

# Адитивне виготовлення виробів авіакосмічного та оборонного призначення

**Нещодавно компанія Harris Corp. (підрядник МО США) провела пряме порівняльне випробування надрукованих на 3D-принтері схем РЧ-підсилювача й антен та аналогічних конструкцій на друківаних платах (ДП; РСВ), виготовлених традиційними методами. Обидві схеми, виконані методом адитивного виготовлення, працювали так само добре, як і реалізовані на традиційних ДП, а друкувалися на кілька днів швидше, ніж за звичайного виготовлення. Ця демонстрація була покликана показати придатність електроніки, створеної прецизійним 3D-друком, для оборонного та авіакосмічного застосування.**

Під час співпраці з компанією Nano Dimension, виробником 3D-принтерів для друкованої електроніки, інженери Harris вирішили з'ясувати, наскільки РЧ-схеми, створені за допомогою адитивного виготовлення (3D-друку), можна порівняти зі схемами, виготовленими за звичайними технологічними процесами. Дослідження охоплювало проектування та імітаційне моделювання схем, їх виготовлення та випробування. Цілі, поставлені командою Harris, полягали в тому, щоб вивчити використання 3D-друку для функціональних РЧ-схем, продемонструвавши порівняння характеристик надрукованих на 3D-принтері та виготовлених звичайними методами схем. Об'єктами випробувань для перевірки концепції стали підсилювач на робочу частоту 2 ГГц і РЧ-антена з робочою частотою 5.2 ГГц. У цій статті наводяться подробиці та експериментально отримані результати дослідження з обговоренням їхнього значення у виготовленні РЧ-виробів.

Образно висловлюючись, спектр застосування продукції Harris — від океану до орбіти. Компанія постачає критично важливі системи для зв'язку, інформування та захисту і є лідером у галузі тактичного зв'язку, РЕБ, авіоніки, керування повітряним рухом, космічних і розвідувальних, а також метеорологічних рішень. Наразі Harris, яка створює схеми і системи для передачі даних, відео та голосу на далекі відстані, зосередилася на підвищенні мобільності та робочих характеристик систем, одночасно займаючись скороченням часу і витрат на проектування, що особливо важливо у випадку складних оборонних і космічних систем. Звідси й інтерес компанії до адитивного виготовлення.

Це дослідження з використання адитивного виготовлення в розробленні РЧ-схем для бездротових систем є частиною спільного проекту з Ізраїльським управлінням підтримки інновацій (Israel Innovation Authority, IIA) і фондом космонавтики

Флориди (Space Florida Foundation) — партнерством, яке сприяє науковим дослідженням, розробкам і комерціалізації авіакосмічних і технологічних проектів. Компанія Nano Dimension отримала від IIA грант на співпрацю з Harris у сфері застосування 3D-друку в електронних модулях. Мета проекту — продемонструвати, що 3D-друк двосторонніх багатосарових схем, що об'єднують силові кола, цифрові та РЧ-сигнали, може покращити масогабаритні характеристики, знизити потужність споживання і вартість (*Size, Weight, Power, and Cost, SWaP-C*) космічних систем.

## ПОБУДОВА РАДІОЧАСТОТНОЇ СХЕМИ

Створення РЧ-компонентів для складних систем, як правило, є комплексним процесом, що складається з безлічі етапів. Досягнення оптимальних характеристик компонента і системи відбувається ітеративно: створюється проект, потім прототип схеми, цей прототип випробовується для виявлення недоліків, у проект вносяться зміни, після чого створюється і випробовується черговий прототип. Так повторюється доти, доки не буде знайдена оптимальна конструкція. Цей процес забирає багато часу та грошей. Разом з електронними компонентами, що становлять основу автомобільних, оборонних, споживчих і медичних пристроїв, сама можливість застосувати 3D-друк у створенні прототипів ДП та інших компонентів лише за кілька годин і прямо «на місці» — незалежно від складності схеми — економить час і гроші та сприяє швидким інноваціям.

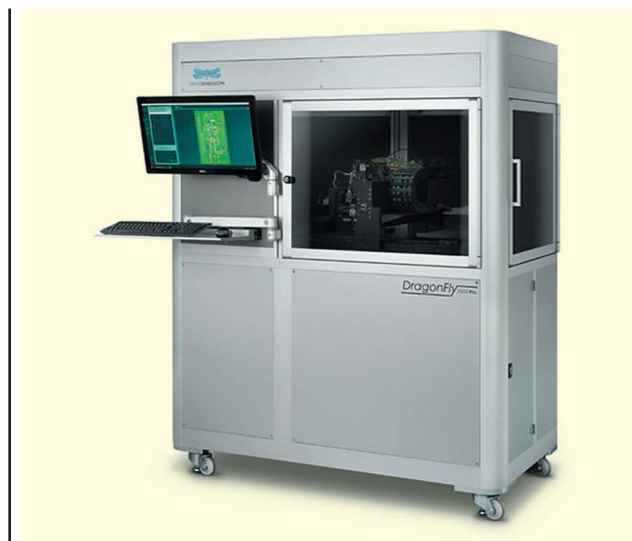
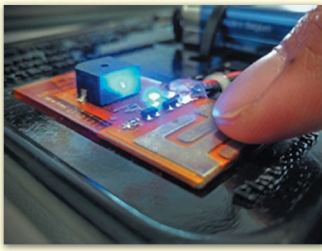


Рис. 1. Зовнішній вигляд 3D-принтера DragonFly



**Рис. 2. Датчик дотику Phytес, надрукований на 3D-принтері DragonFly**

Для виготовлення друкованих схем за допомогою 3D-друку для цього дослідження, Harris скористалася принтером DragonFly («Бабка»), який випускається компанією Nano Dimension (рис. 1) і являє собою першу комерційну систему адитивного виготовлення друкованої електроніки. DragonFly пропонує практично необмежені можливості зі створення щільно скомпонованих електронних прототипів і швидкого виконання ітерацій проектування. Система з високою роздільною здатністю друкує одночасно метал і полімер для ДП і прецизійної електроніки на кшталт датчиків, РЧ-схем, антен, литих між'єд-

нань (molded interconnects) і частин, що виготовляють на замовлення, до яких відносяться смарт-картки, RFID-схеми та інші вироби для ідентифікації, а також їхні масиви (*arrays*) (рис. 2). За допомогою DragonFly можна виготовити схеми та системи з жорстким корпусуванням, поєднаним із гнучкими ДП, і зробити все це в єдиному процесі друку, без використання кабелів і з'єднувачів.

Harris вибрала в партнери Nano Dimension тому, що 3D-принтер DragonFly сконструйований таким чином, щоб кардинально скоротити час і вартість розробки, забезпечуючи при цьому виробництво складних електронних систем, які не можуть бути виготовлені звичайними методами. У принтері застосовуються струмопровідні срібні та діелектричні чорнила, спеціально призначені для тривимірного друку електроніки. Щоб оцінити придатність 3D-друку для РЧ-систем, Harris спроектувала, змодельовала та випробувала РЧ-підсилювач, надрукований на 3D-принтері, та порівняла його з підсилювачем, виготовленим звичайним методом ДП з основою зі склотекстоліту FR4. І підсилювач, і антена були спроектовані із застосуванням програмного забез-



**Рис. 3. РЧ-підсилювач, надрукований за допомогою системи DragonFly Pro**

печення для імітаційного моделювання ЕМ-полів. Щойно було змодельовано і задано діаграми спрямованості антени, файл було перетворено і завантажено в DragonFly для 3D-друку. У результаті виготовлена схема практично повністю відповідала вихідному проекту, демонструючи очікувану функціональність.

РЧ-підсилювач (рис. 3) був виготовлений фахівцями Harris в єдиному процесі друку, який зайняв близько 10 год і передбачав використання випущених Nano Dimension струмопровідних і діелектричних чорнил з наночастинками срібла. Компоненти були вручну припаяні до ДП розмірами 101 × 38 × 3 мм.

# eSUN<sup>®</sup>

## Філаменти для 3D-друку

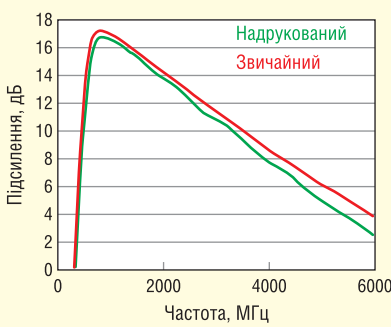


Схеми, які традиційно виготовляли, на-  
впаки, довелося відправити на стороннє  
підприємство, а цей процес зазвичай  
займає від кількох днів до тижнів. Під-  
силювач, надрукований за допомогою  
DragonFly, був розрахований на 2 ГГц  
і демонстрував близькі до результатів  
моделювання характеристики до 6 ГГц.  
АЧХ виявилася піднятою порівняно з  
очікуваною і порівняною з АЧХ підси-  
лювачів, виготовлених на основах з FR4  
звичайними методами.

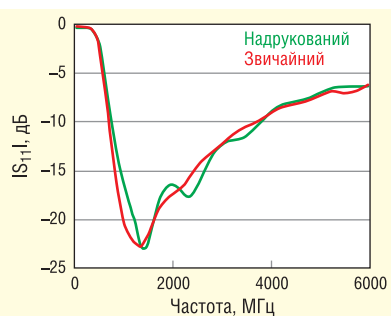
### РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Для того щоб оцінити якість зробле-  
ної на 3D-принтері РЧ-схеми і по-  
рівняти її зі схемами на традиційних ДП,  
фахівці Harris виміряли малосигнальний  
коефіцієнт посилення, зворотні втрати  
на вході і виході у кожного підсилю-  
вача. Інженери Harris визначили, що  
РЧ-схеми, надруковані адитивним мето-  
дом, вийшли такими ж, як і виготовлені  
традиційними способами, що наочно  
показує придатність технології 3D-друку  
для створення функціональних РЧ-схем.

На рисунку 4 порівнюється кое-  
фіцієнт посилення надрукованого на  
3D-принтері та звичайного підсилювачів,  
різниця становить менше ніж 1 дБ



**Рис. 4. Коефіцієнт посилення підсилювача, виготовленого на 3D-принтері та звичайним способом**



**Рис. 5. Параметр |S22| підсилювачів, виготовленого на 3D-принтері та звичайним способом**

на 4700 МГц і менше ніж 1.3 дБ на  
6000 МГц. Знижене підсилення на-  
друкованого підсилювача зумовлене  
підвищеними втратами в діелектрику  
і провідниках ліній передачі. На ри-  
сунку 5 наведено порівняння за па-  
раметром |S11| двох прототипів, що  
не виявляє істотних відмінностей між  
характеристиками підсилювачів у смузі  
10–6000 МГц. Аналогічно зіставлення  
за параметром |S22| двох підсилювачів,  
показане на рисунку 6, відображає  
практично однакові частотні характе-  
ристики. Ці результати та висновки ком-  
панія Harris представила на конферен-  
ції IEEE Radio & Wireless в м. Орlando.

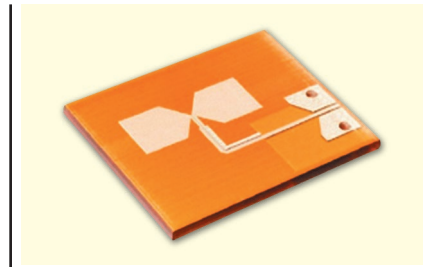
З огляду на отримані робочі харак-  
теристики, а також можливість швидкого  
і доступного виготовлення прототипів,  
Harris продовжує розвивати технології  
3D-друку, зокрема проводить випро-  
бування в реальних польових умовах,  
таким як космічний простір. Крім на-  
земного тестування на безвідмовність,  
розроблені компанією Harris з викорис-  
танням принтера DragonFly апаратні  
засоби доставлені на Міжнародну косміч-  
ну станцію, де проходять випробову-  
вання на здатність встановлення зв'язку  
зі станцією стеження за супутниками  
Harris у Флориді. Цей проєкт дозво-  
ляє забезпечити систематичний аналіз  
створених 3D-друком матеріалів для  
космічних систем, які особливо часто  
застосовуються в наносупутниках.

### ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ АВІАКОСМІЧНОЇ ТА ОБОРОННОЇ ГАЛУЗЕЙ

Результати проведеного дослідження  
продемонстрували широкі можли-  
вості адитивного методу виготовлення  
електроніки для різних галузей промис-  
ловості, в тому числі авіакосмічної та  
оборонної. Вони показують придатність  
надрукованої на 3D-принтері електро-  
ніки для РЧ-схем, що свідчить про здат-



**Рис. 6. 5G-антена, надрукована на замовлення на 3D-принтері компанією Nano Dimension**



**Рис. 7. 5G-антена, надрукована на замовлення на 3D-принтері компанією Nano Dimension**

ність цієї технології відігравати важливу  
роль у просуванні систем малих супут-  
ників і супутників на низькій навколо-  
земній орбіті (*low Earth orbit, LEO*). Існує  
безліч варіантів застосування цих супут-  
ників, від високошвидкісного доступу в  
Інтернет до мереж «Інтернету речей».  
Технологія 3D-друку може відігравати  
вирішальну роль практично у всіх аспек-  
тах наукового дослідження, проектуван-  
ня і виготовлення, пропонуючи відчутні  
переваги, такі як продуктивність, швидко  
розроблення і можливість друку склад-  
них форм, недосяжних за традиційних  
процесів виготовлення.

Компанії Harris і Nano Dimension  
продовжують покращувати ВЧ-характе-  
ристики у надрукованих на 3D-принтері  
схем та роблять ці пристрої компакт-  
нішими та щільніше скомпонуваними.  
Можливість перегляду конструювання  
схем — навіть із залученням ДП на гнуч-  
ких основах і використанням унікальних  
геометричних форм — ось головна пе-  
ревага адитивного виготовлення, що  
дає змогу створювати форми, недосяжні  
за традиційного виготовлення.

### ВИСНОВОК

Надрукована на 3D-принтері елек-  
троніка має цілу низку переваг.  
Можливість власного 3D-друку РЧ-еле-  
ктроніки та антен значно скорочує  
час і вартість створення прототипів і пе-  
ревірки нових концепцій. За допомогою  
3D-друку можна створювати антени, за  
характеристиками схожі з традиційно  
виготовленими, що послужить каталі-  
затором швидкого прогресу в галузі  
радіозв'язку (рис. 7). 3D-друк дає змогу  
створювати ще компактніші та легші  
антени в жорсткому корпусі, суміщен-  
ому з гнучкими схемами, та усунути  
потребу в кабелях та з'єднувачах. Крім  
того, що ця технологія скорочує вар-  
тість і час виготовлення, вона здатна  
послабити загрозу порушення прав ін-  
телектуальної власності.