

УДК 621.396

[0000-0002-6927-8663] **И. В. Забегалов**, преподаватель,

e-mail: igor\_zabegalov@meta.ua

[0000-0002-4126-8754] **Я. Э. Шарпан**, студент,

e-mail: yar\_sharpan@rambler.ru

Шосткинский профессиональный колледж имени Ивана Кожедуба

Сумского государственного университета

ул. Институтская, 1, г. Шостка, Сумская обл., 41100, Украина

[0000-0001-5941-9461] **И. И. Дихтярук**, студент,

e-mail: kotovan99@i.ua

[0000-0002-6927-8663] **С. И. Пильтяй**, к.т.н., доцент,

e-mail: piltyay\_stepan@ua.fm

[0000-0002-4987-4978] **А. В. Булашенко**, ст. преподаватель

e-mail: an\_bulashenko@i.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

## ВОЛНОВОДНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

*В статье приведена методика разработки и оптимизации системы питания рупорной антенны с круговой поляризацией. Система питания предложенной рупорной антенны состоит из прямоугольного волновода со щелью. Такая простая конструкция системы питания устраняет необходимость разработки отдельного поляризационного устройства. Спроектированная система питания рупорной антенны с круговой поляризацией используется на рабочей частоте 8,0 ГГц. Предложенная антенна обеспечивает максимальный коэффициент усиления 21 дБ для правосторонней круговой поляризации, 12 дБ для левосторонней круговой поляризации и кроссполяризационную развязку выше 10 дБ.*

**Ключевые слова:** круговая поляризация, рупорная антенна, волновод, щель, коэффициент усиления, диаграмма направленности.

**Введение.** Телекоммуникационные системы связи последнее время развиваются стремительно. Ведущее место среди них занимают сотовые системы связи 5G с новыми технологиями OFDM [1-3], M2M [4-6], D2D [7-9]. Такие технологии увеличивают качество связи, скорость передачи данных и количество обслуживаемых абонентов.

Кроме того, ведущее место среди телекоммуникационных систем связи занимают спутниковые системы связи. В них широко используются антенные системы. В таких антеннах применяется поляризационная обработка сигналов, которая использует сигналы с круговой поляризацией. Такой подход дает возможность эффективно уменьшить интерференционные помехи, которые возникают по причине многолучевого распространения сигналов [10]. Сигналы изменяют свою поляризацию благодаря отражению от разных объектов. Таким образом, на приемной стороне

удается уменьшить уровень искажений сигналов. В свою очередь это увеличивает пропускную емкость телекоммуникационных каналов связи.

Часто в системах спутниковой связи применяются рупорные антенны для фиксированных и широковещательных услуг [11, 12]. Более того, такие антенны применяются для спутниковой картографии высокого разрешения, для систем отслеживания спутников в диапазоне от 7,25 ГГц до 14,5 ГГц [13]. Диапазон частот 12,75–13,25 ГГц применяют в восходящих линиях связи для коммерческого телевидения и фиксированной спутниковой связи [14].

Сигналы с круговой поляризацией широко применяются различными спутниковыми системами связи. Среди них можно выделить системы отслеживания телеметрии и дистанционного управления, системы дистанционного зондирования и спутниковой связи [15, 16].

Традиционно поляризационные устройства осуществляют поляризационную обработку. Такие устройства, как правило, конструируются на основе прямоугольного или круглого волновода [17-19]. Ключевыми элементами таких устройств являются реактивности, которые располагаются внутри волновода. Благодаря такой особенности на их выходе формируется сдвиг фазы между основными модами в  $90^\circ$ . Среди таких структур первыми появились структуры со штырями цилиндрической и прямоугольной формы [20-22]. Данные поляризаторы являются относительно узкополосными. Далее следует выделить волноводные поляризаторы на основе реактивных элементов в виде индуктивных и емкостных диафрагм [23-29]. Сегодня существует большое количество методик по расчету таких устройств [30-36]. Особое внимание занимают конструкции с диафрагмами в виде щелевых структур [37-39]. Такие структуры обладают более широкой полосой частот по сравнению со структурами в виде штырей. Более того, используются комбинированные поляризационные устройства в виде диафрагм и штырей [40, 41]. Такой подход дает возможность осуществлять настройку устройств. Также существуют поляризационные устройства на основе коаксиальных и ребристых волноводов [42-48]. Эти конструкции позволяют расширить полосу пропускания устройств за счет периодических структур, но их конструкции имеют сложную форму и удлиненные размеры. Последнее время широкое распространение получили поляризационные устройства на основе волноводов с перегородками различной формы [49]. Поляризаторы с перегородкой применяются в системах связи 5G [50].

Кроме того, поляризационную обработку сигналов может осуществлять система питания конической или пирамидальной рупорной антенны. Применение рупорной антенны обеспечивает следующие преимущества: высокий коэффициент усиления антенны, высокий коэффициент полезного действия, простая конструкция. Более того, рупорные антенны обеспечивают меньшие квадратичные фазовые ошибки, что приводит к более узкой диаграмме направленности. Круговую поляризацию можно получить с помощью металлической перегородки в круглых волноводах, добавления гофр в волновод, диэлектрических пластин, канавок или диафрагм.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В [51] описывается конструкция рупорной антенны, которая работает в двух диапазонах частот. Антенна работает на передачу в С-диапазоне частот 5,85–6,65 ГГц и в Х-диапазоне частот 7,9–8,4 ГГц. Кроме того, данная антенна работает в режиме приема в С-диапазоне 3,4–4,2 ГГц и в Х-диапазоне 7,25–7,75 ГГц. Такая многодиапазонная рупорная антенна с двойной круговой поляризацией применяется в спутниковой связи. Она обеспечивает одновременное излучение сигналов с высокой мощностью и прием сигналов с низким уровнем шумов. В качестве питания широкополосной рефлекторной антенны были предложены рупорные антенны различной геометрии в [52]. Конструкция предложенной рупорной антенны была в виде гребней, что значительно улучшило излучающие характеристики рупора. Кроме того, такой рупор с эллиптической боковой стенкой питает рефлекторную антенну с широкой полосой. Такой рупор поддерживает ширину луча 10 дБ в широком диапазоне частот. Результаты разработки системы питания антенны описаны в работе [53]. Предложенная конструкция за счет круглого волновода содержит механизмы поляризационного преобразования в виде канавок. Благодаря этому формируются сигналы с круговой поляризацией. Разработанная система обеспечивает наибольшую величину коэффициента эллиптичности 1,2 дБ в диапазоне частот от 79,5 ГГц до 88 ГГц. К сожалению, такую конструкцию сложно изготовить, что ограничивает ее область применения. В [54] представлена конструкция широкополосной антенны с двойной круговой поляризацией. Антенна разработана на основе оптимизированного поляризатора с перегородкой и рупорной антенны в W-диапазоне частот. Предложенная антенна может принимать два сигнала с круговой поляризацией одновременно. Такими сигналами являются сигналы с левой круговой поляризацией и сигналы с правой круговой поляризацией. Предложенная антенна в полосе частот 76,8–94,7 ГГц обеспечивает максимальное значение коэффициента эллиптичности 5,8 дБ, максимальное значение коэффициента отражения -15 дБ и минимальное значение изоляции между поляризациями 20 дБ. Высокопроизводительная рупорная антенна с двойной круговой поляризацией в V-диапазоне частот 54–60 ГГц была предложена в [55]. Данная антенна имеет

в своей основе круглый волновод, который питают два порта в форме канавок. Каждая отдельная канавка наклонена под углом  $45^\circ$  по отношению к входным портам. Такое расположение обеспечивает сдвиг фаз в  $90^\circ$  на выходе. В результате такая система формирует правую круговую поляризацию и левую круговую поляризацию. Разработанная рупорная антенна обеспечивает наибольшее значение коэффициента эллиптичности 2,2 дБ. Изоляция между портами составляет более 15 дБ, а поляризационная развязка – более 25 дБ во всем рабочем диапазоне частот. Более того, такая антенна обеспечивает симметричные диаграммы направленности. В [56] описана конструкция компактной рупорной антенны с круговой поляризацией в W-диапазоне частот 75–110 ГГц. Питание антенны осуществляется через щель, которая расположена под углом  $45^\circ$  к оси круглого волновода. Такая конфигурация дает возможность получить излучение с широкой полосой частот и круговой поляризацией. Разработанная антенна может поддерживать коэффициент эллиптичности менее 3 дБ. Конструкция двухдиапазонной рупорной антенны с круговой поляризацией представлена в [57]. Рупорная антенна сделана в виде неоднородного гофра. При синтезе данной антенны используют комбинацию метода согласования мод и генетического алгоритма. Предложенная рупорная антенна имеет 19 неоднородных гофров в секциях преобразования мод. Антенна была спроектирована для K-диапазона 19,6–21,2 ГГц и для Ka-диапазона частот 29,4–31 ГГц. Представленная конструкция антенного устройства обеспечивает хорошую поляризацию, низкий уровень боковых лепестков и симметричные диаграммы направленности. В [58] представлены результаты разработки гофрированной рупорной антенны с круговой поляризацией в X-диапазоне. Данная конструкция состоит из отражательной решетки в виде заземленного диэлектрического слоя толщиной 0,5–10 мм. Благодаря этому антенное устройство формирует сигналы с левой круговой поляризацией и сигналы с правой круговой поляризацией. Конструкция новой рупорной антенны в виде пары скрученных гребней с круговой поляризацией представлена в [59]. Такая конструкция гребней позволяет достичь полосы пропускания с широким осевым отношением. Кроме того, предложенная конструкция дает возможность осуществлять настройку согласования сопро-

тивления. С помощью программы CST Microwave Studio в X-диапазоне частот была смоделирована схема формирования сигналов с правой круговой поляризацией. Такая антенна обеспечивает пиковое усиление антенны от 8,0 дБ до 10,1 дБ в рабочем диапазоне частот. Кроме того, пиковое значение коэффициента эллиптичности составляет 3 дБ в двух диапазонах частот 7,43–12,8 ГГц и 7,63–15,00 ГГц. В [60] приведены результаты конструирования рупорной антенны с круговой поляризацией. В разработанной антенне можно возбуждать моды высшего порядка. Рассмотренная конструкция антенны состоит из металлических пластин, которые размещены на отверстиях конической рупорной антенны. Металлическая антенна поддерживает коэффициент эллиптичности менее 3 дБ в диапазоне частот 2,95–3,31 ГГц.

Таким образом, разработка рупорных антенн в качестве систем питания спутниковых антенных систем является сегодня актуальной задачей.

**Цель и задачи исследования.** Целью данной статьи является повышение эффективности рупорной антенны с круговой поляризацией для спутникового диапазона частот 7,5–10,0 ГГц за счет улучшения характеристик максимального усиления и отражения.

Для этого решаются следующие задачи:

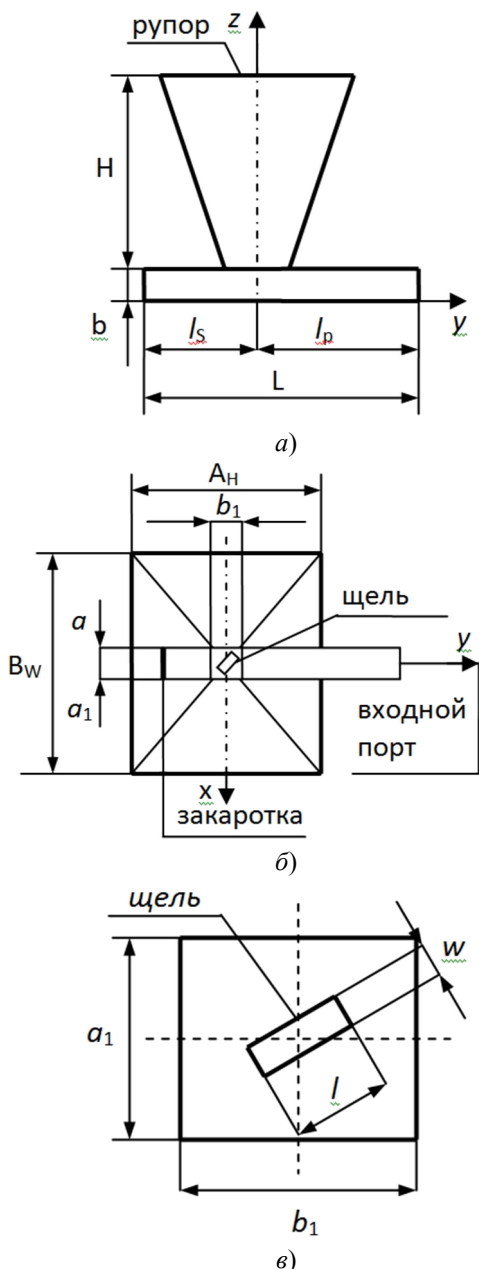
1. Создание соответствующей системы питания антенны, что обеспечит прием сигналов с разными видами поляризаций.

2. Оптимизация характеристик антенного устройства в рабочем диапазоне частот 7,5–10,0 ГГц. Коэффициент усиления разработанной рупорной антенны должен превышать 20 дБ для правой круговой поляризации и 10 дБ для левой круговой поляризации. При этом устройство должно обеспечивать надлежащий коэффициент отражения на рабочей частоте на уровне, превышающем значение -16 дБ.

**Изложение основного материала.** На рисунке 1 представлена конструкция пирамидальной рупорной антенны с системой питания в виде щели. Эта щель прорезана в прямоугольном волноводе. С одной стороны она имеет короткое замыкание, которая увеличивает эффективность за счет минимизации потерь. С другой стороны она имеет входной порт. Для получения круговой поляризации в волновод помещают щель под наклоном. Центр щели расположен на расстоянии половины длины вол-

ны, а длина щели должна быть приблизительно равной половине длины волны в свободном пространстве. Размер сечения прямоугольного волновода выбран таким образом, чтобы в нем распространялись лишь моды  $TE_{10}$  и  $TE_{01}$ .

Такая конструкция системы питания использует прямоугольный волновод со щелью под углом  $45^\circ$  в широкой стенке прямоугольного волновода. Такой подход обеспечивает преимущества по конструкции, весу, объему, управляемой мощности, направленности и эффективности.



а) вид сбоку; б) вид сверху; в) увеличенный вид щелевого отверстия

**Рисунок 1 – Система питания рупорной антенны через щелевое отверстие**

Фазовый сдвиг на выходе рупорной антенны обеспечивается при помощи следующего выражения [10]:

$$\Delta\varphi = \beta_1 L - \beta_2 L = 90^\circ, \quad (1)$$

где  $\beta_1$  является постоянной распространения моды  $TE_{10}$ ,  $\beta_2$  является постоянной распространения моды  $TE_{01}$ .

В соответствии с теорией волноводов постоянная распространения в прямоугольном волноводе определяется выражением [61]

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве,  $a$  и  $b$  – величины размеров широкой и узкой стенок прямоугольного волновода.

Длина волны в волноводе определяется

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_C}\right)^2}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_C$  – критическая длина волны в волноводе,  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве.

В [61] предлагается длина  $L$  прямоугольного волновода в направлении распространения  $y$  больше  $0,75 \lambda_B$ , где  $\lambda_B$  – длина волны в прямоугольном волноводе. Она определяется как расстояние между двумя равными фазовыми плоскостями вдоль волновода.

С помощью выражений (1), (2) для рабочей частоты 8 ГГц были определены длина и ширина прямоугольного волновода:  $a = 18,35$  мм,  $b = 17,85$  мм и  $L = 15,4$  см.

После добавления щели тангенциальные компоненты полей  $E$  и  $H$  должны быть непрерывными через прорезь и волновод [12]. Вблизи резонанса напряжение примерно синусоидальное с длиной волны в свободном пространстве, при этом ток обращается в нуль на концах щели. Амплитуда напряжения зависит от длины и ширины щели. За пределами области резонанса напряжение относительно низкое. Электрическое поле, которое формируется в этой щели, производит текущее смещение, что заменяет прерывистый ток проводимости [12]. Следующий в системе координат, представленной на рисунке 1, ток в направлении  $y$  будет прерванный.

Для получения круговой поляризации щель должна быть вырезана в верхней части стенки прямоугольного волновода под углом  $45^\circ$  (рисунок 1). Центр наклонной щели должен совпадать с фазовым центром пирамидального рупора, в котором происходит возбуждение электромагнитной волны. Соответствующие размеры наклонной щели выбирают таким образом, чтобы возбуждение в прямоугольном волноводе привело к появлению двух ортогональных мод ( $TE_{10}$  и  $TE_{01}$ ) одинаковой амплитуды [10]. Такой подход обеспечивает отличную общую поляризацию (правая круговая поляризация, RHCP). Напротив, если щель имеет угол  $45^\circ$  с наклоном влево, затем кроссполяризация (левая круговая поляризация, LHCP).

Расстояние от центра щели до закороченного конца прямоугольного волновода было оптимизировано при  $l_s = 0,51 \lambda_0$ , а расстояние от центра щели до порта ввода определялось значением  $l_p = 0,92 \lambda_0$ . Щель располагалась так, чтобы минимизировать коэффициент отражения в порте подачи. Таким образом, волновое сопротивление в центре щели примерно было равным импедансу свободного пространства. В результате, размеры щели были оптимизированы для достижения наилучшего коэффициента отражения на резонансной частоте. Ширина щели была определена из выражения  $0,12 \lambda_0$ , а длина щели определена из выражения  $0,54 \lambda_0$ .

Подход классической теории [13] использовался для анализа излучающих характеристик пирамидального рупора и для проверки осуществимости конструкции рупора элемента. Предположим, что фазовое распределение на устье пирамидального рупора меняется по направлениям  $x$  и  $y$  с равномерной квадратной скоростью.

Пирамидальный рупор возбуждается волнами  $TE_{10}$  и  $TE_{01}$  в волновод и его полное поле в апертуре определяются следующими выражениями [10]:

$$\begin{cases} E_s = \hat{y}E_y^{10} + \hat{x}jE_x^{01}, \\ H_s = -\frac{\hat{x}E_y^{10}}{Z_0} + \frac{\hat{y}jE_x^{01}}{Z_0}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $Z_0$  – волновое сопротивление в свободном пространстве,  $E_y^{10}$  – электрическое поле

на оси  $y$  для моды  $TE_{10}$ ,  $E_x^{01}$  – электрическое поле на оси  $x$  для моды  $TE_{01}$ .

Рупор антенны сконструирован по принципу согласования входного импеданса так, чтобы импеданс внутри рупора имел плавное изменение в соответствии с импедансом свободного пространства. Геометрические размеры рупорной антенны можно оптимально рассчитать с применением уравнения пирамидального рупора [61], если известны коэффициент усиления (21 дБ), рабочая частота (8 ГГц) и размер основания рупора ( $a_1$  и  $b_1$ ). Оптимальный пирамидальный рупор производит максимальное усиление в плоскостях  $E$  и  $H$ . Диаграмма направленности рупорной антенны будет зависеть от  $A_H$  и  $B_w$  (размеры рупора в отверстии) и  $H$  (длина рупора (рисунок 1)), что также влияет на углы раскрытия рупора) вместе с  $a_1$  и  $b_1$ . Работа будет сосредоточена на определении остальных размеров для достижения желаемого усиления в зависимости от апертуры рупора, ширины рупора и высоты рупора [59]. Угол раскрытия должен обеспечиваться в диапазоне от  $0$  до  $90^\circ$  для поддержания минимального отражения и максимального усиления.

Процесс оптимизации осуществляется по следующей методике [12].

**Результаты исследования.** На рисунке 2 приведена зависимость коэффициента отражения в рабочем диапазоне частот 7,5–10 ГГц.

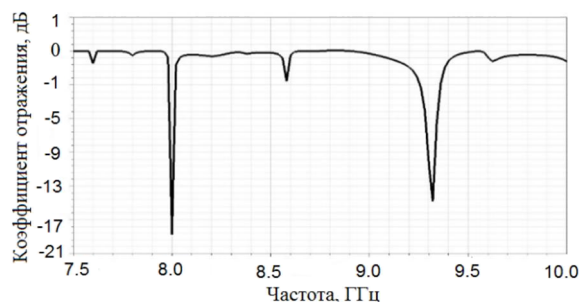


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента отражения от частоты

Из рисунка 2 видно, что коэффициент отражения на частоте 8,0 ГГц принимает значение -19 дБ. Кроме того, можно отметить, что на частоте 9,42 ГГц коэффициент отражения составляет -15 дБ.

На рисунках 3 и 4 приведена зависимость коэффициента усиления от угла для основной поляризации и кроссполяризации на частоте

8,0 ГГц для углов  $\psi = 0^\circ$  и  $\psi = 45^\circ$ . Разница между усилениями правосторонней круговой поляризации (ПСКП) и левосторонней круговой поляризации (ЛСКП) принимает значение порядка 10 дБ. Разработанная рупорная антенна обеспечивает коэффициент усиления для общей поляризации 21 дБ для правосторонней круговой поляризации и усиление по кроссполяризации 12,5 дБ на центральной частоте диапазона  $f = 8,0$  ГГц.

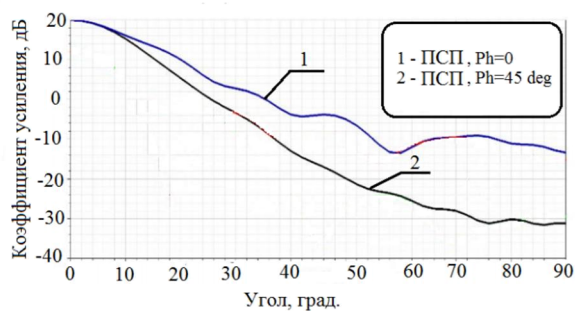


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента усиления от угла для ПСКП

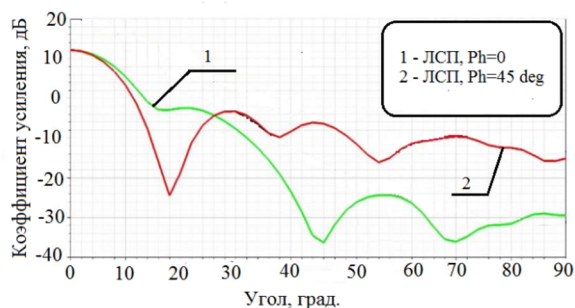


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления от угла для ЛСКП

Стоит отметить, что максимальное усиление для  $0^\circ$  составляет 12 дБ для левосторонней круговой поляризации при значении углов  $\psi = 0^\circ$  и  $\psi = 45^\circ$ .

**Обсуждение результатов.** Все геометрические размеры разработанной системы питания рупорной антенны представлены в таблице 1. Эти размеры предложенного устройства были получены в результате процедуры оптимизации для рабочего диапазона частот 7,5–10,0 ГГц.

Размеры основания рупора ( $a_1$  и  $b_1$ ) выбираются так, чтобы рупорная антенна располагалась по центру щели. Это также должно соответствовать щели внутри таким образом, чтобы  $b_1 \leq a_1$  и  $b_1 > 15$  мм. Наименьшие найденные размеры:  $a_1 = a = 18,34$  мм и  $b_1 = 15,75$  мм.

Таблица 1 – Геометрические размеры разработанного рупорного устройства для рабочего диапазона частот 7,5–10,0 ГГц

Размер	Значение
Длина апертуры рупора, $A_H$	161,1 мм
Ширина апертуры рупора, $B_w$	130,5 мм
Высота рупора, $H$	201 мм
Величина широкой стенки прямоугольного волновода, $a$	18,34 мм
Величина узкой стенки прямоугольного волновода, $b$	17,85 мм
Длина прямоугольного волновода, $L$	153,97 мм
Расстояние от центра щели до закороченной стороны, $l_s$	55,12 мм
Расстояние от центра щели до входа, $l_p$	98,75 мм
Ширина щели, $w$	3,58 мм
Длина щели, $l$	17,95 мм
Длина от основания рупора, $a_1$	18,34 мм
Ширина от основания рупора, $b_1$	15,75 мм

Другие основные конструктивные параметры системы питания рупорной антенны определены следующим образом:  $A_H = 161,1$  мм (длина апертуры рупора),  $B_w = 130,5$  мм (ширина рупора) и  $H = 201$  мм (высота рупора). Размеры апертуры как в  $E$ , так и в  $H$  плоскости направления пирамидального рупора зависят от длины волны и были рассчитаны в соответствии с методикой [61]. Было установлено целевое значение усиления 21 дБ и высота рупорной антенны в плоскостях  $E$  и  $H$  равными.

**Выводы.** В статье предложена методика разработки и оптимизации системы питания рупорной антенны с круговой поляризацией. С ее помощью были улучшены коэффициент усиления и коэффициент отражения разработанной рупорной антенны. Предложенная конструкция используется на рабочей частоте 8,0 ГГц. Система питания антенны сделана в виде щели, которая размещена под углом  $45^\circ$ . Такая конструкция позволяет формировать две ортогональные моды, что обеспечивает сдвиг фазы на выходе  $90^\circ$ . Антенна обеспечивает максимальное усиление 21 дБ для правосторонней круговой поляризации и 12 дБ для левосторонней круговой поляризации.

С практической точки зрения, разработанную рупорную антенну с питанием в виде щели можно применять в спутниковых антенных системах с поляризационной обработкой сигналов. Будущие исследования необходимо сфокусировать на усовершенствовании предложенной методики за счет улучшения коэффициента усиления.

#### Список использованных источников

- [1] O. Yu. Myronchuk et al., "Two-stage method for joint estimation of information symbols and channel frequency response in OFDM communication systems", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 8, pp. 418-429, 2020.  
doi: 10.3103/S073527272008004X.
- [2] O. Myronchuk et al., "Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, 2020.  
doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.
- [3] А. Ю. Мирончук и др., "Метод оценивания частотной характеристики канала в OFDM системах на основе фильтрации и экстраполяции пилот-сигналов", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 78, с. 36-42, 2019.  
doi: 10.20535/RADAP.2019.78.36-42.
- [4] A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishuk, and O. Bulashenko, "New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 125-131.  
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
- [5] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Wireless sensor networks connectivity in heterogeneous 5G mobile systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 508-513.
- [6] А. В. Булашенко, "Розподіл ресурсів для пристроїв малої потужності технології M2M в мережах 5G", *Наукові вісті КПІ*, вип. 3, с. 7-13, 2020.  
doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863.
- [7] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G network", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 324-329.
- [8] А. В. Булашенко, "Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 81, с. 21-29, 2020.  
doi: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
- [9] А. В. Булашенко, "Комбінований критерій вибору маршрутизації D2D технології", *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, № 1, с. 7-13, 2021.  
doi: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
- [10] W. L. Stutzman, *Polarization in electromagnetic systems*. Norwood, Artech House, 2018.
- [11] M. Fartookzadeh, and S. H. M. Armakiat, "Design of metasurface polarization converter for near-field application; stacked conical horn antenna for circular polarization", *Int. Journal of RF and Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 7, p. e21712, 2019.  
doi: 10.1002/MMCE.21712.
- [12] A. Densmore, Y. Rahmat-Samii, and G. Seck, "Corrugated-conical horn analysis using aperture field with quadratic phase", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3453-3457, 2011.  
doi: 10.1109/TAP.2011.2161552.
- [13] C. Granet, T. S. Bird and G. L. James, "Compact multimode horn with low side lobes for global Earth coverage", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1125-1133, 2000.  
doi: 10.1109/8.876332.
- [14] B. Guan, Y. Kuang, and Z. P. Chen, "Canceling the cross-polarization of the difference modes in a circular aperture multimode monopulse feed", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6734-6741, 2018.  
doi: 10.1109/TAP.2018.2869616.
- [15] F. Dubrovka et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 196-202.  
doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
- [16] J. Gmez et al., "Dual K-band/S-band tracking ground station antenna for future earth observation applications", in *2019 8th Int. Workshop on Tracking Telemetry and Command Systems for Space Applications*

- (TTC). Darmstadt, Germany, pp. 1-5, 2019. doi: 10.1109/TTC.2019.8895276.
- [17] S.-M. Hwang, and B.-C. Ahn, "New design method for a dual band waveguide iris polarizer", in *IEEE Int. Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, 2007. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
- [18] Y. Liu, F. Li, H. Li, and H. He, "Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer", in *IEEE Global Symposium on Millimeter Wave*, Nanjing, China, 2008. doi: 10.1109/GSMM.2007.4393644.
- [19] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
- [20] S. Piltyay et al., "Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts", *Path of Science*, vol. 6, no. 11, pp. 5001-5010, 2020. doi: 10.22178/pos.55-1.
- [21] Г. С. Кушнір та ін., "Компактний хвилевідний поляризатор із трьома протифазними штирями", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 5, с. 97-104, 2020. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
- [22] Є. І. Калініченко та ін., "Регульований поляризатор на основі квадратного хвилеводу із діафрагмами та штирями", *Технічна інженерія*, вип. 86, № 2, с. 108-116, 2020. doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.
- [23] B. Subbarao, and V. F. Fusco, "Compact coaxial-fed CP polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters*, vol. 3, pp. 145-147, 2004. doi: 10.1109/LAWP.2004.831084.
- [24] F. F. Dubrovka et al., "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*. Odessa, 2013, pp. 473-474. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
- [25] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(5).05024.
- [26] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [27] S. I. Piltyay et al., "Numerical performance of FEM and FDTD methods for the simulation of waveguide polarizers", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 84, pp. 11-21, 2021. doi: 10.20535/RADAP.2021.84.11-21.
- [28] S.-M. Hwang et al., "Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication", in *IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*. Singapore, 2012. doi: 10.1109/APCAP.2012.63332020.
- [29] Е. І. Калиніченко и др., "Высокоэффективный волноводный поляризатор для спутниковых информационных систем", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, вип. 4, с. 14-26, 2020. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129.
- [30] G. Virone et al., "Combined-phase-shift waveguide polarizer", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 509-511, 2008. doi: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
- [31] A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, and L. A. Rud, "Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers", in *IX IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 470-472. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
- [32] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [33] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
- [34] A. V. Bulashenko, and S. I. Piltyay, "Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 83, pp. 17-28, 2020. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.

- [35] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises", *Science-Based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287-297, 2020. doi: 10.18372/2310-5461.47.14878.
- [36] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, p. 06026, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(6).06026.
- [37] D. Yu. Kulik et al., "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- [38] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20.
- [39] A. A. Kirilenko et al., "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019. doi: 10.1109/TMTT.2018.2881089.
- [40] A. Bulashenko, S. Piltyay, Ye. Kalinichenko, and O. Bulashenko, "Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 330-336. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
- [41] S. Piltyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.
- [42] S. Piltyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, and O. Bulashenko, "FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.
- [43] L. A. Rud, and K. S. Shpachenko, "Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 458-463, 2012. doi: 10.3103/S0735272712100044.
- [44] S. I. Piltyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495. doi: 10.1109/MMET.2012.6331195.
- [45] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Comm. Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014. doi: 10.3103/S0735272714020010.
- [46] S. I. Piltyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radioteknika Radioaparaturbuduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013. doi: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- [47] F. Dubrovka et al., "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv, 2012, p. 191.
- [48] F. Dubrovka et al., "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Science*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014. doi: 10.20535/2411-2976.12014.48-61.
- [49] F. Dubrovka et al., "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 135-138. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- [50] K. Al-Amoodi et al., "A compact substrate integrated waveguide notched-septum polarizer for 5G mobile device", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2517-2521, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.3038404.
- [51] P. Sarasa, A. Baussois, and P. Regnier, "A compact single-horn C/X dual band and circular polarized Tx & Rx antenna system", in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*. Monterey, 2004. doi: 10.1109/APS.2004.1332019.
- [52] O. B. Jacobs, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Elliptically shaped quad-ridged horn antennas as feed for reflector", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 756-759, 2011. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050.

- [53] G. Mishra, S. K. Sharma, and J.-C. Chieh, "A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1904-1909, 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [54] C. Shu et al., "A wideband dual-circular-polarization horn antenna for mmWave Wireless Communications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1726-1730, 2019. doi: 10.1109/LAWP.2019.2927933.
- [55] N. Luo et al., "A millimeter-wave (V-band) dual-circular-polarized horn antenna based on an inbuilt monogroove polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1933-1937, 2020. doi: 10.1109/TAP.2020.3015745.
- [56] H.-Y. Yu et al., "Wideband circularly polarized horn antenna exploiting open slotted end structure", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 267-271, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.2964623.
- [57] J.-R. Qi et al., "Dual-band circular-polarization horn antenna with completely inhomogeneous corrugations", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 751-755, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.2978878.
- [58] A. Caliskan, F. Gunes, and A. S. Turk, "Circularly polarized corrugated horn fed nonuniform reflectarray antenna", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252806.
- [59] K. Lu, K. W. Leung, and N. Yang, "3-D-printed circularly polarized twisted-ridge horn antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1746-1750, 2021. doi: 10.1109/TAP.2020.3031764.
- [60] S. V. Yadav, and A. Chittora, "Circularly polarized high-power antenna with higher-order mode excitation", *Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 1, pp. 1-5, 2021. doi: 10.1017/S1759078721000611.
- [61] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*, Hoboken, John Wiley and Sons, 2005.
- ### References
- [1] O. Yu. Myronchuk et al., "Two-stage method for joint estimation of information symbols and channel frequency response in OFDM communication systems", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 8, pp. 418-429, 2020. doi: 10.3103/S073527272008004X.
- [2] O. Myronchuk et al., "Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, 2020. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.
- [3] A. Yu. Myronchuk et al., "Channel frequency response estimation method based on pilot's filtration and extrapolation", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, no. 78, pp. 36-42, 2019 [in Russian]. doi: 10.20535/RADAP.2019.78.36-42.
- [4] A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishuk, and O. Bulashenko, "New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 125-131. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
- [5] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Wireless sensor networks connectivity in heterogeneous 5G mobile systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 508-513.
- [6] A. V. Bulashenko, "Resource allocation for low-power devices of M2M technology in 5G networks", *Naukovi visti KPI*, vol. 3, pp. 7-13, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863
- [7] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G network", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 324-329.
- [8] A. V. Bulashenko, "Evaluation of D2D communications in 5G networks", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, no. 81, pp. 21-29, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.

- [9] A. V. Bulashenko, "Combined criterion for the choice of routing based on D2D technology", *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, no. 1, pp. 7-13, 2021 [in Ukrainian]. doi: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
- [10] W. L. Stutzman, *Polarization in electromagnetic systems*. Norwood, Artech House, 2018.
- [11] M. Fartookzadeh, and S. H. M. Armakiat, "Design of metasurface polarization converter for near-field application; stacked conical horn antenna for circular polarization", *Int. Journal of RF and Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 7, p. e21712, 2019. doi: 10.1002/MMCE.21712.
- [12] A. Densmore, Y. Rahmat-Samii, and G. Seck, "Corrugated-conical horn analysis using aperture field with quadratic phase", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3453-3457, 2011. doi: 10.1109/TAP.2011.2161552.
- [13] C. Granet, T. S. Bird and G. L. James, "Compact multimode horn with low side-lobes for global Earth coverage", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1125-1133, 2000. doi: 10.1109/8.876332.
- [14] B. Guan, Y. Kuang, and Z. P. Chen, "Canceling the cross-polarization of the difference modes in a circular aperture multimode monopulse feed", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6734-6741, 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2869616.
- [15] F. Dubrovka et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 196-202. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
- [16] J. Gmez et al., "Dual K-band/S-band tracking ground station antenna for future earth observation applications", in *2019 8th Int. Workshop on Tracking Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC)*. Darmstadt, Germany, pp. 1-5, 2019. doi: 10.1109/TTC.2019.8895276.
- [17] S.-M. Hwang, and B.-C. Ahn, "New design method for a dual band waveguide iris polarizer", in *IEEE Int. Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, 2007. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
- [18] Y. Liu, F. Li, H. Li, and H. He, "Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer", in *IEEE Global Symposium on Millimeter Wave*, Nanjing, China, 2008. doi: 10.1109/GSMM.2007.4393644.
- [19] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
- [20] S. Piltyay et al., "Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts", *Path of Science*, vol. 6, no. 11, pp. 5001-5010, 2020. doi: 10.22178/pos.55-1.
- [21] H. S. Kushnir et al., "Compact waveguide polarizer with three antiphase posts", *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, vol. 5, pp. 97-104, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
- [22] Ye. I. Kalinichenko et al., "Adjustable polarizer based on a square waveguide with diaphragms and pins", *Tekhnichna inzheneriia*, vol. 86, no. 2, pp. 108-116, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.
- [23] B. Subbarao, and V. F. Fusco, "Compact coaxial-fed CP polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters*, vol. 3, pp. 145-147, 2004. doi: 10.1109/LAWP.2004.831084.
- [24] F. F. Dubrovka et al., "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*. Odessa, 2013, pp. 473-474. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
- [25] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(5).05024.
- [26] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [27] S. I. Piltyay et al., "Numerical performance of FEM and FDTD methods for the simula-

- tion of waveguide polarizers", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 84, pp. 11-21, 2021.  
doi: 10.20535/RADAP.2021.84.11-21.
- [28] S.-M. Hwang et al., "Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication", in *IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*. Singapore, 2012.  
doi: 10.1109/APCAP.2012.63332020.
- [29] Ye. I. Kalinichenko et al., "High performance waveguide polarizer for satellite information systems", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 4, pp. 14-26, 2020 [in Russian].  
doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129
- [30] G. Virone et al., "Combined-phase-shift waveguide polarizer", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 509-511, 2008.  
doi: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
- [31] A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, and L. A. Rud, "Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers", in *IX IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 470-472.  
doi: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
- [32] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [33] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020.  
doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
- [34] A. V. Bulashenko, and S. I. Piltyay, "Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 83, pp. 17-28, 2020.  
doi: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
- [35] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises", *Science-Based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287-297, 2020.  
doi: 10.18372/2310-5461.47.14878.
- [36] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, p. 06026, 2020.  
doi: 10.21272/jnep.12(6).06026.
- [37] D. Yu. Kulik et al., "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016.  
doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- [38] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017.  
doi: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20.
- [39] A. A. Kirilenko et al., "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019.  
doi: 10.1109/TMTT.2018.2881089.
- [40] A. Bulashenko, S. Piltyay, Ye. Kalinichenko, and O. Bulashenko, "Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 330-336.  
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
- [41] S. Piltyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137.  
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.
- [42] S. Piltyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, and O. Bulashenko, "FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137.  
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.
- [43] L. A. Rud, and K. S. Shpachenko, "Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 458-463, 2012.  
doi: 10.3103/S0735272712100044.
- [44] S. I. Piltyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495.  
doi: 10.1109/MMET.2012.6331195.

- [45] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Comm. Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014. doi: 10.3103/S0735272714020010.
- [46] S. I. Piltyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013. doi: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- [47] F. Dubrovka et al., "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv, 2012, p. 191.
- [48] F. Dubrovka et al., "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Science*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014. doi: 10.20535/2411-2976.12014.48-61.
- [49] F. Dubrovka et al., "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 135-138. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- [50] K. Al-Amoodi et al., "A compact substrate integrated waveguide notched-septum polarizer for 5G mobile device", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2517-2521, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.3038404.
- [51] P. Sarasa, A. Baussois, and P. Regnier, "A compact single-horn C/X dual band and circular polarized Tx & Rx antenna system", in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*. Monterey, 2004. doi: 10.1109/APS.2004.1332019.
- [52] O. B. Jacobs, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Elliptically shaped quad-ridged horn antennas as feed for reflector", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 756-759, 2011. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050.
- [53] G. Mishra, S. K. Sharma, and J.-C. Chieh, "A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1904-1909, 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [54] C. Shu et al., "A wideband dual-circular-polarization horn antenna for mmWave Wireless Communications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1726-1730, 2019. doi: 10.1109/LAWP.2019.2927933.
- [55] N. Luo et al., "A millimeter-wave (V-band) dual-circular-polarized horn antenna based on an inbuilt monogroove polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1933-1937, 2020. doi: 10.1109/TAP.2020.3015745.
- [56] H.-Y. Yu et al., "Wideband circularly polarized horn antenna exploiting open slotted end structure", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 267-271, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.2964623.
- [57] J.-R. Qi et al., "Dual-band circular-polarization horn antenna with completely inhomogeneous corrugations", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 751-755, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.2978878.
- [58] A. Caliskan, F. Gunes, and A. S. Turk, "Circularly polarized corrugated horn fed nonuniform reflectarray antenna", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252806.
- [59] K. Lu, K. W. Leung, and N. Yang, "3-D-printed circularly polarized twisted-ridge horn antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1746-1750, 2021. doi: 10.1109/TAP.2020.3031764.
- [60] S. V. Yadav, and A. Chittora, "Circularly polarized high-power antenna with higher-order mode excitation", *Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 1, pp. 1-5, 2021. doi: 10.1017/S1759078721000611.
- [61] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*, Hoboken, John Willey and Sons, 2005.

**I. V. Zabegalov**, *lecturer*,

e-mail: igor\_zabegalov@meta.ua

**Ya. E. Sharpan**, *student*,

e-mail: yar\_sharpan@rambler.ru

Ivan Kozhedub Shostka Professional College of Sumy State University

Institutska st., 1, Shostka, Sumy region, 41100, Ukraine

**I. I. Dikhtyaruk**, *student*,

e-mail: kotovan99@i.ua

**S. I. Piltyay**, *Ph.D., associate professor*,

e-mail: piltyay\_stepan@ua.fm

**A. V. Bulashenko**, *senior lecturer*

e-mail: an\_bulashenko@i.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

### WAVEGUIDE POWER SUPPLY SYSTEM OF A HORN ANTENNA WITH CIRCULAR POLARIZATION

*The article presents the methodology for developing and optimizing the power supply system of a horn antenna with circular polarization. A horn antenna has a metal structure and consists of a waveguide having a variable cross-section and an open radiating end. Electromagnetic waves in such antenna are excited by a waveguide that is connected to a narrow wall of the horn antenna. The proposed power system of the horn antenna consists of a rectangular waveguide with a slit. In order to obtain the excitation of signals with circular polarization at the output, the slit has been cut in a rectangular waveguide at an angle of 45°. As a result, the circuit makes it possible to generate the signals with right-hand circular polarization and left-hand circular polarization. The presented design of the horn antenna power supply system eliminates the need to develop a separate waveguide device for forming a circular polarization. The designed power system for horn antenna with circular polarization can be used at an operating frequency of 8.0 GHz. At these frequencies the reflection coefficient is less than -19 dB. The proposed horn antenna provides a maximum value of the gain of 21 dB for right-hand circular polarization and a maximum value of the gain of 10 dB for left-hand circular polarization. Cross-polarization isolation is higher than 10 dB. Therefore, the developed power system of the horn antenna provides a narrowband operating mode at the circular polarization with satisfactory electromagnetic polarization characteristics and matching at the frequency of 8 GHz. The developed power supply system of the horn antenna with circular polarization can be used in radio engineering systems, which carry out polarization processing of signals.*

**Keywords:** *circular polarization, horn antenna, waveguide, slit, gain, radiation pattern.*

**І. В. Забегалов**, викладач,  
e-mail: igor\_zabegalov@meta.ua

**Я. Е. Шарпан**, студент,  
e-mail: yar\_sharpan@rambler.ru

Шосткінський фаховий коледж імені Івана Кожедуба Сумського державного університету  
вул. Інститутська, 1, м. Шостка, Сумська обл., 41100, Україна

**І. І. Діхтярук**, студент,  
e-mail: kotovan99@i.ua

**С. І. Пільтяй**, к.т.н., доцент,  
e-mail: piltyay\_stepan@ua.fm

**А. В. Булашенко**, ст. викладач  
e-mail: an\_bulashenko@i.ua

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

### **ХВИЛЕВІДНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ РУПОРНОЇ АНТЕНИ З КОЛОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ**

*У статті наведено методику розробки та оптимізації системи живлення рупорної антени із коловою поляризацією. Рупорна антена має металеву конструкцію та складається із хвилеводу, що має змінний переріз і відкритий випромінюючий кінець. Електромагнітні хвилі у такій антені збуджують за допомогою хвилеводу, який вмикають до вузької стінки рупорної антени. Запропонована система живлення рупорної антени складається з прямокутного хвилеводу зі щільною. Щоб на виході отримати в рупорній антені збудження сигналів із коловою поляризацією, щільну було вирізано у прямокутному хвилеводі під кутом  $45^\circ$ . В результаті схема дає можливість формувати сигнали з правою круговою поляризацією та лівою круговою поляризацією. Представлена конструкція системи живлення рупорної антени усуває необхідність розробки окремо хвилевідного пристрою формування колової поляризації. Спроектована система живлення рупорної антени із коловою поляризацією може використовуватися на робочій частоті 8 ГГц. На ній коефіцієнт відбиття є нижчим за  $-19$  дБ. Запропонована рупорна антена забезпечує максимальне значення коефіцієнта підсилення 21 дБ для правої колової поляризації та максимальне значення коефіцієнта підсилення 10 дБ для лівої колової поляризації. Кросполяризаційна розв'язка перевищує 10 дБ. Таким чином, розроблена система живлення рупорної антени забезпечує вузькосмуговий режим роботи на коловій поляризації із задовільними електромагнітними поляризаційними характеристиками та узгодженням на частоті 8 ГГц. Розроблена система живлення рупорної антени з коловою поляризацією може використовуватися у радіотехнічних системах, які здійснюють поляризаційне оброблення сигналів.*

**Ключові слова:** колова поляризація, рупорна антена, хвилевід, щільна, коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості.