2)$$

Отбор по частоте. Полоса частот, занимаемая сигналом ППРЧ, простирается в границах $(f_{\min}, f_{\max}) = (f_{0R} - B_S / 2, f_{0R} + B_S / 2)$. Эту полосу занимают M каналов. Ширина полосы B_R , занимаемая одним каналом (с учетом защитных интервалов), согласована с полосой РПУ ПУ и составляет

$$B_R = B_S / M.$$

Центральные частоты, по которым происходит перестройка сигнала:

$$f_j = f_{\min} + (j + 1/2)B_R, \quad j = 0, 1, 2, \dots, (M - 1).$$

Процесс частотного отбора состоит в выборе из передатчиков, прошедших отбор по дальности, тех из них, частоты которых f_{T_i} удовлетворяют неравенству

$$f_{0R} - B_S / 2 \leq f_{T_i} \leq f_{0R} + B_S / 2.$$

Пусть таких РПД будет k , т. е. $i = 1, 2, \dots, k$. При анализе воздействия излучений передатчиков РЭС на приемник ПУ ограничимся рассмотрением помех по основному и двум соседним каналам приема приемника ПУ. Поэтому для каждой из частот $f_{T_i} (i = 1, 2, \dots, k)$ находим подмножество частот $f_j (j = 1, 2, \dots, m)$, отстройки между которыми Δf_{ij} отличаются не более чем на $2,5B_R$, т. е.

$$\Delta f_{ij} = |f_{T_i} - f_j| \leq 2,5B_R. \quad (3)$$

Поскольку j -му элементу (каналу) ППРЧ сигнала может создавать помеху несколько передатчиков, для каждой из частот передатчиков f_{T_i} формируется

некоторое множество значений отстроек Δf_{ij} . Отобранные частоты f_{Ti} и их отстройки от элементов ППРЧ сигнала подлежат дальнейшему анализу на предмет их действительного влияния на качество приема полезного сигнала.

Для дальнейшего анализа перейдем к рассмотрению ситуации в декартовой системе координат.

Переход к декартовой системе координат. При переходе пункт управления будем считать точкой начала координат в плоскости xOy , а высота антенны приемника будет координатой на оси h , перпендикулярной плоскости xOy в точке, где размещается ПУ. Так что теперь координатами ПУ будут

$$(x_R, y_R, h_R) = (0, 0, h_R).$$

Часть поверхности, на которой располагаются ПУ и отобранный передатчик T_i , а также направление осей декартовой системы координат представлены на рис. 1, а, а на рис. 1, б приведено определение координаты x_{Ti} .

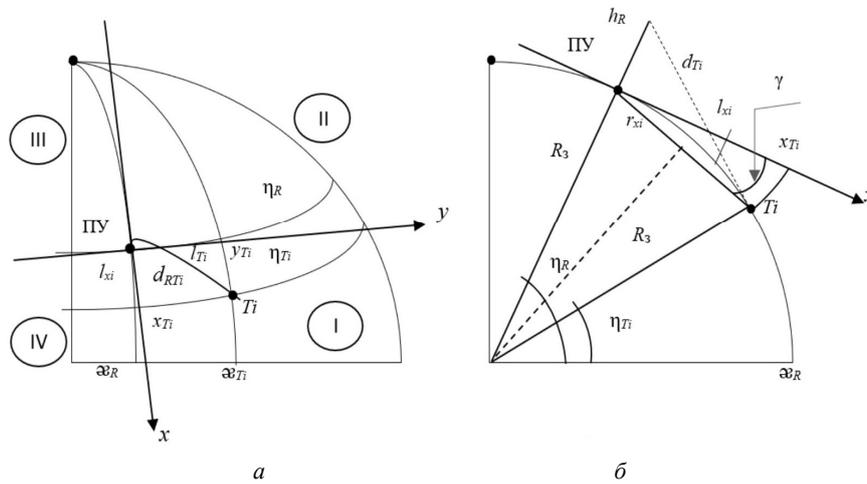


Рис. 1 – Определение декартовых координат передатчика T_i , потенциального источника помехи

Fig. 1. – Finding of Cartesian coordinates of a transmitter T_i , a probable interferer

Как следует из рис. 1, б, длина дуги l_{xi} , соединяющей точку расположения ПУ и точку пересечения меридиана ПУ и параллели η_{Ti} , составляет

$$l_{xi} = R_3(\eta_R - \eta_{Ti})(\pi/180), \text{ км.} \quad (4)$$

Длина хорды r_{xi} , соединяющей эти точки, равна

$$r_{xi} = 2R_3 \sin[(\eta_R - \eta_{Ti})/2].$$

Координаты ПУ и РПД T_i в исходных данных определены в градусах. Выражая аргумент синуса в радианах, получим

$$r_{xi} = 2R_3 \sin\left(\frac{\eta_R - \eta_{Ti}}{2} \frac{\pi}{180}\right), \text{ км.} \quad (5)$$

Учитывая, что угловое расстояние между рассматриваемыми объектами не превышает градуса, можно считать, что при таких значениях углов, выраженных в радианах, $\sin(\delta) \approx \delta$, и тогда, как следует из (4) и (5), $r_{xi} = l_{xi}$.

Ось x является проекцией меридиана, на котором находится ПУ, на плоскость xOy . При определении координаты x_{Ti} нужно в новых координатах сохранить значение расстояния d_{Ti} . Из рис. 1, б следует

$$d_{Ti}^2 = h_R^2 + r_{xi}^2 - 2h_R r_{xi} \cos(90 + \gamma).$$

Поскольку разность $(\eta_R - \eta_{Ti})$ значительно меньше градуса, а $\gamma = (\eta_R - \eta_{Ti})/2$, найдем, что $\cos(90 + \gamma) \approx \cos(90^\circ) = 0$, так что, с одной стороны, учитывая, что $r_{xi} = l_{xi}$, получим $d_{Ti}^2 = h_R^2 + r_{xi}^2 = h_R^2 + l_{xi}^2$. С другой стороны, сохраняя в декартовой системе координат высоту антенны ПУ h_R и расстояние d_{Ti} по оси x , получим $d_{Ti}^2 = h_R^2 + x_{xi}^2$. Сравнивая приведенные значения d_{Ti} , найдем

$$x_{Ti} = r_{xi} = l_{xi}.$$

Для получения координаты y_{Ti} найдем, используя (3), значение l_{Ti} . Аналогично x_{Ti} определим, что d_{RTi} – расстояние между ПУ и T_i в плоскости xOy – с достаточной точностью равно

$$d_{RTi} = l_{Ti}. \quad (6)$$

При указанном на рис. 1, а направлении осей координат x и y , указанной нумерации квадрантов и принятом отсчете значений широты и долготы связь между номером квадранта и координатами передатчика в географической и декартовой системах координат дает табл. 1. Используя табл. 1, найдем квадрант, в котором располагается анализируемый передатчик.

Таблица 1 / Table 1

Связь координат передатчиков с номером квадранта, в котором находится передатчик

The relations between transmitter coordinates and the number of quadrant where the transmitter is located

Квадрант/ Quadrant	Исходные координаты РПД / Initial coordinates of transmitter	Знаки декартовых координат / Cartesian coordinate signs
I	$\eta_{Ti} \leq \eta_R, \ \alpha_{Ti} \geq \alpha_R$	$x_{Ti} \geq 0, \ y_{Ti} \geq 0$
II	$\eta_{Ti} > \eta_R, \ \alpha_{Ti} \geq \alpha_R$	$x_{Ti} < 0, \ y_{Ti} \geq 0$
III	$\eta_{Ti} > \eta_R, \ \alpha_{Ti} < \alpha_R$	$x_{Ti} < 0, \ y_{Ti} < 0$
IV	$\eta_{Ti} \leq \eta_R, \ \alpha_{Ti} < \alpha_R$	$x_{Ti} \geq 0, \ y_{Ti} < 0$

Теперь

$$y_{Ti} = \begin{cases} \sqrt{d_{RTi}^2 - x_{Ti}^2}, & \text{если РПД в I или II квадранте,} \\ -\sqrt{d_{RTi}^2 - x_{Ti}^2} & \text{если РПД в III или IV квадранте.} \end{cases} \quad (7)$$

1.3. Определение областей взаимодействия ДНА РПУ ПУ и РПД T_i

Области ДНА, через которые РПД излучает, а РПУ принимает внешние сигналы, влияют на уровни сигналов, поступающих в РПУ. Главный лепесток ДНА передатчика или приемника направлен на интересующий объект, если линия, соединяющая антенну с объектом, лежит в пределах главного лепестка диаграмм направленности антенны как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Если эта линия находится за пределами ГЛ хотя бы одной из указанных диаграмм, то ДНА направлена на объект боковым лепестком.

Углы, под которыми в вертикальной плоскости ДНА i -го РПД РЭС и РПУ ПУ «видят» друг друга с учетом принятых направлений отсчета (рис. 2), связаны между собой, а именно:

$$\Delta_{Ti} = -\Delta_R.$$

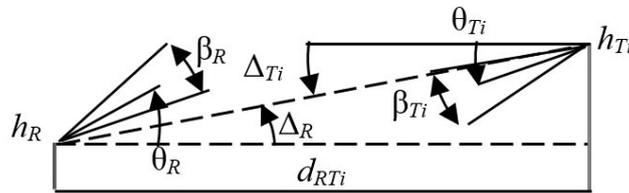


Рис. 2 – Определение областей взаимодействия ДНА РПД РЭС и РПУ ПУ в вертикальной плоскости

Fig. 2 – Finding of the interaction areas between transmitter and receiver antenna patterns in the vertical plane

Числовое значение углов определяет выражение

$$\Delta_R = \arctg\left(\frac{h_{Ti} - h_R}{d_{RTi}}\right). \quad (8)$$

Теперь, если $\alpha_{Ti} = 360^\circ$ и выполняется неравенство

$$\theta_{Ti} - \beta_{Ti} / 2 \leq \Delta_{Ti} \leq \theta_{Ti} + \beta_{Ti} / 2, \quad (9)$$

то ГЛ ДНА РПД i -го РЭС направлен на ПУ. Если неравенство (9) не выполняется, то ДНА РПД i -го РЭС направлена на ПУ боковым лепестком. Если антенна РПД i -го РЭС имеет направленную ДНА в горизонтальной плоскости ($\alpha_{Ti} < 360^\circ$) и выполняется неравенство (9), то необходим дальнейший анализ взаимодействия диаграмм направленности исследуемых объектов в горизонтальной плоскости.

ПУ имеет всегда направленную антенну, ГЛ которой направлен на БПЛА. Поэтому

$$\theta_R = \arctg\left(\frac{h_{ЛА} - h_R}{d_{ЛА}}\right),$$

где $d_{ЛА} = \sqrt{x_{ЛА}^2 + y_{ЛА}^2}$.

Здесь $h_{ЛА}$ – высота полета летательного аппарата, а $x_{ЛА}$, $y_{ЛА}$ – координаты аппарата на плоскости xOy , которые при известных географических координатах БВС $\eta_{ЛА}$ и $\varphi_{ЛА}$ вычисляются аналогично x_{Ti} и y_{Ti} , а именно:

$$x_{\text{ЛЛ}} = r_{x\text{ЛЛ}} = 2R_3 \cdot \sin[(\eta_R - \eta_{\text{ЛЛ}}) / 2] \text{ км},$$

$$\delta_{\text{ЛЛ}} = \arccos(\sin(\eta_{\text{ЛЛ}}) \cdot \sin(\eta_R) + \cos(\eta_{\text{ЛЛ}}) \cos(\eta_R) \cos(\alpha_{\text{ЛЛ}} - \alpha_R)),$$

$$d_{\text{ЛЛ}} = l_{\text{ЛЛ}} = R_3 \delta_{\text{ЛЛ}},$$

$$y_{\text{ЛЛ}} = \begin{cases} \sqrt{d_{\text{ЛЛ}}^2 - x_{\text{ЛЛ}}^2}, & \text{если БАС в I или II квадранте,} \\ -\sqrt{d_{\text{ЛЛ}}^2 - x_{\text{ЛЛ}}^2} & \text{если БАС в III или IV квадранте.} \end{cases}$$

Теперь, если не выполняется неравенство

$$\theta_R - \beta_R / 2 \leq \Delta_R \leq \theta_R + \beta_R / 2, \quad (10)$$

то ДНА приемника ПУ направлена на РЭС боковым лепестком. Если неравенство (10) выполняется, то необходим дальнейший анализ взаимодействия диаграмм направленности исследуемых объектов в горизонтальной плоскости.

На рис. 3 представлено одно из возможных расположений главных лепестков диаграмм направленности антенн ПУ, РПД T_i и местоположения БВС в плоскости xOy . Из рис. 3 найдем значения углов:

$$\psi_1 = \arctg(y_{\text{ЛЛ}} / x_{\text{ЛЛ}}), \quad (11)$$

$$\psi_2 = \arctg(y_{T_i} / x_{T_i}). \quad (12)$$

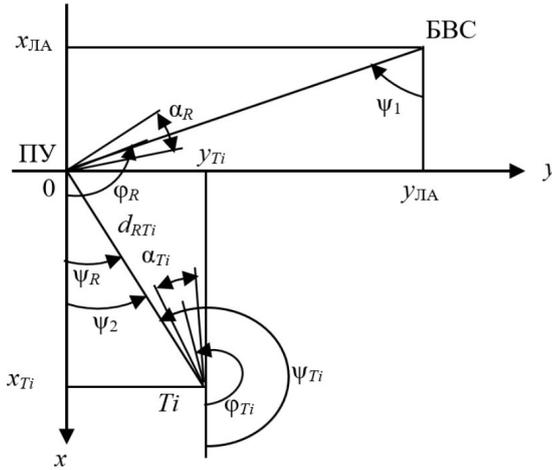


Рис. 3 – Определение областей взаимодействия ДНА РПД T_i и РПУ ПУ в горизонтальной плоскости

Fig. 3. – Finding of the interaction areas between transmitter and receiver antenna patterns in the horizontal plane

Обозначим: ϕ_R – угол, под которым из ПУ видна проекция БВС на горизонтальную плоскость; ψ_R – угол в горизонтальной плоскости, под которым из ПУ виден РПД T_i ; ψ_{T_i} – угол в горизонтальной плоскости, под которым из T_i виден ПУ.

Все углы отсчитываются от оси x , проведенной в горизонтальной плоскости через точку расположения соответствующего объекта в этой плоскости, как показано на рис. 3.

Теперь ГЛ ДНА T_i направлен на ПУ, если

$$\varphi_{Ti} - \alpha_{Ti} / 2 \leq \psi_{Ti} \leq \varphi_{Ti} + \alpha_{Ti} / 2. \quad (13)$$

а ГЛ ДНА приемника ПУ направлен на РПД T_i , если

$$\varphi_R - \alpha_R / 2 \leq \psi_R \leq \varphi_R + \alpha_R / 2. \quad (14)$$

Если неравенства (13), (14), оба или одно из них, не выполняются, то соответствующая ДНА направлена на другой объект боковым лепестком.

Значения углов φ_R , ψ_R , ψ_{Ti} через значения ψ_1 и ψ_2 , полученных с использованием (11) и (12), представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Углы в плоскости xOy , связывающие ПУ, РПД РЭС и БВС
Angles in the xOy plane associated with the control point, transmitter and unmanned aircraft

$x > 0$			
$y > 0$, квадрант I		$y < 0$, квадрант IV	
ПУ \rightarrow БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$	ПУ \rightarrow БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$
$\psi_R = \psi_1$	$\psi_R = \psi_2$	$\psi_R = 360^\circ + \psi_1$	$\psi_R = 360^\circ + \psi_2$
	$\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$		$\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$
$x < 0$			
$y > 0$, квадрант II		$y < 0$, квадрант III	
ПУ \rightarrow БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$	ПУ \rightarrow БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$
$\psi_R = 180^\circ + \psi_1$	$\psi_R = 180^\circ + \psi_2$	$\psi_R = 180^\circ + \psi_1$	$\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$
	$\psi_{Ti} = 360^\circ + \psi_2$		$\psi_{Ti} = \psi_2$

РПД T_i и БВС могут находиться в разных квадрантах. Это обстоятельство нужно учитывать при определении углов φ_R , ψ_R , ψ_{Ti} . Так, если РПД T_i находится в квадранте IV, а БВС в квадранте II, то $\varphi_R = 180^\circ + \psi_1$ (квадрант II), а $\psi_R = 360^\circ + \psi_2$, $\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$ (квадрант IV, здесь $\psi_2 < 0$). Заметим, что если $\psi_{R/Ti}(\varphi_R) = 360^\circ + \psi_2(\psi_1)$ и $\psi_{2/1} \geq 0$, то $\psi_{R/Ti}(\varphi_R) = \psi_2(\psi_1)$.

Используя табл. 2 и неравенства (13), (14) определяем области взаимодействия ДНА РПУ ПУ и РПД T_i .

1.4. Оценка потерь на трассе распространения

В самом общем случае потери на трассе РПД $T_i \rightarrow$ РПУ ПУ составляют L , дБ, где

$$L = L_{св} + L_{диф} + L_{раст} + L_{газ}, \quad (15)$$

здесь $L_{св}$ – потери при распространении в свободном пространстве, дБ; $L_{диф}$ – потери на дифракцию радиоволн на сферической земле, дБ; $L_{раст}$ – потери, связанные с поглощением радиоволн растительностью, дБ; $L_{газ}$ – потери, связанные с поглощением радиоволн газами атмосферы, дБ.

Как следует из графиков, приведенных в [5], погонное затухание электромагнитных волн в газах атмосферы $L_{газ}$ в области частот 5...6 ГГц составляет от 0,01 до 0,03 дБ/км и убывает с уменьшением частоты. Это позволяет в пределах дальностей до радиогоризонта, где по результатам отбора потенциально опасных передатчиков располагаются источники возможных помех, для частот, используемых гражданскими БАС, пренебречь потерями $L_{газ}$.

В настоящее время отсутствуют универсальные процедуры прогнозирования ослабления радиоволн растительностью. Некоторые модели, применимые в конкретных диапазонах частот и при определенных типах растительности, представлены в [6]. Как следует из [6], погонное ослабление, обусловленное лесистой местностью, в полосе частот от 1 до 6 ГГц составляет от 0,2 до 1,5 дБ/м. При значительных размерах лесных массивов между источником возможной помехи (РПД) и РПУ ПУ это обеспечивает достаточную развязку приемника от помехи. Помеха в этом случае может возникать в результате дифракции излучения передатчика на лесном массиве. При отсутствии необходимых данных для оценки ослабления растительностью $L_{раст}$ этим слагаемым часто пренебрегают, особенно, если окружение ПУ представляет собой открытую местность, лишенную древесных массивов. Это несколько увеличивает уровень помехи. Ситуация, характерная для анализа ЭМС.

Потери на дифракцию $L_{диф}$ рассчитывают, используя [7]. Рекомендация позволяет оценить потери на дифракцию для различных видов препятствий, в том числе на сферичность Земли.

Потери при распространении в свободном пространстве $L_{св}$, дБ, являются составляющей всех видов распространения радиоволн и основными на трассе ПУ ↔ БВС.

$$L_{св} = 32,45 + 20 \lg(f[\text{МГц}]) + 20 \lg(d[\text{км}]). \quad (16)$$

1.5. Оценка уровня помехи на входе РПУ ПУ и ее влияния на прием полезного сигнала

Эквивалентная мощность мешающего сигнала I_{ij} с частотой f_{Ti} , приведенная ко входу приемника на частоте его настройки f_{0R} , дБм, создаваемая элементу ППРЧ сигнала, имеющего частоту f_j , составляет

$$I_{ij}(f_{0R}) = P_{Ti}(f_{Ti}) + G_{TR}(f_{Ti}) + G_{RT}(f_{Ti}) - L(f_{Ti}) - \gamma - CF(\Delta f_{ij}), \quad (17)$$

где $P_{Ti}(f_{Ti})$ – мощность передатчика i -го РЭС на частоте f_{Ti} , дБм; $G_{TR}(f_{Ti})$, $G_{RT}(f_{Ti})$ – коэффициенты усиления антенн на частоте f_{Ti} соответственно, антенны передатчика в направлении на приемник и антенны приемника в направлении на передатчик, дБи; $L(f_{Ti})$ – потери в пространстве распространения на частоте f_{Ti} , дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций приходящей электромагнитной волны и приемной антенны, дБ; $CF(\Delta f_{ij})$ – коэффициент частот-

ной коррекции, учитывающий ослабление помехи из-за ее отстройки от частоты полезного сигнала и соотношения ширины спектра помехи и ширины полосы пропускания приемника, дБ; Δf_{ij} – отстройка между частотами f_{T_i} и f_i , удволяющая (3).

Результаты оценки областей взаимодействия ДНА РПД РЭС и ДНА РПУ ПУ определяют выбор коэффициентов усиления их антенн. Коэффициент усиления антенны по ГЛ принимают равным максимальному значению усиления G_0 , указанному в спецификации соответствующей антенны. В области бокового усиления используют статистические параметры антенн, представленные в табл. 3 [8, 9]. Усиление по боковым лепесткам ДНА принимают равным среднему значению m_G плюс среднеквадратическое отклонение σ_G с учетом поляризации взаимодействующих антенн по ГЛ их ДНА.

Таблица 3 / Table 3

Статистические параметры антенн в области бокового усиления

Antenna gain in the area of side lobes

Коэффициент усиления антенны/Antenna gain	Поляризация/Polarization	m_G , дБи/dBi	σ_G , дБ/dB
$G_0 > 25$ дБи/dBi	Любая/Any	-10	14
$10 < G_0 \leq 25$ дБи/dBi	Рабочая/Operating	-10	11
	Ортогональная/Orthogonal	-20	13
$10 < G_0 \leq 25$ дБи/dBi	Рабочая/Operating	0	6
	Ортогональная/Orthogonal	-13	8

Потери на трассе РПД T_i – ПУ оценивают, используя (15) и модели слагаемых этого выражения, как описано выше.

Потери γ из-за несовпадения поляризаций входящей электромагнитной волны и приемной антенны оценивают только в том случае, если взаимодействие ДНА РПУ и ДНА РПД T_i происходит по главным лепесткам их ДНА. Значение потерь в децибелах для наиболее часто используемых видов поляризации представлены в табл. 4 [8, 9].

Таблица 4/ Table 4

Ослабление сигналов при несовпадении поляризации с приемной антенной

Signal attenuation due to polarization with receiving antenna

Поляризация антенны приемника/ Receiver antenna polarization		Поляризация антенны источника помехи/ Interference source antenna polarization					
		Горизонтальная/ Horizontal		Вертикальная/Vertical		Круговая/ Circular	
		$G_0 < 10$ дБ	$G_0 > 10$ дБ	$G_0 < 10$ дБ	$G_0 > 10$ дБ	левая/ left	правая/ right
Горизонтальная/ Horizontal	$G_0 < 10$ дБ	0	0	16	16	3	3
	$G_0 > 10$ дБ	0	0	16	20	3	3
Вертикальная/ Vertical	$G_0 < 10$ дБ	16	16	0	0	3	3
	$G_0 > 10$ дБ	16	20	0	0	3	3
Круговая/ Circular	левая/left	3	3	3	3	0	16
	правая/right	3	3	3	3	16	0

Коэффициент частотной коррекции $CF(\Delta f_{ij})$ можно представить в виде [9]

$$CF(\Delta f_{ij}) = CF_1 + CF_2(\Delta f_{ij}), \quad (18)$$

где CF_1 определяет ослабление помехи в РПУ, если полоса частот, занимаемая мешающим сигналом, превышает ширину полосы пропускания приемника, а $CF_2(\Delta f_{ij})$ определяет ослабление за счет отстройки помехи от частоты настройки РПУ. В качестве математических моделей слагаемых выражения (18) используются

$$CF_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } B_S \leq B_R; \\ 10 \lg(B_S / B_R), & \text{если } B_S > B_R. \end{cases} \quad (19)$$

$$CF_2(\Delta f_{ij}) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\Delta f_{ij}| \leq B_R / 2; \\ \rho \frac{\lg(2|\Delta f_{ij}| / B_R)}{\lg(\Pi_\rho)}, & \text{если } |\Delta f_{ij}| > B_R / 2, \end{cases} \quad (20)$$

где Π_ρ – коэффициент прямоугольности тракта ПЧ приемника по уровню ρ .

Обычно для тракта промежуточной частоты в спецификациях РПУ указывают $\rho = 60$ дБ. Если выражение (20) дает значение больше, чем 100 дБ, то принимаем $CF_2(\Delta f_{ij}) = 100$ дБ.

Если имеется k передатчиков, создающих помехи приему j -го элемента полезного сигнала, то общая внешняя помеха этому элементу, приведенная ко входу РПУ, составит

$$I_j(f_{0R}) = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^k 10^{I_{ij}(f_{0R})/10} \right), \text{ дБм.} \quad (21)$$

Мощность полезного сигнала $S(f_{0R})$ для конкретного положения БВС относительно ПУ

$$S(f_{0R}) = P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}, d), \text{ дБм,} \quad (22)$$

где d – расстояние между БВС и ПУ:

$$d = \sqrt{x_{\text{ЛА}}^2 + y_{\text{ЛА}}^2 + (h_{\text{ЛА}}^2 - h_{\text{Р}}^2)},$$

а координаты летательного аппарата $x_{\text{ЛА}}$, $y_{\text{ЛА}}$ определяются аналогично координатам x_{Ti} , y_{Ti} .

При оценке мощности полезного сигнала потери $L(f_{0R}, d)$ на трассе БВС→ПУ рассматриваются как потери в свободном пространстве (16).

Для оценки качества принимаемого элемента ППРЧ сигнала используем защитное отношение, установленное для сигналов, имеющих модуляцию несущей аналогичную модуляции элементов сигнала ППРЧ.

С этой целью для каждого значения j , подверженного воздействию помехи, вычисляем отношение $(S/I_j) = S(f_{0R}) - I_j(f_{0R})$, дБ, и сравниваем его с защитным отношением $(S/I)_{\text{защ}}$ для данного вида полезного сигнала. Если

$(S/I_j) < (S/I)_{\text{защ}}$, то j -й канал (частота f_j) ППРЧ сигнала поражен помехой и качество элементов ППРЧ сигнала, принимаемого по этому каналу, недопустимо низкое. Вычисляем общее число J пораженных каналов. Если $J > J_{\text{доп}}$, то помеха недопустимо снижает качество принимаемого сигнала.

2. Анализ влияния помех от передатчика ПУ на качество приема полезного сигнала приемниками РЭС, окружающими пункт управления

Анализ происходит во многом аналогично разделу 1, но теперь имеется только один источник помех, передатчик, размещенный в ПУ, и множество потенциальных жертв излучений этого передатчика, приемников, окружающих ПУ. Поскольку в рассматриваемой ситуации, как правило, нет возможности оценить уровень полезного сигнала на входе каждого из рассматриваемых приемников, то для оценки влияния помехи на качество работы РПУ используется значение допустимого ухудшения чувствительности приемника при действии на его входе внешней помехи.

2.1. Исходные данные для анализа

Координаты антенны передатчика ПУ, источника помех:

- широта η_T , град.;
- долгота α_T , град.;
- высота подъема антенны над землей h_T .

Поскольку передатчик и приемник ПУ находятся на одном объекте, можно считать $\eta_T = \eta_R$ и $\alpha_T = \alpha_R$.

Координаты антенны приемника-жертвы i -го РЭС:

- широта η_{Ri} , град.;
- долгота α_{Ri} , град.;
- высота подъема антенны над землей h_{Ri} .

Данные о положении главных лепестков диаграмм направленности и поляризации антенн приемников, окружающих ПУ, аналогичны данным для антенн радиопередатчиков, рассмотренным ранее. Это же относится к текущим координатам БВС и индексации параметров и переменных, используемых в дальнейших расчетах.

Параметры РПУ i -го РЭС:

- рабочая частота РПУ f_{0Ri} , МГц;
- чувствительность РПУ P_{Ri} , дБм;
- ширина полосы пропускания тракта промежуточной частоты (ПЧ) РПУ B_{Ri} , МГц;
- коэффициент шума приемника NFi , дБ.

Параметры РПД ПУ:

- рабочая частота f_{0T} , МГц;
- мощность P_T , дБм;
- ширина полосы частот, занимаемая сигналом ППРЧ B_S , МГц;
- число каналов сигнала ППРЧ M .

Допустимое ухудшение чувствительности РПУ i -го РЭС ΔP_{Ri} , дБ.

2.2. Отбор приемников, потенциальных жертв помех от излучений РПД ПУ

Отбор выполняется по расстоянию от ПУ и по частоте.

Отбор по расстоянию. Источник помехи (передатчик ПУ) считается потенциально опасным, если РПУ РЭС располагается в пределах радиогоризонта РПД ПУ. Отбор выполняется с использованием процедуры, описанной выражениями в интервале от (1) до (2), с заменой в них индексов R на T , T на R , T_i на R_i и параметров, соответствующих этим индексам.

Отбор по частоте. Сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), используемый передатчиком ПУ, занимает обычно очень широкую полосу частот и обладает низкой спектральной плотностью мощности в этой полосе. Учитывая, что восприимчивость РПУ по соседнему и побочным каналам приема на несколько десятков децибел хуже чувствительности приемника, ограничимся рассмотрением помех только по основному каналу приема приемников РЭС, окружающих ПУ. В этом случае рассмотрению подлежат приемники, прошедшие отбор по расстоянию, рабочие частоты которых f_{0Ri} удовлетворяют неравенству

$$f_{0T} - B_S / 2 \leq f_{0Ri} \leq f_{0T} + B_S / 2.$$

Переход к декартовой системе координат. Если разность широт ПУ и РПД T_i выразить в градусах, то

$$x_{Ri} = 2R_3 \sin[(\eta_T - \eta_{Ri}) / 2] \text{ км.}$$

Аналогично, используя (6), (7) и таблицу 1 с заменой в них индексов параметров $R \rightarrow T$, $T \rightarrow R$, $R_i \rightarrow T_i$ и $T_i \rightarrow R_i$, получим координаты отобранных РЭС, содержащих РПУ.

2.3. Определение областей взаимодействия ДНА РПУ ПУ и РПУ R_i

Продолжая сравнение ситуации, рассмотренной ранее в разделе 1 (РПУ ПУ – жертва, передатчики РЭС окружения – источники помех), с рассматриваемой ситуацией (РПД ПУ – источник помех, приемники РЭС окружения – жертвы), найдем, что в настоящей ситуации определение областей взаимодействия интересующих ДНА можно выполнить, используя процедуру, примененную для решения этой задачи в предыдущей ситуации. Получить необходимые соотношения можно, используя указанную выше замену индексов параметров и переменных в выражениях (8)–(14), в табл. 2 и на рис. 2 и 3. Кроме того в пояснениях к полученным таким образом формулам следует также выполнить некоторые замены, соответствующие новой ситуации, именно: РПД $T_i \rightarrow$ РПУ R_i , РПУ ПУ \rightarrow РПД ПУ, РПД i -го РЭС \rightarrow РПУ i -го РЭС, ГЛ ДНА приемника ПУ \rightarrow ГЛ ДНА передатчика ПУ.

2.4. Оценка потерь на трассе распространения

Процедура оценки полностью совпадает с процедурой, рассмотренной в разделе 1.4.

2.5. Оценка степени опасности помехи для РПУ РЭС от передатчика ПУ

Поскольку в исследуемой ситуации рассматриваются помехи только по основному каналу приема, то мощность помехи $I(f_{0Ri})$, дБм, на входе РПУ i -го РЭС может быть вычислена как

$$I(f_{0Ri}) = P_T + 10\lg(B_{Ri} / B_S) + G_{TRi}(f_{0Ri}) + G_{RiT}(f_{0Ri}) - L(f_{0Ri}) - \gamma. \quad (23)$$

Здесь P_T – мощность передатчика ПУ в полосе B_S , дБм; B_{Ri} и B_S – полоса пропускания приемника i -го РЭС и ширина спектра излучения радиопередатчика ПУ соответственно (предполагается $B_{Ri} \leq B_S$); $G_{TRi}(f_{0Ri})$, $G_{RiT}(f_{0Ri})$ – коэффициенты усиления антенн на частоте f_{0Ri} соответственно, антенны передатчика T (ПУ) в направлении на приемник i -го РЭС R_i и антенны приемника R_i в направлении на передатчик T , дБи; $L(f_{0Ri})$ – потери на трассе распространения на частоте f_{0Ri} , дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций проходящей электромагнитной волны и приемной антенны, дБ.

Значение мощности передатчика ПУ получают из спецификации технических параметров РПД.

Значения коэффициентов усиления антенн выбирают по результатам определения областей взаимодействия их ДНА. Если на интересующий объект направлен главный лепесток ДНА, то коэффициент усиления антенны принимают равным максимальному значению усиления G_0 , указанному в спецификации антенны. В области бокового усиления используют статистические параметры антенн, представленные в табл. 3 [8, 9], с пояснениями, приведенными к таблице.

Значения потерь γ из-за несовпадения поляризаций проходящей электромагнитной волны и приемной антенны в децибелах для наиболее часто используемых видов поляризации представлены в табл. 4. Используются только при взаимодействии антенн по главным лепесткам их диаграмм направленности.

Как отмечалось ранее, поскольку уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС неизвестен, то для оценки качества принимаемого сигнала защитное отношение не может быть использовано. Ключевым параметром радиоприемника, влияющим на рабочую характеристику любой системы, в состав которой он входит, является его чувствительность. Поэтому влияние помехи на рабочую характеристику системы можно охарактеризовать значением ухудшения чувствительности РПУ РЭС под действием помехи. Ухудшение чувствительности приемника ΔP_{Rk} , дБ, можно оценить, используя уравнение

$$\Delta P_{Rk} = 10\lg(1 + i/n). \quad (24)$$

где k – номер рассматриваемого приемника, а i и n – соответственно мощности помехи и шума приемника, приведенные ко входу приемника, мВт. Мощность собственного шума РПУ определяет выражение

$$N = -174 + 10\lg(B_R) + NF, \text{ дБм}, \quad (25)$$

где B_R – полоса приемника, Гц; NF – коэффициент шума приемника, дБ. Мощность помехи дает выражение (23). Однако нужно учесть, что (25) и (23) определяют мощности в децибелах относительно милливатта (дБм), а в (24) мощности используются в метрических единицах. Поэтому перед использованием (24) их нужно перевести в милливатты (или ватты). Сравнивая результат, полученный из (24), с допустимым ухудшением чувствительности, заданным в исходных данных, определяют степень опасности помехи, создаваемой излучением передатчика ПУ.

Заключение

Рассмотренная процедура анализа ЭМС радиооборудования ПУ с окружением является составной частью общего алгоритма оценки ЭМС БАС с окружением. Процедура рассматривает в качестве окружения ПУ только стационарные РЭС, расположение которых в регионе, где используется БВС для решения каких-либо народнохозяйственных задач, обычно известно. При выборе места размещения ПУ анализ позволяет из нескольких возможных местоположений ПУ найти наиболее удобное место, в котором помимо технических требований, связанных с эксплуатацией ПУ, выполняются требования ЭМС радиооборудования ПУ с окружением.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 57258–2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения: дата введения 2017–06–01. – М.: Стандартинформ, 2016.
2. Решение ГКРЧ при Мининформсвязи от 07 мая 2007 года № 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия» (в ред. от 23.12.2022).
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 18.11.2019 № 1203-47 «Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторые постановления Правительства Российской Федерации».
4. **Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Терновая А.К.** Отбор потенциально опасных источников помех для приемника пункта управления беспилотных авиационных систем // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПМК-2023): Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистров и их руководителей: в 2 т. – СПб., 2023. – Т. 1. – С. 61–66.
5. Рекомендация МСЭ-R P.676-11. Затухание в атмосферных газах.
6. Рекомендация МСЭ-R P.833-10. Ослабление сигналов растительностью.
7. Рекомендация МСЭ-R P.526-13. Распространение радиоволн за счет дифракции.
8. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / сост. Д.Р.Ж. Уайт. – М.: Советское радио, 1977. – 352 с.
9. **Виноградов Е.М.** Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 301 с.
10. Рекомендация МСЭ-R SM.337-6. Частотный и территориальный разнос.
11. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, В.И. Шестопалов. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.

CALCULATIONS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BETWEEN RADIO EQUIPMENT OF A COMMAND AND CONTROL POINT OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM AND STATIONARY LAND RADIO STATIONS

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I., Munkueva O.B.
*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
 Saint-Petersburg, Russian Federation*

An analysis procedure of electromagnetic compatibility between radio equipment of a command and control point (CP) of unmanned aircraft (UA) carrying a radio transmitter (RT) and a radio receiver (RR) and stationary land radio electronic equipment (REE) stations containing radio transmitters and/or radio receivers and surrounding the CCP is considered. The procedure involves analysis of the scenarios where emissions produced by the surrounding transmitters may have an effect on the quality of the signal received by the CCP receiver and where the emission produced by the CCP transmitter may have effect on the quality of signals received by the recei-

vers surrounding the CCP. It assumed that frequency-hopping spread spectrum signals are applied in both downlink and uplink. To assess the interference effect from emissions of the surrounding transmitters on the quality of the signal received by the CCP receiver the protection ratio is used. To assess the interference effect from emissions of the CCP transmitter on the quality of the signal received by the surrounding receivers the receiver desensitization is used.

Keywords: unmanned aircraft, frequency-hopping spread spectrum, electromagnetic compatibility, protection ratio, receiver desensitization.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24

REFERENCES

1. GOST R 57258–2016. *Sistemy bespilotnye aviatsionnye. Terminy i opredeleniya* [State Standart 57258–2016. Unmanned aircraft systems. Terms and definition]. Moscow, Standartinform Publ., 2016.
2. The decision of SCRF the Ministry of communications of Russia No. 07-20-03-001 "On the allocation of radio frequencies to devices of small radius of action" (as amended by 23.12.2022). (In Russian).
3. Decree of the Government of the Russian Federation of November 18, 2019 No. 1203-47 "On approval of the Table of distribution of radio frequency bands between radio services of the Russian Federation and recognition of certain decisions of the Government of the Russian Federation". (In Russian).
4. Antipin B.M., Vinogradov E.M., Ternovaya A.K. [Selection of potentially dangerous interference sources for the receiver of the control point of unmanned aircraft systems]. *Podgotovka professional'nykh kadrov v magistrature dlya tsifrovoi ekonomiki (PMK-2023)* [Training of professional personnel in master's programs for the digital economy (PMK-2023)]. All-Russian scientific technical and methodological conference of masters and their supervisors. In 2 vol.]. St. Petersburg, 2023, vol. 1, pp. 61–66. (In Russian).
5. Recommendation ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases.
6. Recommendation ITU-R P.833-10. Vegetation signal weakening.
7. Recommendation ITU-R P.526-13. Propagation of radio waves due to diffraction.
8. White D.R.J., comp. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i nerednamerennyye pomekhi*. Vyp. 1. *Obshchie voprosy EMS. Mezhsistemnye pomekhi* [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment and unintentional interference. Vol. 1]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 352 p. (In Russian).
9. Vinogradov E.M. *Analiz elektromagnitnoi sovmestimosti radioelektronnykh sredstv* [Analysis of electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment.]. St. Petersburg, St. Petersburg, Electrotechnical University "LETI" Publ., 2010. 301 p.
10. Recommendation ITU-R SM.337-6. Frequency and territorial diversity.
11. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty* [Noise immunity of a radio communication system with signal expansion using the method of pseudorandom adjustment of the duty cycle]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000. 384 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Антипин Борис Маврович – родился в 1955 году, канд. техн. наук, доцент, начальник Научно-исследовательской лаборатории радио-контроля и электромагнитной совместимости, доцент кафедры телевидения и метрологии, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: обработка сигналов в системах радиосвязи для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости и мониторинга использования радиочастотного ресурса. Опубликовано 52 научные работы. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: boris_antipin@mail.ru).

Antipin Boris Mavrovich (b. 1955) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Radio Monitoring and Electromagnetic Compatibility, Associate Professor at the Department of Television and Metrology, SUT. His research interests are currently focused on signal processing in radio communication systems to solve problems of ensuring electromagnetic compatibility and monitoring the use of radio frequency resources. He is the author of 52 scientific papers. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: boris_antipin@mail.ru).



Виноградов Евгений Михайлович – родился в 1936 году, канд. техн. наук, доцент, Научно-исследовательская лаборатория радиоконтроля и электромагнитной совместимости СПбГУТ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Опубликовано 108 научных работ. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: vinog1936@mail.ru).

Vinogradov Evgeny Mikhailovich (b. 1936) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Research Laboratory of Radio Monitoring and Electromagnetic Compatibility SPbSUT. His research interests are currently focused on electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. He is the author of 108 scientific papers. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: vinog1936@mail.ru).



Туманова Евгения Ивановна – родилась в 1987 году, канд. техн. наук, доцент, кафедра цифрового телевидения и метрологии, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: иммерсивная реальность, ольфакторная модальность, генеративная графика. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: evjeny@gmail.com).

Tumanova Evgeniya Ivanovna (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Digital Television and Metrology, SUT. Her research interests are currently focused on immersive reality, olfactory modality, generative graphics. She is the author of 35 scientific papers. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: evjeny@gmail.com).



Мункуева Ольга Борисовна – родилась в 1988 году, аспирант, кафедра цифрового телевидения и метрологии, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Опубликовано одна научная работа. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: munkuevaolga@gmail.com).

Munkueva Olga Borisovna (b. 1988) – Postgraduate at the Department of Digital Television and Metrology, SUT. Her research interests are electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. She is the author of 1 scientific paper. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: munkuevaolga@gmail.com).

*Статья поступила 18 сентября 2024 г.
Received September 18, 2024*

To Reference:

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I., Munkueva O.B. Raschet elektromagnitnoi sovmestimosti radiooborudovaniya punkta upravleniya bespilotnoi aviatsionnoi sistemy so stacionarnymi nazemnymi radioelektronnymi sredstvami [Calculations of electromagnetic compatibility between radio equipment of a command and control point of unmanned aircraft system and stationary land radio stations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 3 (64), pp. 7–24. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24.

УДК 621.396.94: 537.86.029: 52.65

**MATHEMATICAL MODELS OF RADIO WAVE PROPAGATION
IN HETEROGENEOUS ENVIRONMENTS FOR WIRELESS NETWORKS.
REVIEW**

V.I. Попов

Riga Technical University, Riga, Latvia

The issue of ensuring uniform radio coverage of service areas and the associated reliability of mobile radio systems in the 3G and 4G standards requires a lot of attention upon designing cellular mobile networks. One of the main tasks at the first stage of designing is the mathematical modeling of radio wave propagation under the influence of the environment.

This work provides classification of mathematical models of radio wave propagation in cellular mobile communication systems, the algorithm of calculating radio signal strength at the receiving point depending on the distance between the mobile and the base stations, as well as factors and conditions affecting radio wave propagation are specified.

Keywords: mathematical models, radio wave propagation, heterogeneous environment, wireless networks, cellular networks of mobile communication (CNMC).

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-25-42

Introduction

Currently problems of radio wave propagation (RWP) in **cellular networks of mobile communications (CNMC)** are dealt with in many works [1–16]. Various methods of classification of mathematical models of RWP in the decimeter and centimeter wave band applied to CNMC are considered in them.

Depending on environmental influences, both deterministic and statistical models can be used for modeling RWP; often semi-deterministic, semi-empirical and empirical models are applied.

Deterministic mathematical models are based on the use of the physical laws of RWP. The calculation is based on single-ray, double-ray or multi-beam models of RWP. They take account of influencing factors of obstacles in the path of radio wave propagation and local conditions in the radio channel (Fig. 1): attenuation in free space, reflection from objects, diffraction due to obstacles, absorption, refraction and cross-polarization of electromagnetic waves (EMW).

Semi-empirical and empirical models are based on path loss formulas, including a number of empirical correction factors picked up by experiments. The accuracy of calculated results in such a case depends on the preciseness of the correction factor values and restrictions having significance within the chosen frequency range and for the specific environmental conditions only.

It is important to point out that results of experimental research for the real environmental conditions are often used to determine a path loss of EMW propagating along the terrain. Mathematical models of RWP in the heterogeneous environment, for example, have their own laws of attenuation for different surroundings and allow calculating median values of the received power depending on the distance to the receiver (consid-

The study was done in an initiative way.

ering ITU-R, CEPT recommendations). Combined methods represent a blend of deterministic and statistical models. RWP models based on these methods may be applied for more accurate measurements in specific situations.

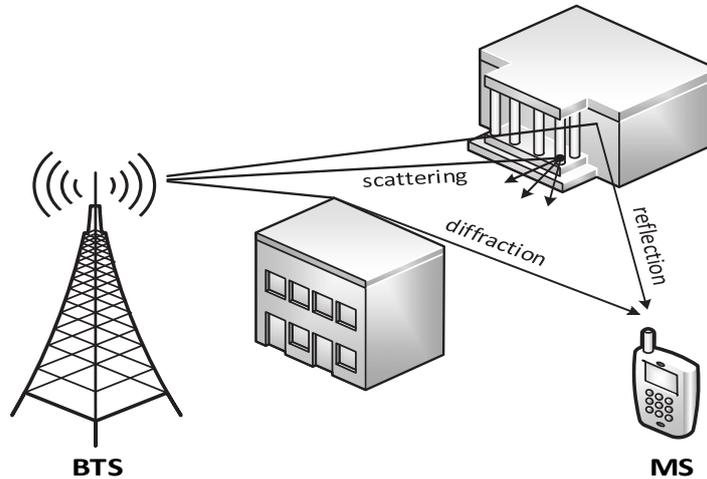


Fig. 1 – Impact of Obstacles on Radio Wave Propagation

Рис. 1 – Влияние препятствий на распространение радиоволн

Nowadays the majority of CNMC operators are using mobile network development and monitoring software products that are based on models listed above. Sadly, imperfections of digitized maps, approximation and averaging of path loss values lead to relatively large calculation and planning errors. Improvements in model simulation accuracy have been made possible lately by introducing geographic information systems (GIS), which use high-precision maps and geographical databases.

1. Classification of RWP Models in CNMC

Let’s consider mathematical models of radio wave propagation in CNMC assuming standard conditions and propagation regimes are in place. Most characteristic regimes of wave propagation between the base transceiver station (BTS) and the mobile station (MS) in the real world conditions are generalized in Table 1 and serve as a basis for further mathematical model classification. The following abbreviations are used in the Table: R is reflection, EMW is an electromagnetic wave, NLOS is line-of-sight; NLOS is non-line-of-sight; D/EMW is diffraction of the electromagnetic wave, A/EMW is attenuation of the electromagnetic wave.

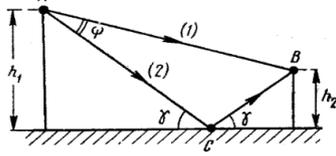
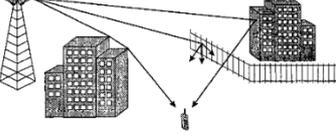
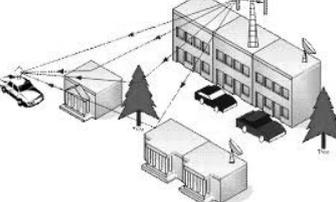
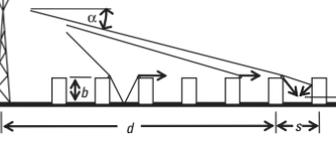
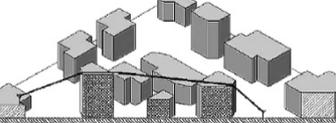
Table 1 / Таблица 1

Distinctive RWP Regimes in CNMC

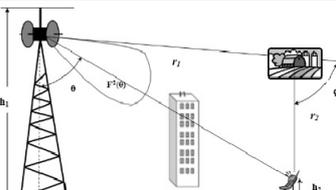
Отличительные режимы RWP в CNMC

No.	Conditions	RWP model, regime, cell type
1		Free space LOS macrocell

Continuation of the Table 1 / Продолжение табл. 1

No.	Conditions	RWP model, regime, cell type
2		<p>A two-ray model LOS+R/EMW macrocell</p>
3		<p>A multiple ray model The Log-distance path loss model LOS+NLOS+D/EMW+ΣR_i/EMW_i macrocell, microcell</p>
4		<p>A multiple ray model for urban conditions Lee model LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i macrocell</p>
5		<p>A multiple ray model for urban conditions The Okumura model LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i microcell</p>
6		<p>A multiple ray model for urban conditions The Okumura-Hata model LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i microcell, picocell</p>
7		<p>A multiple ray model for urban conditions The COST 231-Hata model LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i microcell, picocell</p>
8		<p>Multiple ray model for urban conditions The Walfish-Ikegami model LOS+NLOS+ΣD_i/EMW_i macrocell, microcell, picocell</p>
9		<p>Multiple ray model for urban conditions The Hata-Davidson model LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i microcell, picocell</p>

The End Table 1 / Окончание табл. 1

No.	Conditions	RWP model, regime, cell type
10		Radio wave propagation through the forest A semi-deterministic model $LOS_1+A/LOS_F+Lateral/EMW+LOS_2$ microcell, picocell
11		Radio wave propagation in free space with the reflection from the forest The deterministic model $NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$ microcell, picocell

This paper, as it follows from table 1, examines 11 path loss mathematical models, which represent the approximation of the received signal strength in relationship to the distance between BTS and MS, taking into account environmental conditions, as well as transmitter and receiver antennas parameters. The determining of received signal strength for an array of distances allows finding the maximum radius of BTS cell coverage area R_{max} (fig. 2) for a downlink transmission when P_r is equal to the MS receiver sensitivity $P_{r\ min}$, which is one of the main tasks in mobile cellular network area coverage planning.

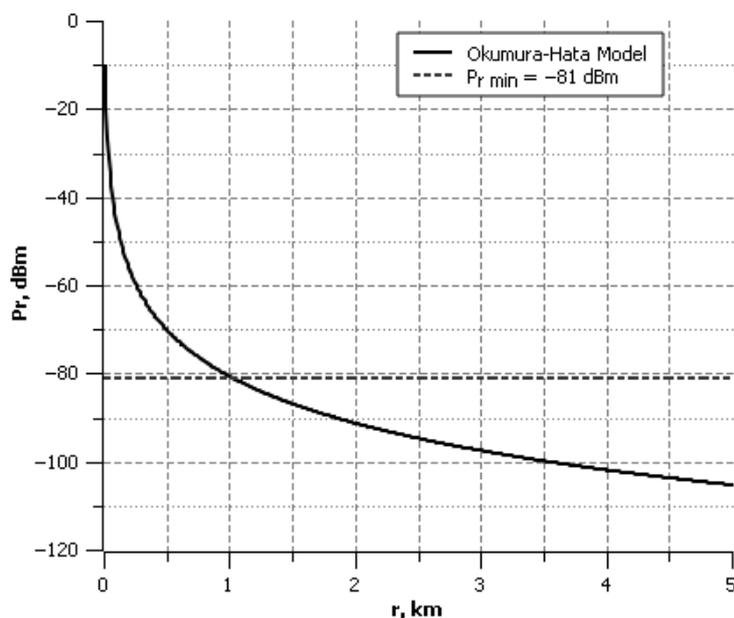


Fig. 2 – Finding Cell Tower Maximum Coverage Radius Using the Okumura-Hata Model ($P_{r\ min} = -81$ dBm, $R_{max} = 1.021$ km) [2]

Рис. 2 – Определение максимального радиуса покрытия вышки сотовой связи с использованием модели Окумура-Хата ($P_{r\ min} = -81$ дБм, $R_{max} = 1,021$ км) [2]

2. RWP Models in CNMC

Mathematical models, which determine the power of the harmonic electromagnetic wave (EMW) aired by the BTS antenna and received by MS, are shown in table 2 with the following set of parameters: P_t is a BTS transmitter power, dBm; f is an operational frequency, MHz; λ is an operational wavelength, m; G_t, G_r is BTS, MS antenna gain; h_t, h_r – BTS, MS antenna height, m; r is the distance between the BTS transmitter and the MS receiver, km; f_0 is a norming frequency, $f_0 = 1$ MHz; λ_0 is a norming wavelength, $\lambda_0 = 1$ m; h_0 is a norming height, $h_0 = 1$ m; r_0 is a norming distance between BTS and MS, $r_0 = 1$ km.

Table 2 / Таблица 2

RWP Mathematical Models

Математические модели RWP

No.	Model	Formulae
1	Line-of-sight LOS	in $P_{r\text{LOS}} = P_t + 10\lg G_t + 10\lg G_r - 20\lg(4\pi) +$ $+ 20\lg\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) - 20\lg\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) < 0,$ where $P_{r\text{LOS}}$ is a received signal strength in the free space (LOS) environment, dBm;
2	The two-ray model LOS ₁ + R ₂ /EMW (TR model)	$P_r = P_{r\text{LOS}} + 10\lg \psi ;$ $\psi \approx 1 + R^2 + 2R \cdot \cos\left(\varphi + 4\pi \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot r \cdot 10^3}\right), \quad 0.8r > r > 18 \frac{h_t h_r}{\lambda};$ $P_r \approx P_t + 10\lg G_t + 10\lg G_r + 20\lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + 20\lg\left(\frac{h_r}{h_0}\right) -$ $- 40\lg\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right),$ where P_r is a median power level at the receiving point for point-to-point RWP, dBm; ψ is a value determined as a function of the terrain parameters, dBm; R is a coefficient of reflection, $R \leq 1$; φ is a reflection angle, usually $\varphi = 3.142$ rad;
3	The Log-distance path loss model LOS+NLOS+ D/EMW+ +ΣR _i /EMW _i (TR model)	$P_r = P_{r\text{LOS}} - 10n \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - (\pm X_g),$ where n is an attenuation exponent, $n = 2$ for the free space (LOS), $n = 2.7 - 3.5$ for the suburban area (LOS/NLOS), and $n = 3 - 5$ for the urban area (NLOS); X_g is a random value for normal (Gaussian) distribution with a zero mean, representing a signal attenuation condition, which was caused by its fading (in case of no fading $X_g = 0$);
4	The Lee model LOS+ΣR _i /EMW _i	$P_r = P_{r0} - 10\gamma \cdot \lg\left(\frac{r}{r_{n0}}\right) - 10n \cdot \lg\left(\frac{f}{f_{n0}}\right) + 10\lg(\alpha_0),$ $\alpha_0 = \left(\frac{h_t}{h_{tn0}}\right)^2 \left(\frac{h_r}{h_{rn0}}\right)^{\gamma} \left(\frac{P_{tmw} \cdot 10^3}{P_{tn0}}\right) \frac{G_t G_r}{4},$

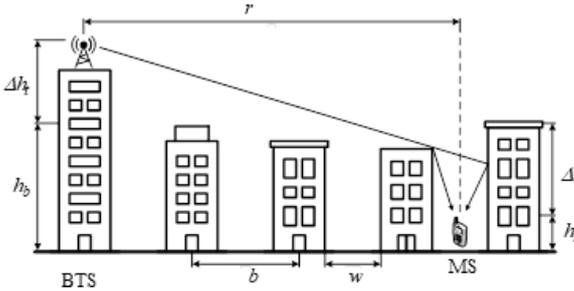
Continuation of the Table 2 / Продолжение табл. 2

No.	Model	Formulae
		$v = \begin{cases} 2, & \text{if } h_r > 10 \text{ m;} \\ 1, & \text{if } h_r < 3 \text{ m,} \end{cases}$ <p>where α_0 is an adjustment factor; $P_{t_{mW}}$ – is a BTS transmitter power, mW; P_{r_0} is power at the r_{n0} point, dBm, $P_{r_0} = -45$ dBm for free space, $P_{r_0} = -49$ dBm for Rural area; $P_{r_0} = -61.7$ dBm for the suburban area, $P_{r_0} = -70$ dBm for the urban area, for the metropolitan center, γ is a path loss correction due to distance, $\gamma = 2$ for the free space, $\gamma = 4.35$ for the rural area, $\gamma = 3.84$ for the suburban area, $\gamma = 3.68$ for urban area, $\gamma = 3.05$ for metropolitan area; n is a frequency correction factor, recommended values are $2 \leq n \leq 3$; $n = 2$ for the open, rural, suburban area, $f < 450$ MHz; $n = 2$ for the urban, metropolitan area, $f > 450$ MHz; v is a MS antenna height correction factor; f_{n0} is a nominal frequency, $f_{n0} = 900$ MHz; $P_{t_{n0}}$ is a nominal BTS transmitter power, $P_{t_{n0}} = 10$ W; $h_{t_{n0}}$ is a nominal BTS antenna height, $h_{t_{n0}} = 30.48$ m; $h_{r_{n0}}$ is a nominal MS antenna height, $h_{r_{n0}} = 3$ m; r_{n0} is a nominal distance between BTS and MS, $r_{n0} = 1.6$ km.</p>
5	Okumura model LOS+ ΣR_i /EMW $_i$	<p>Limitations: frequency range $f = 150$–1920 MHz; BTS antenna height $h_t = 30$–1000 m; MS antenna height $h_r = 1$–10 m; distance between BTS and MS $r = 1$–100 km;</p> $L_{rt} = L_{rt\text{LOS}} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area},$ $P_r = P_{r\text{LOS}} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area},$ $H(h_r) = \begin{cases} 10 \lg \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right), & \text{if } h_r \leq 3 \text{ m;} \\ 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right), & \text{if } 3 < h_r < 10 \text{ m.} \end{cases}$ <p>Here L_{rt} is path attenuation, dB; $A_{mu}(f, r)$ is median attenuation relative to free space (determined from the fig. 3), dB; $H(h_t)$ is a BTS antenna gain factor, dB; $H(h_r)$ is a MS antenna gain factor, dB; $h_{t_{n0}}$ is a nominal BTS antenna height, $h_{t_{n0}} = 200$ m; $h_{r_{n0}}$ is a nominal MS antenna height, $h_{r_{n0}} = 3$ m; G_{area} is a gain correction factor depending on the environment (see Fig. 4), dB.</p>
	The Okumura-Hata model LOS+ ΣR_i /EMW $_i$	<p>Limitations: frequency range $f = 150$–1500 MHz; BTS antenna height $h_t = 30$–200 m; MS antenna height $h_r = 1$–10 m; distance between BTS and MS $r = 1$–20 km;</p> $P_{r\text{Hata}} = P_t - 69.55 - 26.16 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) -$

Continuation of the Table 2 / Продолжение табл. 2

No.	Model	Formulae
6		$-\left(44.9 - 6.55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right) \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) +$ $+ 13.82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) + K(f);$ $a(f, h_r) = \begin{cases} \left(1.1 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.8 \right) & \text{for open,} \\ & \text{suburban, urban area,} \\ 8.29 \left[\lg \left(1.54 \frac{h_r}{h_{r0}} \right) \right]^2 - 1.1 & \text{for metropolitan area,} \\ f < 300 \text{ MHz,} \\ 3.2 \left[\lg \left(11.75 \frac{h_r}{h_{r0}} \right) \right]^2 - 4.97 & \text{for metropolitan area,} \\ f \geq 300 \text{ MHz;} \end{cases}$ $K(f) = \begin{cases} 4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94 & \text{for open area,} \\ 2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4 & \text{for suburban area,} \\ 0 & \text{for urban, metropolitan area;} \end{cases}$ <p>where $a(f, h_r)$ is a correction factor for MS antenna height, dB; $K(f)$ is a correction factor that depends upon the environment, dB.</p>
7	The COST 231-Hata model LOS+ΣR _i /EMW _i	<p>Limitations: frequency range $f = 150\text{--}2000$ MHz; BTS antenna height $h_t = 30\text{--}200$ m; MS antenna height $h_r = 1\text{--}10$ m; distance between BTS and MS $r = 1\text{--}20$ km;</p> $P_r = P_t - A - B \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 13.82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) -$ $-\left[44.9 - 6.55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right] \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - C;$ $a(f, h_r) = \left(1.1 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.7 \right) h_r - \left(1.56 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.8 \right),$ <p>where A is an attenuation component, dB ($A = 69.55$ dB for $150 \leq f \leq 1500$ MHz, $A = 46.33$ dB for $1500 \leq f \leq 2000$ MHz); B is a frequency correction factor ($B = 26.16$ for $150 \leq f \leq 1500$ MHz, $B = 33.9$ for $1500 \leq f \leq 2000$ MHz); $a(f, h_r)$ is a correction factor for the MS antenna height, dB; C is an attenuation correction factor, dB. It depends on the environment ($C = 0$ for open, suburban and urban area, $C = 3$ for Metropolitan area), dB.</p>

Continuation of the Table 2 / Продолжение табл. 2

No.	Model	Formulae
8	The Walfisch-Ikegami model LOS/NLOS+ $\Sigma D_i/EMW_i$	<p>Limitations: frequency range $f = 800\text{--}2000$ MHz; BTS antenna height $h_t = 4\text{--}50$ m; MS antenna height $h_r = 1\text{--}3$ m; distance between BTS and MS $r = 0.02\text{--}5$ km.</p>  $L_{rt} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{m ds}, & \text{if } L_{rts} + L_{m ds} \leq 0, \\ L_0, & \text{if } L_{rts} + L_{m ds} > 0; \end{cases} ;$ $L_0 = -32.45 - 20 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right);$ $L_{rts} = 16.9 + 10 \lg \left(\frac{w}{w_0} \right) - 10 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{\Delta h_r}{h_0} \right) - L_{ori};$ $L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & \text{if } 0 \leq \varphi < 35^\circ, \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35), & \text{if } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4 - 0.114(\varphi - 35), & \text{if } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ; \end{cases}$ $L_{m ds} = -L_{bsh} - k_a - k_d \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - k_f \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 9 \lg \left(\frac{b}{b_0} \right);$ $L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + \Delta h_t), & \text{if } \Delta h_t > 0, \\ 0, & \text{if } \Delta h_t \leq 0; \end{cases}$ $k_a = \begin{cases} 54, & \text{if } \Delta h_t > 0, \\ 54 - 0.8\Delta h_t, & \text{if } \Delta h_t \leq 0 \wedge r \geq 0.5, \\ 54 - 1.6r \cdot \Delta h_t, & \text{if } \Delta h_t \leq 0 \wedge r < 0.5; \end{cases}$ $k_d = \begin{cases} 18, & \text{if } \Delta h_t > 0, \\ 18 - 15 \frac{\Delta h}{h_b}, & \text{if } \Delta h_t \leq 0; \end{cases}$ $k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{for suburban, urban area,} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{for metropolitan area;} \end{cases}$

Continuation of the Table 2 / Продолжение табл. 2

No.	Model	Formulae
		$L_{LOS} = -42.6 - 26 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right);$ $P_{rLOS} = P_r + L_{LOS} = P_t - 42.6 - 26 \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right);$ $P_{rNLOS} = P_t + L_{rt}.$ <p>Here P_{rLOS} is the received signal strength in the line-of-sight (LOS) environment, dBm; P_{rNLOS} is the received signal strength in the non-line-of-sight environment, dBm; L_{rt} is a path loss, dB; L_{LOS} is a path loss for the free space environment, dB; L_0 is a free space loss, dB; L_{rts} is a diffraction and scatter loss, dB; $L_{m ds}$ is a multiscreen diffraction loss, dB; L_{ori} is an orientation loss, dB; L_{bsh} is a shadowing gain due to the BTS antenna location, dB; b is an average building separation, m; w is an average street width, usually $w = 0.5b$ m; h_b is an average building height, m; $\Delta h_t = h_t - h_b$ is the BTS antenna height above the rooftops, m; $\Delta h_r = h_b - h_r$ is the distance between MS antenna and rooftops, m; φ is a street orientation angle with respect to the direct radio path, $\varphi = 90^\circ$ in the worst case; k_a is a correction factor, dB; k_d is a distance factor; k_f is a frequency factor.</p>
9	The Hata-Davidson model LOS+ΣR _i /EMW _i	<p>Limitations: frequency range $f = 150-1500$ MHz; BTS antenna height $h_t = 30-2500$ m; MS antenna height $h_r = 1-10$ m; distance between BTS and MS $r = 1-300$ km.</p> $P_r = P_{rHata} - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r);$ $P_{rHata} = P_t - 69.55 - 26.16 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) -$ $- \left(44.9 - 6.55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right) \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) +$ $+ 13.82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) + K(f);$ $A(h_t, r) = \begin{cases} 0, & \text{if } r < 20 \text{ km,} \\ 0, 62137(r - 20) \times \\ \times \left[0.5 + 0.15 \lg \left(\frac{h_t}{121.92} \right) \right] & \text{if } 20 \leq r < 20 \text{ km;} \end{cases}$

The End Table 1 / Окончание табл. 2

No.	Model	Formulae
		$S_1(r) = \begin{cases} 0, & \text{if } r < 64.38 \text{ km,} \\ 0.174(r - 64.38) & \text{if } 64.38 \leq r < 300 \text{ km;} \end{cases}$ $S_2(h_t, r) = \begin{cases} 0.00784(h_t - 300) \left \lg \left(\frac{9.98}{r} \right) \right , & \text{if } h_t \geq 300 \text{ m,} \\ 0 & \text{if } h_t < 300 \text{ m;} \end{cases}$ $S_3(f) = \frac{f}{250 \lg \left(\frac{1500}{f} \right)};$ $S_4(r) = \begin{cases} 0, & \text{if } r < 64.38 \text{ km,} \\ 0.112(r - 64.38) \lg \left(\frac{1500}{f} \right) & \text{if } 64.38 \leq r < 300 \text{ km.} \end{cases}$ <p>Here P_{rHata} is thereceived signal strength for the Okumura-Hata model, dBm; $a(f, h_r)$ correction factor for the MS antenna height, dB (see the Okumura-Hata model); $A(h_t, r)$, $S_1(r)$ is distance correction factors, dB; $S_2(h_t, r)$ is a BTS antenna height correction factor, dB; $S_3(f)$ is a frequency correction factor, dB; $S_4(f, r)$ is a frequency and distance correction factor, dB.</p>
10	RWP through the forest [1, 15] LOS ₁ +A/LOS _F +Lateral/E MW+ LOS ₂	$P_r \approx P_{rLOS} - \alpha_{mF} r + 10 \lg[\zeta(r)];$ $\alpha_{mF} = \begin{cases} 0.185 \text{ dB/m} & \text{for operational frequency } f = 900 \text{ MHz,} \\ 0.36 \text{ dB/m} & \text{for operational frequency } f = 1800 \text{ MHz;} \end{cases}$ $\zeta(r) = 10^{0.1r}.$
11	RWP in a free space with the reflection from the forest [15] NLOS+ΣR _i /EMW _i	$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2} \int_{V_F} \frac{F_t(\theta)^2 \cdot \sigma(\phi)}{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot V_0} dV,$ <p>where P_r is a median power level at the receiving point for point-to-point RWP, W; $F_t(\theta)$ – BTS antenna radiation pattern, $F_t(\theta) = 1$ for omnidirectional antennas; V_F is the volume of the forest, m³; $V_0 = 1 \text{ m}^3$ – norming volume, ϕ is an angle between the direction of the main wave and its reflection from the forest; $\sigma(\phi)$ is an effective scattering area of a volume unit, m²; r – distance between BTS and forest, km; r_2 is the distance between the forest and MS, km</p>

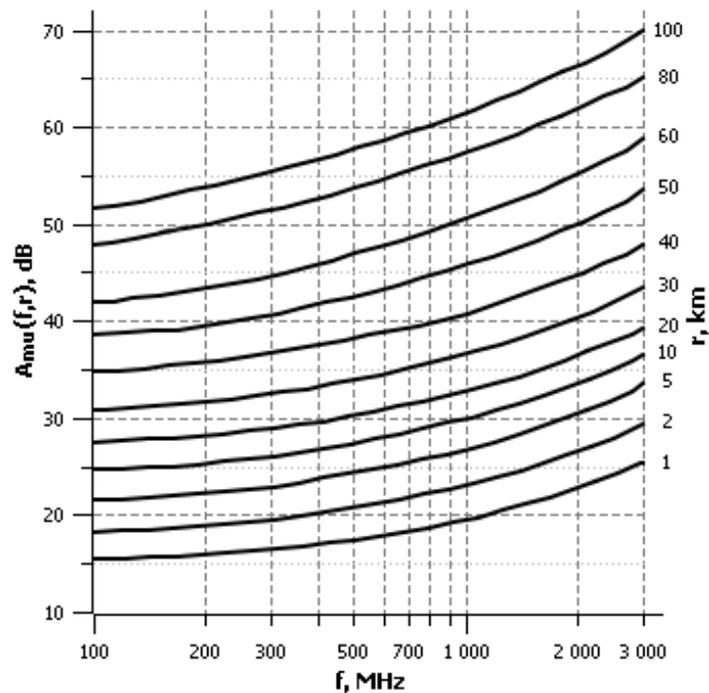


Fig. 3 – Attenuation Factor for Urban Areas

Рис. 3 – Коэффициент затухания для городских территорий

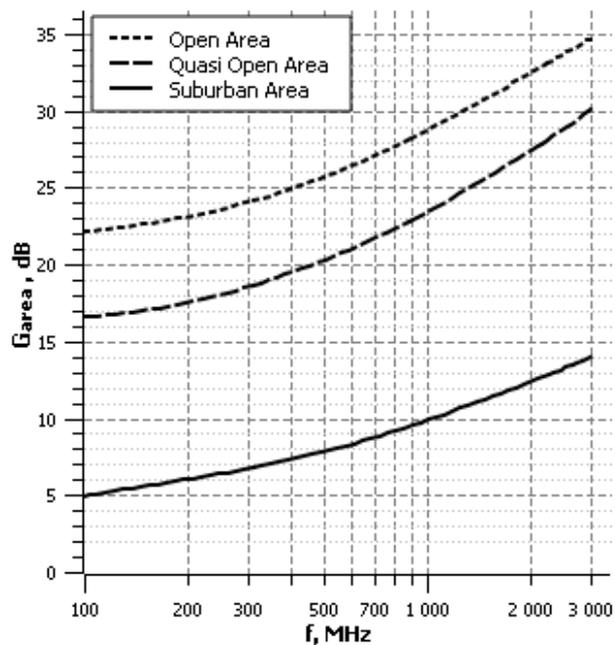


Fig. 4 – Gain Correction Factor

Рис. 4 – Поправочный коэффициент усиления

3. Calculation Algorithm for RWP Models

The RWP numerical calculation algorithm based on the examined mathematical models is shown in Fig. 5. The values of received signal strength for every model are found by using formulas from Table 2 with appropriate standard BTS and MS parameters.

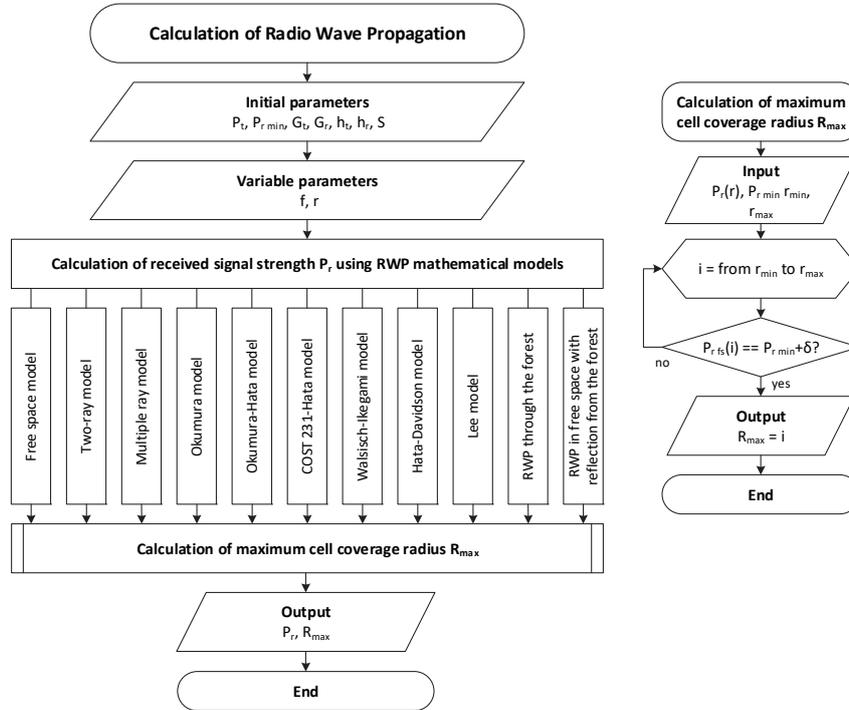


Fig. 5 – Algorithm for RWP Calculation Using Mathematical Models and Standard BTS and MS parameters

Рис. 5 – Алгоритм расчета РВП с использованием математических моделей и стандартных параметров БТС и МС

As it follows from the right part of the flowchart (Fig. 3), the maximum radius of BTS radio coverage area R_{\max} depends on the values of MS receiver sensitivity $P_{r \min}$ and received signal strength $P_r(r)$ for corresponding RWP model.

Example of the R_{\max} numerical calculation using the proposed algorithm (Fig. 5).

To estimate the influence of the environment on the received signal strength (for downlink transmission), calculations of the proposed algorithm were made using the Mathcad engineering software. Comparison of the results, visible in Fig. 3, are true for the following parameters:

- BTS transmitter power: $P_t = 50$ W (47 dBm);
- Operational frequency: $f = 900$ MHz ($\lambda = 0.33$ m);
- BTS, MS antenna gain: $G_t = 10$, $G_r = 1$.

Environmental conditions, specific for every mathematical model (Tab. 2), were also taken into account.

The received signal strength is heavily dependent on wave propagation conditions, and it changes drastically with an increase in distance between BTS and MS (as it is

shown in Fig. 6). For example, when distance $r = 3$ km, signal strength $P_r = -44$ dBm for the LOS model, but in dense urban area conditions (the Walfisch-Ikegami model) – $P_r = -95$ dBm. The stability of the radio communication link depends on the MS receiver sensitivity level ($P_{r \text{ min}}$). If $P_{r \text{ min}} = -93$ dBm and the real path loss is equal to the calculated one (using the Walfisch-Ikegami model), then a signal from BTS couldn't be received by MS already at a 3 km distance.

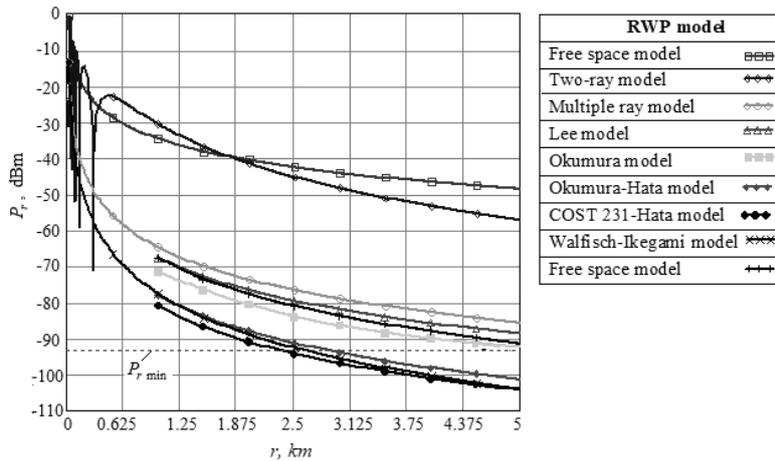


Fig. 6 – Comparison of the Received Signal Strength for 9 RWP models

Рис. 6 – Сравнение мощности принимаемого сигнала для 9 моделей RWP

Experimentally gathered RWP data for Philadelphia, New York and Tokyo are shown in Fig. 7 to compare the real signal attenuation slopes with the calculated results (Fig. 6).

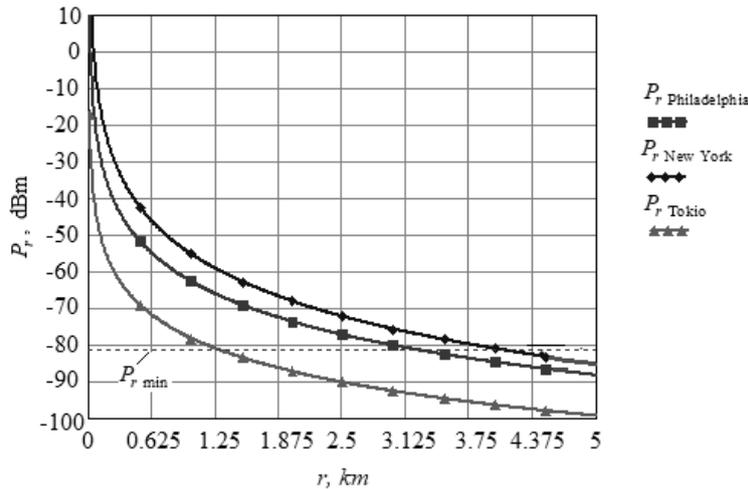


Fig. 7 – Received Signal Strength Relation to the Distance between BTS and MS (r , km) for Selected Urban Areas [9]

Рис. 7 – Зависимость мощности принимаемого сигнала от расстояния между BTS и MS (r , км) для выбранных городских территорий [9]

As it can be seen in Fig. 3, the Lee model is most suitable for environmental conditions in Philadelphia, while the COST 231-Hata model gives the best results for Tokyo.

Maximum cell coverage radiuses of the calculated path loss models for two different MS receiver sensitivity settings ($P_{r \min} = [-81; -100]$ dBm) are visible in Tab. 3.

Table 3 / Таблица 3

Maximum Cell Coverage Radius R_{\max} for Given MS Receiver Sensitivity $P_{r \min}$

Максимальный радиус покрытия соты R_{\max} для заданной чувствительности приемника MS $P_{r \min}$

RWP model	R_{\max} , km $P_{r \min} = -81$ dBm	R_{\max} , km $P_{r \min} = -100$ dBm
Free space model	210.253	1873.883
Two-ray model	19.911	59.452
Multiple ray model	3.536	15.202
Lee model	2.818	11.827
Okumura model	2.077	9.141
Okumura-Hata model	1.255	4.584
COST 231-Hata model	1.026	3.748
Walfisch-Ikegami model	1.253	3.962
Free space model	2.526	8.837
Hata-Davidson model	2.526	8.837

Conclusions

1. This work discusses relatively simple RWP models for CNMC, which, using a proposed algorithm along with appropriate software (such as Mathcad), allows determining the maximum coverage area of BTS cells based on environment characteristics.

2. Every mathematical model is presented as a function of the received signal strength $P_r(P_t, G_t, G_r, f, h_t, h_r, r)$. Unlike in most of the models recommended by ITU-R и CEPT, formulas in tab. 2 comply with the strict mathematical laws. Expressions with common logarithms are reduced to dimensionless forms by introduction of the norming parameters. For instance, the received path loss formula for the COST 231-Hata model in the book [6] looks like this:

$$L_{\text{COST231}} = 46.3 + 33.9 \lg(f) - 13.82 \lg(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \lg(h_t)] \lg(r) + C. \quad (1)$$

That path loss $L_{tr} = 10 \lg(P_r / P_t) > 0$ doesn't match the actual reduction in the signal level when the distance between BTS and MS increases, and expression (1), in overall, is mathematically incorrect, because quantities with dimensions are used as an logarithm arguments. This work proposes the following formula:

$$P_{r \text{COST231}} = P_t - 46.3 - 33.9 \cdot \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 13.82 \cdot \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + a(f, h_r) - \left[44.9 - 6.55 \cdot \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right] \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - C, \quad (2)$$

which corresponds to the path loss $L_{tr} = 10\lg(P_r / P_t) < 0$ and shows the real attenuation of the radio signal.

3. Path loss in Philadelphia, as shown in Fig. 8, where experimental (Fig. 7) and calculated (Fig. 6) data are compared, can be expressed using the Lee model, whereas the COST 231-Hata model is a match to the measured path attenuation in Tokyo. Visible errors are possible due to the choice of parameters (BTS and MS antenna height, antenna gain, urban parameters, etc.).

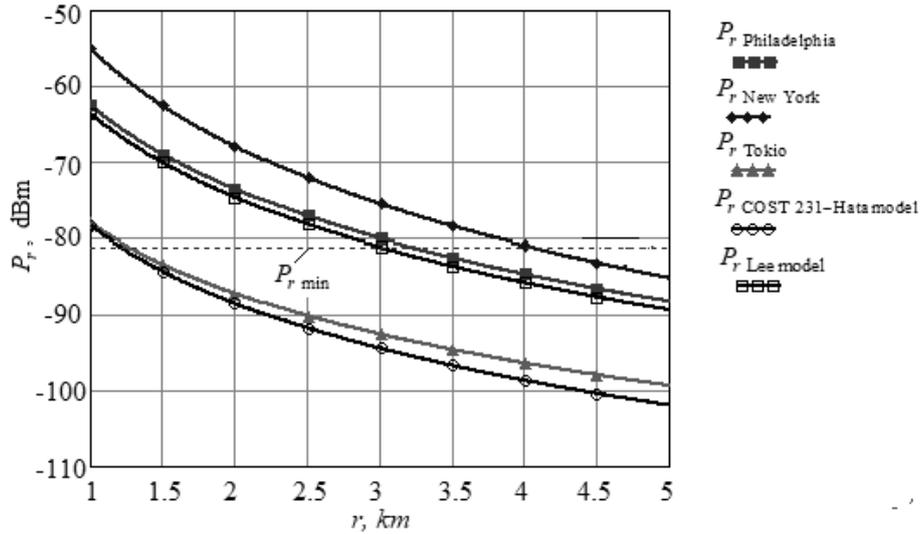


Fig. 8 – Comparison of the Experimental and Calculated Values of Received Signal Strength in Selected Cities

Рис. 8 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений мощности принимаемого сигнала в выбранных городах

4. As a first approximation, calculations of the median received power $P_r(r)$ (for downlink regime) can be made using estimated engineering formula (3):

$$P_r = P_{rLOS} - 10n \lg \left(\frac{r}{r_0} \right), \tag{3}$$

where $r_0 = 1$ km is a norming distance, n is an attenuation exponent which depends on the environment (Tab. 4).

Table 4 / Таблица 4

Dependence of the attenuation exponent on the environment features

Зависимость показателя затухания от особенностей окружающей среды

Environment	Attenuation exponent n
Free space (LOS)	2
Suburban area (LOS/NLOS)	2.7–3.5
Urban area (NLOS)	3–5

For example, if the received power in the LOS environment $P_{r, \text{LOS}} = -60$ dBm at the distance $r = 1$ km from the BTS, and $P_{r, \text{LOS}} = -75$ dBm when the distance is $r = 3$ km, then the slope of experimentally acquired data for RWP in New York (fig. 3.3) can be roughly expressed using (3) with the coefficient $n = (-75 + 60) / (-10 \cdot 0,48) = 3,125$.

5. The developed algorithm (Fig. 2), which was implemented using Mathcad software, allows not only calculating maximum coverage area of BTS cell towers, but also performing network clustering and designing the coverage map afterwards [1, 2, 11].

REFERENCES

1. Popovs V. *GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēmas: Projektēšanas problēmas*. Rīga, RTU Izdevniecība, 2003. 362 p.
2. Popov V.I. *Osnovy sotovoi svyazi standarta GSM* [Basics of GSM cellular communication]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2005. 296 p.
3. Blaunstein N. *Radio propagation in cellular networks*. London, Artech House, 2000. 384 p.
4. European Commission, Directorate-General for the Information Society and Media. *COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems: Final Report*. European Commission, 1999. 474 p.
5. Lee W.C.Y. *Mobile communications design fundamentals*. 2nd ed. New York, Wiley, 1993. 398 p.
6. Parsons J. D. *The mobile radio propagation channel*. 2nd ed. New York, Wiley, 2000. 436 p.
7. Popovs V. *Tehniskā elektrodinamika*. 4. daļa. *Radioviļņu izplatīšanas: Lekcijas*. Rīga, RTU DzTI, 2005. 74 lpp.
8. Popov V.I., Skudnov V.A., Vasil'ev A.S. Antenny bazovykh stantsii v sotovykh setyakh mobil'noi svyazi. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Antennas of base stations in cellular networks of mobile communication. Current state and prospects of development]. *Evrziskii soyuz uchenykh = Eurasian Union of Scientists*, 2016, no. 3-3 (20), pp. 138–150. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-i-algoritmy-rasprostraneniya-radiovoln-v-sotovykh-setyah-mobilnoy-svyazi> (accessed 23.10.2024).
9. Singh Y. Comparison of Okumura, Hata and COST-231 models on the basis of path loss and signal strength. *International Journal of Computer Applications*, 2012, vol. 59 (11), pp. 37–41. DOI: 10.5120/9594-4216.
10. Siwiak K., Bahreini Y. *Radio wave propagation and antennas for personal communications*. 3rd ed. London, Artech House, 2007. 494 p.
11. Wesolowski K. *Mobile communication systems*. Chichester, Wiley, 2002. 480 p.
12. Shabunin S.N., Lesnaya L.L. *Rasprostranenie radiovoln v mobil'noi svyazi* [Radio wave propagation in mobile communication]. Methodological guidelines for the course "Radio wave propagation and antenna-feeder devices in mobile communication systems". Ekaterinburg, UGTU Publ., 2000. 38 p.
13. Alim M.A., Rahman M.M., Hossain M.M., Al-Nahid A. Analysis of large-scale propagation models for mobile communications in urban area. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, 2010, vol. 7 (1), pp. 135–139.
14. Utts V.A. Issledovanie poter' pri rasprostraneni radiosignala sotovoi svyazi na osnove statisticheskikh modelei [Investigation of cellular radio signal propagation losses]. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 5, pp. 44–49. (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-poter-pri-rasprostraneni-radiosignala-sotovoy-svyazi-na-osnove-statisticheskikh-modeley> (accessed 23.10.2024).
15. Popov V.I. *Rasprostranenie radiovoln v lesakh* [Propagation of radio waves in forests]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015. 392 p.
16. Popov V.I., Skudnov V.A. *Osnovy proektirovaniya sotovykh setei mobil'noi svyazi* [Fundamentals of cellular mobile network design]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2019. 400 p. ISBN 978-5-9912-0664-8.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ОБЗОР

В.И. Попов

Рижский технический университет

Вопрос обеспечения равномерного радиопокрытия зон обслуживания и связанной с этим надежности систем мобильной радиосвязи в стандартах 3G и 4G требует большого внимания при проектировании сотовых мобильных сетей. Одной из основных задач на первом этапе проектирования является математическое моделирование распространения радиоволн под воздействием окружающей среды. В данной работе представлена классификация математических моделей распространения радиоволн в системах сотовой мобильной связи, алгоритм расчета мощности радиосигнала в точке приема в зависимости от расстояния между мобильной и базовой станциями, а также факторы и условия, влияющие на радиосвязь. Распространение волн указано.

Ключевые слова: математические модели, распространение радиоволн, гетерогенная среда, беспроводные сети, сотовые сети мобильной связи (ССМС).

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-25-42

ЛИТЕРАТУРА

1. **Popovs V.** GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēmas: Projektēšanas problēmas. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2003. – 362 p.
2. **Попов В.И.** Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с. – ISBN 5-88405-068-2.
3. **Blaunstein N.** Radio propagation in cellular networks. – London: Artech House, 2000. – 384 p.
4. COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems: Final Report / European Commission, Directorate-General for the Information Society and Media. – European Commission, 1999. – 474 p.
5. **Lee W.C.Y.** Mobile communications design fundamentals. – 2nd ed. – New York: Wiley, 1993. – 398 p.
6. **Parsons J.D.** The mobile radio propagation channel. – 2nd ed. – New York: Wiley, 2000. – 436 p.
7. **Popovs V.** Tehniskā elektrodinamika. 4. Daļa. Radioviļņu izplatīšanas: Lekcijas. – Rīga: RTU DzTI, 2005. – 74 lpp.
8. **Попов В.И., Скуднов В.А., Васильев А.С.** Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 11-3 (20). – С. 138–150. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antenny-bazovyh-stantsiy-v-sotovyyh-setyah-mobilnoy-svyazi-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 23.10.2024).
9. **Singh Y.** Comparison of Okumura, Hata and COST-231 models on the basis of path loss and signal strength // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 59 (11). – P. 37–41. – DOI: 10.5120/9594-4216.
10. **Siwiak K., Bahreini Y.** Radio wave propagation and antennas for personal communications. – 3rd ed. – London: Artech House, 2007. – 494 p.
11. **Wesolowski K.** Mobile communication systems. – Chichester: Wiley, 2002. – 480 p.
12. Распространение радиоволн в мобильной связи: методические указания по курсу «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи»/ сост.: С.Н. Шабунин, Л.Л. Лесная. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 38 с.
13. Analysis of large-scale propagation models for mobile communications in urban area / M.A. Alim, M.M. Rahman, M.M. Hossain, A. Al-Nahid // International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS). – 2010. – Vol. 7 (1). – P. 135–139.
14. **Утц В.А.** Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей // Вестник Балтийского федерального университета

- им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. – 2011. – № 5. – С. 44–49. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-poter-pri-rasprostranении-radio-signala-sotovoy-svyazi-na-osnove-statisticheskikh-modeley> (дата обращения: 23.10.2024).
15. **Попов В.И.** Распространение радиоволн в лесах. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 392 с.
 16. **Попов В.И., Скуднов В.А.** Основы проектирования сотовых сетей мобильной связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 400 с. – ISBN 978-5-9912-0664-8.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Попов Валентин Иванович – родился в 1937 году, д-р техн. наук, профессор Рижского технического университета. Область научных интересов: телекоммуникации. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: Латвия, ЛВ-1048, Рига, ул. Кипсалас, д. 6А. E-mail: popovs@latnet.lv).

Popov Valentin Ivanovich (b. 1937) – Doctor of Sciences (Eng.), Hab. Doctor of Physics (Dr. habil. phys.), Professor in the Riga Technical University. His research interests are currently focused on telecommunication. He is the author of 150 scientific papers. (Address: 6A Kipsalas Street, Riga LV-1048, Latvia. E-mail: popovs@latnet.lv).

*Статья поступила 16 сентября 2024 г.
Received September 16, 2024*

To Reference:

Popov V.I. Mathematical models of radio wave propagation in heterogeneous environments for wireless networks. Review. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 3 (64), pp. 25–42. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-25-42.

УДК 330.341:621.383

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
В НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ПАТЕНТНЫХ ПОРТФЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИЙ*****С.Г. Филатова^{1,2}, А.Г. Вострецов^{2,3}, Н.В. Проценко¹, Т.В. Гонжара¹**¹*Федеральный институт промышленной собственности*²*Новосибирский государственный технический университет*³*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН*

Широкое использование микроэлектроники в различных областях науки и техники – в современных системах управления, радиотехнических устройствах, приборах и средствах автоматизации в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, для оборонных целей – обуславливает первоочередную необходимость развития этой сферы. Стратегия развития электронной промышленности РФ до 2030 года сфокусирована в том числе на продвижении российской электроники на существующие и международные рынки, что сопряжено в первую очередь с необходимостью правовой защиты разработок. Патентные документы являются объективным критерием оценки потенциала развития технологий. В статье оценивается динамика научных публикаций и патентования в сфере микроэлектроники в Новосибирской области, в России и в мире. Данная сфера является достаточно зрелой, количество научных публикаций и патентов в мире выросло за последние 20 лет незначительно. Наблюдается уменьшение количества российских патентов в целом, и патентов, правообладателями которых являются организации, зарегистрированные на территории Новосибирской области в частности. Это является результатом ухудшения политической обстановки в мире. Введение экономических санкций против Российской Федерации стало причиной, по которой зарубежные компании вынуждены были прекратить инвестиции как в исследования и разработки, так и в производство российской электроники. Некоторые российские компании в этих обстоятельствах перешли к охране своих разработок в режиме коммерческой тайны. Также выявлены основные правообладатели и установлены ученые-носители технологий, которые работают в организациях электронной промышленности, зарегистрированных в рассматриваемом регионе. Произведен анализ уровня развития микроэлектронных технологий в Новосибирской области, который показал, что он соответствует мировому.

Ключевые слова: импортозамещение, микроэлектроника, патентная аналитика.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-43-56

Введение

Микроэлектроника широко используется в различных областях науки и техники, при создании современных систем управления, радиотехнических устройств, приборов и средств автоматизации в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, для оборонных целей.

В 1990-х годах российская электронная промышленность находилась в упадке из-за острого финансового и политического кризиса, а также отсутствия заказов

* Публикация подготовлена в рамках НИР «Методология исследования и оценки потенциала развития технологий в электронной промышленности Новосибирской области с использованием патентного скрининга и анализа патентной активности: перспективы применения в других регионах РФ», шифр 3-ЭП-2024.

Публикация подготовлена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект no. FSUN-2023-0007.

на разработку и создание новых электронных изделий. В [1] констатируется утрата до 50 % технологий производства электронной компонентной базы (ЭКБ), разработанной в СССР в 1970–1980-х годах, в том числе наблюдается прогрессирующее технологическое отставание РФ в области твердотельной СВЧ-электроники, полностью утрачены компетенции по созданию средств производства для микроэлектроники [1]. Вследствие этого российские электронные изделия оказались неконкурентоспособны на мировом рынке, что дополнительно усугубило положение предприятий электронной промышленности. К 2007 году доля РФ на мировом рынке ЭКБ составляла всего 0,23 %; на внутреннем рынке ЭКБ промышленность РФ обеспечивает только 37,5 % спроса. Всё это существенно повлияло на такие стратегические сферы, как оборонная, космическая и нефтегазовая отрасли, атомная промышленность, авиа-, судо- и автомобилестроение, которые в большей степени оснащались импортной электроникой, что несомненно снизило обороноспособность страны в условиях действия политически-мотивированных санкций.

В 2022 году принята обновленная концепция государственной политики в области развития электронной промышленности до 2030 года. Отмечаются следующие проблемы в развитии отрасли: нехватка производственных мощностей в России, критическая зависимость процессов проектирования и выпуска продукции от зарубежных технологий, а также от сырья и материалов [2], трудности с освоением технологических процессов ниже 180 нм, невозможность обеспечить рынок необходимой электроникой, низкая инвестиционная привлекательность, в том числе из-за наличия недобросовестной конкуренции со стороны зарубежных поставщиков электроники, высокая стоимость производства в России, а также острый дефицит квалифицированных кадров.

Тем не менее второй этап Стратегии (2022–2025 гг.) сфокусирован на продвижении российской электроники, в том числе на международные рынки, что сопряжено в первую очередь с необходимостью правовой защиты разработок. В связи с этим представляется возможным оценить динамику и потенциал развития технологий именно через анализ патентных документов.

1. Постановка задачи

Микроэлектроникой называют раздел электроники, связанный с изучением и производством электронных компонентов с геометрическими размерами порядка нескольких микрон и меньше. Такие устройства обычно производят из полупроводников и полупроводниковых соединений, используя фотолитографию и легирование. Традиционные устройства электронной компонентной базы, такие как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы, изоляторы, проводники, в микроэлектронике реализованы в виде миниатюрных устройств в интегральном исполнении [3].

В качестве региона для проведения исследования выбрана Новосибирская область (НСО). Связано это с тем, что в регионе имеются предприятия радиоэлектронной промышленности, в том числе входящие в холдинг «Росэлектроника» [4], такие как АО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток», АО «Швабе-Оборона и Защита», АО «Экран-оптические системы», АО «Новосибирский завод радиодеталей «Оксид». Существенна и научно-исследовательская компонента. Концентрация в регионе научных работников в 1,5 раза превышает общероссийский показатель. Новосибирские ученые составляют 5 % всего российского научного сообщества и почти половину числа ученых Сибирского Федерального округа (СФО). Сегодня в научно-исследовательской и инновационной сферах занято более 30 тысяч человек – по этому показателю НСО находится на первом месте в СФО. По затратам на научные исследования и опытно-конструк-

торские разработки НСО занимает первое место в СФО и шестое – в РФ. НСО входит в десятку ведущих регионов РФ по количеству заявок на объекты интеллектуальной собственности. При этом за 2019–2021 гг. использование изобретений и полезных моделей в сфере производства компьютеров, электронных и оптических изделий составляет 13,3 % от общего объема использования изобретений и полезных моделей, и занимает третье место в регионе (после секторов научных исследований и разработок и образования). Также следует отметить, что НСО выбрана Министерством экономического развития РФ как пилотный регион для разработки типовых моделей развития территорий с высокой концентрацией исследований и разработок, инновационной инфраструктуры и производства (Государственная программа Новосибирской области «Стимулирование научной, научно-технической и инновационной деятельности в Новосибирской области»).

Предметом исследования являются патентные документы, касающиеся технологий микроэлектроники, правообладателями которых являются научные и образовательные организации, а также предприятия реального сектора экономики, расположенные на территории НСО. Выбор научных и образовательных организаций, относящихся к организациям электронной промышленности, основывался на экспертном анализе их патентных портфелей. Среди коммерческих организаций для анализа выбраны те организации, которые имеют код ОКВЭД 26 «Производство компьютеров, электронных и оптических изделий» [5].

Информационный поиск проводился средствами современных баз данных, таких как Электронный архив заявок ФИПС, патентных поисковых систем PatSearch, Espacenet, Orbit Questel, библиотек IEEE Xplore, Google Scholar, E-library, КиберЛенинка. В связи с тем, что сфера микроэлектроники является динамично развивающейся, многие технологии достаточно быстро устаревают, а также в связи с тем, что максимальный срок действия исключительного права на изобретение согласно п. 1 ст. 1363 Гражданского Кодекса Российской Федерации составляет 20 лет, глубина поиска была ограничена датой 01.01.2004.

Область поиска ограничена индексами Международной патентной классификации H01L «Полупроводниковые приборы, не отнесенные к подклассу H10»; H03N «Цепи полного (активного и реактивного) сопротивления»; H05K «Печатные схемы; корпуса или детали электрических приборов; изготовление блоков элементов электрической аппаратуры»; H10 «Полупроводниковые приборы; электрические твердотельные устройства, не отнесенные к другим классам»; V81B «Микроструктурные устройства или системы, например микромеханические устройства»; V81C «Способы или устройства, специально предназначенные для изготовления или обработки микроструктурных устройств или систем» [6], а также ключевыми словами «микроэлектроника», «микросхема», «интегральная микросхема», «пленочная микросхема», «БИС», «микропроцессор», «пьезокерамический», «оптоэлектронный», «многослойная печатная плата», «микрореле», «реле», «триггер», «шифратор», «компаратор», «усилитель», «генератор», «резистор», «конденсатор», «катушка индуктивности», «диод», «транзистор», «изолятор», «проводник».

2. Анализ динамики публикационной активности и патентования технологий микроэлектроники в мире

По данным IEEE Xplore была оценена мировая динамика научных публикаций по микроэлектронике (рис. 1). Поиск проводился по упоминанию темы в любой части публикации. За исследуемый период выявлено более 64 тыс. публикаций. Диаграмма рис. 1 отражает тот факт, что сфера микроэлектроники является достаточно зрелой, рост количества публикаций за последние 10 лет незначительный.

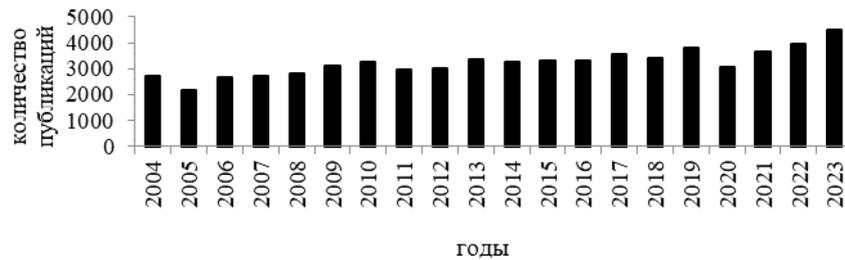


Рис. 1 – Динамика публикаций по теме «микроэлектроника» за 2003–2023 гг. по данным IEEE Xplore

Fig. 1 – Dynamics of publications on the topic “microelectronics” for 2003–2023 according to IEEE Xplore

Динамика патентования в мире отражена на рис. 2. Выборка патентных семейств включает в себя 53 679 документов. Графики демонстрируют незначительный рост количества запатентованных решений, за 20 лет количество патентных семейств увеличилось всего в 1,5 раза, что также подтверждает зрелость данного направления исследований и разработок. При этом следует отметить значительное количество патентов, действие которых поддерживается правообладателями, что свидетельствует об актуальности технических решений на протяжении долгого времени и наличии коммерческой привлекательности.

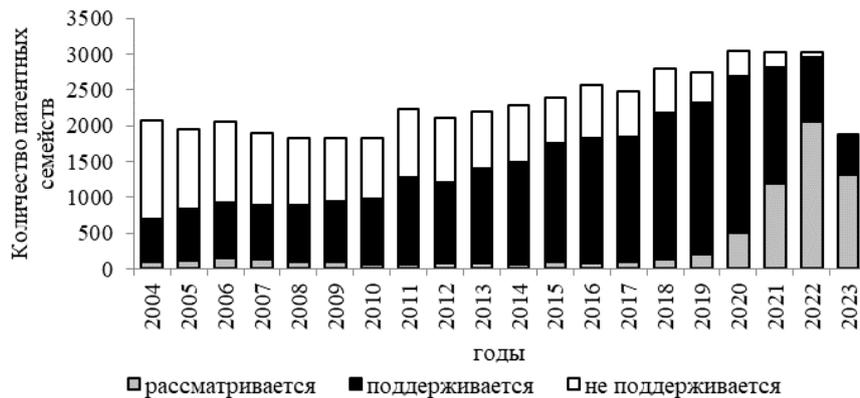


Рис. 2 – Динамика патентования в сфере микроэлектроники за 2004–2023 гг. в мире

Fig. 2 – The dynamics of patenting in the field of microelectronics for 2004–2023 in the world

Ведущими игроками на данном рынке (рис. 3) являются такие международные компании как INTEL, которая имеет в своем портфеле 2835 патентов по микроэлектронике, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) с 1333 патентами, Samsung Electronics (1310), IBM (1239). Также существенным портфелем патентов по микроэлектронике (1625) владеет французский научно-исследовательский институт Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA – Комиссариат по атомной и альтернативным видам энергии). При этом ведущими компаниями больше 60 % патентов поддерживается в силе.

Технологии микроэлектроники в первую очередь патентуют в США и Китае (рис. 4), где находятся либо R&D подразделения компаний-мировых лидеров

в этой сфере, либо производство микроэлектронных изделий. Россия при этом находится на 7 месте по количеству патентов среди всех стран. Кроме того, часть заявок (13 902) подана в рамках Договора о патентной кооперации (РСТ), который обеспечивает предварительную правовую охрану технического решения на территории 156 стран. Также 2202 заявок первоначально подано в Европейское патентное ведомство, что обеспечивает защиту технических решений на территории 25 стран Европейского союза.

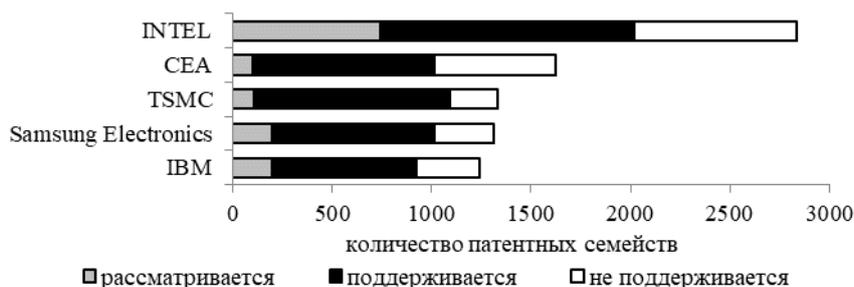


Рис. 3 – ТОП-5 правообладателей в сфере микроэлектроники за 2004–2023 гг. в мире

Fig. 3 – TOP-5 patent holders in the field of microelectronics for 2004–2023 in the world

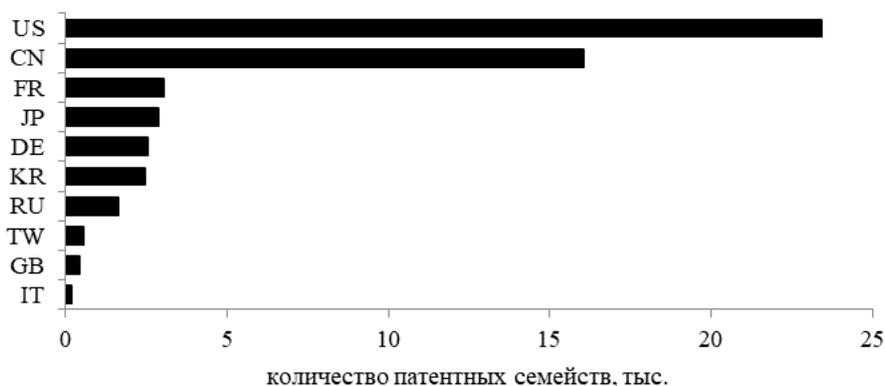


Рис. 4 – Рейтинг патентных ведомств первого приоритета по количеству патентов за 2004–2023 гг. в мире:

US – США; CN – Китай; FR – Франция; JP – Япония; DE – Германия; KR – Республика Корея; RU – Россия; TW – Тайвань; GB – Великобритания; IT – Италия

Fig. 4 – The ranking of patent offices of the first priority in terms of the number of patents for 2004-2023 in the world:

US – USA; CN – China; FR – France; JP – Japan; DE – Germany; KR – Republic of Korea; RU – Russia; TW – Taiwan; GB – Great Britain; IT – Italy

3. Анализ динамики патентования технологий микроэлектроники в России

Результаты поиска с ограничением по российскому патентному ведомству включают в себя 2066 патентных семейств, доля российских патентов не превышает 3,85 % от мирового количества. При этом 10 правообладателям принадлежит

24 % российских патентов, т. е. рынок микроэлектроники в РФ является высококонкурентным.

Динамика патентования микроэлектронных технологий в России с 2004 года показана на рис. 5. Диаграммы показывают, что количество защищаемых технических решений остается в среднем на постоянном уровне, до 2015 года он составлял приблизительно 100 заявок в год, после средний уровень снизился до 80 заявок. Вероятно, это связано с ухудшением политической обстановки в мире, введением экономических санкций против РФ, по причине которых зарубежные компании вынуждены были прекратить инвестиции как в исследования и разработки, так и в производство российской электроники, а некоторые российские компании перешли к охране своих разработок в режиме коммерческой тайны.



Рис. 5 – Динамика патентования в сфере микроэлектроники за 2004–2023 гг. в России

Fig. 5 – The dynamics of patenting in the field of microelectronics for 2004–2023 in Russia

При этом следует отметить, что доля иностранных правообладателей до 2015 года не превышала 20 % (рис. 5). Наибольшее количество патентов принадлежит международным компаниям Johnson & Johnson Vision Care, BASF, PHILIPS и др. (рис. 6).

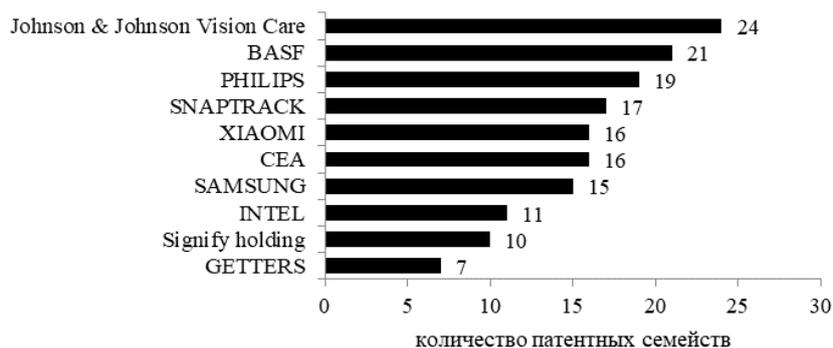


Рис. 6 – ТОП-10 иностранных правообладателей по микроэлектронике в России

Fig. 6 – TOP-10 Foreign Microelectronics patent holders in Russia

Среди российских организаций безусловными лидерами по патентованию микроэлектронных технологий являются Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ЮРГУЭС), Донской государственный техни-

ческий университет (ДГТУ), Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), компания «Группа Кремний Эл», Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ) и др. (рис. 7).

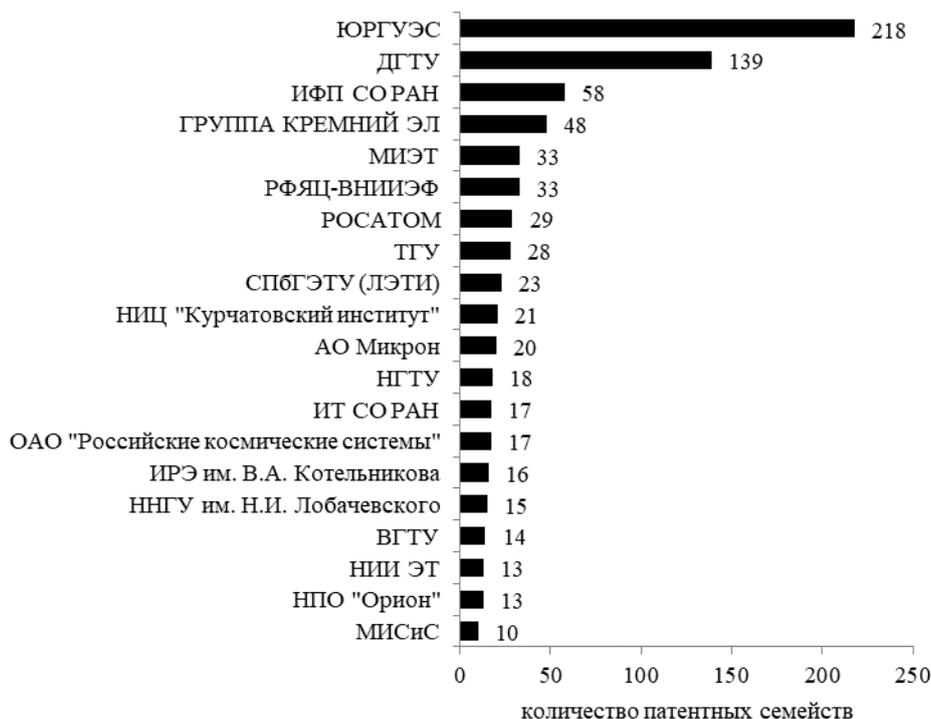


Рис. 7 – ТОП-20 российских правообладателей по микроэлектронике в России:

ТГУ – Томский государственный университет; СПБГЭТУ – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); НГТУ – Новосибирский государственный технический университет; ИТ СО РАН – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН; ИРЭ им. В.А. Котельникова – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова; ННГУ им. Н.И. Лобачевского – Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; ВГТУ – Воронежский государственный технический университет; НИИ ЭТ – Научно-исследовательский институт электронной техники; МИСиС – Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Fig. 7 – TOP-10 Russian Microelectronics patent holders in Russia:

TSU – Tomsk State University; SPBSETU – St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI” named after V.I. Ulyanov (Lenin); NSTU – Novosibirsk State Technical University; IT SB RAS – S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS; V.A. Kotelnikov IRE – V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics; N.I. Lobachevsky National Research University – N.I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University; VSTU – Voronezh State Technical University; NII ET – Scientific Research Institute of Electronic Technology; MISiS – National Research Technological University “MISiS”

Основная доля патентных семейств имеет в качестве страны первого приоритета Российскую Федерацию (рис. 8). Часть патентов (406 ед.) защищено в рамках Договора о патентной кооперации (РСТ), а 109 патентных семейств первоначально подано в Европейское патентное ведомство. Кроме того, в России запатентованы разработки, которые страной первого приоритета имеют США (US).

В остальных странах, таких как Китай (CN), Франция (FR), Германия (DE), Великобритания (GB), Корея (KR), Австралия (AU), доля семейств, включающих российский патент, незначительна. Следует отметить также, что в основном российские правообладатели не стремятся защищать свои разработки по микроэлектронике на зарубежных рынках, что демонстрирует незначительность экспортного потенциала разработок в этой сфере.

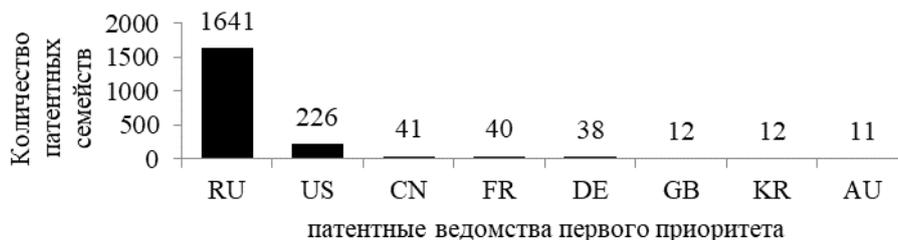


Рис. 8 – Рейтинг патентных ведомств первого приоритета по количеству патентов за 2004–2023 гг.:

AU – Австралия

Fig. 8 – The ranking of patent offices of the first priority in terms of the number of patents for 2004–2023:

AU – Australia

4. Анализ патентной активности организаций электронной промышленности Новосибирской области

Динамика патентования микроэлектронных технологий организациями, зарегистрированными на территории Новосибирской области, с 2004 года показана на рис. 9. Видно, что динамика в целом соответствует общероссийским тенденциям, после 2015 года наблюдается снижение количества патентов. Большая часть патентов, полученных до 2018 года, не поддерживается, что свидетельствует об отсутствии коммерческой привлекательности патентов, полученных более 5 лет назад.

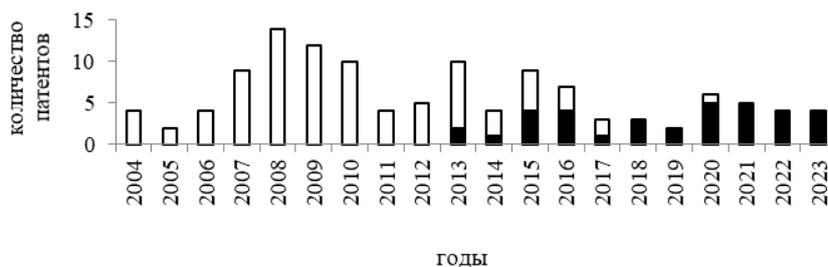


Рис. 9 – Динамика патентования технологий микроэлектроники в 2004–2023 гг. в Новосибирской области

Fig. 9 – Dynamics of patenting of microelectronics technologies for 2004–2023 in the Novosibirsk region

Среди научных организаций наибольшее количество патентов, касающихся микроэлектроники, имеет ИФП СО РАН (рис. 10), как было отмечено ранее, институт находится на третьем месте по количеству патентов с сфере микроэлектроники среди российских организаций. Патенты посвящены способам изготов-

ления элементов микроэлектроники, в частности получения структуры кремний-на-изоляторе, кремний-на-сапфире, индиевых микроконтактов, слоя поликристаллического кремния, способам считывания сигнального заряда с матричного ПЗИ-фотоприемника, а также различным конструкциям элемента памяти для электрически перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства.

Среди образовательных организаций лидером является НГТУ. Его патенты посвящены способам изготовления микросхем, в том числе многослойной тонкопленочной структуры, а также конструкциям различных микроэлектронных изделий, таких как микромеханический генератор, СВЧ-аттенюатор, хеморезистивный газовый сенсор, криогенный малошумящий СВЧ-усилитель и т. п.

Среди предприятий наибольшее количество патентов по микроэлектронике имеет Научно-исследовательский институт электронных приборов (НИИЭП). Патентами защищены конструкции СВЧ-модулей, используемых в радиоэлектронной аппаратуре, конструкции приемных устройств, способ напыления в вакууме топологического тонкопленочного рисунка гибридной микросхемы на подложку.

Следует отметить, что предприятия реального сектора экономики в целом меньше защищают свою продукцию патентами.

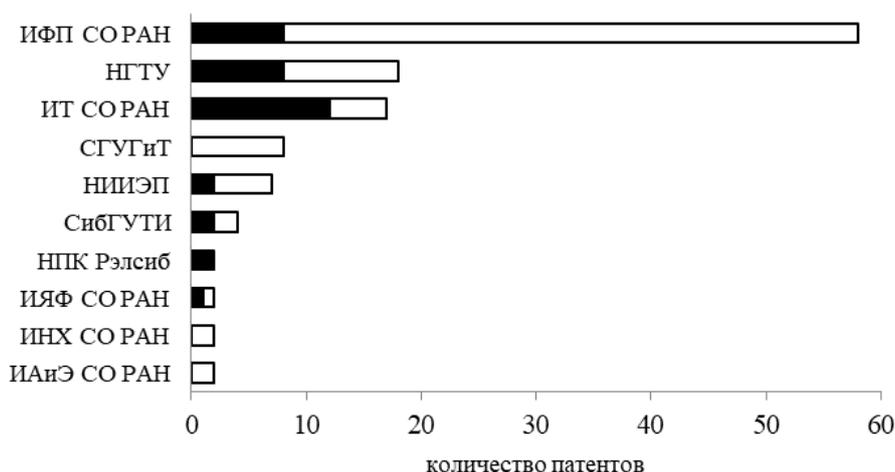


Рис. 10 – Топ-10 правообладателей по микроэлектронике в Новосибирской области:

СГУГиТ – Сибирский государственный университет геосистем и технологий; СибГУТИ – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; ИЯФ СО РАН – Институт ядерной физики СО РАН; ИНХ СО РАН – Институт неорганической химии СО РАН; ИАиЭ СО РАН – Институт автоматизации и электротехники СО РАН

Fig. 10 – TOP-10 microelectronics patent holders in the Novosibirsk Region:

SGUGiT – Siberian State University of Geosystems and Technologies; SibGUTI – Siberian State University of Telecommunications and Informatics; INP SB RAS – Institute of Nuclear Physics SB RAS; INH SB RAS – Institute of Inorganic Chemistry SB RAS; IAiE SB RAS – Institute of Automation and Electrometry SB RAS

В результате анализа авторов патентов также установлены основные носители технологий по микроэлектронике (рис. 11). Среди них можно выделить следующие.

Гриценко В.А., д-р физ.-мат. наук, работает в лаборатории физических основ материаловедения кремния ИФП, основная область его интересов – синтез пленок нитрида кремния, в том числе для создания элементов энергонезависимой резистивной памяти – мемристоров.

Чесноков Д.В., канд. техн. наук, доцент, является руководителем научно-образовательной лаборатории СГУГиТ «Лазерные технологии и оптические микросистемы для приборостроения». На базе лаборатории создан научный задел, который в настоящее время реализуется в услугах дизайн-центра ООО «Соленна», разрабатывающего приборы и компоненты в области оптического приборостроения, опто-, микро- и нанoeлектроники, МЭМС, сенсорики и гибкой электроники.



Рис. 11 – ТОП-10 авторов патентов – носителей технологий по микроэлектронике в Новосибирской области

Fig. 11 – TOP-10 authors of microelectronics technologies patent in the Novosibirsk region

Несмотря на то, что российская микроэлектроника в целом значительно отстает от мировой, новосибирские научные и образовательные организации патентуют разработки мирового уровня. В частности, Институт теплофизики СО РАН занимается газоструйным осаждением алмазных покрытий, которое может быть применено как для изготовления пассивных устройств (теплоотводов), так и в качестве полупроводникового материала (полевых транзисторов с частотой выше 100 ГГц, детекторов) [7]. Кроме того, ИТ СО РАН патентует разработки, связанные с различными передовыми способами охлаждения электронного оборудования [8–10]

В НГТУ получен криогенный малошумящий СВЧ-усилитель, который в том числе необходим для проведения исследований, связанных с созданием квантовых систем обработки информации на сверхпроводящих кубитах [11].

Институт физики полупроводников СО РАН занимается вопросами разработки универсальной памяти, которая может совмещать в себе энергонезависимость, высокую скорость работы и большой информационный объем. Предложены различные структуры мемристоров – резистивной перезаписываемой памяти, представляющий собой структуру металл-диэлектрик-металл, в которой тонкий слой диэлектрика обратимо меняет сопротивление при подаче переключающего импульса напряжения из-за образования и рассасывания в нем тонкого проводящего канала (филамента) [12–14].

Заключение

В статье проведен анализ динамики патентования технических решений по микроэлектронике. Установлено, что данная сфера является зрелой, рост количества научных публикаций и патентов в мире незначительный. В России наблюда-

ется снижение количества патентов начиная с 2015 года, что обусловлено как уходом иностранных компаний с российского рынка, так и снижением интереса отечественных организаций к защите результатов интеллектуальной деятельности с помощью патента. При этом организации, зарегистрированные в Новосибирской области, обладают высоким потенциалом для патентования своих разработок. Лидерами патентования в сфере микроэлектроники традиционно остаются научные и образовательные учреждения, для которых, однако, патент в основном не является инструментом коммерциализации разработок, а носит скорее имиджевый характер, подтверждая наличие уникальных в мировом масштабе компетенций. Рынок в этой сфере высококонкурентный, что дополнительно свидетельствует о необходимости защищать микроэлектронную продукцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.01.2020 № 20-р.
2. **Петрова Е.А.** Кризисы отечественной электроники и проблемы импортозамещения // Стратегии развития социальных общностей, институтов и территорий: материалы VIII Международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 1. – Екатеринбург, 2022. – С. 62–66. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/116518/1/978-5-7996-3498-8_2022_014.pdf (дата обращения: 23.10.2024).
3. Большая политехническая энциклопедия / авт.-сост. В.Д. Рязанцев. – М.: Мир и образование, 2011. – 704 с.
4. Росэлектроника: РОСЭЛ: сайт. – URL: <https://www.ruselectronics.ru/> (дата обращения: 27.09.2024).
5. ОК 029–2014 (КДЕС Ред. 2). Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (утв. приказом Росстандарта от 31.01.2014 № 14-ст) (ред. от 16.08.2024).
6. ФИПС. Международная патентная классификация: сайт. – URL: <https://www.fips.ru/publication-web/classification/mpk?view=list> (дата обращения: 24.10.2024).
7. **Ральченко В., Конов В.** CDV-алмазы. Применение в электронике // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2007. – № 4 (78). – С. 58–67.
8. Патент № 2773679 Российская Федерация. Способ охлаждения электронного оборудования с использованием комбинированных потоков газа и микрокапель: № 2021139139: заявл. 28.12.2021: опубл. 07.06.2022, Бюл. № 16 / Кабов О.А., Чеверда В.В., Пуховой М.В., Сибиряков Н.Е., Быковская Е.Ф. – 10 с.
9. Патент № 2781758 Российская Федерация. Испарительно-конденсационная газожидкостная система охлаждения электронного оборудования: № 2021138791: заявл. 25.12.2021: опубл. 17.10.2022, Бюл. № 29 / Кабов О.А. – 10 с.
10. Патент № 2816279 Российская Федерация. Система охлаждения электронного оборудования со смесью пара и неконденсируемого газа: № 2023125482: заявл. 05.10.2023: опубл. 28.03.2024, Бюл. № 10 / Кабов О.А., Зайцев Д.В., Быковская Е.Ф. – 10 с.
11. Патент № 209911 Российская Федерация. Криогенный малошумящий СВЧ-усилитель: № 2021134863: заявл. 29.11.2021: опубл. 23.03.2022, Бюл. № 9 / Вольхин Д.И., Новиков И.Л., Вострецов А.Г. – 10 с.
12. **Volkhin D.I., Novikov I.L., Vostretsov A.G.** Cryogenic low-noise amplifier 1-3GHz // 24 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proceedings, Novosibirsk, 29 June – 3 July 2023. – Novosibirsk: IEEE, 2023. – P. 800–803. – DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225128.
13. Патент № 2749028 Российская Федерация. Способ получения активной структуры элемента энергонезависимой резистивной памяти: № 2020125960: заявл. 29.07.2020: опубл. 07.09.2021, Бюл. № 25 / Камаев Г.Н., Гисматулин А.А., Володин В.А., Гриценко В.А. – 28 с.
14. Патент № 2779436 Российская Федерация. Способ получения активного слоя для бесформовочного элемента энергонезависимой резистивной памяти: № 2021139274:

- заявл. 27.12.2021: опублик. 07.09.2022, Бюл. № 25 / Алиев В.Ш., Воронковский В.А., Герасимова А.К., Гриценко В.А. – 20 с.
15. Патент № 2812881 Российская Федерация. Способ получения активного слоя элемента энергонезависимой резистивной памяти: № 2023125731: заявл. 06.10.2023: опублик. 05.02.2024, Бюл. № 4 / Камаев Г.Н., Новиков Ю.Н., Володин В.А., Гриценко В.А. – 29 с.

INVESTIGATION OF THE POTENTIAL FOR THE DEVELOPMENT OF MICROELECTRONICS IN THE NOVOSIBIRSK REGION BASED ON THE ANALYSIS OF PATENT PORTFOLIOS OF ORGANIZATIONS

Filatova S.G.^{1,2}, Vostretsov A.G.^{2,3}, Protsenko N.V.¹, Gonzhara T.V.¹

¹*Federal institute of industrial property, Moscow, Russia*

²*Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia*

³*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences*

Microelectronics is widely used in various fields of science and technology: in modern control systems, radio engineering devices, devices and automation tools in industry, agriculture, transport and defense purposes. This determines the primary need for the development of this area. The strategy for the development of the electronic industry of the Russian Federation until 2030 is focused, among other things, on promoting Russian electronics to existing and international markets. Thus, the primary task is the legal protection of developments. Patent documents are an objective criterion for assessing the potential of technology development. The article evaluates the dynamics of scientific publications and patenting in the field of microelectronics in the Novosibirsk region, in Russia and in the world. This field is quite developed, the number of scientific publications and patents in the world has grown slightly over the past 20 years. There has been a decrease in the number of Russian patents in general and patents whose copyright holders are organizations registered in the Novosibirsk Region, in particular. This is a result of the deterioration of the political situation in the world. The imposition of economic sanctions against the Russian Federation was the reason why foreign companies were forced to stop investing in both research and development and in the production of Russian electronics. In these circumstances, some Russian companies have switched to protecting their developments in a trade secret mode. The main copyright holders and technology scientists working in electronic industry organizations registered in the region under consideration were also identified. The analysis of the level of development of microelectronic technologies in the Novosibirsk region was carried out, which showed that it corresponds to the world level.

Keywords: import substitution, microelectronics, patent analytics.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-43-56

REFERENCES

1. *Strategiya razvitiya elektronnoi promyshlennosti Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda* [Strategy for the development of the electronic industry of the Russian Federation for the period up to 2030]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of 17.01.2020 № 20-p.
2. Petrova E.A. [Crises of domestic electronics and problems of import substitution]. *Strategii razvitiya sotsial'nykh obshchnostei, institutov i territorii*. V 2 t. T. 1 [Strategies of Development of Social Communities, Institutions and Territories. In 2 vol. Vol. 1]. Proceedings of the VIII International Scientific-Practical Conference. Ekaterinburg, 2022, pp. 62–66. (In Russian). Available at: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/116518/1/978-5-7996-3498-8_2022_014.pdf (accessed 23.10.2024).

3. Ryazantsev V.D., comp. *Bol'shaya politekhnicheskaya entsiklopediya* [The great polytechnic encyclopedia]. Moscow, Mir i obrazovanie Publ., 2011. 704 p.
4. *Roselektronika: ROSEL* [Ruselectronics]. Website. Available at: <https://www.ruselectronics.ru/> (accessed 27.09.2024).
5. ОК 029–2014 (KDES Ed. 2). *Obshcherossiiskii klassifikator vidov ekonomicheskoi deyatel'nosti* [Russian classification of economic activities] (approved by the Order of Rosstandart dated 01.31.2014 N 14-st) (ed. dated 08.16.2024).
6. FIPS. *Mezhdunarodnaya patentnaya klassifikatsiya* [International patent classification]. Website. Available at: <https://www.fips.ru/publication-web/classification/mpk?view=list> (accessed 24.10.2024).
7. Ralchenko V., Konov V. *CDV-almazы. Primenenie v elektronike* [CDV-diamonds. Adoption in electronics]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 4 (78), pp. 58–67.
8. Kabov O.A., Cheverda V.V., Pukhvoi M.V., Sibiriakov N.E., Bykovskaia E.F. *Sposob okhlazhdeniya elektronnoy oborudovaniya s ispol'zovaniem kombinirovannykh potokov gaza i mikrokapel'* [Method for cooling electronic equipment using combined gas and microdroplets flow]. Patent RF, no. 2773679, 2022.
9. Kabov O.A. *Isparitel'no-kondensatsionnaya gazozhidkostnaya sistema okhlazhdeniya elektronnoy oborudovaniya* [Evaporative-condensing gas-liquid cooling system for electronic equipment]. Patent RF, no. 2781758, 2022.
10. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Bykovskaia E.F. *Sistema okhlazhdeniya elektronnoy oborudovaniya so smes'yu para i nekondensiruемого газа* [System for cooling electronic equipment with mixture of steam and noncondensed gas]. Patent RF, no. 2816279, 2024.
11. Volkhin D.I., Novikov I.L., Vostretsov A.G. *Kriogennyi maloshumyashchii SVCh-usilitel'* [Cryogenic low-noise microwave amplifier]. Patent RF, no. 209911, 2022.
12. Volkhin D.I., Novikov I.L., Vostretsov A.G. Cryogenic low-noise amplifier 1-3GHz. *24 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proceedings*. Novosibirsk, IEEE, 2023, pp. 800–803. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225128.
13. Kamaev G.N., Gismatulin A.A., Volodin V.A., Gritsenko V.A. *Sposob polucheniya aktivnoy struktury elementa energonezavisimoi rezistivnoy pamyati* [Method for producing active structure of non-volatile resistive memory element]. Patent RF, no. 2749028, 2021.
14. Aliev V.Sh., Voronkovskiy V.A., Gerasimova A.K., Gritsenko V.A. *Sposob polucheniya aktivnogo sloya dlya bes-formovochnoy elementa energonezavisimoi rezistivnoy pamyati* [Method for obtaining an active layer for a formless element of a non-volatile resistive memory]. Patent RF, no. 2779436, 2022.
15. Kamaev G.N., Novikov Yu.N., Volodin V.A., Gritsenko V.A. *Sposob polucheniya aktivnogo sloya elementa energonezavisimoi rezistivnoy pamyati* [Method for obtaining active layer of non-volatile resistive memory element]. Patent RF, no. 2812881, 2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Филатова Светлана Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент, государственный эксперт по интеллектуальной собственности отдела полезных моделей Сибирского центра ФИПС. Область научных интересов: цифровая статистическая обработка сигналов, патентная аналитика. Опубликовано более 35 научных работ. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная, 30, к. 2а. E-mail: s.filatova@corp.nstu.ru).

Filatova Svetlana Gennadjevna – Candidate of Sciences (Eng.), assoc. prof., state expert on industrial property at the department of utility models of the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. Her research interest is currently focused on digital statistical signal processing, patent analytics. She is author of more than 35 scientific papers. (Address: 30, Planetnaya Street, bldg 2a, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: s.filatova@corp.nstu.ru).



Вострецов Алексей Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, советник при ректорате НГТУ, заведующий лабораторией квантовой криогенной электроники. Область научных интересов: помехоустойчивые алгоритмы оценивания в аналого-цифровых системах обработки сигналов. Опубликовано более 150 научных работ. (Address: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostreczov@corp.nstu.ru).

Vostretsov Alexey Gennadjevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Honored Scientist of the Russian Federation, NSTU Rector's Advisor, Head of the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics. His research interest is currently focused on noise-resistant estimation algorithms in analog-to-digital signal processing systems. He is author of more than 185 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: vostreczov@corp.nstu.ru).



Проценко Наталья Викторовна – начальник отдела полезных моделей Сибирского центра ФИПС, ФГБУ Федеральный институт промышленной собственности. Область научных интересов: патентная экспертиза, транспорт. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная, 30, корп. 2а. E-mail: protsenko@rupto.ru).

Protsenko Natalia Viktorovna – chief of department Utility Models of the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. Her research interests are currently focused on patent examination, transport. She is author of 5 scientific paper. (Address: 30, Planetnaya Street, bldg 2a, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: protsenko@rupto.ru).



Гонжара Татьяна Викторовна – государственный эксперт по интеллектуальной собственности 1 категории отдела полезных моделей Сибирского центра ФИПС. Область научных интересов: патентная экспертиза, силовая электроника. (Адрес: 630015, Россия, Новосибирск, ул. Планетная, 30, к. 2а. Email: novosib18@rupto.ru).

Gonzhara Tatyana Viktorovna – state expert on intellectual property of the 1st category at the department of utility models of the Siberian Center of the Federal Institute of Industrial Property. Her research interest is currently focused on patent examination and power electronics. (Address: 30, Planetnaya Street, bldg 2a, Novosibirsk, 630015, Russia. E-mail: novosib18@rupto.ru).

Статья поступила 30 сентября 2024 г.
Received September 30, 2024

To Reference:

Filatova S.G., Vostretsov A.G., Protsenko N.V., Gonzhara T.V. Opredelenie potentsiala razvitiya mikroelektroniki v Novosibirskoi oblasti na osnove analiza patentnykh portfelei organizatsii [Investigation of the potential for the development of microelectronics in the Novosibirsk region based on the analysis of patent portfolios of organizations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 3 (64), pp. 43–56. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-43-56.

УДК 621.355, 629.34, 656.131

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ
НА БАЗЕ ЕЗДОВОГО ЦИКЛА****Н.И. Щуров, Р.В. Шабалин***Новосибирский государственный технический университет*

На сегодняшний день улучшение силовой части электрического транспортного средства, в частности электромобиля, является одним из основных направлений исследования в области транспортных средств. Из-за нестабильности уровней нагрузки, частых торможений и разгонов эффективность использования силовой установки нуждается в улучшении с использованием новейших компонентов и методов. Цель работы – на базе всемирного ездового цикла разработать эффективную силовую установку электромобиля. В данном исследовании был проведен анализ существующих ездовых циклов, выбран наиболее оптимальный на основе его характеристик в различных эксплуатационных условиях. В результате полученных расчетов выбрана оптимальная мощность тягового электродвигателя (ТЭД). На основе выбранной мощности выбрана соответствующая модель двигателя, построены его тяговые характеристики. В программной среде “MatlabSimulink” выполнено моделирование тягового привода на базе ездового цикла WLTC, представлены и описаны математически блоки модели, получены зависимости $a(t)$, $E(t)$ и $V(S)$, которые подтверждают адекватность математического моделирования. Выбран соответствующий накопитель в сравнении с другими моделями.

Ключевые слова: силовая установка, тяговый привод, ездовой цикл WLTC, электромобиль, накопитель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-57-68

Введение

В настоящее время городской транспорт оказывает огромное влияние на городскую инфраструктуру. В частности, выбросы нефтепродуктов значительно ухудшают экологию. И улучшение этой инфраструктуры – приоритетное направление для исследований со всего мира. Каждый день создаются новые системы и предлагаются различные методы по улучшению существующих видов электрического транспорта. Так, приоритетным направлением для исследователей является именно городской электрический транспорт. Городской электрический транспорт имеет ряд преимуществ: он экологичен, источником энергии служит электричество, которое гораздо дешевле, чем нефтепродукты и их конструкция значительно проста в производстве. К городскому электрическому транспорту можно отнести: метро, трамваи, электробусы и электромобили и др. Но основным недостатком такого транспорта является меньший запас хода, чем у транспорта с двигателем внутреннего сгорания.

Разработка эффективного привода – электротехнического устройства, обеспечивающего движение при различных условиях эксплуатации, – это решение недостатков электрического транспорта [1]. Электротехническое устройство может включать в себя датчики, аккумуляторные батареи, электрические двигатели, электрические узлы, контроллеры и преобразователи мощности [2].

На электрическом транспорте применяются бортовые и внешние источники питания. Например, для метро и трамваев могут использоваться внешние источники, передающие энергию от станции к объекту движения через контактную сеть.

Бортовые же имеют больше преимуществ, так как необходимость в контактной сети отсутствует и источник находится на самом объекте. Бортовые источники: АКБ, суперконденсаторы, маховики, гидравлические источники и топливные элементы [3].

Контроль состояния уровня заряда (напряжение и ток) проводится во время зарядки АКБ [4].

Сложные условия эксплуатации могут привести к быстрому выходу из строя АКБ, поэтому анализ проходящих циклов может помочь оценить деградацию батареи. Для точного описания используются циклы движения, с целью измерения параметров тока (мгновенного) или скорости [5].

В текущем исследовании используется цикл WLTC, он наиболее точно приближен к реальным условиям эксплуатации. Точно описывает регресс и процессы нагрева АКБ и силовой установки. С помощью цикла WLTC смоделированный процесс движения максимально приближен к реальным эксплуатационным [6].

1. Всемирная гармонизированная процедура испытаний легких транспортных средств WLTC

На рис. 1 представлен всемирный ездовой цикл WLTC. Этот цикл используется во время эксплуатации автомобилей. Существуют, помимо WLTC, разные виды ездовых циклов: европейский, японский, китайский, американский. Все они применимы и имеют свои преимущества и недостатки [7–8].

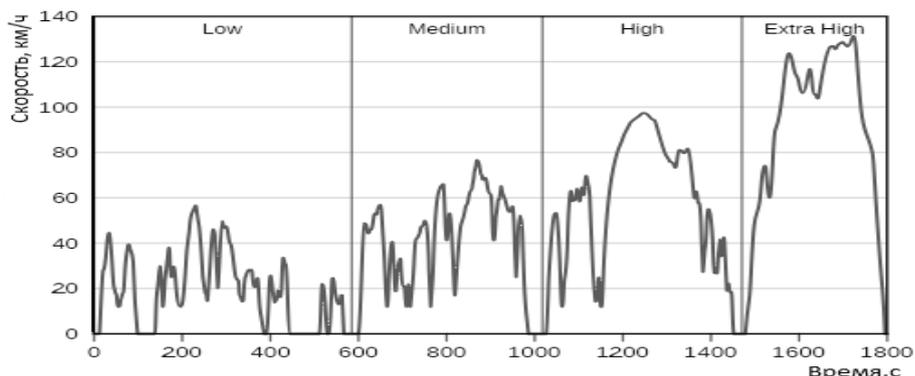


Рис. 1 – Всемирная гармонизированная процедура испытаний легких транспортных средств

Fig. 1 – Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure

Критериями циклов служит их местоположение и какие виды транспорта используются. Поэтому для анализа и моделирования, приближенного к реальным условиям, выгоднее всего брать всемирный ездовой цикл WLTC, так как он наиболее энергоэффективен и универсален. Он применим к автомобилям массой до 3500 кг. В зависимости от условий эксплуатации, например, городское движение или движение за городом, у цикла различают различные скоростные режимы:

1. Low – 56,5 км/ч;
2. Medium – 76,6 км/ч;
3. High – 97,4 км/ч;
4. Extra High – 131,6 км/ч.

Также существуют три класса энерговооруженности, обладающие параметром максимального ускорения:

- класс № 1: менее 22 Вт/кг; $a_{\max} = 0,76 \text{ м/с}^2$;
- класс № 2: от 22 до 34 Вт/кг; $a_{\max} = 0,96 \text{ м/с}^2$;
- класс № 3: более 34 Вт/кг; $a_{\max} = 1,58 \text{ м/с}^2$.

В данном исследовании принят третий класс энерговооруженности, у которого пиковая скорость достигает значения в 120 км/ч. Класс может включать в себя такие автомобили, как LADA Granta (53,3 Вт/кг), LADA Priora (49,3 Вт/кг), Chevrolet Niva (41,3 Вт/кг).

2. Выбор электродвигателя силовой установки

В качестве прототипа используется модель отечественного автомобиля LADA Granta. Данные LADA Granta представлены в табл. 1.

Таблица 1/ Table 1

Технические характеристики LADA Granta

Technical characteristics of LADA Granta

Класс	Лифтбек
Длина, мм	3995
Ширина, мм	1805
Высота, мм	1455
Количество мест	4
Снаряженная масса, кг	1130
Полная масса, кг	1440
Мощность ДВС, л.с. (кВт)	120 (88)
Привод	Передний

Максимальная мощность электродвигателя определяется следующим образом [9] (табл. 2, рис. 2):

$$P_{\max} = FV_{\max}, \quad (1)$$

где V_{\max} – максимальная скорость транспортного средства, м/с; F – тяговое усилие при максимальной мощности, Н.

Таблица 2/ Table 2

Расчетные данные для определения мощности двигателя

Calculation data to determine the engine power

V , км/ч	ω_0 , Н/кН	F , кгс			P , кВт		
		$a = 2 \text{ м/с}^2$	$a = 2,5 \text{ м/с}^2$	$a = 3 \text{ м/с}^2$	$a = 2 \text{ м/с}^2$	$a = 2,5 \text{ м/с}^2$	$a = 3 \text{ м/с}^2$
10	11,98	297	369	439	7,99	9,98	12,07
20	12,54	298	369	440	15,99	19,97	24,01
30	13,26	299	370	441	24,59	29,89	35,87
40	14,45	300	372	443	33,05	40,87	47,95
50	16,43	301	374	445	40,89	51,06	59,59
60	18,34	304	376	447	50,01	62,03	72,91
70	20,79	307	378	450	59,02	71,89	86,04

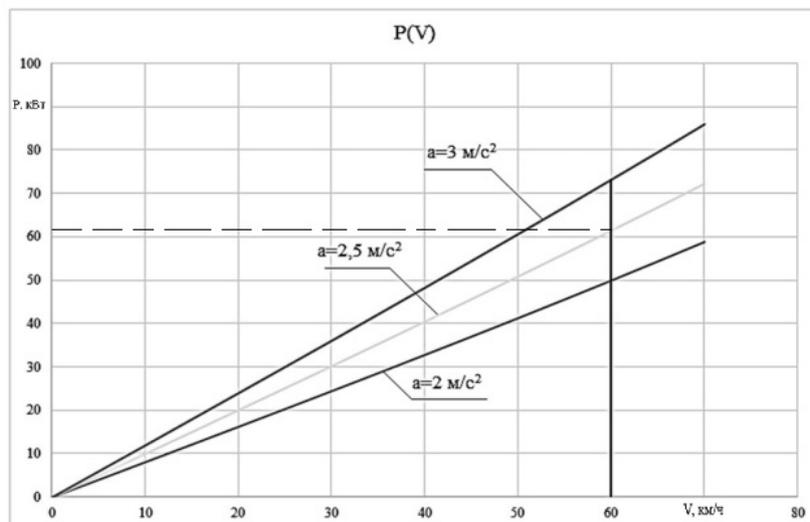


Рис. 2 – Зависимость мощности от скорости при различных ускорениях

Fig. 2 – Dependence of power on speed at various accelerations

Тяговое усилие можно выразить как

$$F = [102(1 + \gamma)G_{\text{ТС}}]a + \omega G_{\text{ТС}}, \quad (2)$$

где a – пусковое ускорение транспортного средства, принимается $a = 2 \dots 2,5 \text{ м/с}^2$; ω – удельное основное сопротивление движению Н/кН; $G_{\text{ТС}}$ – полный вес транспортного средства, $G_{\text{ТС}} 1,44 \text{ т}$; $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся масс, примем $\gamma = 0,15$.

Удельное основное сопротивление движению может быть найдено на основе эмпирической зависимости

$$\omega = 12 + 0,0018V^2. \quad (3)$$

Режим работы электродвигателя электромобиля повторно-кратковременный, в связи с чем, учитывая перегрузочную способность, можно выбрать менее мощный двигатель, чем получено в расчетах. Выберем для установки асинхронный электродвигатель Siemens 1PV5135-4WS24 (табл. 3, рис. 3) [10].

Таблица 3/Table 3

Характеристики двигателя

Engine characteristics

Параметр	Величина
Номинальное напряжение, В	520
Номинальная мощность, кВт	59
Номинальный крутящий момент, Н · м	160
Номинальный ток, А	145
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Максимальная частота вращения, об/мин	10 000
Масса, кг	90

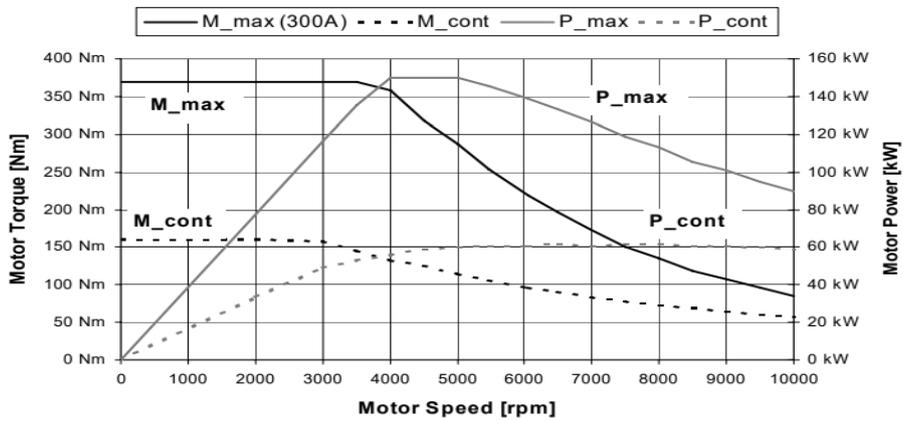


Рис. 3. – Характеристики электродвигателя

Fig. 3 – Electric motor characteristics

3. Моделирование силовой части

С учетом входных данных автомобиля, а также характеристик двигателя на базе цикла WLTC был смоделирован режим движения [11]. На рис. 4 представлена имитационная модель на базе LADA Granta. Данная модель помогает избежать громоздких вычислений и позволяет определить необходимые данные.

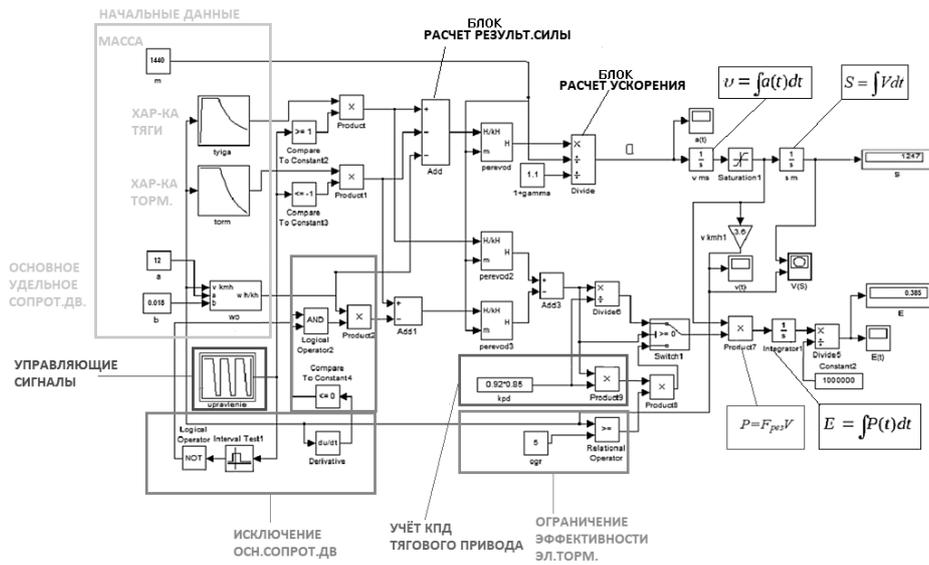


Рис. 4 – Имитационная модель на базе автомобиля LADA Granta

Fig. 4 – A simulation model based on the LADA Granta car

В результате моделирования были произведены расчеты ускорения, силы тяги и силы торможения, исходя из уравнения Ньютона. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Блок управления 1, который производит расчет силы основного сопротивления движения, представлен на рис. 5.

Таблица 4/Table 4

Полученные результаты расчета силы тяги и силы торможения

The obtained results of calculating the traction force

V , км/ч	$F_{\text{тяги}}$, Н	$F_{\text{торм}}$, Н
65	285	–
70	265	–
75	248	–
80	219	–
85	215	194
90	202	182
95	191	173
100	182	164
105	173	158
110	166	149
115	157	143
120	152	138

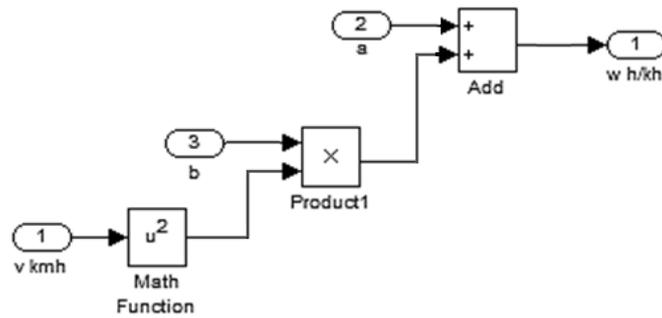


Рис. 5 – Блок управления 1

Fig. 5 – Control unit 1

Так как в имитационной модели собраны разные блоки и с различными параметрами, то для корректных расчетов необходимо, чтобы вычисления сил были представлены в одних единицах измерения. На рис. 6 представлен такой блок – перевода единиц измерения.

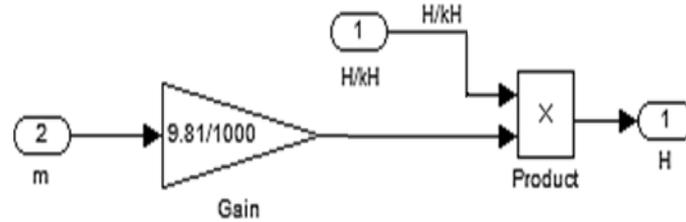


Рис. 6 – Блок перевода единиц сил

Fig. 6 – Units of force conversion block

При помощи подобных блоков можно вычислить ускорение по формуле

$$a = \frac{F_{\text{рез}}}{(1 + \gamma) * m} \tag{4}$$

Используя блок «upravlenie», можно изменять режимы ускорения и торможения, используя последовательность, которая основана на цикле WLTC, значения которой 1 и -1, соответствующей четырем этапам цикла. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5/Table 5

Блок «upravlenie»
The “upravlenie” unit

Скоростные этапы	0	17	27	40
Последовательность	1	1	-1	-1

В модели присутствуют блоки (см. рис. 5), отвечающие за вычисления по энергетике.

Данная модель является корректной, согласно графику ускорения на рис. 7. Это подтверждает и величина ускорения, которая соответствует расчетной.

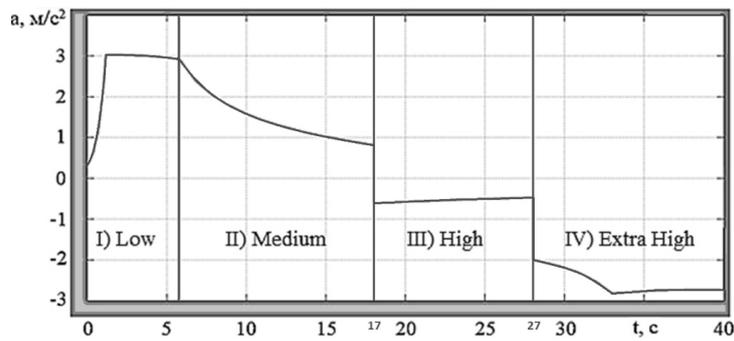


Рис. 7 – График зависимости ускорения от времени

Fig. 7 – Acceleration versus time graph

Для достижения скорости в 120 км/ч, выбега (20 %) и остановки потребуется 1,388 МДж (или 0,388 кВт · ч) энергии (рис. 8).

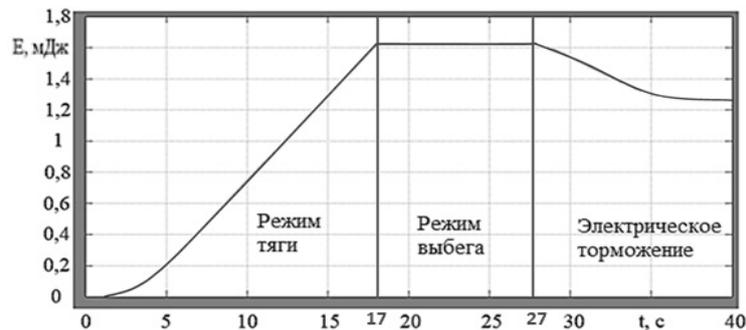


Рис. 8 – График зависимости энергии от времени

Fig. 8 – Energy versus time graph

При такой энергии общий путь, который пройдет электромобиль, составит 1247 м (рис. 9).

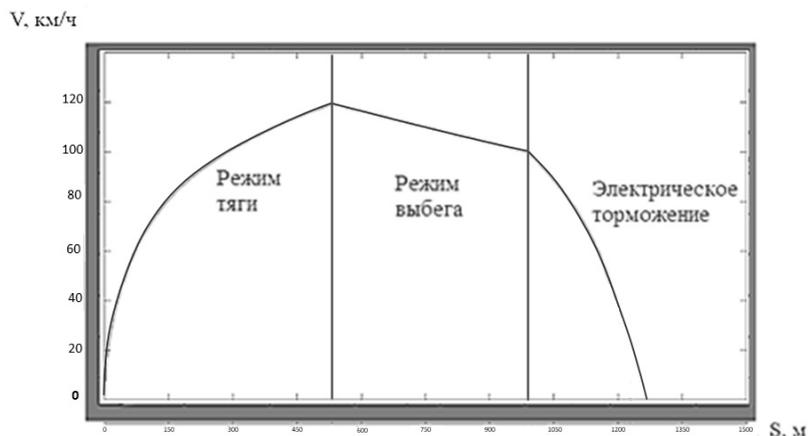


Рис. 9 – Кривая движения скорости от пройденного пути

Fig. 9 – The curve of the speed movement from the distance traveled

4. Выбор накопителя энергии

Чтобы обеспечить электромобиль запасом хода в 450 км, потребуется накопитель энергии объемом в $(450/1,247) \cdot 0,38 = 137$ кВт · ч, где $L = 450$ км – запас хода электромобиля, $S = 1,247$ км – расстояние, $E = 0,38$ кВт · ч – энергия электромобиля [12].

Для оптимального выбора накопителя энергии необходимо сравнить существующие аккумуляторы, которые будут наиболее выгодно использоваться при эксплуатации электромобиля [13–15]. Каждый тип аккумуляторов с литий-ионной структурой наиболее перспективен в качестве бортового накопителя. В табл. 6 сравниваются различные типы наиболее часто используемых литий-ионных батарей.

Таблица 6/Table 6

Сравнительная таблица литий-ионных батарей LFP, NCA, NMC

A comparative table of LFP, NCA, NMC lithium-ion batteries

Характеристика	Единица Измерения	NMC	NCA	LFP
Материалы катода	–	Оксиды никеля, марганца, кобальта, лития	Оксиды никеля, кобальта, алюминия, лития	Фосфат железа, лития
Плотность энергии, удельная	Вт · ч/кг	150–200	200–260	90–160
Напряжение элемента макс./рабочее/ мин. элемента макс./рабочее/мин.	В	4,3/3,7/2,6	4,2/3,6/3,0	3,65/3,3/2,0
Число циклов	–	1000	500	2000
Начало теплового разгона при перезарядке	°С	80	65	140
Разогрев при тепловом разгоне	°С	500–700	739–1075	283–448
Безопасность	–	Хорошо	Удовлетворительно	Отлично

Исходя из табл. 6, ввиду лучших параметров, чем с аналогами, выбран тип тяговой аккумуляторной батареи LiFePO₄.

При напряжении аккумуляторной батареи в 500 В, равном напряжению питания тягового электродвигателя, необходимая емкость накопителя составит $137\ 000/500 = 274\ \text{А} \cdot \text{ч}$.

Обеспечить подобную емкость может сборка аккумуляторной батареи на базе стандартных ячеек формата LiFePO₄ 32700.

Параметры ячейки LiFePO₄ 32700 6Ah представлены в табл. 7.

Таблица 7/Table 7

Ячейка LiFePO₄ 32700 6Ah

The LiFePO₄ 32700 6Ah Cell

Параметр	Значение
Номинальное напряжение	3,2 В
Максимальный ток разряда	Непрерывный ток разряда –3С (18А)
Максимальный ток заряда	Максимальный ток заряда –1С (6А)
Внутреннее сопротивление	≤ 8 мΩ
Число циклов до потери 20 % емкости при 1С	2000 циклов/емкость 80 %

Для обеспечения напряжения 500 В понадобится 158 ячеек LiFePO₄ 32700. Общая масса бортового источника энергии составит 524 кг.

5. Выводы

Таким образом, в процессе данного исследования были выполнены следующие задачи.

– Проанализирован цикл WLTC.

– Осуществлен расчет мощности электродвигателя, которая составила 59 кВт, построены зависимости мощности от скорости и выбрана модель электродвигателя Siemens 1PV5135-4WS24.

– Составлена имитационная модель в программной среде “MatlabSimulink” на базе цикла WLTC, получены зависимости ускорения от времени, энергии от времени, а также скорости от пройденного пути. В ходе моделирования пройденный путь электромобиля составил 1247 м, а для достижения максимальной скорости в 120 км/ч и выбега (20 %) потребуются 0,385 кВт · ч энергии.

– Чтобы обеспечить электромобиль необходимым запасом хода в 450 км потребуются буферный накопитель, объем которого составит 137 кВт · ч, а его необходимая емкость 274 А · ч. Ячейки LiFePO₄ 32700 6Ah были приняты в качестве прототипа буферного накопителя, которые размещены в электромобиле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штанг А.А., Ярославцев М.В. Контактно-аккумуляторный манёвровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 13–16.
2. Штанг А.А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 18.10.2006. – Новосибирск, 2006. – 233 с.
3. Щуров Н.И., Мятёж С.В., Малозёмов Б.В. Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 270–283.

4. **Щуров Н.И.** Энергоэффективная силовая установка для автономных транспортных средств // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 23–24 ноября 2016 г. – Новокузнецк, 2016. – С. 107–108.
5. Инновационные технологии в электротранспортных комплексах: монография / Н.И. Щуров, В.В. Бирюков, С.В. Мятеж, А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов, Б.В. Малозёмов, С.М. Кузнецов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 159 с.
6. **Малозёмов Б.В., Мятеж С.В., Щуров Н.И.** Повышение количества рабочих зон в трёхфазном выпрямителе переменного тока // Электротехника. – 2021. – № 6. – С. 56–60.
7. **Щуров Н.И., Дедов С.И.** Определение токовых нагрузок электромобиля на основе стандартизированного цикла WLTC // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. – № 1. – С. 12–16.
8. Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC / Н.И. Щуров, А.А. Штанг, С.И. Дедов, У. Сяоган // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2020. – № 13 (8). – С. 977–990. – DOI: 10.17516/1999-494X-0279.
9. **Малозёмов Б.В., Трухин Ф.В.** Повышение эффективности и надёжности тягового двигателя троллейбуса // Интеллектуальный потенциал Сибири: 26-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, 22–24 мая 2018 г.: в 2 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 650–652.
10. **Ярославцев М.В.** Определение потерь в тяговом приводе автономного транспортного средства с комбинированной энергетической установкой методом имитационного моделирования // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 1–5 дек. 2015 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 5. – С. 174–175.
11. **Дедов С.И.** Анализ современных ездовых циклов и их актуальность при определении параметров гибридной энергетической установки // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г.: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 191–194.
12. **Бирюков В.В., Панченко Ю.В.** Повышение надёжности транспортного обслуживания городов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 34–36.
13. **Спиридонов Е.А.** Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Новосибирск, 2009. – 165 с.
14. **Бирюков В.В., Бахолдин Д.А.** Электробус для внутригородских перевозок пассажиров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 196–198.
15. Источники и накопители электрической энергии на транспорте: монография / Н.И. Щуров, В.В. Бирюков, С.В. Мятеж, А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов, Б.В. Малозёмов, П.С. Лисицын, Е.Ю. Абрамов, С.И. Дедов, С.Н. Андрияшин, Р.Н. Латышев, И.И. Сингизин, П.А. Бахолдин, Д.А. Бахолдин; под ред. В.В. Бирюкова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 162 с.

MODELING THE POWER PART OF AN ELECTRIC VEHICLE BASED ON A DRIVING CYCLE

Shchurov N.I., Shabalin R.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Nowadays, improving the power train of an electric vehicle, particularly an electric vehicle, is one of the major research areas in the field of transportation vehicles. Due to unstable load levels, frequent braking and acceleration, the efficiency of the power train needs to be improved using the latest components and techniques. The aim of the paper is to develop an efficient power train for an electric vehicle based on the world driving cycle.

In this study, the existing driving cycles were analyzed and the most optimal one was selected based on its performance under different operating conditions. As a result of the obtained calculations, the optimum power of a traction motor (TEM) was selected. Based on the selected power, the corresponding model of the motor is selected and its traction characteristics are built.

In the MatlabSimulink software environment the modeling of traction drive, based on the driving cycle WLTC, is performed, the blocks of the model are presented and described mathematically, the dependencies $a(t)$, $E(t)$ and $V(S)$ are obtained, which confirm the adequacy of mathematical modeling. An appropriate drive is selected in comparison with other models.

Keywords: Power train, traction drive, WLTC drive cycle, electric vehicle, storage.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-57-68

REFERENCES

1. Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V. Kontaktno-akkumulyatornyi manevrovyyi elektrovoz s nakopitelem energii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov [Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics and electrical equipment of transport*, 2016, no. 1, pp. 13–16.
2. Shtang A.A. *Povyshenie effektivnosti elektrotransportnykh sistem na osnove ispol'zovaniya nakopitelei energii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing efficiency of electric transit systems by means of energy storage devices. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2006. 233 p.
3. Shchurov N.I., Myatezh S.V., Malozyomov B.V. Analiz i raschet neaktivnoi moshchnosti v seti pitaniya elektropotrebiteli rudnichnogo transporta [Analysis and calculation of inactive power in the power network of electric consumers of mining transport]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2022, no. 12-2, pp. 270–283.
4. Shchurov N.I. [Energy efficient power plant for autonomous vehicles]. *Avtomatizirovannyi elektrivod i promyshlennaya elektronika* [Automated electric drive and industrial electronics]. Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference. Novokuznetsk, 2016, pp. 107–108. (In Russian).
5. Shchurov N.I., Biryukov V.V., Myatezh S.V., Shtang A.A., Spiridonov E.A., Malozyomov B.V., Kuznecov S.M. *Innovatsionnye tekhnologii v elektrotransportnykh kompleksakh* [Innovative technologies in electric transport complexes]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2022. 159 p.
6. Malozyomov B.V., Myatezh S.V., Shchurov N.I. Povyshenie kolichestva rabochikh zon v trekhfaznom vypryamitele peremennogo toka [Increasing the number of working zones in a three-phase AC rectifier]. *Elektrotekhnika = Russian Electrical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 56–60. (In Russian).
7. Shchurov N.I., Dedov S.I. Opredelenie tokovykh nagruzok elektromobilya na osnove standartizirovannogo tsikla WLTC [Determination of the electric vehicle current loads based on the WLTC]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics and Electrical Equipment of Transport*, 2021, no. 1, pp. 12–16.
8. Shchurov N.I., Shtang A.A., Dedov S.I., Xiaogang Wu. Analiz vliyaniya rezhimov dvizheniya elektromobiley na protsess stareniya tyagovykh akkumulyatorov na osnove tsikla WLTC [Analysis of Electric vehicles motion modes influence on traction batteries aging based on WLTC]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2020, no. 13 (8), pp. 977–990. DOI: 10.17516/1999-494X-0279.
9. Malozyomov B.V., Trukhin F.V. [Increasing the efficiency and reliability of the trolleybus traction engine]. *Intellektual'nyi potentsial Sibiri* [Intellectual potential of Siberia]. 26th Regional Scientific Student Conference, Novosibirsk, May 22–24 2018. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018, pt. 2, pp. 650–652. (In Russian).
10. Yaroslavtsev M.V. [Determination of losses in the traction drive of an autonomous vehicle with a combined power plant using the simulation modeling method]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovation]. Collection of scientific papers, Novosibirsk, December 1–5, 2015. Novosibirsk, 2015, pt. 5, pp. 174–175. (In Russian).
11. Dedov S.I. [Analysis of modern driving cycles and their relevance in determining the parameters of a hybrid power plant]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Inno-

- vation]. Collection of scientific papers, Novosibirsk, December 4–8, 2017. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017, pt. 5, pp. 191–194. (In Russian).
12. Biryukov V.V., Panchenko Yu.V. Povyshenie nadezhnosti transportnogo obsluzhivaniya gorodov [Improving the reliability of transport services for cities]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific Problems of Transportation in Siberia and the Far East*, 2017, no. 3–4, pp. 34–36.
 13. Spiridonov E.A. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya energii v elektrotransportnykh kompleksakh s nakopitel'nymi ustroystvami. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of energy use in electric transport complexes with storage devices. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 165 p.
 14. Biryukov V.V., Bakholdin D.A. Elektrobus dlya vnutrigorodskikh perevozok passazhirovo [Electrobus for intra-city passenger transportation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka = Scientific Problems of Transportation in Siberia and the Far East*, 2017, no. 3–4, pp. 196–198.
 15. Shchurov N.I., Biryukov V.V., Myatezh S.V., Shtang A.A., Spiridonov E.A., Malozomov B.V., Lisitsyn P.S., Abramov E.Yu., Dedov S.I., Andriyashin S.N., Latyshev R.N., Singizin I.I., Bakholdin P.A. *Istochniki i nakopiteli elektricheskoi energii na transporte* [Sources and storage devices of electric energy in transport]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2023. 162 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Щуров Николай Иванович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: энергосбережение на электрическом транспорте. Опубликовано 147 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nischurov@mail.ru).

Shchurov Nikolay Ivanovich (b. 1947) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy saving in electric transport. He is the author of 147 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nischurov@mail.ru).



Шабалин Роман Викторович – родился в 1998 году, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: повышение энергоэффективности процесса рекуперации электрического транспорта. Опубликовано три научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: romanshabalinnstu@mail.ru).

Shabalin Roman Viktorovich (b. 1998) – postgraduate student at the Department of Electrical Engineering Complexes in Novosibirsk State Technical University. The area of his scientific interests includes improvement of energy efficiency of the electric transport regeneration process. He has published 3 scientific works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: romanshabalinnstu@mail.ru).

Статья поступила 02 июня 2024 г.
Received June 02, 2024

To Reference:

Shchurov N.I., Shabalin R.V. Modelirovanie silovoi chasti elektromobilya na baze ezdovogo tsikla [Modeling the power part of an electric vehicle based on a driving cycle]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 3 (64), pp. 57–68. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-57-68.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 3 (64) июль–сентябрь 2024

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 14.11.2024. Выход в свет 18.11.2024. Бумага офсетная
Формат 70×108 1/16. Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 5,95. Печ. л. 4,25. Изд. № 160. Заказ № 205
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961