

¹ Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна,
<https://orcid.org/0009-0005-0306-846X>;

² Національний лісотехнічний університет України, Львів, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-8707-9895>.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ SIMP ДЛЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ЛІСОВИХ МАШИН

Анотація.

У статті запропоновано вдосконалений метод топологічної оптимізації FA-SIMP для проєктування несучих елементів конструкцій лісозаготівельних машин, зокрема кронштейнів маніпуляторів форвардерів. Метою роботи є зниження маси деталей без втрати жорсткості та підвищення їхньої циклічної довговічності шляхом покращення збіжності класичного методу SIMP. Алгоритм FA-SIMP інтегрує в класичну схему SIMP крок прискорення (точку випередження), що дозволяє обчислювати градієнти в більш перспективному напрямку оптимізації. Чисельний експеримент проведено на 2D-моделі плоскої балки (340×80 мм, товщина 10 мм) зі сталі ($E=210$ ГПа, $\nu=0,30$), навантаженою зосередженою силою 5,0 кН при цільовому об'ємі матеріалу 40%. Розрахункова сітка складала 7200 скінченних елементів. Результати показали, що FA-SIMP після 120 ітерацій забезпечує

зниження податливості конструкції ($C=7,181$ Дж проти 7,206 Дж) та зменшення пікових напружень за фон Мізесом на 2,64% (159,09 МПа проти 163,4 МПа) порівняно з класичним SIMP. Індекс розмитості ("сірості") топології зменшився з 0,1964 до 0,1591, що спрощує перехід до підготовки виробничої документації на підприємстві. Реалізація методу FA-SIMP у практиці проєктування несучих елементів лісових машин сприятиме зменшенню питомого тиску на ґрунт, зниженню витрат палива та вуглецевого сліду лісозаготівельних робіт, що відповідає принципам сталого лісокористування.

Ключові слова: топологічна оптимізація, несучий елемент, лісозаготівельна машина, податливість конструкції, напруження за фон Мізесом.

R. R. Pyshka, B. Ya. Bakay

IMPROVEMENT OF THE SIMP METHOD FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF LOAD-BEARING ELEMENTS OF FOREST MACHINERY STRUCTURES

Abstract.

The paper presents an improved topology optimization method, FA-SIMP, for the design of load-bearing structural components of forest harvesting machines, in particular manipulator brackets of forwarders. The aim of the work is to reduce the mass of parts without compromising stiffness and to improve their fatigue life by enhancing the convergence of the classical SIMP method. The FA-SIMP algorithm integrates the acceleration step (lookahead) into the classical SIMP scheme, allowing gradients to be computed in a more promising optimization direction. A numerical experiment was conducted using a 2D plane-stress beam model (340×80 mm, thickness 10 mm) made of steel ($E=210$ GPa, $\nu=0.30$), loaded with a concentrated force of 5.0 kN at a prescribed material volume of 40%. The finite element mesh consisted of 7200 elements. The results showed that, for 120 iterations, FA-SIMP reduces structural compliance ($C=7.181$ J vs. 7.206 J) and reduces the von Mises peak stress by 2.64% (159.09 MPa vs. 163.4 MPa) compared to the classical SIMP. The grey index of the final topology decreased from 0.1964 to 0.1591, which

simplifies the transition to manufacturing documentation. Implementing the FA-SIMP method in the design practice of load-bearing elements of forest machinery can reduce the specific ground pressure, fuel consumption and carbon footprint of timber harvesting operations, which is consistent with the principles of sustainable forest management.

Keywords: topology optimization, load-bearing element, forest harvesting machine, structural compliance, von Mises stress.

Лісозаготівельні машини є ключовим елементом виробничої інфраструктури на лісгосподарських підприємствах, проте їхня експлуатація супроводжується значними екологічними ризиками, що безпосередньо впливають на стан лісових екосистем [1]. Постійні динамічні навантаження на пересіченій місцевості зумовлюють підвищені вимоги до міцності та жорсткості несучих елементів конструкції [2], таких як рами, стріли, балки та опорні елементи технологічного устаткування. Традиційні методи проектування, орієнтовані на завищені коефіцієнти запасу міцності, призводять до надмірної маси цих деталей, що збільшує питомий тиск ходових систем на ґрунт, спричиняє його ущільнення, погіршує водний баланс і знижує здатність лісових угруповань до природного відновлення [3]. У результаті формується додаткове техногенне навантаження, яке суперечить принципам сталого розвитку та вимогам міжнародних екологічних сертифікаційних систем (FSC, PEFC). Удосконалення методу SIMP для топологічної оптимізації несучих елементів відкриває можливість зменшення матеріаломісткості конструкцій без втрати їхньої функціональної надійності, що водночас сприяє збереженню екологічної рівноваги лісових екосистем і підвищує ефективність машинобудівних рішень у заготівлі деревини.

Методи топологічної оптимізації дають змогу формалізувати завдання раціонального розподілу матеріалу в деталі та знайти її оптимальну форму, яка забезпечує необхідну жорсткість при мінімальній масі. Найбільш поширеним у практиці є метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), запропонований Бендсо та Кікучі [4] й деталізований у роботах Сігмунда [5]. Незважаючи на його широке застосування, класичний SIMP має відомий недолік – повільну збіжність ітераційної процедури, що особливо помітно при розв’язанні великомасштабних завдань з великою кількістю скінченних елементів. Підвищення якості кінцевої топології та зниження пікових напружень у несучих елементах лісозаготівельної техніки є актуальним завданням, оскільки ці машини працюють у режимі циклічних навантажень, а локальні концентратори напружень суттєво зменшують їхню втомну довговічність.

Метою цієї роботи є розроблення та обґрунтування удосконаленого алгоритму топологічної оптимізації, який отримав назву FA-SIMP. У цьому методі класична схема SIMP доповнюється кроком прискорення, що дозволяє отримувати топології з меншою податливістю конструкції та більш рівномірним розподілом напружень. Практична спрямованість роботи полягає у застосуванні запропонованого методу до завдань проектування несучих елементів лісових машин, зокрема кронштейна маніпулятора форвардера.

В основі запропонованого методу лежить класичне формулювання завдання топологічної оптимізації: мінімізація податливості конструкції при обмеженні сумарного об’єму матеріалу. Податливість визначається як добуток вектора зовнішніх сил на вектор вузлових переміщень, або в елементному поданні, як сума добутків жорсткості кожного скінченного елемента на квадрат його переміщень. Жорсткість кожного елемента задається степеневим законом SIMP: модуль пружності елемента є функцією від відносної густини матеріалу в цьому елементі, причому числове значення показника (пеналізація) приймається рівним трьом для редукції проміжних значень густини. Для конструкційної сталі Strenx 700, з якої виготовляють рами та кронштейни лісозаготівельної техніки, модуль пружності становить 210 ГПа, коефіцієнт Пуасона – 0,30, густина – 7870 кг/м³. Мінімальне значення модуля пружності для порожніх елементів обирається на рівні 10⁻⁹ від основного модуля, щоб уникнути виродження матриці жорсткості.

Ключовою відмінністю FA-SIMP є встановлення кроку обчислення так званої точки випередження перед кожним розв'язанням завдання. Ця точка обчислюється як сума поточного вектора проєктних змінних і добутку параметра імпульсу на різницю між поточним та попереднім векторами. Фактично алгоритм застосовує метод “зазирання вперед” у напрямку, який був визначений на попередньому кроці оптимізації. Саме в цій точці обчислюються градієнти чутливості та розв'язується система рівнянь пружної рівноваги. Параметр імпульсу в даній роботі прийнято рівним 0,15, що забезпечує стабільну збіжність без осциляцій (рисунок 1).

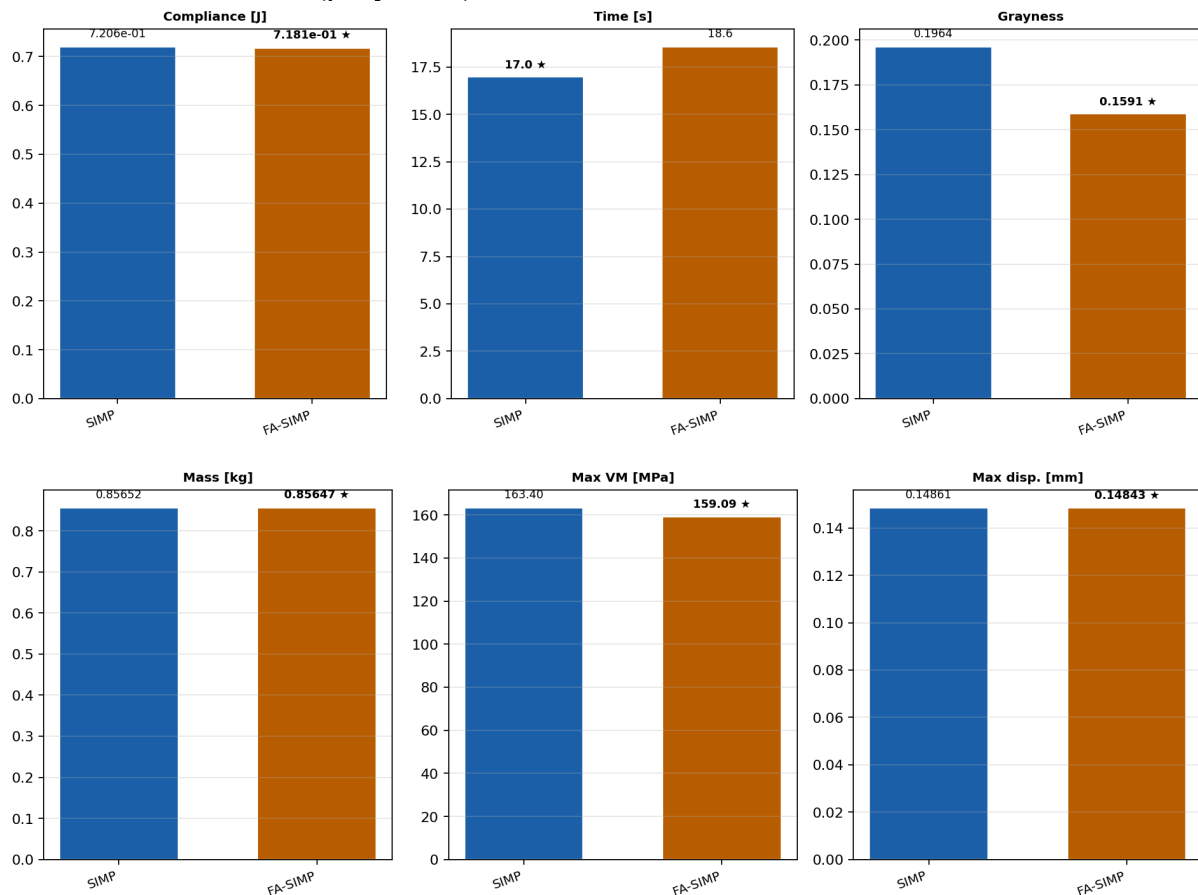


Рисунок 1 – Порівняння показників дослідження для методів SIMP і FA-SIMP

Перевірка ефективності FA-SIMP проводилась на класичній тестовій задачі оптимізації плоскої балки розмірами 340×80 мм, яка моделює поперечний переріз несучого кронштейна маніпулятора форвардера. Товщина балки приймалась рівною 10 мм. Граничні умови відповідали схемі простої балки: шарнірне закріплення у нижньому лівому куті та рухома опора у нижньому правому куті. Зосереджена сила величиною 5,0 кН прикладалась вертикально вниз у середній точці верхньої грані, що імітує зусилля від маси деревини при заданому вильоті маніпулятора. Розрахункова сітка складалась з 7200 чотирикутних скінченних елементів (120 елементів по довжині та 60 по висоті), а цільова частка матеріалу після оптимізації була встановлена на рівні 40% від початкового об'єму.

Результати чисельного експерименту показали (рисунок 2), що метод FA-SIMP перевершує класичний SIMP за всіма ключовими показниками при однаковій кількості ітерацій (120). Податливість конструкції, тобто інтегральна міра її гнучкості (чим менша податливість, тим жорсткішою є конструкція при однаковій масі), для FA-SIMP становила 7,181 Дж, тоді як для класичного SIMP вона дорівнювала 7,206 Дж. Таким чином, зниження податливості становило 0,36%, що означає, що кронштейн, отриманий за допомогою FA-

SIMP, є жорсткішим при тій самій витраті матеріалу, а це безпосередньо впливає на надійність маніпулятора у реальних умовах експлуатації.

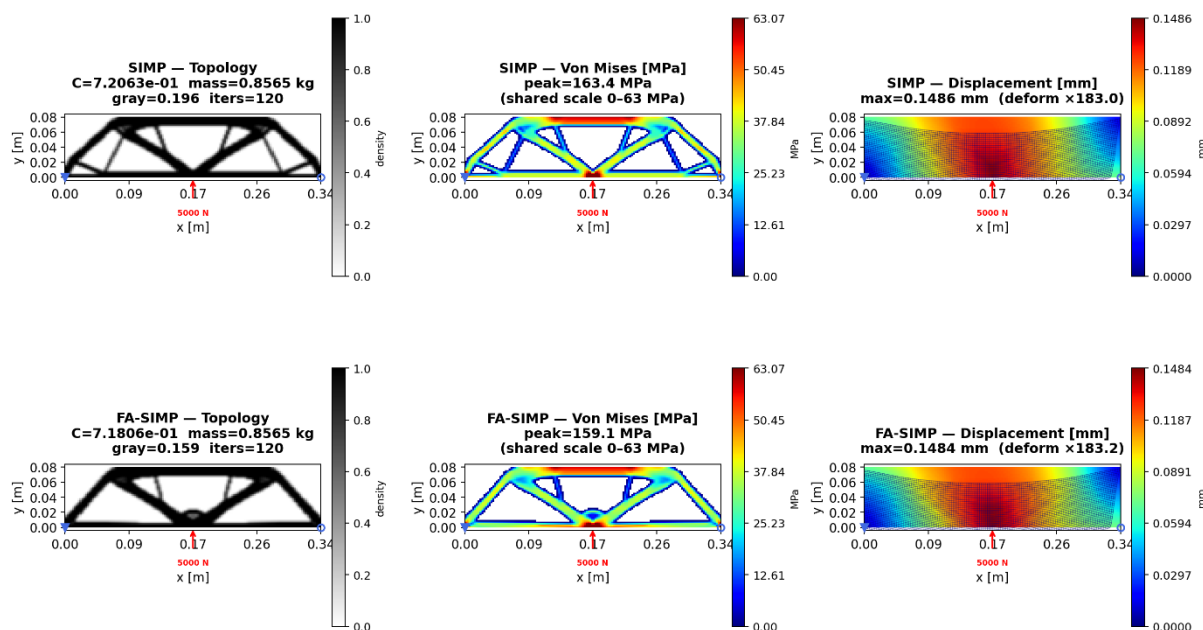


Рисунок 2 – Порівняння результатів дослідження: напруження за фон Мізесом та переміщення для SIMP і FA-SIMP

Також важливим для довговічності лісозаготівельної техніки є зменшення пікових напружень. За критерієм фон Мізеса, який найкраще описує перехід матеріалу в пластичний стан при складному напруженому стані, максимальне напруження для FA-SIMP склало 159,09 МПа, тоді як для класичного SIMP воно сягало 163,4 МПа. Зниження на 2,64% є достатньо значним, оскільки втомна довговічність деталі при циклічних навантаженнях залежить від пікового напруження за степеневим законом: пікове напруження для FA-SIMP становить 16,223 кгс/мм² проти 16,663 кгс/мм² для SIMP. З розподілу осьових напружень видно, що в класичному SIMP максимальне стискаюче напруження сягає –142,8 МПа, тоді як для FA-SIMP воно становить лише –136,6 МПа. Це свідчить про те, що запропонований алгоритм знаходить топологію, у якій матеріал розподілений більш ефективно, а несучі елементи мають більш однорідне навантаження без різких концентраторів напружень.

Додатковим позитивним ефектом запропонованого удосконалення методу є зменшення індексу розмитості топології, тобто частки елементів із проміжними значеннями, з 0,1964 (класичний SIMP) до 0,1591 (FA-SIMP). Це означає, що отримана топологія є більш чіткою, бінарною структурою “матеріал – порожнина”, що значно спрощує подальшу інтерпретацію результатів, їх апроксимацію гладкими поверхнями та перехід до виробничої документації, наприклад до формату STEP для верстатів з числовим програмним керуванням.

Таким чином, у роботі запропоновано метод FA-SIMP – вдосконалений алгоритм топологічної оптимізації, що поєднує класичну схему SIMP з кроком прискорення, який полягає у введенні точки випередження перед обчисленням чутливостей. Чисельний експеримент у завданні, що моделює несучий кронштейн маніпулятора форвардера, підтвердив перевагу FA-SIMP: при однаковій кількості ітерацій і однаковій витраті матеріалу досягнуто зниження податливості на 0,36% та зниження пікових напружень за фон Мізесом на 2,64%, що безпосередньо підвищує циклічну довговічність деталі. Крім того, покращення індексу розмитості спрощує перехід від топологічної оптимізації до виробничої документації.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування методу FA-SIMP при автоматизованому проєктуванні несучих елементів лісових машин. Зменшення маси цих елементів без втрати жорсткості дозволяє знизити питомий тиск на лісові ґрунти, зменшити витрати палива та відповідно знизити вуглецевий слід лісозаготівельних робіт, що повністю узгоджується з принципами сталого лісокористування та цілями проєкту WoodReconstruct, який об'єднує науку, адміністрування та бізнес для низьковуглецевої повоєнної відбудови. Подальші дослідження будуть спрямовані на тривимірну топологічну оптимізацію деталей рам харвестерів та форвардерів з урахуванням технологічних обмежень лиття, зварювання й фрезерування, а також на впровадження запропонованого методу в інженерну практику вітчизняних машинобудівних підприємств, що працюють на потреби лісового сектору України.

Перелік використаних джерел

1. Бакай Б. Я., Рудько І. М., Удовичий О. М. *Ресурсоефективне устаткування лісопромислового виробництва* : монографія / Академія технічних наук України, Національний лісотехнічний університет України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М., 2025. – 136 с. – DOI: <https://doi.org/10.63048/978-617-7926-77-0>
2. Радяк І., Бакай Б. Динамічний аналіз стріли маніпулятора комбінованого устаткування для трелювання деревини за допомогою фазових портретів // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Том 359, № 6.2. – С. 114–122. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-86>
3. Loveikin V., Romasevych Y., Bakay B., Rudko I., Radiak I. Modelling and Dynamic Analysis of an Integrated Hydraulic Forest Crane-Winch System for Timber Extraction // *FME Transactions*. – 2025. – Vol. 53, No. 4. – P. 625–638. – DOI: <https://doi.org/10.5937/fme2504625L>
4. Bendsøe M. P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1988. – Vol. 71. – P. 197–224. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
5. Sigmund O. A 99 line topology optimization code written in Matlab // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2001. – Vol. 21. – P. 120–127. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s001580050176>