

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ КУЛЬТИВУВАННЯ БАЗИДІЄВИХ МАКРОМІЦЕТІВ

Сокольницький М. Ю.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, sokolnickiy@gmail.com

Abstract

This study investigates the application of such algorithms to optimize substrate parameters, treating them as black-box functions affecting fungal growth. By mimicking natural selection processes, evolutionary strategies enhance the search for optimal substrate conditions, surpassing traditional methods like regression analysis or exhaustive search. The research aims to assess the feasibility of evolutionary optimization strategies in biotechnological applications.

Keywords: *evolutionary optimization, Pleurotus cultivation, substrate parameters, biomass yield, CMA-ES.*

Вступ. З розвитком м'яких обчислень, таких як метаевристичні методи, стохастична та еволюційна оптимізація, відкривається широкий простір для вдосконалення процесів в різних галузях, зокрема в біотехнологіях. Ці алгоритми стали особливо ефективними у випадках роботи з функціями, які складно аналізувати або за відсутності аналітичних виразів для їхнього опису, а також коли функція залежить від великої кількості параметрів [1, 2]. У контексті культивування макроміцетів, компоненти субстрату є ідеальним прикладом таких функцій «чорного ящика». Завдяки своїй хімічній природі ці компоненти взаємодіють між собою та з біомасою хаотично та непередбачувано. Через складність взаємодії компонентів субстрату, відношення «причина-наслідок» може бути нелінійним та неоднорідним, ускладнюючи аналіз та прогнозування [3]. Застосування м'яких обчислень, зокрема еволюційних алгоритмів, дозволяє оптимізувати параметри субстрату шляхом імітації природного процесу еволюції. Під час оптимізації, алгоритми поступово підлаштовують значення параметрів таким чином, щоб максимізувати цільову змінну – біомасу грибів. Такий підхід дозволяє враховувати різноманітність та нелінійність взаємодії між компонентами субстрату, що робить його більш адаптивним та ефективним у порівнянні з традиційними методами, такими як регресійний аналіз чи метод перебору [2].

Метою даного дослідження є оцінка ефективності та доцільності використання еволюційних стратегій у вирішенні задач оптимізації в біотехнологічних процесах, зокрема для культивування базидіоміцетів.

Матеріали та методи. Для підбору ефективного методу оптимізації поживного середовища використано методи стохастичної оптимізації, а саме: алгоритми еволюційної оптимізації основі на публікації з м'яких обчислень [4]. Для моделювання роботи різних алгоритмів на тестових функціях було застосовано мову програмування Python. Було розглянуто чотири еволюційні стратегії:

- CMA-ES (коваріаційно-матрична адаптивна еволюційна стратегія) – базується на адаптивному зміщенні коваріаційної матриці, що дозволяє ефективно пристосовуватися до форми і розміру функції цілі [5]. Доцільно

використати теорему, що забезпечує збіжність пошуку оптимуму еволюційними стратегіями:

Якщо $f(x)$ неперервна функція, визначена на закритій області з глобальним оптимумом $f^*(x)$, то

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = f^*(x),$$

де t – номер покоління.

- $(1+1)$, що базується на мутації поточного кращого рішення шляхом додавання випадкового шуму до його параметрів;
- $(\mu+1)$ – розширення методу $(1+1)$, де одночасно обирається декілька кращих кандидатів, і вибирається найкращий з них для наступного покоління;
- та $(\mu+\lambda)$ – в цьому методі за один крок генерується λ кандидатів на основі поточного кращого рішення, після чого обирається кращий з них, щоб стати батьком для майбутніх поколінь. Відмінність від попереднього методу полягає в тому, що батьками можуть стати не тільки кращі кандидати, але й випадково обрані;

Параметри для стратегій були наступні: кожен алгоритм мав максимальну кількість ітерацій – 1000. Аналіз проводився наступним чином: було змодельовано 100 симуляцій роботи кожного алгоритму методом Монте-Карло на функції Розенброка та розраховано середнє, оптимізоване значення ефективності

Результати та обговорення. Результати дослідження наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння ефективності алгоритмів еволюційної оптимізації

Алгоритм	$(1+1)$	$(\mu+1)$	$(\mu+\lambda)$	CMA-ES
Ефективність	0.4264	0.3671	0.3671	0.00007

Із таблиці видно, що CMA-ES є найефективнішим методом серед розглянутих. Це може бути пов'язано із деякими факторами:

- Ефективність адаптації параметрів, оскільки CMA-ES автоматично адаптується до властивостей задачі оптимізації, таких як градієнт і кривизна функції.
- Глобальна збіжність досягається завдяки комбінації еволюційної стратегії та адаптації параметрів.
- CMA-ES зазвичай ефективно працює навіть при наявності обмежень на область пошуку.
- Параметри CMA-ES можуть бути налаштовані для різних типів оптимізаційних завдань та функцій. Це робить його варіантним і масштабованим для різних сценаріїв.

Регресійні моделі найчастіше використовуються для оптимізації складу поживного середовища. Зокрема, при культивуванні *Flammulina velutipes* було застосовано повний факторний експеримент 2⁴. Сумарно використано 17 поживних середовищ (16 дослідних та контрольне з вихідними параметрами). Основними недоліками такого методу є припущення про лінійну залежність між вхідними та вихідними даними та потребу у великій кількості даних для збільшення статистичної значущості результату, що значно ускладнює постановку експерименту [6]. Більш простим за своєю суттю та підходом є метод перебору. Його варіація була використана для оптимізації виходу ендо-1,4-β-D-глюканази *Irpex lacteus*. У експерименті було використано 6 поживних середовищ для культивування даного макроміцету, де на основі глюкозо-пептон-дріжджового середовищ оптимізували шляхом зміни джерела вуглецю і азоту. Оскільки в даному підході враховуються тільки якісні зміни параметрів він неефективний для впровадження [7].

В той же час еволюційні стратегії оминають ці ризики, завдяки відбору кращих індивідів з популяції. Про ефективність застосування логістичних моделей для моделювання росту і продукування ферментів зазначено у [8]. Було встановлено, що модифікована логістична модель дозволяє ефективно прогнозувати накопичення біомаси ($R^2 > 0,9$).

Висновки. СМА-ES є ефективним алгоритмом оптимізації, який поєднує в собі переваги еволюційних стратегій з методами адаптації. Цей підхід дозволяє налаштовувати параметри алгоритму, щоб краще відповідати структурі задачі оптимізації і забезпечити ефективну пошукову поведінку.

Подальше розглядання та аналіз даних, що впливають із цього дослідження, можуть сприяти покращенню виробничих процесів та досягненню більш високих показників якості та кількості продукції.

Список використаної літератури:

1. A Novel Optimization Approach Based On Unstructured Evolutionary Game Theory / H. Escobar-Cuevas et al. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.12.027>.
2. Investigation of the Use of Evolutionary Algorithms for Modeling and Simulation of Bifacial Photovoltaic Modules / G. H. Grala et al. *Inventions*. 2023. Vol. 8, no. 6. P. 134. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions8060134>.
3. Linear and nonlinear causality between signals: methods, examples and neurophysiological applications Boris Gourévitch · Régine Le Bouquin-Jeannès · Gérard Faucon Received: 30 September 2005 / Accepted: 17 July 2006 / Published online: 23 August 2006 © Springer-Verlag 2006, P. 350
4. Simon D. Evolutionary optimization algorithms: biologically-Inspired and population-based approaches to computer intelligence. 2013. 776 p.
5. Hansen N. The CMA evolution strategy: A tutorial. 2016. P. 1–39. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.00772>.
6. Optimization of the Nutrient Medium for *Flammulina velutipes* Submerged Biomass Production and Micromorphology of Its Mycelium / L. Krasnopolskaya et al. *Fermentation*. 2021. Vol. 7, no. 3. P. 180. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation7030180>.
7. Boiko S., Netsvetov M., Radchenko V. Cellulose biosaccharification by *Irpex lacteus* wood decay fungus. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2023. Vol. 25. URL: <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100435>.
8. Validation of mathematical models as a tool for prediction of α-amylase production by *Coprinus comatus* in a low-cost culture medium / L. C. Paludo та ін. *Acta Scientiarum. Technology*. 2023. T. 45. C. e63415. URL: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v45i1.63415>.