

ГНУЧКІ КОМУТАЦІЙНІ СТРУКТУРИ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ

Н.П. Демська, Харківський національний університет радіоелектроніки

В роботі досліджено переваги гнучких комутаційних структур над традиційними жорсткими та гнучко-жорсткими друкованими платами, розглянуті передумови їх створення та застосування в існуючих та нових пристроях, які можуть бути зігнутими, прокатаними, складеними і розтягнутими при збереженні функціональної цілісності.

В работе исследованы преимущества гибких коммутационных структур над традиционными жесткими и гибко-жесткими печатными платами, рассмотрены предпосылки их создания и применения в существующих и новых устройствах, которые могут быть согнутыми, прокатаными, сложенными и растянутыми при сохранении функциональной целостности.

In this paper, the advantages of flexible commutation structures over traditional hard and flexibly hard printed circuit boards are considered, and the preconditions for their creation and application in existing and new devices that can be bent, rolled, folded and stretched while maintaining functional integrity are considered.

Ключові слова: технічні засоби автоматизації, гнучкі комутаційні структури, сфера застосування

Вступ

Сучасні тенденції виробництва ґрунтуються на впровадженні нових рішень і технологій Industry 4.0, IoT, хмарних сервісів тощо [1-2]. Застосування таких підходів обумовлено тим, що вони дозволяють використовувати великі обчислювальні ресурси, гнучкість, швидке нарощування ресурсів та інші.

Важливу роль у технології Industry 4.0 відіграють сучасні технічні засоби автоматизації (сенсори, виконавчі пристрої, регулятори тощо), які повинні забезпечувати необхідний рівень точності, параметри швидкодії, малі габаритно-масові характеристики (ГМХ), високу функціональність, низьке енергоспоживання та вартість [1].

Основною проблемою інтеграції сучасних технічних засобів для впровадження технології Industry 4.0 залишається те, що нині готові деталі базуються на традиційних електронних компонентах жорстких (гнуcho-жорстких) друкованих платах, у зв'язку з чим сенсори мають значну товщину і обмежені в гнучкості, а також не можуть мати повністю адаптоване апаратне рішення для кожного конкретного розміру та форми об'єкту автоматизації [3].

Тому останнім часом технологія виходить з традиційного дизайну жорсткої електроніки в майбутнє гнучких форм-факторів. Розвиток гнучкої технології запропонує нові функціональні можливості, які раніше не були можливі, за допомогою гнучкої конструкції, особливо на ринках, таких як медицина, одяг та IoT, сенсори та смарт-текстиль.

Галузі застосування гнучких комутаційних структур

В сучасних умовах речі дуже швидко змінюються і збільшуються аж до медіа-інтерфейсів, при цьому розмір та форма самого об'єкту зменшується [3]. Із зростанням впливу цих об'єктів на всі сфери життя сучасного суспільства неминучим стає впровадження новітніх технологій [4]. І такою технологією визнано гнучку електроніку, що швидко розвивається як сфера досліджень, розробок, експериментального виробництва [5] та випробувань [6-7].

Гнучка електроніка має довгу історію. П'ятдесят років тому монокристалічні кремнієві сонячні елементи робились більш тонкими шляхом зменшення товщини підкладки, щоб підвищити їх співвідношення потужність/вага для використання в позаземних супутниках [5].

Сьогодні під гнучкою електронікою розуміють сукупність всіх технологій, які можуть потенційно забезпечити гнучкість пристроїв [8]. Термін «гнуchoка електроніка» (полімерна, друкована) відображає дві основні складові даного напрямку:

1) матеріалознавчий базис – конструктивно-матеріалознавчі особливості підкладок, систем комутації-ізоляції і функціональних елементів. Для виготовлення пристроїв гнучкої електроніки можна використовувати розчинні і друковані методи, що значно знижує вартість технологічних процесів і збільшує їх продуктивність. Використання матеріалів гнучкої електроніки дозволяє не тільки знизити вартість одного пристрою, але також робити пристрої великої площі, знизивши при цьому вартість одиниці площі. Це відіграє велику роль у виробництві дисплеїв і сенсорних інтерфейсів [8];

2) технологічний базис – комплекс способів формування функціональних елементів і систем комутації-ізоляції, заснованих на друкованих рулонних трафаретних і крапельно-струменевих технологіях. Перевагою таких технологій є більш прості і дешеві виробничі процеси, які дозволяють знизити вартість кінцевих пристроїв в порівнянні з традиційними технологіями електроніки. Так, можна знизити кількість циклів фотолітографії, уникнути високотемпературних процесів і спеціальних вакуумних умов [9].

Виробництво гнучкої електроніки в наш час орієнтується на виготовлення таких виробів, як надмініатюрні радіотехнічні модулі, в тому числі інтегровані з сенсорами і системами для збору і передачі інформації, мініатюрні навігаційно-орієнтаційні системи для автономної навігації і позиціонування, мікроаналітичні системи типу «лабораторія на чипі» матричного і капілярного типів для біомедичного та технічного контролю біотехносфери, інтелектуальний високоінтегрований багатофункціональний одяг, в тому

числі з епідермальною розподіленою сенсорно-виконавчою системою, розподілені, гнучкі і інші мініатюрні джерела енергії, включаючи рекуператори з ефіру і навколишнього середовища, мікроробототехнічні засоби наземного та повітряного базування, дисплеї, гнучкі акумулятори, фотоелектричні, освітлювальні, автомобільні та оборонні прилади та багато ін. (рис. 1).

Для звичайного споживача гнучка електроніка – це, в основному, пристрої побутового призначення (гнучкі дисплеї та датчики), для виробників та вчених коло використання гнучких комутаційних структур (ГКС) набагато ширше, тому що застосування ГКС дозволяє (рис. 1): зменшити габарити і вагу пристрою (*зменшення ГМХ деталей*); вбудувати електроніку в корпус складної форми (*інтеграція*); відмовитися від сполучних роз'ємів; забезпечити динамічну гнучкість з'єднань (*динамічна гнучкість*); підвищити надійність з'єднань (*системна надійність*); спростити обслуговування при експлуатації (*простота складання*); створювати тривимірну структуру, що дає можливість тривимірного монтажу і здатність обгинання контурів блоків електронних пристроїв (*об'ємне компонування*); використання органічних матеріалів для створення підкладки (*матеріали*) [10].

Зменшення габаритно-масових характеристик

Властивості матеріалів можуть змінюватися не тільки в результаті зміни хімічного складу, але також і в результаті зміни форми та розмірів компонентів, матеріалів. Багато властивостей твердих тіл пов'язані з характерними розмірами, вище та нижче яких ці властивості різні. Такі характерні розміри є в діапазонах і мікро-, і нанооб'єктів [11].

Так, зі зменшенням розмірів елементів змінюються співвідношення об'ємних і поверхневих сил, інерційних і сил пружності твердого тіла, сил тертя та інерції, умови теплопередачі, швидкодія та інші електрофізичні параметри елементів. При розмірах структур менше 100 нм багато фундаментальних властивостей речовин (температура плавлення, ширина забороненої зони напівпровідників) визначаються розмірами кристалів [12].

Наприклад, це тонкі й гнучкі сонячні батареї; гнучкі пластикові екрани завтовшки з паперовий аркуш і з яскравістю сучасного монітора; компактні електронні пристрої, розміри й енергоємність яких у сотні разів менші від розмірів і енергоємності сучасних пристроїв. Крім того, нанотехнології дозволяють створювати прозорі й гнучкі матеріали, легкі як пластик і міцні як сталь, легкі й еластичні конструкційні матеріали, високоефективні фільтри для повітря й води, ліки, що діють на більш глибокому рівні та багато чого іншого [11].

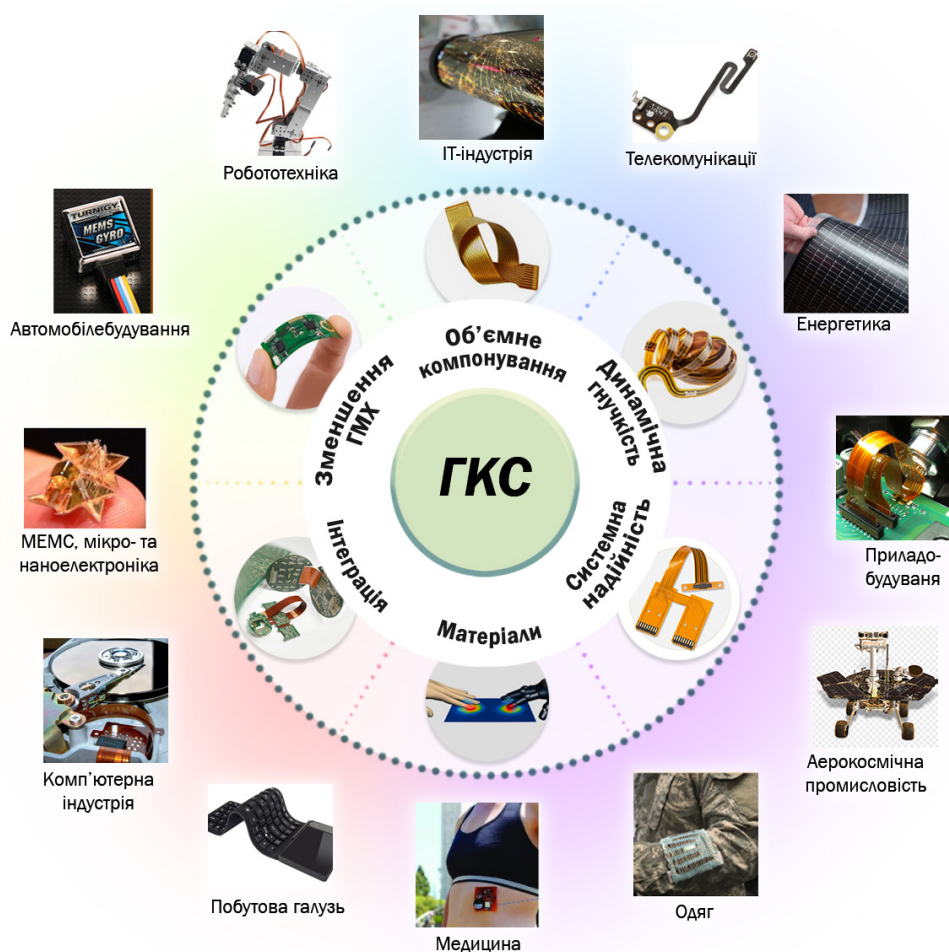


Рис. 1. Спектр можливих застосувань ГКС

Найбільш затребуваними виробами гнучкої електроніки є гібридні мініатюрні пристрої, що інтегрують сенсорні і виконавчі мікросистеми з інфокомунікаційними кристалами-чипами для збору, обробки і передачі інформації (наприклад, орієнтаційно-навігаційні або біомедичні модулі) [11, 13] (рис. 1).

Вельми ефективним є використання технологій гнучкої електроніки для виробництва випромінювачів і перетворювачів оптичного випромінювання на гнучкому субстраті, а також органонеорганічних гнучких акумуляторів. Великий інтерес представляє розвиток спеціальних текстильних технологій з використанням мікро- і нановолокон з різними фізико-хімічними, теплофізичними, електричними, оптичними та біологічними властивостями [7].

Системна надійність, простота складання

Працездатність виробів електронної техніки (ЕТ) все частіше залежить від якості з'єднувачів, особливо коли до кінцевого продукту висувають серйозні вимоги щодо експлуатації: вібростійкість, стійкість до механічних пошкоджень, пило- та вологостійкість, здатність перебувати у хімічно агресивному середовищі, широкий робочий температурний діапазон та ін. [14].

Більшість гнучких схем – всього лише пасивні сполучні елементи, які використовуються для з'єднання таких електронних компонентів, як інтегральні схеми, резистори і конденсатори. Однак, деякі з них можуть застосовуватися тільки для створення взаємного зв'язку між іншими електронними блоками як безпосередньо, так чи через з'єднувачі.

Більше 50 % несправностей модулів ЕТ пов'язані зі з'єднувачами. Можливими їх причинами можуть бути: корозія, нещільне з'єднання, випадіння або деформація кабелю внаслідок вібрації [14].

Широке застосування пласких кабелів практично у усій стаціонарній і мобільній апаратурі (морській, наземній, повітряній) обумовлено низкою переваг таких з'єднань: компактність, навіть за великого числа контактів; проста та швидка заміна пошкодженого кабелю; чітка організація несучих провідників, що виключає заплутування; з'єднання модулів і виконавчих пристроїв, віддалених один від одного, у рамках одного блоку або виробу; «рухливість» з'єднання. За рахунок гнучкості та довговічності самого кабелю можливе підведення живлення та сигнальних ліній до рухомих вузлів пристрою. Але надійність таких з'єднувачів залежить від їх мініатюризації і зменшується із збільшенням ступеню мініатюризації [14].

При застосуванні гнучких плат в конструкціях ліній передач необхідно відзначити їх властивість менше спотворювати цифрові сигнали при великих довжинах ліній зв'язку. Відносно малі значення діелектричної проникності та діелектричних втрат – лише один з факторів меншого ослаблення сигналу, ніж в інших конструкціях ліній, що використовують жорсткі діелектрики [13] (рис. 1).

Динамічна гнучкість

Використовують ГКС у тих випадках, коли вони працюють в умовах вібрації, багатократних згинань, або коли платі необхідно надати компактную вигнуту форму.

Було б несправедливо стверджувати, що гнучкі

друковані плати у всьому перевершують свої жорсткі аналоги, але вони мають цілий ряд безумовних переваг, що дозволяють зайняти свою нішу у виробництві функціональної електроніки. Конструкційна гнучкість є з одного боку перевагою ГКС, але з іншого боку призводить до появи проблем, викликаних необхідністю забезпечення стабільності матеріалів і конструкцій ГКС в часі під впливом деформацій різного виду [13].

Спільне використання різних середовищ в якості рухомих елементів, елементів змінної форми дозволило створити високонадійні пристрої нового принципу дії: струменеві друкуючі голівки принтерів, безконтактне зчитування інформації з жорстких магнітних дисків, наноімпрінг з використанням тиску через повітряну прокладку (air cushion pressing), а також контактування в багатозондових підключаючих пристроях [15], мікродозуючих пристроях, рідинних і твердотільних реактивних мікродвигунах.

Об'ємне компонування

Завдяки перевагам над традиційними друкованими платами з'являються нові пристрої які можуть бути зігнутими, прокатаними, складеними і розтягнутими при збереженні функціональної цілісності [10]. Для забезпечення даних якостей на сьогодні існують такі підвиди ГКС: гнучкі схеми подвійного доступу; рельєфні гнучкі схеми; двосторонні гнучкі схеми; багатопшарові гнучкі схеми.

Гнучкі схеми подвійного доступу мають один провідний шар, але він працює так, що з'являється можливість отримання доступу до певних елементів провідної схеми з обох сторін. Незважаючи на те, що цей тип схем має певні переваги, спеціальні вимоги до обчислень для доступу до елементів обмежують їх застосування.

Рельєфні гнучкі схеми – інноваційний підклас звичайних гнучких схем. Процес виробництва включають спеціальний багатоступінчастий метод травлення гнучких плат, під час якого шари мідного провідника на гнучкій платі відрізняються по товщині в різних місцях по всій довжині плати (наприклад, товщина провідника може бути нижче в гнучких ділянках і вище – в місцях з'єднання). Однією з переваг рельєфних друкованих плат, називають можливість надання їм «округлості». Тим самим з'являється можливість узгодити їх форму і форму об'єктів (ракет, космічних об'єктів і ін.), в які їх можна помістити. Результат – істотна економія внутрішнього обсягу виробів. Їх істотний недолік в тому, що зі зростанням кількості шарів знижується гнучкість таких друкованих плат.

Двосторонні гнучкі схеми отримали свою назву через використання двох шарів провідника. Вони можуть проводитися з використанням монтажу компонентів в отвори або без нього, хоча більш поширеним є перший варіант. Через монтаж в отвори з обох сторін плати можна розмістити затискачі для електронних компонентів, що дозволить помістити самі компоненти на будь-якій стороні. Залежно від вимог до розробки, двосторонні гнучкі схеми можуть випускатися з захисними покриттями на одній, обох або ні на одній зі сторін завершеною схеми, але найчастіше їх випускають з покриттям на обох сторонах. Одним з головних переваг цього типу підкладок є можливість легко створити

перехресні з'єднання. Двосторонні гнучкі схеми монтуються на двосторонній підкладці просто тому, що у них є одне або два перехресних з'єднань. Приклад використання цих схем – з'єднання тачпад і материнської плати в ноутбучі. Всі з'єднання цієї схеми розташовані тільки на одній стороні підкладки, крім найменших з них, які використовують другу сторону підкладки.

Гнучкі схеми, що володіють трьома і більше шарами провідника, відомі, як багат шарові гнучкі схеми. Часто шари взаємопов'язані за рахунок монтажу компонентів в отвори, так як можливо забезпечити доступ до більш низькорівневих зв'язків. Шари цього типу гнучких схем можуть безперервно ламінуватися під час конструювання за винятком зон, зайнятих компонентами, змонтованими в отвори. Практика дискретного ламінування поширена в тих випадках, коли необхідна максимальна гнучкість. Це досягається шляхом виділення зон, вільних від зв'язків, де необхідна гнучкість.

Матеріали

Гнучкість, на противагу звичайним методам зміцнення за рахунок збільшення розмірів або міцності використовуваних матеріалів, забезпечує розподіл навантаження, зберігаючи напруги в матеріалі в межах пружної деформації. Методи зниження напружень можуть бути різними: шляхом локалізації області напруг, введення додаткових робочих ділянок для розподілу навантаження, зміни конфігурації пристрою, форми.

В цілому, гнучкість знижує матеріаломісткість тому дозволяє використовувати більш якісні матеріали [16].

Досягнення у галузі матеріалознавства забезпечують виробництво новими матеріалами підвищеної якості, із високим рівнем технологічності та стабільності електрофізичних характеристик, у тому числі матеріалами з інтелектуальними властивостями [17].

У якості діелектричної основи ГКС застосовуються найрізноманітніші полімерні матеріали: поліефіри, зокрема поліетилентерефталат (він же Mylar або лавсан), поліімід (Картон різних типів), фторополімерні плівки (Teflon), рідинно-кристалічні полімери (LCP) і навіть термопластичні плівки, такі, наприклад, як поліетилен, полівініл хлорид і ін. Товщина полімерної основи змінюється в широких межах, найчастіше вона становить від 10 до 125 мкм [18].

Для ГКС більшості груп електронних пристроїв використовується неорганічний напівпровідник (поліімідна плівка або поліетилентерефталат) – міцний базовий матеріал, що має високий ступінь гнучкості, в першу чергу, завдяки експлуатаційним характеристикам, які значно перевищують значення продуктивності відомих органічних матеріалів, включаючи високоефективну рухливість і довгострокову стабільність при механічних, електричних і екологічних навантаженнях. Основною причиною у використанні неорганічних напівпровідників і пов'язаних з ними традиційних методів обробки є обмеження у виборі матеріалів і стратегій виготовлення [19].

Наприклад, більшість полімерних субстратів несумісні з високими температурами, необхідними в традиційних процедурах осадження, кристалізації і

легування. Крім того, при виробництві рулонним друком, великі площі і низька ціна на одиницю площі, в деяких випадках, легше досягається з використанням неорганічними речовинами, ніж органічними аналогами.

Нещодавні дослідження демонструють, однак, що відповідний вибір матеріалів, конструкторських схем і стратегій інтеграції дозволяють використовувати високопродуктивні монокристалічні неорганічні напівпровідники в механічно сумісних системах, таким чином, щоб подолати такі обмеження [20].

Однак для досягнення цих потенційних переваг такі плати повинні мати певні характеристики. Наприклад, гнучкі ділянки цих друкованих плат повинні бути здатні витримувати часті вигини і деформації, пов'язані з процесами експлуатації, що використовуються для виготовлення плати і включення її в електронне обладнання, в якому вона буде використовуватися.

Якщо плата не має таких характеристик, то загальна вартість виготовлення таких плат різко зростає внаслідок високої частоти відходів, пов'язаних з виготовленням і установкою таких блоків.

Крім того, для того, щоб легко використовувати жорсткі / гнучкі плати в компактних конфігураціях, гнучкі ділянки друкованої схеми повинні мати здатність згинатися навколо дуже малих радіусів без збоїв. Якщо мінімальний радіус вигину гнучкого перерізу занадто великий, можливість використання плати в компактних місцях буде небажано зменшена. Відповідно, секція гнучкого ланцюга повинна мати найменший можливий мінімальний радіус вигину [21-22].

Технології виготовлення

Аналіз сукупності технологічних операцій і рішень, які використовуються у виробництві гнучкої електроніки та фотоніки, дозволив сформулювати ряд рекомендацій щодо вибору технологій [11]:

- технологією, що найбільш динамічно перебудовується щодо топологічної локалізації та складу осідаючого матеріалу є крапельно-струменевий друк, що забезпечує мікронну розрізняючу здатність;

- формування тривимірних конструкцій з досить високою мікронною просторовою розрізняючою здатністю забезпечується об'ємною стереолітографією;

- найбільш високу швидкість формування складної комутації на поверхні 2D і 3D-об'єктів забезпечує лазерна конверсія (модифікація) металовмісного полімерного субстрату.

З'єднання матеріалів і покриття названо експертами в якості одного з пріоритетних напрямків розвитку виробничих систем. Тут в якості перспективних відзначаються: технології створення на деталях з тугоплавких металів і вуглецевих матеріалів захисних покриттів, що дозволяють працювати в окислювальному середовищі при температурі до 2000⁰C; зварювальні технології, за допомогою яких вдається зберегти початкові властивості матеріалів, що з'єднуються – їх зносостійкість, твердість і міцність, а також методи прогнозування, діагностики, контролю та управління властивостями з'єднань матеріалів, що гарантують надійність відповідальних об'єктів в ключових областях промисловості (атомно-енергетичної, нафтогазової, ракетно-космічної, оборонної та ін.).

Розробка промислових установок для нанесення

наноструктурних захисних і зміцнюючих покриттів, а також наноламінатних покриттів без застосування цинку і алюмінію представляється не менш важливим фактором.

Технології лазерного зварювання конструкційних матеріалів і електронно-променевої технології з програмним керуванням забезпечать підвищену точність обробки, безвідходне об'ємне формоутворення деталей без механічної обробки [23].

Розвиток струмопровідних чорнил і різноманітні друкарські процеси (рулонний друк, настільний струменевий друк і т.п.) дозволяють проводити недороге масове виробництво датчиків. Ця можливість дає змогу створювати настроювані недорогі гнучкі «листи датчиків». Вони також можуть бути надруковані за допомогою дешевих струменевих принтерів, що дає змогу створювати прототипи малою кількістю.

Висновки

Хоча гнучка технологія, для впровадження технології Industry 4.0, готова забезпечити безпрецедентну функціональність у майбутньому, на цьому етапі розвитку традиційні схеми все ще мають більш високі продуктивні можливості.

Гнучкі гібридні схеми є мостом між сучасними конструкціями та майбутніми інноваціями, використовуючи високу продуктивність кремнієвої технології з низькими витратами на виробництво друкованих схем. Отримана в результаті сумісна архітектура має величезний потенціал росту в придатних до носіння, IoT і медичних додатках, де необхідна гнучкість.

Незважаючи на проміжні успіхи в цій галузі, поки у гнучкої електроніки залишаються невирішені проблеми, в тому числі низька надійність і складність створення багатопарових мікросхем, з електричними з'єднаннями між шарами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Невлюдов І. Ш., Пономарьова Г. В., Бортнікова В. О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів // Вчені записки ТНУ імені ВІ Вернадського. Серія: технічні науки. – 2018. – Т. 29. – №. 68. – С. 204-210.
2. Пупена О. М., Ельперін І. В., Міркевич Р. М. Сучасні стандарти інтегрованого керування і шляхи їх впровадження в Україні // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2017. – №. 23, № 1. – С. 25-41.
3. Gong N. W. Design and applications of inkjet-printed flexible sensate surfaces : дис. – Massachusetts Institute of Technology, 2013.
4. Святний В.А. Сучасні тенденції в автоматизації промислових комплексів / В.А. Святний, Д.Ю. Бровкіна // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2016. – № 1. – С. 32-39
5. Wong W. S., Salleo A. (ed.). Flexible electronics: materials and applications. – Springer Science & Business Media, 2009. – Т. 11. – 461 p.
6. Стенд для динамічних випробувань гнучких

комутаційних шлейфів та MEMC-компонентів: патент № 108066 України на корисну модель: МПК G01M 7/02 (2006.01) / О.С. Боцман, І.В. Жарікова, В.В. Невлюдова, С.П. Новоселов та ін.; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. – 3 с.

7. Reboun, J., Pretl, S., Navratil, J., & Hlina, J. (2016). Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates. Paper presented at the Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, 2016 – September 184-188. doi:10.1109/ISSE.2016.7563185 Retrieved from www.scopus.com

8. Афанасьев П., Бохов О., Лучинин В. Создание технологического кластера гибкой печатной электроники // Наноиндустрия. – 2014. – №. 3. – С. 52-56.

9. Глушкова А.В. Гибкая электроника: настоящее и будущее [Электронный ресурс]: режим доступа: [https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2017/04\(126\)-2017/25457/](https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2017/04(126)-2017/25457/)

10. Медведев А. Гибкие печатные платы. Преимущества и применение / А. Медведев, Г. Мылов, Ю. Набатов, В. Люлина // Компоненты и технологии. – 2007. – №. 9. – С. 202-208.

11. Невлюдов І.Ш. Мікросистемна техніка та нанотехнології: Монографія / І.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін. – Киев, НАУ 2017. – 528 с.

12. Нанофізика. наноматеріали, наноелектроніка: навч. носіб. / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.

13. Невлюдов І.Ш. Технологічне забезпечення якості гнучких комутаційних структур: Монографія / І.Ш. Невлюдов, І.В. Боцман, В.В. Невлюдова, Є.А. Разумов-Фризюк. – Кривий ріг : КК НАУ, 2018. – 256 с.

14. Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А., Демська Н.П., Гуріна Д.В. Аналіз впливу механічних напружень на можливість мініатюризації гнучких структур електронної техніки на прикладі ZIF з'єднувача // Проблеми тертя та зношування. – 2017, №3 (76) с. 74-80.

15. Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій: Патент України UA 97538 C2 від 27.02.2012 р., бюл. № 4 / Невлюдов І.Ш., Борцов В.М., Палагін В.А., Разумов-Фризюк Є.А., Жарікова І.В.

16. Овчаренко В.Е. Перспективы использования гибких и жестких конструкций в электронной технике / В.Е. Овчаренко, А.А. Ефименко, Е.В. Токарева, Е.А. Чалая // Технологія приборостроєння. – 2016. №3, – С. 22-24

17. Воробьев А.В., Жора В.Д. Гибкие фольгированные диэлектрики: классификация и анализ направлений применения и совершенствования. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. – С. 56-61.

18. Медведев А.М. Материалы для гибких печатных плат // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 3.

19. Wang, X., Dong, L., Zhang, H., Yu, R., Pan, C., & Wang, Z. L. Recent progress in electronic skin // Advanced Science. – 2015. – Т. 2. – №. 10. – С. 1500169.

20. Sundar, V. C., Zaumseil, J., et al Elastomeric transistor stamps: reversible probing of charge transport in organic crystals // Science. – 2004. – Т. 303. – №. 5664. – p.p. 1644-1646.

21. Haas, Daniel P. "Flexible printed circuits." U.S. Patent No. 5,121,297. 9 Jun. 1992.

22. Hamby B. L. Flexible printed circuits and methods of fabricating and forming plated thru-holes therein : пат. 4715928 США. – 1987.

23. Соколов А. В. Будущее науки и технологий: результаты исследования Дельфи // Форсайт. – 2009. – Т. 3. – №. 3.