

**Мачуський Євген Андрійович,**

доктор технічних наук, професор,  
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського»

**Антéни** (від лат antenna— рея) — радіотехнічні пристрої, призначені для перетворення енергії зв'язаних електромагнітних коливань, замкнених в електричних колах, на енергію вільних електромагнітних коливань, випромінених у простір і навпаки.

## **1. Історична довідка**

### **1.1. Винайдення**

Уперше передавання електромагнітних коливань на відстань 32 км між двома антенами, піднятими за допомогою повітряних зміїв на висоту близько 200 м, здійснив інженер М. Луміс (США) у 1866.

### **1.2. Етапи вдосконалення**

За допомогою найпростішої антени — диполя (вібратора) — Г. Герц 1886 довів існування електромагнітних хвиль. 1888 він побудував першу в світі параболічну рефлекторну антену. Н.Тесла 1893 під час досліджень атмосферної електрики виготовив заземлену щоглову антену. Будову антен наприкінці 1800-х удосконалювали Г. Марконі, О. Попов. 1906 у Колумбійському університеті (США) створено антену, що за формою нагадувала дротяну клітку. К. Ф. Браун одним із перших побудував антену спрямовану. У 1900-х він запропонував систему паралельних антен і рамочну антену (1916). Антену «хвильовий канал» (антена Яги–Уда) винайдено 1926 дослідником Сінтаро Уда у співпраці з Хідецугу Яги з Тохокуського університету (м. Сендай, Японія). Під час Другої світової війни її використовували як антену радарів протиповітряної оборони. Г. Марконі використовував параболічний рефлектор протягом 1930-х у дослідженні передачі УВЧ-сигналів на човен у Середземному морі. Першу велику параболічну антену — тарілку діаметром 9 м — побудував у 1937 дослідник Р. Гроут (США), заклавши підвалини радіоастрономії. У 1938 інженер-електрик В. Барроу (США) створив широкосмугову рупорну антену. У 1940-х почали

використовувати складні антени, що були сукупністю окремих антен (випромінювальних елементів). Антенні решітки дотепер застосовують для підвищення коефіцієнта спрямованої дії антени як системи та для керування формою діаграми спрямованості за допомогою електричних сигналів. Використання радарів у Другій світовій війні стимулювало розробку параболічних антен нових форм, зокрема антен із секторними діаграмами спрямованості. Наприкінці 1900-х створено параболічні антени з дзеркалами діаметром понад 60 м (Ведмежі озера, СРСР), 100 метровий радіотелескоп у Грін-Бенк (шт. Західна Вірджинія, США) тощо. У 1970-х розроблено малогабаритні патч-антени діапазонів УВЧ і НВЧ, у 1980-х — фрактальні електрично малі антени (ЕМА), що принципово відрізнялися своєю геометрією від відомих рішень, і планарні F-подібні антени (англ. Planar Inverted-F Antennas, PIFA), зростання попиту на які зумовлено розвитком мобільного зв'язку та бездротових комп'ютерних технологій. На початку 2000-х подальше вдосконалення антен ґрунтувалося на використанні новітніх матеріалів, зокрема нанотрубок, графену, рідкометалевого композиційного матеріалу та інноваційних конструкторських підходах (антена-трансформер, Росія, 2016; антена з морської води, Японія, 2016; мембранна антена, США, 2017 тощо).

### **1.3. Конструктивні особливості**

Уся різноманітність випромінювальних систем зводиться до двох типів: електрично непрозора ділянка на прозорому тлі та електрично прозора ділянка на непрозорому тлі. Найпростіший випромінювач першого типу — це відрізок дроту (штир, електричний вібратор), а випромінювач другого типу — розрив у металевій плівці (щілина, магнітний вібратор). Назви вібраторів «електричний» і «магнітний» походять від подібності структури електричного поля штиря та магнітного поля щілини. Неперервна сукупність електричних вібраторів утворює непрозору для електромагнітних хвиль площинку, а неперервна сукупність магнітних вібраторів — прозорий для електромагнітних хвиль отвір. Прозорий отвір на тлі непрозорої площинки — це електромагнітна рамка. Штир, щілина, площинка, отвір, рамка утворюють ряд найпростіших

випромінювачів. Усі складніші антенні системи можна розглядати як просторові комбінації найпростіших випромінювачів.

## 2. Технічні показники

Найінформативнішим в інженерній практиці є поняття ефективної поверхні антени (ЕПА) — пласкої поверхні простору, з якої антена здатна збирати або в яку здатна спрямовувати потік електромагнітної енергії. Максимальну ефективну поверхню наближених за одним із розмірів до половини довжини хвилі  $\lambda$  (наближених до першого резонансу в просторі) найпростіших випромінювачів визначають за формулою

$$S_{\text{эф}} \approx 0,5(\lambda/2)^2.$$

З ЕПА тісно пов'язаний коефіцієнт спрямованої дії антени (КСД) — число, яке показує, у скільки разів створювана в заданому напрямку потужність поля більша від тієї, яка була б за сферичного рівномірного розподілу:

$$\text{КСД} = 4\pi S_{\text{эф}}/\lambda^2.$$

Залежність відносної напруженості створюваного поля від напрямку в просторі (величину, пропорційну КСД) називають амплітудною діаграмою спрямованості (ДС).

КСД півхвильних за максимальним розміром найпростіших випромінювачів становить приблизно  $\pi/2$ . Уведення додаткового елемента — рефлектора, який відбиває енергію лише в потрібному напрямку, дає змогу подвоїти спрямованість антени. Прикладом природної найпростішої випромінювальної системи з рефлектором є відкритий кінець хвилеводу, де роль рефлектора відіграє сам хвилевід, а роль випромінювача — поверхня розриву. Збільшення кількості випромінювачів в антені приводить до зростання КСД за дотримання необхідних фазових і поляризаційних співвідношень.

Випромінювачі діють відносно незалежно лише тоді, коли вони рознесені у просторі на відстань, більшу від половини довжини хвилі. Можна вважати, що ефективна зона і зона незалежної дії найпростішого випромінювача — це кубик із ребром завдовжки  $\lambda/2$ . Ефективна зона лінійної антенної решітки не перевищує  $L/(\lambda/2)$  таких кубиків: поверхневої —  $S/(\lambda/2)^2$ , а об'ємної —  $V/(\lambda/2)^3$  кубиків, де  $L$ ,  $S$ ,  $V$  — геометрична довжина, площа та об'єм антенної решітки.

Максимально досяжне значення КСД будь-якої антени визначено об'ємом ефективної зони і має порядок  $\pi V/(\lambda/2)^3$  для об'ємних,  $\pi S/(\lambda/2)^2$  для поверхневих,  $\pi L/(\lambda/2)$  для лінійних антенних решіток,  $\pi$  для одноелементних антен із рефлектором,  $\pi/2$  для таких самих антен, але без рефлектора. В останньому випадку цифра 2 показує, що без рефлектора поширення хвиль відбувається у дві протилежні півсфери.

Практично досягнуті в оптимально виготовлених антенах КСД збігаються з визначеними вище. Перевищити встановлені межі можна лише через уповільнення хвиль або заповнення активної зони антен матеріалами з підвищеною проникністю діелектричною чи проникністю магнітною, унаслідок чого підвищується густина електромагнітного поля та зменшується довжина хвиль. Здебільшого такі матеріали на радіочастотах мають відчутний опір утрат, що призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД), коефіцієнта підсилення, максимально можливої потужності випромінювання, шумової температури антен. Збільшення кількості випромінювальних елементів структури дає змогу поліпшити електричні параметри антен, але ускладнює їхню конструкцію.

### **3. Класифікація**

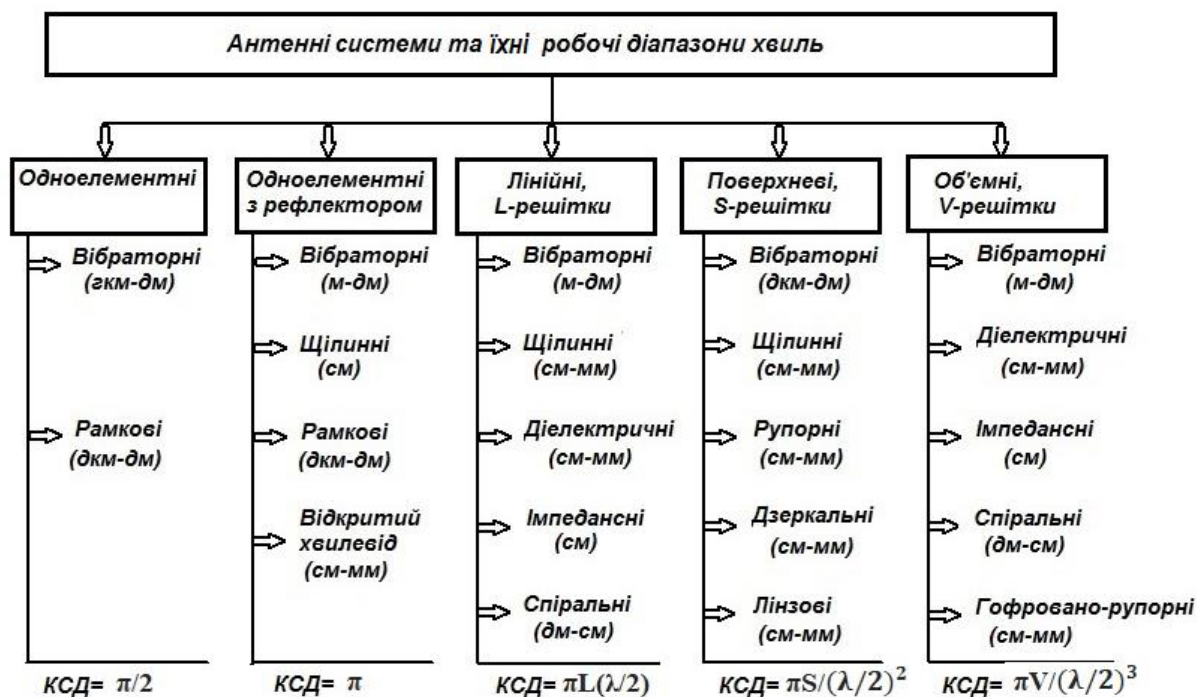
Тип і назву антени визначено головним елементом структури (вібратор, щілина, рамка, рупор, лінза, дзеркало тощо). Класифікують антени за різними ознаками:

- 1) за структурою — одноелементні, одноелементні з рефлектором, поздовжні решітки, поперечні решітки, поздовжньо-поперечні решітки;
- 2) за функціональним призначенням — приймальні, передавальні, приймально-передавальні;
- 3) за конструкцією і принципом дії — лінійні, апертурні, антенні решітки;
- 4) за поляризацією — з лінійною поляризацією, з обертовою поляризацією;
- 5) за смугою пропускання — вузько смугові, широкосмугові, широкодіапазонні;
- 6) за діапазоном радіохвиль — антени метрового, дециметрового, сантиметрового, міліметрового діапазонів;

- 7) за напрямленими властивостями — не спрямовані, вузько спрямовані;
- 8) за місцем установки — наземні (стаціонарні), бортові (рухливі);
- 9) за призначенням радіотехнічних пристроїв — зв'язкові, навігаційні, радіолокаційні.

#### 4. Застосування

Діапазон хвиль, у якому застосування антени найдоцільніше (див. рис. 2), зумовлено конструкторсько-технологічними (габаритні розміри, маса, наявність необхідних матеріалів і засобів виробництва) та експлуатаційними (стаціонарні, бортові, портативні вироби) вимогами.



Необхідна форма ДС залежить від класу радіосистеми, у якій антену використовують (системи радіомовлення, радіозв'язку, радіолокації, радіопротидії тощо). Значення КСД антен залежить від об'єму активної зони і практично може досягати кількох десятків, сотень, тисяч для поздовжніх, поперечних та об'ємних антенних решіток відповідно. Великі антенні решітки (особливо дзеркальні антени) на частотах сантиметрового та міліметрового діапазонів дають змогу одержати КСД у десятки й сотні тисяч. Найвищі (понад 0,95) значення ККД мають антени з гладкими, суто металевими головними випромінювачами (вібраторні, рупорні, дзеркальні). У інших антенах значення ККД дещо зменшені внаслідок істотної нерегулярності та недосконалості

поверхні, а також якості елементів або через додаткові втрати в об'ємі діелектричних і магнітних матеріалів. За смугою робочих частот найліпшими є рамкові, спіральні, рупорні, лінзові та дзеркальні антени, які не мають яскраво виражених резонансних ефектів. Найгірші діапазонні властивості мають антенні решітки з резонансних випромінювальних елементів (вібраторні та щілинні).

Оптимально спроектована спіральна антена — це поперечна решітка з двох поздовжніх решіток, тому її КСД може досягати значення  $2\pi L/(\lambda/2)$ . Гофровано-рупорна антена — це конструкторське поєднання суто рупорної (поперечна решітка) та кількох імпедансних (поздовжні решітки) антен; тому гофровані рупори віднесено до класу об'ємних (поздовжньо-поперечних) решіток. Спіральні антени, а також решітка центрально-симетричних у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвиль, антен добре пристосовані до приймання сигналів як з лінійною, так і з коловою поляризацією, що може бути важливим в окремих спеціальних застосуваннях (космічний зв'язок, зв'язок у складних умовах поширення хвиль).

### **Література**

Радіотехніка / За ред. Ю. Л. Мазора. Київ : Вища школа, 1999. 839 с.

Згуровский М. З., Ильченко М. Е., Кравчук С. А. и др. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем: Распространение радиоволн.

Антенные и частотно-избирательные устройства. Киев : Політехніка, 2003. 454 с.

Ільницький Л. Я., Савченко О. Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот. Київ : Відкрите АТ «Укртелеком», 2003. 496 с.

Bala R., Marwaha A. Investigation of graphene based miniaturized terahertz antenna for novel substrate materials // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2016. Vol. 19. Is. 1. P. 531–537. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098615001263>

Mitsubishi Electric's Sea Aerial Antenna Uses Seawater Plume // Mitsubishi Electric. 2016. URL: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2016/0127.html>

1. Grekhov A. M. Recent Advances in Satellite Aeronautical Communications Modeling. USA, Hershey : IGI Global, 2019. 313 p. URL: <https://www.igi-global.com/book/recent-advances-satellite-aeronautical-communications/216508#table-of-contents>

---

Є. А. Мачуський