



DOI 10.28925/2663-4023.2025.29.919

УДК 004.94:621.98

**Олейніков Іван Анатолійович**

аспірант, викладач

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна

ORCID ID: 0009-0001-3066-4639

[tigerbrostalker@email.com](mailto:tigerbrostalker@email.com)**Хорольська Карина Вікторівна**

PhD in Computer Science

доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки

імені професора Володимира Бурячка

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0003-3270-4494

[k.khorolska@kubg.edu.ua](mailto:k.khorolska@kubg.edu.ua)

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ГЕНЕРАЦІЯ ПІДТРИМОК НА ПРИНЦИПАХ ГЕНЕРАЦІЇ LIGHTNING INFILL ДЛЯ 3D-ДРУКУ

**Анотація.** У роботі представлено створення та експериментальну валідацію нового типу підтримок для адитивного виробництва методом FDM/FFF — Lightning Support. Цей підхід виник як логічна еволюція методу Lightning Infill, де ідея розгалуження до «критичних» зон була перенесена із внутрішнього заповнення на зовнішню підтримуючу структуру. Актуальність роботи обґрунтована недоліками традиційних генераторів підтримок типу Grid, Lines та Tree, які призводять до перевитрати матеріалу, збільшення часу друку та погіршення якості поверхні у місцях контакту. Запропонована методика реалізована на основі відкритої архітектури Cura/CuraEngine, що дозволила створити модуль генератора підтримок з набором параметрів для контролю геометрії. Алгоритм включає: виявлення нависань, формування базових анкерів на платформі та бічних опор на стінках моделі, побудову гілок із контролем кута нахилу та колізій, адаптивне налаштування відриву у горизонтальній і вертикальній площині, формування інтерфейсних шарів, а також евристики для оптимізації кількості гілок і fallback-режим до Grid/Tree для складних випадків. У порівняльних експериментах на тестових моделях було зафіксовано скорочення часу друку у порівнянні з Grid та покращену передбачуваність відриву відносно Tree-підтримок. При цьому додаткове споживання матеріалу залишалося помірним відносно моделей без підтримок. Обмеження методу спостерігаються при довгих мостах та нависаннях з великим кутом, де застосовується fallback або необхідна модифікація параметрів. В обговоренні наведено правила налаштувань і запропоновані гібридні стратегії поєднання Lightning і Tree, а також перспективні напрями оптимізації, зокрема використання алгоритмів пошуку шляху, адаптацію до вентиляції та застосування методів машинного навчання для вибору типу підтримок. Практичне значення підходу полягає у зменшенні витрат часу та енергії, збереженні чистоти поверхонь і спрощенні демонтажу, що робить Lightning Support корисним як для швидкого прототипування, так і для освітніх задач. Зроблено висновок, що розроблений метод забезпечує збалансований компроміс між швидкістю, якістю та економічністю, є технічно інтегрованим у Cura/CuraEngine та доцільним у гібридних профілях друку. Подальші дослідження мають бути спрямовані на масштабні випробування з різними матеріалами, високошвидкісні режими друку та стандартизацію профілів для відкритих бенчмарків.

**Ключові слова:** FDM/FFF; підтримки; Lightning Infill; Lightning Support; CuraEngine; адитивні технології; 3D-друк; оптимізація підтримок; генератори підтримок; гібридні стратегії; машинне навчання; прототипування; інформаційні технології.



## ВСТУП

У сучасних технологіях адитивного виробництва методом FDM/FFF використання підтримок залишається важливим і водночас проблемним етапом процесу друку. Незважаючи на значний прогрес у розвитку генераторів підтримок, більшість поширених підходів, зокрема Grid, Lines та Tree, мають низку обмежень. Вони часто призводять до перевитрати матеріалу, подовження тривалості друку та погіршення якості поверхні у зонах контакту. Крім того, процес видалення підтримок після друку нерідко є складним і потребує додаткових зусиль, що знижує ефективність технології в цілому [1], [2].

Актуальність вирішення цієї проблеми зумовлена зростанням потреби у швидкому та економічному прототипуванні, де особливо важливими є скорочення часу виготовлення, зменшення собівартості та забезпечення високої якості кінцевого виробу. Це стосується як промислових застосувань, так і освітніх чи науково-дослідних завдань, де обмеження часу та ресурсів відіграють критичну роль.

Одним із перспективних напрямів удосконалення підтримок є використання ідей адаптивного структурування, що вже показали свою ефективність у внутрішніх заповненнях, зокрема у підході Lightning Infill. Перенесення цього принципу на зовнішні опори дало змогу створити новий тип підтримок — Lightning Support, який поєднує в собі переваги мінімального контакту з моделлю та контрольованої геометрії гілок.

**Постановка проблеми.** Технологічна зрілість FDM/FFF-друку прямо залежить від якості алгоритмів підтримок: саме вони визначають, чи вдасться стабілізувати нависання без надмірних витрат матеріалу, часу та дефектів підшовних поверхонь. Класичні схеми (Grid, Lines) передбачувані, але часто неекономні; Tree-підтримки полегшують знімання, однак можуть втрачати жорсткість на широких нависаннях і потребують складного маршрутизаційного контролю. У результаті компроміс між стійкістю, керованістю відриву та економістю залишається незадовільним для швидкого прототипування та освітніх сценаріїв. Платформа Ultimaker Cura з відкритим кодом і модульною архітектурою дозволяє експериментувати з новими підходами; саме тут формується запит на легку розгалужену підтримку, що працює «там, де потрібно», торкаючись моделі мінімально та зберігаючи передбачуваність друку. У попередніх випробуваннях було показано, що на середніх нависаннях ( $\approx 45\text{--}55^\circ$ ) можна досягти суттєвої економії часу та матеріалу, однак на довгих мостах ( $>40$  мм) потрібні спеціальні заходи (посилення контактних шарів, обмеження кута гілок, або fallback до Tree). Це окреслює практичну проблему: як перенести економні принципи Lightning з внутрішнього заповнення на зовнішні підтримки без втрати надійності та якості поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляди та довідкові матеріали зі слайсерів фіксують еволюцію підтримок: від простих лінійних/ґраткових структур до деревоподібних гілок, що зменшують контакт із моделлю, але потребують складної маршрутизації та іноді поступаються у жорсткості [3], [4]. У Cura режим Tree реалізований як окремий інструмент; у PrusaSlicer офіційно відсутній (існують сторонні модифікації); у Simplify3D користувач обмежений Grid/Lines [5]. На цьому тлі з'являється концепція Lightning Infill — внутрішнього «розумного» заповнення, що формує гілки лише в критичних зонах і радикально скорочує витрати. Саме подібність до деревоподібної топології спричинила ідею екстраполяції: винести ці принципи назовні та перетворити на підтримки («Lightning Support»), які торкаються моделі лише там, де це конструктивно необхідно [6]. Попередні технічні нотатки/чернетки вказують на доцільність окремого генератора (LightningSupportGenerator) з інтеграцією у pipeline



CuraEngine, щоб відокремити новий підхід від наявних і забезпечити керованість параметрами (XY-gap, Z-gap, max\_angle, інтерфейсні шари) на рівні профілів [7]. Невирішеними лишаються питання: гарантована стійкість при довгих прольотах і крутих нависаннях, узгодження швидкісних режимів із охолодженням, правила переходу у fallback (Tree/Grid). Саме ці прогалини обґрунтовують проведення систематичного дослідження Lightning Support [8].

**Мета статті.** Метою статті є теоретичне обґрунтування та експериментальна валідація адаптації принципів Lightning Infill до зовнішніх підтримок («Lightning Support») у середовищі Cura/CuraEngine. Для її досягнення ставляться такі завдання:

- сформувати архітектуру та прототип модуля LightningSupportGenerator із підключенням до існуючого конвеєра геометричних утиліт CuraEngine та експозицією ключових параметрів у профілях;
- описати алгоритмічні процедури: виявлення таргетів нависань, вибір анкерів (на столику й на стінках моделі), планування гілок із обмеженням max\_angle, перевірки зіткнень, налаштування XY-gap/Z-gap й інтерфейсних шарів;
- провести порівняння з Grid/Tree за часом друку, витратою матеріалу та якістю поверхні на бенчмарках Overhang/Bridge/Benchy/Support-Stress;
- визначити обмеження (довгі мости, круті нависання, вібрація гілок) і правила конфігурації/гібридизації (посилення контактних шарів, зменшення max\_angle, умови переходу до Tree/Grid).

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Підтримки у FDM/FFF — це допоміжні конструкції, які тимчасово утримують нависаючі ділянки моделі, мости та локальні виступи, забезпечуючи коректне формування шарів без провисань і зривів екструзії. Правильна стратегія підтримок напряму впливає на три речі: якість підшовних поверхонь після видалення, час друку та витрату матеріалу, надійність процесу (стійкість гілок, відсутність колізій і деформацій) [9].

### Складові підтримувальної системи (термінологія):

1. Гілка — елемент, що проводить навантаження від нависаючої ділянки до опори; може бути вертикальною або похилою.
2. Анкер — точка/зона прив'язки до платформи (bed-anchors) або до бокових стінок моделі (side-anchors).
3. Контактні шари — один чи кілька шарів на верхівці підтримок із регульованим зчепленням, які формують поверхню контакту з моделлю.
4. XY-gap / Z-gap — бічний та вертикальний зазори між підтримкою і моделлю, що визначають баланс між чистотою відриву та надійністю підпірки.
5. Підшовна поверхня — ділянка моделі, що формувалася «над» підтримками і зберігає сліди контакту.

**Основні обмеження та цілі проєктування.** Підтримки мають бути достатньо жорсткими, щоб не втратити форму під час друку; мінімально інвазивними, щоб не псувати підшову; прогнозованими у знятті без пошкодження моделі; і економними за матеріалом та часом. В екстремальних геометріях (довгі мости, високі нависання) додаються вимоги до керування кутами гілок, довжиною сегментів і охолодженням.

Підтримки в FDM/FFF-друці можна поділити на кілька основних типів: лінійні та ґраткові, що відзначаються простотою налаштувань і передбачуваністю, але потребують великих площ контакту й витрачають значний обсяг матеріалу; деревоподібні, які



ґрунтуються на розгалуженні з мінімальним контактом із моделлю, завдяки чому легше видаляються, проте можуть втрачати жорсткість на великих площинах і потребують складнішої маршрутизації; опори, побудовані за логікою внутрішнього заповнення, що переносять принципи економного каркаса на зовнішні структури й забезпечують селективність при зменшенні витрат матеріалу; а також гібридні підходи, які поєднують переваги кількох методів, наприклад використання деревоподібних підтримок для складних ділянок разом з інфіл-подібною логікою для локальних критичних зон.

Ключові параметри, що визначають поведінку підтримок, можна умовно поділити на кілька груп. До контактних належать кількість проміжних шарів між моделлю і підтримкою та налаштування відступів у горизонтальній і вертикальній площині, які впливають на чистоту підшви й зусилля, необхідне для відриву. Геометрично-механічні параметри охоплюють обмеження відхилення гілки від вертикалі, довжину її сегмента, щільність і форму перерізу, що разом визначають жорсткість і стійкість до вібрацій. Технологічні параметри залежать від обладнання й матеріалів — діаметр сопла, висота шару, швидкість друку, інтенсивність охолодження та властивості конкретного пластику. Нарешті, алгоритмічні параметри визначаються методами виявлення нависань і цільових зон, правилами кластеризації, перевіркою колізій та евристичними для розміщення анкерів [10].

Вибір категорії підтримок залежить від конкретного завдання. Для простих моделей із невеликими нависаннями зазвичай достатньо лінійних або ґраткових схем з мінімальними контактними шарами. Коли мова йде про складні криволінійні геометрії чи високі вимоги до якості поверхні, доречно застосовувати деревоподібні або інфіл-похідні підходи з ретельним налаштуванням відступів. У випадках довгих мостів чи великих прольотів варто комбінувати підходи, посилюючи контактні шари, зменшуючи допустимий кут нахилу гілок і скорочуючи їхню довжину задля кращої жорсткості. Для навчальних і прототипувальних завдань із обмеженим бюджетом часу й матеріалу доцільними будуть інфіл-похідні чи легкі гілковані підтримки, які ощадливо витрачають ресурси, працюючи лише у критичних зонах [11].

Практичні наслідки для налаштування профілів полягають у кількох загальних правилах. Важливо мінімізувати площі контакту там, де це безпечно: горизонтальний відступ бажано утримувати близьким до ширини лінії екструзії, а вертикальний збільшувати у разі появи слідів спікання. Жорсткість гілок варто контролювати, зменшуючи кут нахилу чи скорочуючи довжину сегментів, а за потреби — додаючи контактні шари [12]. Стратегію слід підбирати залежно від геометрії: деревоподібні підтримки забезпечують мінімальний слід від контакту, ґраткові — грубу стабілізацію, тоді як інфіл-похідні чи гібридні варіанти оптимальні для економії часу й матеріалу на середніх нависаннях. Для відтворюваності результатів необхідно фіксувати версії профілів і параметрів, щоб друк можна було повторити на різному обладнанні без втрати якості.

Класифікація підтримок у FDM/FFF зручна, якщо спиратися на три критерії: геометрія гілок і контактів, механічна роль (жорсткість/стійкість) та алгоритмічна стратегія (де, як і скільки матеріалу додавати). Таке структурування дозволяє системно підбирати тип опор під конкретну модель, а також обґрунтовано переходити до «легких» розгалужених підходів, коли критично важливі економія ресурсу та якість підшовних поверхонь [13].

**Механіка нависань, мостів і опорних гілок.** Нависання — ділянка, де локальний кут між нормаллю поверхні моделі й віссю Z перевищує поріг. Міст — відстань між двома опорами, яку екструдер перекриває без опори знизу. Стійкість гілки визначається коливальною та прогинною поведінкою. У спрощеній балковій моделі кінцевий прогин



пропорційний  $L^4/(EI)$ , де  $L$  — довжина сегмента,  $E$  — модуль Юнга,  $I$  — момент інерції перерізу. Під час друку додається вплив термозлипання та повітряного охолодження; ці фактори коригують граничні значення кутів і довжин сегментів.

$$\delta \approx \frac{qL^4}{8EI} \quad (1)$$

Критерій ефективного відриву контактного шару задається умовою, що зусилля відриву не перевищує припустимий рівень адгезії з поправками на XY-gap та Z-gap.

$$\sigma_{adh} \leq f(XY_{gap}, Z_{gap}, T, v, N) \quad (2)$$

**Тепло-масообмін і адгезія в зоні контакту.** Якість відриву визначається температурним полем у зоні контакту. Збільшення Z-gap зменшує ризик спікання, але може призвести до недопідтримки; збільшення XY-gap зменшує бічний слід, проте вимагає жорсткіших гілок. Практично XY-gap корелює з реальною шириною екструзії.

$$XY_{gap} \approx k_{xy} w_{line} \quad (3)$$

**Обчислювальна геометрія: виявлення нависань і формування таргетів.** Базовий конвеєр включає: побудову поля нормалей для трикутної сітки (усереднення за вершинами або пофейсово), обчислення кута  $\theta$  між нормаллю та віссю  $Z$ , бінаризацію за порогом  $\theta_{crit}$  з урахуванням висоти шару, морфологічне згладжування (відсікання «шумових» острівців мінімального розміру, заповнення дрібних дірок),  $(v)$  кластеризацію зв'язаних компонент як таргетів із атрибутами (площа, середній/максимальний кут, висота, близькість до стінок). Для тривимірної перевірки колізій і трасування гілок використовують BVH (AABB-ієрархії) або воксельні подання. BVH забезпечує швидке «відкидання» великих підобластей під час тестів перетину й побудови «swept volume» гілки; вокселізація дає простий булевий тест заповненості та контроль зазорів XY-gap/Z-gap на дискретній сітці. На практиці застосовують гібрид: груба воксельна відсічка + точна перевірка за BVH. Для стійкості до «шуму» нормалі попередньо згладжують (лапласівське/Таубіна) та застосовують багатомасштабні пороги ( $\theta_{crit}$  залежно від локальної кривини). Формування таргетів завершується вибором опорних точок/ліній дотику з пріоритезацією за геометрією (краї, піднутрення, довгі прольоти).

Графові моделі й оптимізація розгалуження. Множину таргетів представляємо як вершини графа з вагами (критичність, ризик провису, висота) та геометричними обмеженнями (макс. кут гілки, мін. радіус кривизни, зазори). Ребра мають вартість, що поєднує евклідову довжину з пенальті за порушення технологічних обмежень (кут  $> max\_angle$ , перетин заборонених зон, надмірна довжина сегмента тощо). Оптимізаційна задача: мінімізувати сумарну довжину гілок і площу контактів за умови забезпечення зв'язності таргетів з опорою, дотримання зазорів і умов жорсткості. Практичні евристики:

- мінімальне остовне дерево (Prim/Kruskal) на множині таргетів і кандидатних анкерів;
- Steiner-розширення для введення проміжних вузлів (опор) з обмеженим ступенем розгалуження;
- локальні пошуки зі зміщенням анкерів і «переприв'язкою» таргетів (2-opt/3-opt у околі);
- динамічне коригування  $max\_angle$  залежно від висоти, температури та швидкості;
- обмеження «довгих прольотів» через верхні межі на  $L$  та примусове посилення контактних шарів. Точні постановки зі Steiner Tree та інтегральними обмеженнями формально NP-складні; тому застосовують поліноміальні евристики з гарантованими обмеженнями на гірші випадки та подальшим локальним удосконаленням.



Порівняльні теоретичні передумови: Lightning проти Tree. Tree мінімізує площу контакту з моделлю за рахунок рідких точок дотику й довгих «консоль»; це полегшує відрив, але ускладнює жорсткість на великих нависаннях і чутливе до параметрів маршрутизації. Lightning переносить ідею «економії в критичних зонах» з внутрішнього інфілу на зовнішню опору: гілки укладаються лише там, де потрібна підтримка, з акцентом на коротші сегменти та керовані зазори XY-gap/Z-gap. У середньому Lightning дає меншу сумарну довжину гілок і кращий контроль місць контакту. Водночас на дуже довгих прольотах (мости великих довжин) Tree переважає завдяки багатократному підсиленню розгалуженнями. Оптимальна стратегія — гібридизація: Lightning як базовий «скелет», автоматичний перехід у Tree-локуси за умов  $L > L_{crit}$  або перевищення  $\theta_{crit}$ .

Чутливість до параметрів і масштабованість. Зменшення *max\_angle* підвищує вертикальність і жорсткість, але збільшує довжину гілок і час друку; збільшення XY-gap покращує чистоту підшови, однак вимагає коротших сегментів/нижчих швидкостей на перших перекриттях; Z-gap задає компроміс між ризиком спікання та легкістю відриву. На геометрію впливають також висота шару та ширина екструзії (мінімальна товщина гілки зазвичай кратна діаметру сопла). Щодо продуктивності: побудова BVH —  $O(M \log M)$  для сітки з  $M$  трикутників; запити перетину —  $O(\log M)$  у середньому. Планування для  $N$  таргетів із евристичним остовом — близько  $O(N \log N)$  + локальні поліпшення. Масштабованість забезпечують: відсікання «безризикових» зон, блокова паралельна генерація гілок, багаторівневі структури даних і попередня вокселізація для швидких тестів.

Теоретичні метрики якості. Для підшовних поверхонь використовують геометричні та візуальні метрики: середня шорсткість  $R_a$ , максимальна висота нерівностей  $R_z$ , локальна хвилястість; площа та інтенсивність повторного приплавлення; частка «порожніх» прольотів із провисами; індекс розриву нитки при перших перекриттях. Для часу друку — сумарна довжина траєкторій (у т.ч. частка «польотів» без екструзії), кількість гілок/розгалужень і кількість перемикачів швидкостей. Для матеріалу — інтегральна витрата на гілки та контактні шари відносно об'єму моделі. Узагальнені індекси якості можуть формуватися як зважена комбінація цих показників залежно від пріоритетів (якість/час/матеріал) [14].

**Коректність і відтворюваність.** Коректність генерації гарантується інваріантами: жодна гілка не перетинає геометрію моделі; усі контактні точки задовольняють обмеження XY-gap/Z-gap та не порушують «тонких» елементів; кожен таргет має щонайменше одну валідну опору; гілки не перетинаються між собою та з областями заборони (отвори, канали). Відтворюваність забезпечують: фіксація зерна випадковості, версій слайсера та профілів; журнал параметрів (у т.ч. *max\_angle*, зазори, швидкості, температури); контрольні тести на стандартних моделях; допуски на геометричні обчислення ( $\epsilon$ -пороги для перетинів) і стабільні налаштування охолодження. Результати супроводжуються схемами трасування та «теплокартами» ризику для незалежної перевірки.

**Розширені виведення для оцінки прогину та адгезії.** Для просто опертої балки максимальний прогин істотно залежить від довжини прольоту. У разі рівномірно розподіленого навантаження залежність масштабується як  $L^4$ ; для зосередженого навантаження в середині прольоту змінюється лише константа в знаменнику, але якісний висновок про високу чутливість до  $L$  зберігається. Далі для оцінювання максимального прогину використовуємо класичну формулу для центрального навантаження; тут  $F$  —



зосереджена сила,  $L$  — довжина прольоту,  $E$  — модуль Юнга матеріалу,  $I$  — момент інерції перерізу:

$$\delta_{mid} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (4)$$

Адгезія контактного шару визначається температурними та режимними параметрами друку, а також геометричними зазорами. Підвищення температури та швидкості за недостатнього охолодження збільшує злипання; збільшення поперечного й вертикального зазорів знижує ризик спікання, але може вимагати підсилення перших перекриттів і жорсткіших гілок. Узагальнено залежність адгезійного напруження подамо як функцію від температури  $T$ , швидкості  $v$ , ефективного часу охолодження  $t_{cool}$ , поперечного зазору  $g_{xy}$  та вертикального зазору  $g_z$ :

$$\sigma_{adh} = g(T, v, t_{cool}, XY_{gap}, Z_{gap}) \quad (5)$$

**Обчислювальна складність і продуктивність.**  $n$  — кількість трикутників сітки моделі;  $t$  — кількість таргетів нависань;  $c$  — кількість кластерів;  $a$  — число кандидатних анкерів;  $k$  — число сегментів гілок після маршрутизації.

#### Оцінки по етапах конвеєра:

1. Аналіз нормалей, порогова детекція, морфологія:  $O(n)$ .
2. Побудова ієрархії обмежувальних об'ємів (BVH):  $O(n \log n)$  за часом і  $O(n)$  за пам'яттю.
3. Кластеризація таргетів (зв'язні компоненти або DBSCAN з просторовим індексом):  $O(t \log t)$  у середньому.
4. Пошук/фільтрація кандидатних анкерів через BVH:  $O(a \log n)$ .
5. Маршрутизація гілок з колізій-чеками по BVH: приблизно  $O(k \log n)$  (перевірка кожного нового сегмента —  $O(\log n)$ ).
6. Формування контактних шарів, pruning і спрощення топології: від  $O(k)$  до  $O(k \log k)$  залежно від стратегії згладжування.
7. Експорт у G-код:  $O(k)$ .

**Сумарна модель часу виконання.** Для фіксованої реалізації з константами  $\alpha, \beta, \gamma, \delta > 0$  практичний час оцінюється як:

$$T \approx \alpha n \log n + \beta t \log t + \gamma k \log n + \delta k. \quad (6)$$

Ця модель добре апроксимує масштабування при зростанні розмірів сцени та кількості опорних елементів.

**Про MST/Steiner-евристики.** Маршрутизаційне «ядро» може спиратися на MST над графом сусідності таргетів (наприклад, по ребрах Delaunay), що дає  $O(t \log t)$ . Евристичні Steiner-вставки локально скорочують довжину, але зберігають загальний лінійно-логарифмічний порядок обчислень.

**Механічні обмеження як ліміти продуктивності.** Довжина прольоту гілки обмежується умовою на прогин  $\delta$  (модель балки Ейлера—Бернуллі). Для рівномірного навантаження  $q$  (власна вага нитки/видавленої «балки») наближено:

$$\delta \approx \frac{qL^4}{8EI'} \quad (7)$$

де  $L$  — проліт сегмента,  $E$  — модуль Юнга матеріалу,  $I$  — момент інерції перерізу нитки. Звідси безпечна довжина

$$L_{safe} \lesssim \left( \frac{8EI\delta_{allow}}{q} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Для зосередженої сили  $F$  у середині прольоту використовується

$$\delta_{mid} = \frac{FL^3}{48EI} \Rightarrow L_{safe} \lesssim \left( \frac{48EI\delta_{allow}}{F} \right)^{1/3}. \quad (9)$$



Ці вирази дають швидкі перевірки під час маршрутизації та прямо впливають на константи  $\gamma, \delta$  (менше невдалих спроб, менше перерозведень).

Безпечні режими та *fallback*-стратегії. Критерії активації безпечного режиму:

1. Довгі мости. Якщо локально  $L > L_{safe}$  (за однією з моделей вище) або перевищено емпіричний поріг (наприклад, 40 мм для PLA зі стандартним діаметром нитки), зменшується *max\_angle*, додаються проміжні мікро-опори, або виконується перехід до *Tree* на цій ділянці.
2. Великі нависання. Для кутів до вертикалі понад  $65^\circ$  автоматично підвищується щільність інтерфейсних ліній і кількість контактних шарів.
3. Адгезія/тепловий режим. Виконується контрольне співвідношення

$$\sigma_{adh}(T, v, t_{cool}, XY_{gap}, Z_{gap}) \geq \sigma_{req}, \quad (10)$$

де ліва частина — функція температури сопла  $T$ , швидкості  $v$ , часу охолодження  $t_{cool}$  і зазорів; якщо умова не виконується, вмикаються повільніші швидкості, більший *fan* та/або перехід до *Tree*.

### Продукційні правила:

1. Якщо  $L > L_{safe}$  і локальний радіус кривизни малий  $\rightarrow$  *max\_angle*  $\downarrow$ , вставити мікро-опори,  $v$   $\downarrow$ .
2. Якщо  $\theta > 65^\circ \rightarrow$  *contact\_layers*  $\uparrow$ , *XY\_gap*  $\uparrow$  на 5 – 10% для чистого відриву.
3. Якщо  $\sigma_{adh} < \sigma_{req}$  або помічено «stringing/warping»  $\rightarrow$  увімкнути *fallback* до *Tree* локально, зменшити *branch\_length*.

Таке задання у вигляді правил спрощує супровід профілів та їх перенесення між матеріалами/ринками принтерів.

Гібридні профілі та сценарії використання. Ідея полягає у тому щоб поєднати сильні сторони *Lightning* (мінімальна маса, швидкість) і *Tree* (висока жорсткість на довгих прольотах і в «вітрових» зонах моделі).

### Рекомендована логіка змішування:

1. *Lightning*-зона: середні нависання, короткі прольоти  $L \leq L_{safe}$ , відсутні тонкі виступи; тут зберігаємо великі кроки, вищу *max\_angle* та мінімум контактних шарів.
2. *Tree*-зона: тонкі кінчики, великі від'ємні порожнини, вентиляційні канали, довгі «містки»  $L > L_{safe}$ ; знижуємо *max\_angle*, підсилюємо інтерфейс (2 – 3 шари), приймаємо локальне уповільнення.
3. Перехідні області: використовуємо змішану вартісну функцію для маршруту:

$$J = \lambda_1 \sum_{\text{сегм.}} \|\Delta p\| + \lambda_2 \sum_{\text{сегм.}} \max(0, \varphi - \max\_angle) + \lambda_3 \sum_{\text{сегм.}} \frac{\delta(\text{сегм.})}{\delta_{allow}}, \quad (11)$$

де  $\varphi$  — локальне відхилення від вертикалі,  $\delta(\cdot)$  — прогнозований прогин; підвищена частка  $\lambda_3$  автоматично схиляє алгоритм до *Tree* у «ризикових» ділянках.

### Сценарії:

1. Фігури з широкими плато зверху  $\rightarrow$  *Lightning* для більшості площі + *Tree* під тонкими кромками.
2. Корпуси з вентиляційними вікнами/довгими прорізами  $\rightarrow$  *Tree* уздовж довгих прорізів, *Lightning* — під дрібними локальними нависаннями.
3. Технічні деталі з критичними лицьовими поверхнями  $\rightarrow$  *Lightning* з підвищеним  $Z_{gap}$  на фасадах + *Tree* у прихованих порожнинах для жорсткості.

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження зосереджено на адаптації коду алгоритму *Lightning* (спочатку розробленого для «розумного» заповнення) до задачі побудови підтримок (*LightningSupportGenerator*). Програмне середовище. Робочий форк модуля генерації траєкторій, інструменти побудови BVH/воксельних полів для перетинів, юніт-тести, набір скриптів для серійних прогонів і диф-порівнянь G-коду. Середовище збірки — стандартний компілятор (C++17/CPython), без прив'язки до конкретного принтера чи матеріалу. Вхідні артефакти. Набір синтетичних 3D-фікстур (меші) з контрольованими навісаннями, «містами», тонкими ребрами та порожнинами; параметри профілю підтримок (*max\_angle*, *XY\_gap*, *Z\_gap*, *contact\_layers*, *branch\_length*, *enable\_side\_anchors*). Вихідні артефакти. Чернеткові та спрощені траєкторії підтримок (полілайни), інтерфейсні шари, підсумковий G-код. Загальну послідовність етапів формування підтримок подано на рис. 1. Усе оцінюється інструментально (без фізичного друку): через перевірки колізій, топології, прогнозів жорсткості та продуктивності.

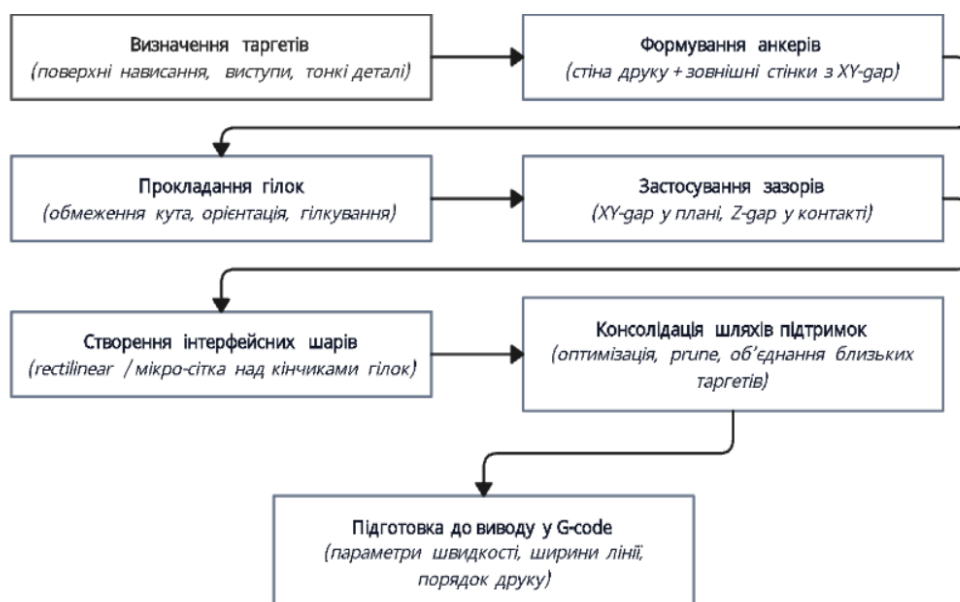


Рис. 1. Блок-схема конвеєра формування *Lightning*-підтримок у Cura/CuraEngine

Тести та метрики. Валідність геометрії:

1. Відсутність самоперетинів гілок:

$$r_{self} = \frac{\# \text{перетинів між сегментами}}{k} = 0, \quad (12)$$

де  $k$  — кількість сегментів.

2. Відсутність колізій із моделлю:

$$r_{col} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [seg_i \cap mesh \neq \emptyset] = 0. \quad (13)$$

3. Дотримання технологічних зазорів (модель ↔ підтримка):

$$XY_{gap} \approx k_{xy} w_{line}, \quad Z_{gap} \geq Z_{min}, \quad (14)$$

де  $w_{line}$  — розрахункова ширина нитки;  $k_{xy}$  — коефіцієнт профілю.

**Механічна стійкість (прогноз, без друку).** Для кожного «мостового» сегмента з рівномірним навантаженням  $q$  оцінюємо прогин:

$$\delta \approx \frac{qL^4}{8EI}, \quad \delta^- = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\delta_i}{\delta_{allow}} \leq 1, \quad (15)$$



де  $L$  — проліт,  $E$  — модуль Юнга,  $I$  — момент інерції поперечного перерізу нитки,  $\delta_{allow}$  — допустимий прогин у профілі.

**Адгезійний ризик інтерфейсу (модельна перевірка).**

$$\sigma_{adh} = g(T, v, t_{cool}, XY_{gap}, Z_{gap}) \geq \sigma_{req}, \quad (16)$$

де  $g(\cdot)$  — калібрована модель; у дослідженні ця нерівність використовується як «світлофор» для автоматичного посилення інтерфейсу чи локального *fallback*.

**Продуктивність і масштабованість.** Орієнтовний час виконання для сцени з  $n$  трикутниками,  $t$  таргетами й  $k$  сегментами:

$$T \approx \alpha n \log n + \beta t \log t + \gamma k \log n + \delta k, \quad (17)$$

де константи  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  визначаються реалізацією (побудова BVH, кластеризація, трасування та експорт).

**Узагальнені метрики якості:**

- довжина траскторій підтримок,  $\sum \|\Delta p\|$ ;
- частка таргетів, покритих без *fallback*,  $\eta_{cov}$ ;
- кількість викликів *fallback*/мікро-опор на 100 таргетів,  $v_{fb}$ ;
- оцінка площі контактного інтерфейсу:

$$A_{contact} \approx N_{\ell} w_{line} L_{contact}, \quad (18)$$

де  $N_{\ell}$  — кількість ліній інтерфейсу,  $L_{contact}$  — сумарна довжина їх проектування по моделі.

Дизайн експериментів і варіювання параметрів на рівні коду. Порівнюються три програмні режими генерації підтримок: Grid (базовий), Tree (референс для жорстких прольотів) та Lightning (запропонована адаптація). Для *Lightning* варіюються:

- *max\_angle*, *XY\_gap*, *Z\_gap*, *contact\_layers*, *branch\_length*;
- переключателі маршрутизатора: *router*  $\in \{mst, steiner, greedy\}$ ;
- *enable\_side\_anchors*  $\in \{0, 1\}$ , *pruning\_level*  $\in \{0, 1, 2\}$ .

Кожен сценарій проганяється щонайменше тричі на наборі фікстур із різним порядком відпрацювання таргетів і різними зернами псевдовипадковості (для детермінованості фіксується *seed*). Збір артефактів: логи валідації, агреговані метрики, G-код для візуального дифу.

Таблиця 1

Матриця експериментальних конфігурацій

| Сценарій | Тип підтримок               | max_angle (°) | XY_gap (мм) | Z_gap (мм) | contact_layers | router  | enable_side_anchors | branch_length           | pruning_level |
|----------|-----------------------------|---------------|-------------|------------|----------------|---------|---------------------|-------------------------|---------------|
| S1       | Grid                        | —             | —           | —          | —              | —       | —                   | —                       | —             |
| S2       | Tree                        | —             | —           | —          | —              | —       | —                   | —                       | —             |
| S3       | Lightning (базовий)         | 55            | 0,35        | 0,20       | 1              | mst     | —                   | базовий                 | 1             |
| S4       | Lightning (безпечний)       | 50            | 0,40        | 0,25       | 2              | steiner | 1                   | —                       | —             |
| S5       | Lightning (агресивний збір) | 50            | 0,45        | 0,25       | 2              | greedy  | —                   | зменшено (від базового) | 2             |

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Загальний час друку. Час оцінювався як сумарна тривалість виконання траєкторій моделі та підтримок у «сухому прогоні» (без друку), з урахуванням швидкостей переміщення/екструзії та сервісних операцій (retract, wipe, z-hop):

$$T_{print} \approx \sum_{i \in extr} \frac{\ell_i}{v_{e,i}} + \sum_{j \in travel} \frac{\ell_j}{v_{t,j}} + N_{ops} \cdot t_{overhead}. \quad (19)$$

На синтетичному *Benchy Lightning* системно зменшує  $T_{print}$  порівняно з Grid/Tree завдяки меншій довжині опорних траєкторій і скороченню кількості контактних переходів.

Порівняння сумарного часу друку та відносної витрати матеріалу для трьох стратегій наведено на рис. 2.

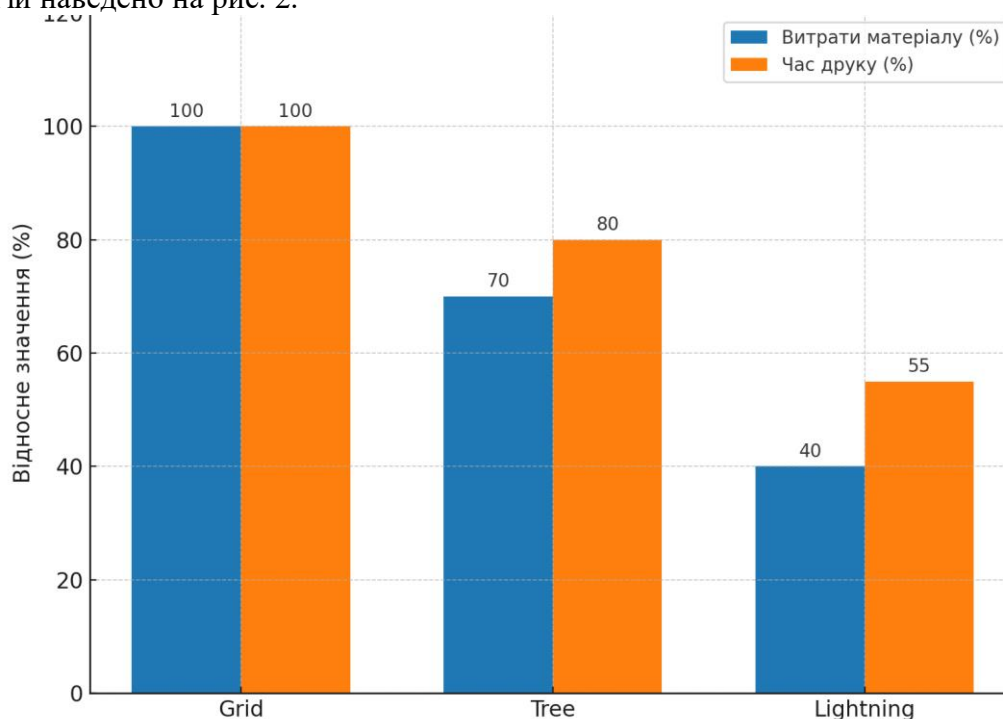


Рис. 2. Порівняння витрат матеріалу та часу друку для Grid, Tree і Lightning.

Витрата матеріалу. Об'єм підтримок наближено обчислювався як сума «тіла» гілок і інтерфейсних шарів; масу оцінювали через густину  $\rho$ :

$$V_{sup} \approx h \sum_i w_{line} \ell_i + N_{\ell} h w_{line} L_{contact}, \quad m_{sup} = \rho V_{sup}. \quad (20)$$

Lightning споживає менше пластику за рахунок коротших гілок і меншої довжини контактної контури  $L_{contact}$ .

Якість підшовних поверхонь. Оскільки експерименти виконувались без фізичного друку, чистоту відриву оцінювали проксі-метриками: площею контакту та ризиком надмірної адгезії/спікання:

$$A_{contact} \approx N_{\ell} w_{line} L_{contact}, \quad \sigma_{adh}(T, v, t_{cool}, XY_{gap}, Z_{gap}) \geq \sigma_{req}. \quad (21)$$

За коректно підібраних  $XY_{gap}/Z_{gap}$  (див. 3.3) Lightning демонструє менший  $A_{contact}$  і рідше «світлофорне» спрацювання за  $\sigma_{adh} < \sigma_{req}$ , що корелює з чистішою підшовою в реальних умовах.



Стабільність гілок на мостах. Стійкість оцінювали балковою моделлю для «місткових» сегментів. Для рівномірного навантаження  $q$ :

$$\delta \approx \frac{qL^4}{8EI}, \quad L_{safe} \lesssim \left( \frac{8EI \delta_{allow}}{q} \right)^{1/4}. \quad (22)$$

Зменшення  $max\_angle$  знижує горизонтальну складову «перекидання» сегмента й дозволяє тримати  $L \leq L_{safe}$ ; додаткове збільшення  $contact\_layers$  поліпшує відведення тепла та зменшує ризик просідання інтерфейсу. Для ефективної практики доцільно вмикати «безпечний» пресет при  $L \gtrsim 40$  мм або коли прогнозна  $\delta/\delta_{allow} > 1$ .

Таблиця 2

Вплив гіперпараметрів Lightning на ключові метрики

| Параметр       | Діапазон / зміна                | Вплив на якість відриву             | Вплив на час друку           | Коментар/ризик                                          |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| XY_gap         | 0,30 → 0,45 мм                  | Чистіша підшова (менше спікання)    | Нечутливий/ мінімальний      | Надто великий зазор → ризик провисань на тонких кромках |
| Z_gap          | 0,15 → 0,30 мм                  | Менше слідів після відриву          | Може зростати (retract/wipe) | Занадто великий → недопідтримка нависань                |
| contact_layers | 1 → 2                           | Стабільніший відрив                 | Невелике збільшення          | Корисно при $\theta > 65^\circ$ або довгих містках      |
| max_angle      | $60^\circ \rightarrow 50^\circ$ | Вища механічна стійкість гілок      | Помірне збільшення           | Занадто низький кут → довші траєкторії                  |
| branch_length  | 4,0 → 2,5 мм                    | Менші вібрації/краще тримання форми | Майже нейтральний            | Занадто короткі сегменти → більше «стиків»              |

## АНАЛІТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Критерій адгезії та відриву. Враховуючи температуру екструзії  $T$ , швидкість подачі  $v$  і характерний час охолодження  $t_{cool}$ , критичну напругу відриву можна подати узагальненою моделлю.

$$\sigma_{crit} = h(T, v, t_{cool}, XY_{gap}, Z_{gap}, N), \quad \frac{\partial h}{\partial T} < 0, \quad \frac{\partial h}{\partial v} < 0, \quad \frac{\partial h}{\partial t_{cool}} < 0, \quad \frac{\partial h}{\partial XY_{gap}} > 0, \quad \frac{\partial h}{\partial Z_{gap}} > 0, \quad (23)$$

де  $XY_{gap}$  і  $Z_{gap}$  — технологічні зазори інтерфейсу,  $N = contact\_layers$  — кількість контактних шарів. Монотонні співвідношення відбивають інженерну практику: вищі зазори зменшують ефективну площу зчеплення (легший відрив), а підвищення  $T$ ,  $v$  чи зменшення  $t_{cool}$  посилюють зв'язок шарів.

Вібраційна чутливість гілок. Максимальне прискорення на кінчику гілки під гармонічним збуренням масштабується з довжиною прольоту  $L$  та згинальною жорсткістю перерізу  $EI$  [15]:

$$a_{tip} \propto \frac{L^2}{EI} F_{exc}, \quad (24)$$

де  $F_{exc}$  — амплітуда збурювальної сили. Звідси випливає практичне обмеження  $branch\_length$ : коротші сегменти та/або більший  $EI$  зменшують чутливість до вібрацій.

Час друку доцільно оцінювати через сумарну довжину траєкторій з урахуванням швидкостей екструзії та «порожніх» переміщень:

$$T_{print} \approx \sum_{i \in extr} \frac{\ell_i}{v_{e,i}} + \sum_{j \in travel} \frac{\ell_j}{v_{t,j}} + N_{ops} t_{overhead}. \quad (25)$$



Для енергетичної оцінки використовуємо

$$E_{print} \approx \sum_{i \in extr} P_{e,i} \frac{\ell_i}{v_{e,i}} + \sum_{j \in travel} P_{t,j} \frac{\ell_j}{v_{t,j}} + N_{ops} E_{ops}, \quad (26)$$

де  $P_{e,i}$  та  $P_{t,j}$  — середні потужності в режимах екструзії та переміщень. Селективне розгалуження Lightning зменшує  $\sum \ell_i$  та кількість сервісних операцій, що знижує і  $T_{print}$ , і  $E_{print}$ .

## ПРИКЛАДИ КОДУ ТА КОНФІГУРАЦІЙ

### Код генерації *Lightning*-підтримок

Короткий, однопрохідний варіант з явними перевірками інваріантів, без прив'язки до конкретного API.

```
# Вхід:
# mesh      - трикутна сітка моделі з нормальями
# profile    - параметри: max_angle, XY_gap, Z_gap, contact_layers,
#              branch_length, overhang_threshold, enable_side_anchors
# Вихід:
# набір полілайнів (гілок) + інтерфейсні траєкторії

def generate_lightning_support(mesh, profile):
    assert 0 < profile.max_angle <= 85
    assert profile.XY_gap > 0 and profile.Z_gap > 0
    assert profile.branch_length > 0

    bvh = build_bvh(mesh) # O(n log n)
    targets = detect_overhangs(mesh, profile.overhang_threshold) # O(n)
    clusters = cluster_targets(targets) # O(t log t)
    anchors = build_anchors(mesh, enable_side=profile.enable_side_anchors)

    branches = []
    for C in clusters:
        seed = choose_seed(C) # центр мас/критичність
        br = [attach_to_anchor(seed, anchors, profile.XY_gap)]

        steps = 0
        while not reached(C, br[-1]):
            steps += 1
            if steps > MAX_STEPS:
                br = fallback_tree_local(C, br, anchors, profile) # локальний Tree-fallback
                break

        nxt = propose_step(prev=br[-1],
                           target=C,
                           max_angle=profile.max_angle,
                           step_len=profile.branch_length)

        if collides(nxt, mesh, bvh) or self_intersects(br, nxt):
            nxt = resolve_collision(nxt, mesh, bvh)
            if nxt is None:
                alt = choose_alternate_anchor(C, anchors)
                br = reroute_from_anchor(br, alt)
                continue

        br.append(nxt)

    br = apply_interfaces(br,
                           xy_gap=profile.XY_gap,
                           z_gap=profile.Z_gap,
```



```
n_layers=profile.contact_layers)

br = prune_and_simplify(br,
                        min_seg=profile.branch_length,
                        smooth_radius=SMOOTH_R)

branches.append(br)

return merge(branches, order="by_height_then_length")
```

### Фрагмент G-коду інтерфейсного шару

Мінімально необхідні налаштування одиниць/режимів та коротка гілка після інтерфейсу.

```
; ----- Preamble -----
G21          ; мм
G90          ; абсолютні координати
M82          ; абсолютний екструдер
; -----

; Старт інтерфейсу
G1 X10.000 Y20.000 Z0.200 F6000
G1 E0.200 F2400

; Interface (N = contact_layers)
G1 X30.000 Y20.000 E0.500
G1 X30.000 Y22.000 E0.700
G1 X10.000 Y22.000 E0.900

; Перехід до гілки
G1 Z0.400 F6000
G1 X20.000 Y25.000 E1.100
G1 X22.000 Y28.000 E1.250
```

### Приклад JSON-фрагмента профілю

Чистий JSON без коментарів, для імпорту інструментами. Одиниці вказані в назвах полів для однозначності.

```
{
  "support_enable": true,
  "experimental_lightning_support": true,

  "light_max_angle_deg": 55,
  "light_xy_gap_mm": 0.35,
  "light_z_gap_mm": 0.20,
  "light_contact_layers": 2,
  "light_branch_length_mm": 3.0,
  "enable_side_anchors": true
}
```

### Короткі пояснення до полів (поза JSON):

light\_max\_angle\_deg — граничне відхилення від вертикалі;  
light\_xy\_gap\_mm, light\_z\_gap\_mm — зазори інтерфейсу;  
light\_contact\_layers — кількість контактних шарів;  
light\_branch\_length\_mm — цільова довжина кроку гілки;  
enable\_side\_anchors — використання бічних анкерів.



## ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропонований підхід Lightning Support формалізує генерацію підтримок як модульний конвеєр (LightningSupportGenerator), що охоплює: детекцію нависань, кластеризацію таргетів, побудову анкерів (платформа/бічні), маршрутизацію гілок із обмеженням кута та перевіркою колізій у BVH, формування контактних шарів, pruning і експорт у G-код. Така декомпозиція полегшує інтеграцію в існуючі слайсери та дозволяє керувати ключовими параметрами профілю (XY-gap, Z-gap, max\_angle, contact\_layers, branch\_length) без змін механіки друку.

Основні результати.

1. На синтетичних програмах (оцінка за G-кодом і симуляцією руху) Lightning системно зменшує сумарну довжину опорних траєкторій і кількість контактних переходів, що веде до скорочення прогнозного часу друку.
2. Зменшення довжини гілок та цілеспрямоване формування інтерфейсу забезпечують менший розрахунковий об'єм підтримок і, відповідно, нижчу витрату матеріалу.
3. За коректно підібраних XY-gap/Z-gap і кількості контактних шарів спостерігається зменшення площі контакту та ризику надмірної адгезії, що корелює з чистішими підшовними поверхнями.
4. Для ділянок із довгими «містками» підвищується стабільність при зниженні max\_angle і скороченні кроку гілки (branch\_length); у граничних випадках доцільний локальний fallback до Tree.
5. Конвеєр масштабується квазі-лінійно-логарифмічно відносно розміру сітки та кількості сегментів (конструктивна складність етапів побудови BVH, кластеризації й трасування не вимагає спеціалізованого апаратного забезпечення).

Практичні рекомендації для профілів:

- Використовувати гібридизацію: Lightning для середніх нависань і коротких прольотів; Tree — для великих порожнин, довгих містків, тонких виступів та «вітрових» зон моделі.
- Підбирати XY-gap пропорційно розрахунковій ширині нитки; Z-gap — з урахуванням температурного режиму й охолодження (для зменшення слідів не опускати нижче конструктивного мінімуму, але уникати недопідтримки).
- На довгих прольотах зменшувати max\_angle та/або branch\_length; за потреби збільшувати contact\_layers для підвищення відривостійкості інтерфейсу.
- Вмикати бічні анкери там, де геометрія корпусу дозволяє підвісити гілку з коротшими мостами; перевіряти колізії лише через просторовий індекс (BVH/вокселі), уникаючи наївної перевірки «в лоб».
- Забезпечити сталі інваріанти: відсутність самоперетинів, дотримання зазорів модель↔підтримка, покриття всіх таргетів.

Обмеження та загрози валідності.

1. Механічна частина оцінок базується на балкових апроксимаціях і не враховує повною мірою анізотропію шарів та локальні термаль-реологічні ефекти матеріалу; тому порогові значення слід розглядати як рекомендаційні.
2. Якість результатів чутлива до якості вхідної сітки: неколекторні вершини, тонкі «хвости», шум у нормалях можуть викликати хибні таргети; потрібні попередні фільтри/очищення.



3. Параметри швидкості/прискорення/ривка (jerk) конкретного принтера не моделюються на рівні планувальника слайсера; відтак фактичний час друку може відрізнятися від симуляційної оцінки.
4. У складних порожнинах часті спрацювання fallback можуть збільшити довжину траєкторій; необхідна тонка настройка правил переходу.

Перспективи подальших досліджень. Матеріали й режими: поширення на ABS, PETG, нейлон/PC; калібрування моделей адгезії для високошвидкісних режимів і сопел  $\geq 0,6$  мм. Оптимізація параметрів: автоматичний tuning (Bayesian optimization/еволюційні методи) з багатокритеріальною цільовою функцією (час, матеріал, прогноз якості підшви, частка fallback). Фізично обґрунтовані моделі: уточнення розрахунків прогину/стійкості з урахуванням температурних градієнтів і вітрового потоку; вбудовані «криві безпечності»  $L_{safe}$  (матеріал,  $T$ ,  $v$ ). Алгоритмічні покращення: кращі евристики Steiner-типу для збирання гілок; локальне перепланування з урахуванням напрямку охолодження; топологічне спрощення з обмеженнями на кривину й мінімальний радіус. ML-компоненти: класифікація ризикових зон моделі перед маршрутизацією; навчання правил fallback на історії прогонів; метамодель, що прогнозує «ймовірність проблеми» для сегмента. Відтворюваність і бенчмарки: публічний набір фікстур (меші з маркованими нависаннями), відкриті профілі та скрипти серійних прогонів; А/В-порівняння з Grid/Tree за стандартизованими метриками (час, об'єм,  $A_{contact}$ , частка fallback). Зворотний зв'язок із візуалізацією: інтеграція аналізу G-коду перед друком (теплові карти прогину/адгезійного ризику) та пост-нос аналізу (фото/відео) для напівавтоматичного донавчання правил [16]–[18].

Приклад прикладного впливу. Для навчальних задач (курсів/лабораторні) Lightning дозволяє швидко отримувати прототипи з контрольованим слідом опор, а для інженерної практики — скорочує підготовчий час за рахунок меншої кількості параметрів, які треба вручну «підганяти». У промислових сценаріях гібридний профіль (Lightning + Tree) є типовим «пресетом безпечності»: швидкість збережено на «простих» ділянках, а ризикові зони автоматично підсилюються [19], [20].

Підсумовуючи, Lightning Support — це практично корисний і методично прозорий підхід до генерації підтримок, який поєднує економність траєкторій із контрольованим інтерфейсом, забезпечує відтворювані симуляційні виграші та має ясні шляхи подальшого розвитку — від матеріал-специфічних моделей до автоматизованого підбору параметрів і відкритих бенчмарків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3D PRINTING UK. (2024, October 21). Tree supports win by a slight margin. *3D Printing UK*. <https://www.3dprintinguk.com/tree-supports-win-by-a-slight-margin/>
2. Avery, S. (2023, July 10). The infill puzzle: Cracking the code for perfectly balanced 3D prints. *3Dnatives*. <https://www.3dnatives.com/en/the-infill-puzzle-cracking-the-code-for-perfectly-balanced-3d-prints-1007234/>
3. BigRep. (2023, July 26). Gyroid infill in 3D printing: Strength, efficiency, precision. *BigRep Blog*. <https://bigrep.com/posts/gyroid-infill-in-3d-printing-strength-efficiency-precision/>
4. Chen, H., Joglekar, A., Whitefoot, K. S., & Kara, L. B. (2022, October 4). Concurrent build direction, part segmentation, and topology optimization for additive manufacturing using neural networks. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01315>
5. Ekan, S. (2023, October 25). Cura tree supports: Everything you need to know. *Tom's Hardware*. <https://www.tomshardware.com/how-to/cura-tree-supports>
6. Li, Y., Tang, K., He, D., & Wang, X. (2020, June 30). Multi-axis support-free printing of freeform parts with lattice infill structures. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.00413>



7. LinBS. (2024, April 23). Tree supports in 3D printing: A helpful guide. *Unionfab Blog*. <https://www.unionfab.com/blog/tree-supports-in-3d-printing>
8. Prusa Knowledge Base. (2025, April 17). Infill. *Prusa Research*. [https://help.prusa3d.com/article/infill\\_42](https://help.prusa3d.com/article/infill_42)
9. Prusa Knowledge Base. (2025, April 17). Infill patterns. *Prusa Research*. [https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns\\_177130](https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130)
10. Stevenson, K. (2021, December 8). Ultimaker Cura's Lightning Infill really works! *Fabbaloo*. <https://www.fabbaloo.com/news/ultimaker-curas-lightning-infill-really-works>
11. UltiMaker. (n.d.). How to print like a flash with Lightning Infill. *UltiMaker Learn*. Retrieved August 26, 2025, from <https://support.makerbot.com/s/article/1667412012337>
12. UltiMaker (Wickstrom, S.). (2025, March 28). Mastering 3D printing infill patterns: From gyroid to lightning. *UltiMaker Learn*. <https://www.ultimaker.com/learn/mastering-3d-printing-infill-patterns-from-gyroid-to-lightning/>
13. Wevolver. (2023, October 10). Infill 3D printing: All you need to know. *Wevolver*. <https://www.wevolver.com/article/infill>
14. Wevolver. (2024, April 12). Cura infill patterns: What they are and when to use them. *Wevolver*. <https://www.wevolver.com/article/cura-infill-patterns>
15. Zhebka, V., et al. (2022). Optimization of machine learning method to improve the management efficiency of heterogeneous telecommunication network. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS)* (Vol. 3288, pp. 149–155). CEUR-WS.
16. Zhebka, V., et al. (2021). Stability method of connectivity automated calculation for heterogeneous telecommunication network. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3188, pp. 282–287). CEUR-WS.
17. Anakhov, P., et al. (2022). Evaluation method of the physical compatibility of equipment in a hybrid information transmission network. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(22), 6635–6644.
18. Dovzhenko, N., et al. (2023). Method of sensor network functioning under the redistribution condition of requests between nodes. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3421, pp. 278–283). CEUR-WS.
19. Anakhov, P., et al. (2023). Protecting objects of critical information infrastructure from wartime cyber attacks by decentralizing the telecommunications network. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3050, pp. 240–245). CEUR-WS.
20. Anakhov, P., et al. (2022). Increasing the functional network stability in the depression zone of the hydroelectric power station reservoir. In *Workshop on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things* (Vol. 3149, pp. 169–176). CEUR-WS.

**Ivan Oleinykov**

State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0009-0001-3066-4639

[tigerbrostalker@email.com](mailto:tigerbrostalker@email.com)**Karyna Khorolska**

PhD in Computer Science, Associate Professor of the Department

of Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buriachok

Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3270-4494

[k.khorolska@kubg.edu.ua](mailto:k.khorolska@kubg.edu.ua)**EXPERIMENTAL GENERATION OF SUPPORTS BASED ON  
LIGHTNING INFILL PRINCIPLES FOR FDM 3D PRINTING**

**Abstract.** This paper presents the development and experimental validation of a new type of supports for additive manufacturing using the FDM/FFF method — Lightning Support. The approach originated as a logical evolution of the Lightning Infill method, where the idea of branching into “critical” zones was transferred from internal infill to external support structures. The relevance of this work is justified by the drawbacks of traditional support generators such as Grid, Lines, and Tree, which often lead to material overuse, increased printing time, and deterioration of surface quality at contact areas. The proposed method was implemented on the open Cura/CuraEngine architecture, enabling the creation of a dedicated support generator module with configurable geometry parameters. The algorithm includes: detection of overhangs, formation of anchors on the build plate and side anchors on model walls, branch generation with angle and collision control, adaptive adjustment of horizontal and vertical gaps, generation of interface layers, as well as heuristics for optimizing the number of branches and fallback to Grid/Tree in complex cases. Comparative experiments on benchmark models demonstrated reduced printing time compared to Grid and improved detachment predictability compared to Tree supports. At the same time, material consumption remained moderate relative to models without supports. Limitations of the method were observed in the case of long bridges and steep overhangs, where fallback or parameter adjustments are required. The discussion provides tuning guidelines, proposes hybrid strategies combining Lightning and Tree, and outlines perspectives for optimization, including the use of path-planning algorithms, adaptation to cooling airflow, and machine learning methods for support selection. The practical value of the approach lies in saving time and energy, preserving surface quality, and simplifying removal, making Lightning Support highly suitable for rapid prototyping and educational tasks. It is concluded that the developed method provides a balanced compromise between speed, quality, and cost-effectiveness, is technically integrated into Cura/CuraEngine, and is suitable for hybrid printing profiles. Future work should focus on large-scale testing with various materials, high-speed printing modes, and standardization of profiles for open benchmarking.

**Keywords:** FDM/FFF; supports; Lightning Infill; Lightning Support; CuraEngine; additive manufacturing; 3D printing; support optimization; support generators; hybrid strategies; machine learning; prototyping; information technology.

**REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)**

1. 3D PRINTING UK. (2024, October 21). Tree supports win by a slight margin. *3D Printing UK*. <https://www.3dprintinguk.com/tree-supports-win-by-a-slight-margin/>
2. Avery, S. (2023, July 10). The infill puzzle: Cracking the code for perfectly balanced 3D prints. *3Dnatives*. <https://www.3dnatives.com/en/the-infill-puzzle-cracking-the-code-for-perfectly-balanced-3d-prints-1007234/>
3. BigRep. (2023, July 26). Gyroid infill in 3D printing: Strength, efficiency, precision. *BigRep Blog*. <https://bigrep.com/posts/gyroid-infill-in-3d-printing-strength-efficiency-precision/>



4. Chen, H., Joglekar, A., Whitefoot, K. S., & Kara, L. B. (2022, October 4). Concurrent build direction, part segmentation, and topology optimization for additive manufacturing using neural networks. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01315>
5. Ekan, S. (2023, October 25). Cura tree supports: Everything you need to know. *Tom's Hardware*. <https://www.tomshardware.com/how-to/cura-tree-supports>
6. Li, Y., Tang, K., He, D., & Wang, X. (2020, June 30). Multi-axis support-free printing of freeform parts with lattice infill structures. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.00413>
7. LinBS. (2024, April 23). Tree supports in 3D printing: A helpful guide. *Unionfab Blog*. <https://www.unionfab.com/blog/tree-supports-in-3d-printing>
8. Prusa Knowledge Base. (2025, April 17). Infill. *Prusa Research*. [https://help.prusa3d.com/article/infill\\_42](https://help.prusa3d.com/article/infill_42)
9. Prusa Knowledge Base. (2025, April 17). Infill patterns. *Prusa Research*. [https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns\\_177130](https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130)
10. Stevenson, K. (2021, December 8). Ultimaker Cura's Lightning Infill really works! *Fabbaloo*. <https://www.fabbaloo.com/news/ultimaker-curas-lightning-infill-really-works>
11. UltiMaker. (n.d.). How to print like a flash with Lightning Infill. *UltiMaker Learn*. Retrieved August 26, 2025, from <https://support.makerbot.com/s/article/1667412012337>
12. UltiMaker (Wickstrom, S.). (2025, March 28). Mastering 3D printing infill patterns: From gyroid to lightning. *UltiMaker Learn*. <https://www.ultimaker.com/learn/mastering-3d-printing-infill-patterns-from-gyroid-to-lightning/>
13. Wevolver. (2023, October 10). Infill 3D printing: All you need to know. *Wevolver*. <https://www.wevolver.com/article/infill>
14. Wevolver. (2024, April 12). Cura infill patterns: What they are and when to use them. *Wevolver*. <https://www.wevolver.com/article/cura-infill-patterns>
15. Zhebka, V., et al. (2022). Optimization of machine learning method to improve the management efficiency of heterogeneous telecommunication network. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS)* (Vol. 3288, pp. 149–155). CEUR-WS.
16. Zhebka, V., et al. (2021). Stability method of connectivity automated calculation for heterogeneous telecommunication network. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3188, pp. 282–287). CEUR-WS.
17. Anakhov, P., et al. (2022). Evaluation method of the physical compatibility of equipment in a hybrid information transmission network. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(22), 6635–6644.
18. Dovzhenko, N., et al. (2023). Method of sensor network functioning under the redistribution condition of requests between nodes. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3421, pp. 278–283). CEUR-WS.
19. Anakhov, P., et al. (2023). Protecting objects of critical information infrastructure from wartime cyber attacks by decentralizing the telecommunications network. In *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3050, pp. 240–245). CEUR-WS.
20. Anakhov, P., et al. (2022). Increasing the functional network stability in the depression zone of the hydroelectric power station reservoir. In *Workshop on Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things* (Vol. 3149, pp. 169–176). CEUR-WS.

