

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-13>

УДК 620.179.14

ЛЕВИНСЬКИЙ Олександр

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: levinskiy.a.s@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9643-1494>

ОЛЬМАН Даніель

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: 4141456@as.op.edu.ua

<https://orcid.org/0009-0003-1365-8055>

ГАНУСОВСЬКИЙ Віктор

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: 3499109@as.op.edu.ua

<https://orcid.org/0009-0004-3866-2496>

БІЛОУС Денис

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: denisbilous1989@stud.op.edu.ua

<https://orcid.org/0009-0006-1355-4338>

КЕРДАНЬ Федір

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: teogof@stud.op.edu.ua

<https://orcid.org/0009-0009-4827-168X>

ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ У СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

У рамках даного дослідження було проведено комплексний аналіз методів налаштування та оптимізації засобів автоматизованого вихрострумowego контролю у системах технічної діагностики. Проведено аналіз переваг вихрострумowego контролю та визначено його класифікацію за методологічними, функціональними, технічними, експлуатаційними та галузевими характеристиками. Оцінка ефективності засобів автоматизованого вихрострумowego контролю в технічній діагностиці має враховувати нормативно-правові вимоги, регуляторний контроль і економічну доцільність, що забезпечує відповідність міжнародним стандартам і оптимізацію витрат. Вказано, що завдяки використанню багатоканальних сенсорних масивів, сучасні засоби вихрострумowego контролю матричного типу значно покращують ефективність технічної діагностики, що знижує час моніторингу та підвищує ефективність виявлення дефектів. Визначено, що основною задачею підвищення продуктивності вихрострумowego контролю є ефективна обробка електричних сигналів від детекторів масиву датчиків, що дозволяє отримати точну амплітудну та фазову характеристику сигналу. Цифрове виділення цих характеристик за допомогою дискретного перетворення Гільберта та адаптованого математичного апарату дозволяє знизити похибки та покращити точність діагностики, що є важливим для задачі дефектоскопії. Також у межах дослідження було запропоновано математичне моделювання процесів діагностики на основі датчиків комплексу вихрострумowego контролю, що дозволяє ефективно виявляти дефекти на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалу, а також адаптувати модель для вирішення інших інженерних задач, таких як виявлення тріщин і механічних пошкоджень у об'єктах зі складною геометрією. Сигнали, що надходять від датчиків під час сканування, відображають зміни рівня напруги, які виникають при проходженні над дефектами, і перетворюються на цифрові значення, що дозволяють визначити глибину дефектів; в процесі сканування формується тривимірний карт об'єкта, а для підвищення точності та швидкості діагностики застосовуються спеціалізовані алгоритми управління підключенням датчиків та схеми розміщення.

Ключові слова: вихрострумовой контроль, масиви датчиків, дискретне перетворення Гільберта, амплітудна характеристика, фазова характеристика, карта дефектів.

LEVINSKYI Oleksandr, OLMAN Daniel,

HANUSOVSKYI Viktor, BILOUS Denys, KERDAN Fedir

Odesa Polytechnic National University

IMPLEMENTATION OF AUTOMATED EDDY CURRENT TESTING TOOLS IN TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS

This study presents a comprehensive analysis of methods for configuring and optimizing automated eddy current testing tools in technical diagnostics systems. The advantages of eddy current testing were analyzed, and its classification was determined based on methodological, functional, technical, operational, and industry-specific characteristics. The evaluation of the effectiveness of automated eddy current testing tools in technical diagnostics should consider regulatory requirements, regulatory control, and economic feasibility, ensuring compliance with international standards and cost optimization. It was noted that the use of multi-channel sensor arrays significantly improves the efficiency of technical diagnostics with modern matrix-type eddy current testing tools, reducing monitoring time and enhancing defect detection effectiveness. It was determined that the primary task of improving the productivity of eddy current testing is the effective processing of electrical signals from sensor arrays, which allows for accurate amplitude and phase characterization of the signal. Digital extraction of these characteristics using discrete Hilbert transforms and adapted mathematical techniques helps to reduce errors and improve diagnostic accuracy, which is essential for defectoscopy tasks.

Furthermore, the study proposed mathematical modeling of diagnostic processes based on sensors from the eddy current testing complex, which enables effective detection of defects on surfaces and in subsurface layers of materials, as well as adaptation of the model for solving other engineering problems such as crack detection and mechanical damage in objects with complex geometries. Signals received from the sensors during scanning reflect changes in voltage levels that occur when passing over defects, and are converted into digital values that allow for determining the depth of the defects. A three-dimensional map of the object is formed during the scanning process, and specialized algorithms for sensor connection management and placement schemes are used to enhance diagnostic accuracy and scanning speed.

Keywords: eddy current testing, sensor arrays, discrete Hilbert transform, amplitude characteristic, phase characteristic, defect map.

Стаття надійшла до редакції / Received 16.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Серед методів неруйнівного контролю у промисловості автоматизовані безконтактні технології [1-5] займають особливе місце, оскільки вони не вимагають підготовки поверхні досліджуваного об'єкту та не порушують виробничий цикл. Завдяки цьому моніторинг стану матеріалів і конструкцій може здійснюватися в режимі реального часу без необхідності зупинки обладнання. Такі методи дозволяють проводити контроль з високою швидкістю та точністю, що особливо важливо для об'єктів критичної інфраструктури у машинобудуванні, енергетиці, авіації, космічній промисловості, транспорті, тощо. Посеред актуальних засобів безконтактного контролю у промисловості можна відзначити ультразвукові, акустичні, оптичні методи, а також вихрострумові технології, які активно застосовуються для діагностики стану матеріалів [1-5]. Одним із найбільш ефективних засобів автоматизованого безконтактного контролю є саме вихрострумовий метод, який широко використовується для виявлення дефектів поверхневого та приповерхневого характеру у провідних конструкціях. Вихрострумовий контроль забезпечує високу чутливість до тріщин, корозійних ушкоджень і змін структури матеріалу, що робить його незамінним у багатьох галузях, зокрема в автомобілебудуванні, нафтохімічній, авіаційній та енергетичній промисловості. Крім того, можливість автоматизації вихрострумової діагностики сприяє підвищенню продуктивності та надійності процесу контролю, знижуючи вплив людського фактору та покращуючи точність оцінки стану об'єкта. Це вказує на високу **актуальність** задачі вдосконалення засобів автоматизованого вихрострумового контролю [6-9] для підвищення ефективності технічної діагностики та моніторингу стану промислового обладнання.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Результати досліджень, представлені у сучасних наукових публікаціях, вказують на те, що вихрострумовий контроль є одним із найбільш ефективних методів технічної діагностики, оскільки дозволяє здійснювати неруйнівний аналіз, виявляти дефекти на ранніх стадіях і автоматизувати процес оцінки стану досліджуваного об'єкту [6-9]. Зазначені фактори, що визначають переваги засобів вихрострумового контролю при проведенні технічної діагностики, надають можливість сформувати наступні категорії у рамках багаторівневої класифікації:

1. Переваги пов'язані з методологічними особливостями впровадження засобів вихрострумового контролю, що включає у себе безконтактний принцип роботи [10], автоматизацію процесу діагностики та сумісність із іншими методами контролю [11].
2. Переваги пов'язані з функціональними можливостями засобів вихрострумового контролю, що включає у себе виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів [12], оцінку товщини покриття та структурних шарів досліджуваного об'єкту [13], визначення механічних властивостей матеріалу, а також моніторинг змін стану в реальному часі [14].
3. Переваги пов'язані з технічними характеристиками засобів вихрострумового контролю, що включає у себе високу чутливість до дефектів у поверхневому та приповерхневому шарі досліджуваного об'єкту [12-14], високу роздільну здатність при формуванні карти дефектів [15] та широкий інструментарій для контролю об'єктів складної геометрії [16].
4. Експлуатаційні переваги засобів вихрострумового контролю, що включає у себе високу швидкість проведення процедури [17] при застосуванні дефектоскопів матричного типу (Eddy Current Array, ECA), можливість використання у польових умовах та без зупинки роботи обладнання, мінімальну підготовку досліджуваного об'єкту до проведення діагностичного дослідження [10-17], а також відсутність потреби у витратних матеріалах.
5. Галузева адаптивність засобів вихрострумового контролю, що включає у себе використання в авіаційній та космічній галузі [17], застосування в енергетиці та електротехніці [18], контроль у транспортній та машинобудівній промисловості [19], оцінку стану металевих покриттів [20], інспекцію трубопроводів, резервуарів та інших промислових конструкцій [20, 21], тощо.

Значний спектр переваг вихрострумowego контролю зумовлює його високу ефективність у технічній діагностиці промислових об'єктів, особливо у галузях, де необхідне оперативне й високоточне визначення дефектів у автоматизованому режимі без порушення цілісності об'єктів. Тим не менш, необхідно вказати також, що впровадження засобів вихрострумowego контролю пов'язане з рядом проблем та особливостей, що ускладнюють практичну реалізацію та впливають на точність діагностики [12-21], як то:

- залежність засобів вихрострумowego контролю від електропровідності матеріалу досліджуваного об'єкту, що є основним обмеженням для діагностичного дослідження на його основі при роботі з діелектричними матеріалами, полімерами та композитами з низькою провідністю;
- обмеження глибини проникнення вихрових струмів [12, 13], що, у свою чергу, обмежує відповідний інструментарій діагностикою поверхневих і приповерхневих шарів досліджуваного об'єкту і вказує на його непридатність при необхідності проведення діагностики товстостінних об'єктів і багатошарових конструкцій, а також виявлення внутрішніх дефектів;
- вплив електромагнітних завад на результати дослідження, як то зовнішніх електромагнітних полів і намагніченості матеріалу досліджуваного об'єкту, що потребує застосування спеціальних методів компенсації на основі алгоритмів фільтрації або екранування на етапі організації експерименту;
- необхідність впровадження складних алгоритмів обробки сигналів засобів ЕСА для підвищення точності вимірювань, що підвищує вимоги до апаратного забезпечення й ускладнює автоматизацію процесу;
- обмеження допустимої форми та геометрії об'єкту, так контроль складнопрофільних поверхонь може бути утрудненим через нерівномірний розподіл вихрових струмів та неоднорідності у зоні контролю.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє зазначити, що задача автоматизації процедури вихрострумowego контролю є комплексною та вимагає подальших досліджень, що включає у себе розширення можливостей методу, адаптації до нових матеріалів, розробки стійких алгоритмів обробки сигналів та побудови комплексної методології.

Також у рамках проведення дослідження та побудови цілісної методології необхідно зазначити, що оцінка ефективності засобів автоматизованого вихрострумowego контролю у системах технічної діагностики передбачає врахування правових і економічних аспектів [22, 23], зокрема:

1. Дотримання нормативно-правових вимог. Використання вихрострумowego контролю передбачає дотримання норм вітчизняного та міжнародного законодавства, що відповідним чином регулює технічну діагностику об'єктів у галузях промисловості. Зокрема, при проведенні діагностики необхідно враховувати стандарти «ISO 15548» (вимоги до вихрострумowych приладів), «ISO 17643» (контроль зварних з'єднань), а також специфічні галузеві норми, як то «ASME», «ASTM», тощо.

2. Регуляторний контроль. Впровадження засобів вихрострумовой діагностики вимагає контролю з боку органів сертифікації та регуляторних структур. У більшості країн подібні системи можуть експлуатуватися без спеціального дозволу, якщо вони відповідають чинним стандартам. Однак у критичних галузях, як то авіація, ядерна енергетика, транспортна безпека можуть існувати вимоги щодо сертифікації обладнання, методик та персоналу відповідно до «EN 4179», «NAS 410», а також аналогічних нормативів.

3. Економічна доцільність. Використання засобів автоматизованого вихрострумowego контролю є економічно доцільним за умов необхідності забезпечення високоточної безконтактної діагностики без зупинки виробничого процесу. Автоматизація процесів знижує вплив людського фактору, підвищує ефективність контролю та зменшує витрати на діагностику у порівнянні з традиційними методами.

Таким чином, проведений аналіз показав, що дослідження має включати у себе визначення базових принципів правового регулювання застосування засобів автоматизованого вихрострумowego контролю, що спрямоване на забезпечення відповідності міжнародним стандартам, необхідності спеціальної сертифікації, а також оцінку економічної ефективності організації відповідних систем контролю у системах технічної діагностики об'єктів у промисловому виробництві.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є аналіз та удосконалення методів автоматизованого вихрострумowego контролю у системах технічної діагностики. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності моніторингу технічного стану обладнання шляхом вирішення наступних задач:

- адаптація математичної моделі вихрострумowego контролю, а також оптимізація у відповідності до математичної моделі діагностичної процедури і конфігурації двовимірного масиву датчиків;
- оцінка практичної ефективності запропонованих рішень у відповідності до показників, що визначають галузеву адаптивність.

Очікувані результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності систем технічної діагностики завдяки удосконалення методів автоматизованого вихрострумowego контролю, що призведе до

значного зниження витрат на обслуговування обладнання, підвищення рівня безпеки експлуатації та розширення можливостей застосування зазначених методів у промислових системах моніторингу.

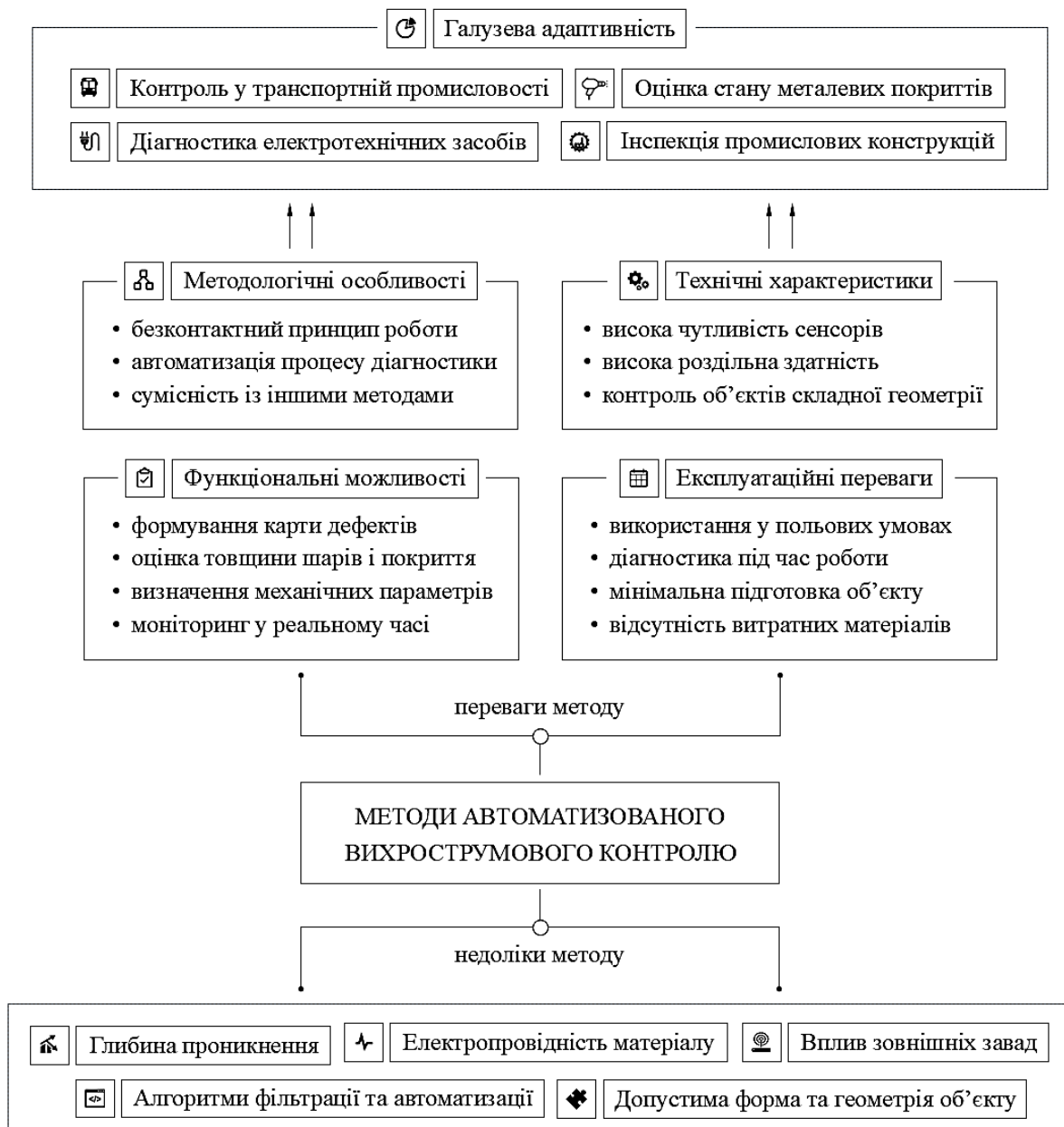


Рис. 1. Базова методика оцінки ефективності засобів автоматизованого вихрострумowego контролю у системах технічної діагностики

Постанова задачі оцінки ефективності засобів автоматизованого вихрострумowego контролю у системах технічної діагностики

Як було зазначено вище, сучасні засоби вихрострумowego контролю матричного типу значно розширюють можливості технічної діагностики досліджуваних об'єктів завдяки використанню багатоканальних сенсорних масивів, що забезпечують високу швидкість та точність діагностики. Основною перевагою ЕСА є здатність проводити контроль великої площі досліджуваного об'єкту за одну ітерацію виконання діагностичної процедури, що суттєво скорочує час промислового моніторингу у порівнянні з більшістю альтернативних підходів. Відповідні комплекси діагностичного обладнання надають детальну картину розподілу вихрострумowych полів, що покращує виявлення сторонніх включень та дискретних або протяжних дефектів різної природи через формування карти дефектів, яка дозволяє оцінити форму, розміри та просторову орієнтацію. Завдяки адаптивним алгоритмам обробки сигналів набору ЕСА-датчиків забезпечується точна ідентифікація структурних особливостей приповерхневої структури досліджуваного

об'єкту і класифікацію приповерхневих дефектів, що вказує на високу ефективність моніторингу стану промислових конструкцій без необхідності демонтажу або припинення експлуатації обладнання. На рівні технічних характеристик ЕСА також можна вказати на наступні переваги:

- збільшення точності результатів діагностики завдяки завадостійкості засобів контролю і мінімізації рівня похибок завдяки зниженню впливу крайових ефектів і співставленню даних від сусідніх датчиків;
- контроль складних поверхонь завдяки організації набору датчиків, що включені у окремі секції та працюють у багатоканальному режимі, що збільшує ефективність роботи з досліджуваними об'єктами, які характеризуються складною геометрією;
- розширення набору діагностичних даних завдяки отриманню інформації про геометрію, орієнтацію, механічні властивості та електропровідність складових компонент досліджуваного об'єкту.

При визначенні ефективності ЕСА у відповідності до технічного завдання та актуальних економічних аспектів необхідно розглянути такі категорії як масив вихрострумів датчиків із локалізованою передачею сигналу (Eddy Current Array with Lumped Parameters, ECA-LP) і масив вихрострумів датчиків із усередненою передачею сигналу (Eddy Current Array with Distributed Parameters, ECA-DP). Засоби ECA-LP забезпечують високу точність виявлення локальних змін у механічних властивостях і електропровідності, що дозволяє ефективно діагностувати стан матеріалу досліджуваного об'єкту, тоді як діагностичне дослідження на основі ECA-DP сприяє підвищенню продуктивності, зниженню рівня помилкових спрацьовувань та зменшенню загальної собівартості комплексу вихрострумової діагностики завдяки меншій складності конструкції (рис. 2).



Рис. 2. Схема організації засобів автоматизованого вихрострумового контролю матричного типу

Подальше уточнення особливостей проведення діагностичної процедури включає у себе визначення актуальної конфігурації датчиків [24, 25], де можна виділити лінійні масиви, що забезпечує швидке сканування вздовж однієї осі, планарні масиви, які дозволяють охоплювати більшу площу завдяки двовимірному розміщенню датчиків, та гнучкі масиви, які адаптуються до складних поверхонь досліджуваного об'єкту, як то пристрої з круговим і об'ємним розташуванням ЕСТ-датчиків [78, 80]. Надалі за типом електромагнітного збудження розрізняють постійні (Continuous Wave, CW) та імпульсні (Pulsed Eddy Current, PEC) методи, де у рамках CW використовується стабільна амплітуда сигналу, а у відповідності до PEC використовуються імпульси з фіксованими параметрами для кращого проникнення та розширення діагностичних можливостей. Оптимізація комплексу діагностичних процедур на виробництві, таким чином, є складною задачею, що включає у себе визначення типів досліджуваних об'єктів, як то оцінку геометричної форми та габаритів, оцінку шорсткості поверхні, а також типових дефектів. У відповідності до складових

апаратного комплексу вихроstromового контролю можуть бути оцінені показники точності діагностики, максимальна величина та розподіл похибки вимірювання, залежність чутливості датчиків від параметрів об'єкта контролю, а також вплив зовнішніх завад на достовірність отриманих результатів.

Цифрова обробка сигналу датчиків вихроstromового контролю на основі дискретного перетворення Гільберта

Основною задачею підвищення продуктивності вихроstromового контролю є ефективна обробка залежностей електричного сигналу $\{U_i(t)\}$, отриманого від набору детекторів $i \in [1; I]$ масиву ЕСА, що може бути представлено як $A(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi(t))$. Надалі при проведенні діагностики для інтерпретації результатів експериментального дослідження виділяють амплітудну та фазову характеристики сигналу як $A(t)$ і $\Phi(t)$, відповідно. Зазвичай це реалізується на апаратному рівні через впровадження детектору фази та детектору амплітуди, що ускладнює конструкцію приладу й підвищує похибку через завади. Натомість, у рамках дослідження пропонується цифрове виділення цих характеристик із застосуванням дискретного перетворення Гільберта та адаптованого математичного апарату, заснованого на співвідношеннях Крамерса-Кроніга, що дозволяє знизити похибки та покращити точність діагностики. Введення Гільберт-образу залежності напруги від часу U_H надає можливість представити сигнал як $U(t) + i \cdot U_H(t)$, що, у свою чергу, еквівалентно поданню сигналу у вигляді добутку $A(t) \cdot e^{i\varphi(t)}$ через амплітудну та фазову характеристики (рис. 3).

На практичному рівні цифрова обробка сигналу за допомогою дискретного перетворення Гільберта має низку важливих властивостей, які визначають її ефективність у задачах аналізу вузькосмугових та циклічних сигналів. Лінійність відображення дозволяє зберігати пропорційність сигналу при його обробці, тобто сума сигналів після перетворення збігається із сумою їхніх окремих перетворень. Це важливо для аналізу складних сигналів, що складаються з кількох гармонік або складних комбінацій частот. Ортогональність перетворення вказує на те, що вихідний сигнал і його Гільберт-образ є незалежними у сенсі ортогонального представлення, що дозволяє ефективно розділяти амплітудну і фазову інформацію. Це є ключовим фактором у задачах дефектоскопії, де необхідно виділити корисний сигнал від фонових шумів.

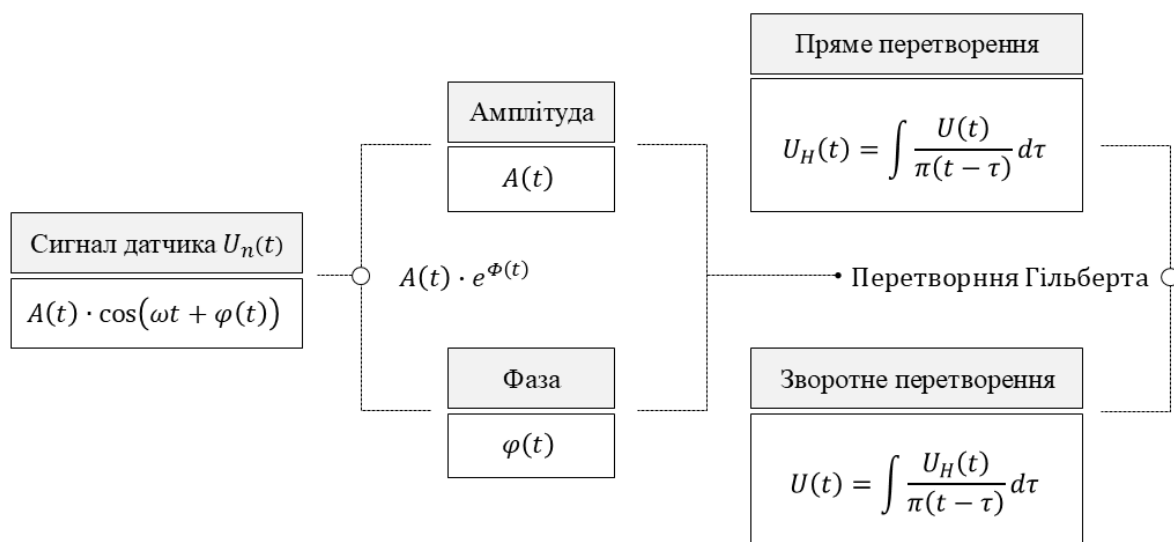


Рис. 3. Виділення фазової і амплітудної компонент сигналу датчику вихроstromового контролю

Також важливою властивістю є інваріантність до зміни масштабу часу, що означає, що при розтягненні або стисканні сигналу його Гільберт-образ змінюється пропорційно. Це дозволяє використовувати метод для аналізу сигналів з різною тривалістю або частотою без необхідності додаткового калібрування. Слід додатково зазначити, що існує зв'язок між Гільберт-образом і спектральним представленням сигналу, що виражається через його вплив на фазовий спектр. Це дає змогу виділяти певні частотні компоненти та аналізувати фазові співвідношення без втручання у амплітудний спектр, що суттєво спрощує реалізацію цифрових фільтрів. Властивість зсуву дозволяє проводити процедуру зміщення сигналу у часі без втрати його структурних характеристик, а також гарантує збереження парності або непарності функції при її обробці. Це корисно для симетричних або періодичних сигналів, які часто зустрічаються вихроstromовому контролю. Завдяки комутативності Гільберт-образ може комбінуватися з іншими лінійними операторами, що дозволяє інтегрувати його у складніші алгоритми цифрової обробки сигналів без втрати його основних властивостей. Таким чином, проведений аналіз показав, що використання цифрового виділення амплітудної та фазової характеристик сигналів вихроstromових датчиків на основі перетворення Гільберта

дозволяє реалізувати ефективну математичну модель у вигляді лінійного фільтра. Запропонована методика значно спрощує аналіз сигналів та підвищує точність діагностики, усуваючи похибки, пов'язані з аналоговою обробкою. Під час розробки діагностичного комплексу важливо враховувати властивість однорідності Гільберт-перетворення, тобто збереження характеристик перетворення при зміні параметрів сигналу фазовій, частотній і часовій області. Ці властивості є ключовими для точного аналізу фазових і амплітудних характеристик сигналів датчиків, забезпечуючи стабільність та узгодженість перетворення у різних умовах.

Запропонована математична модель визначення амплітудної та фазової характеристик сигналу базується на застосуванні лінійного фільтра, який виконує роль ідеального фазообертача. Його основна функція полягає в усуненні постійної складової сигналу та корекції фазових співвідношень між спектральними компонентами. Це забезпечує зсув фази для негативних частотних складових та позитивних частот відповідно, зберігаючи амплітудні характеристики. Такий підхід дозволяє підвищити точність обробки сигналів без втрати ключової інформації. Тим не менш, слід зазначити, що наведений математичний апарат заснований на аналоговому перетворенні Гільберта, у той час як сучасні діагностичні системи базуються на цифровій обробці сигналів, включаючи дискретизацію вихідних даних датчиків та аналіз їх спектральних компонент за допомогою перетворення Фур'є. У цьому контексті використання дискретного перетворення Гільберта є більш доцільним, оскільки воно дозволяє адаптувати запропонований математичний апарат до реальних умов функціонування діагностичних систем. Відповідне методологічне розширення дозволяє забезпечити ефективний аналіз фазових та амплітудних характеристик сигналів у цифровому форматі. При цьому на основі часової послідовності сигналу кожного датчику $\{U_i(t)\}$ для проміжку часу $t \in [t_0; t_0 + N \cdot \Delta t]$ формується послідовність значень $U(n)$, де $n \in [1; N]$. На основі $U(n)$ розраховується набір значень гільберт-образ $U_H(n)$, що, у свою чергу, надає можливість сформувати дискретну комплексна послідовність $U(n) + i \cdot U_H(n)$. Для дискретної комплексної послідовності виконується правило, за яким сума добутків вихідного сигналу та його Гільберт-образу для всіх дискретних відліків дорівнює нулю, що відображає їхню ортогональність у часовій області. Аналогічно, при застосуванні дискретного перетворення Фур'є спектральні компоненти сигналу кожного датчика, визначаються через дискретизацію частоти. Частота представлена у вигляді дискретних значень, пропорційних кількості відліків у часовому проміжку $t \in [t_0; t_0 + N \cdot \Delta t]$ дозволяє перейти від часової області до частотної, забезпечуючи розклад сигналу на його гармонійні складові. Це дозволяє отримати комплексну характеристику сигналу, яка формалізується у вигляді рівняння, що визначає значення спектра в різних діапазонах частот. Далі, для отримання комплексної послідовності, що є результатом перетворення сигналу, застосовується обернене дискретне перетворення Фур'є. Це дозволяє відновити часову послідовність із спектральних компонентів, розрахованих через перетворення Фур'є. Для подальшої роботи з Гільберт-образами, використовується імпульсна характеристика дискретного перетворення, яку можна отримати через обернене перетворення Фур'є частотної характеристики комплексного сигналу. Це визначення дозволяє розглянути вплив частот на сигнал, застосовуючи певну стратегію для інтегрування функції частоти. У межах цієї процедури також розглядається використання імпульсної характеристики для дискретизації сигналу, де враховується, що перехід від часу до дискретних значень здійснюється за допомогою перетворення набору значень у множину, що описується через дискретизацію. Вихідний сигнал системи розглядається як результат згортки імпульсної характеристики з вхідним сигналом. Цей процес можна реалізувати як за допомогою програмних алгоритмів, так і через побудову відповідної електронної схеми. Аналогічним чином, для дискретних сигналів можна визначити цифрові аналоги амплітуди, частоти та фази сигналу, що дозволяє перевести аналогові характеристики в цифрову форму для подальшого аналізу. Для амплітуди це виражається через суму квадратів вхідного сигналу та його Гільберт-образу. Частота визначається через різницю фаз між сусідніми відліками, а фаза обчислюється як різниця між двома відповідними значеннями фази сигналу. Це дає можливість проводити комплексний аналіз сигналу, ефективно визначати його характеристики та оцінювати досліджувані об'єкти наявними засобами комплексу ЕСА.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу та опису математичних методів, пов'язаних з перетворенням Гільберта та застосуванням дискретних фільтрів, було продемонстровано можливості їх використання для аналізу сигналів системи ЕСА. Впровадження програмних алгоритмів та побудова відповідних схем забезпечують гнучкість і зручність у реалізації цих методів у практичних системах.

Оптимізація структури масиву датчиків комплексу вихрострумовевого контролю

У рамках даного дослідження пропонується реалізувати математичне моделювання процесів діагностики, що проводиться на основі датчиків комплексу вихрострумовевого контролю. Система розглядається як двовимірна матриця ЕСА, яка активно використовується в дефектоскопії об'єктів з плоскою поверхнею. Це дозволяє ефективно виявляти дефекти на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалу, що робить її незамінною для контролю якості та надійності різноманітних конструкцій. Математична модель має бути універсальною з можливістю подальшої адаптації для моделювання та вирішення ряду інших типових задач, таких як виявлення тріщин, порушень цілісності матеріалу або аналіз механічних пошкоджень для

досліджуваних об'єктів зі складною геометричною формою. Це свідчить про високий потенціал використання такого підходу не лише в дефектоскопії, а й у широкому спектрі інженерних задач, що підвищує гнучкість і ефективність системи.

Розглянемо планарний масив датчиків, кожен з яких визначається парою координат $\{x, y\}$, причому $x \in [1; X]$ і $y \in [1; Y]$, причому відстань між сусідніми датчиками складає ΔS . Таким чином засіб вихрострумової діагностики, що сканує поверхню досліджуваного об'єкту зі швидкістю v_{ECA} , характеризується розмірністю $(X \cdot \Delta S) \times (Y \cdot \Delta S)$, що відповідає загальній площі цифрового зображення ЕСА, що отримується у кожен момент часу $(t_0 + n \cdot \Delta t)$ для всіх $n \in [1; N]$. При цьому роздільна здатність ЕСА визначається через ΔS , а динамічний діапазон – чутливістю кожного окремого датчика, що значним чином визначається радіусом обмотки R .

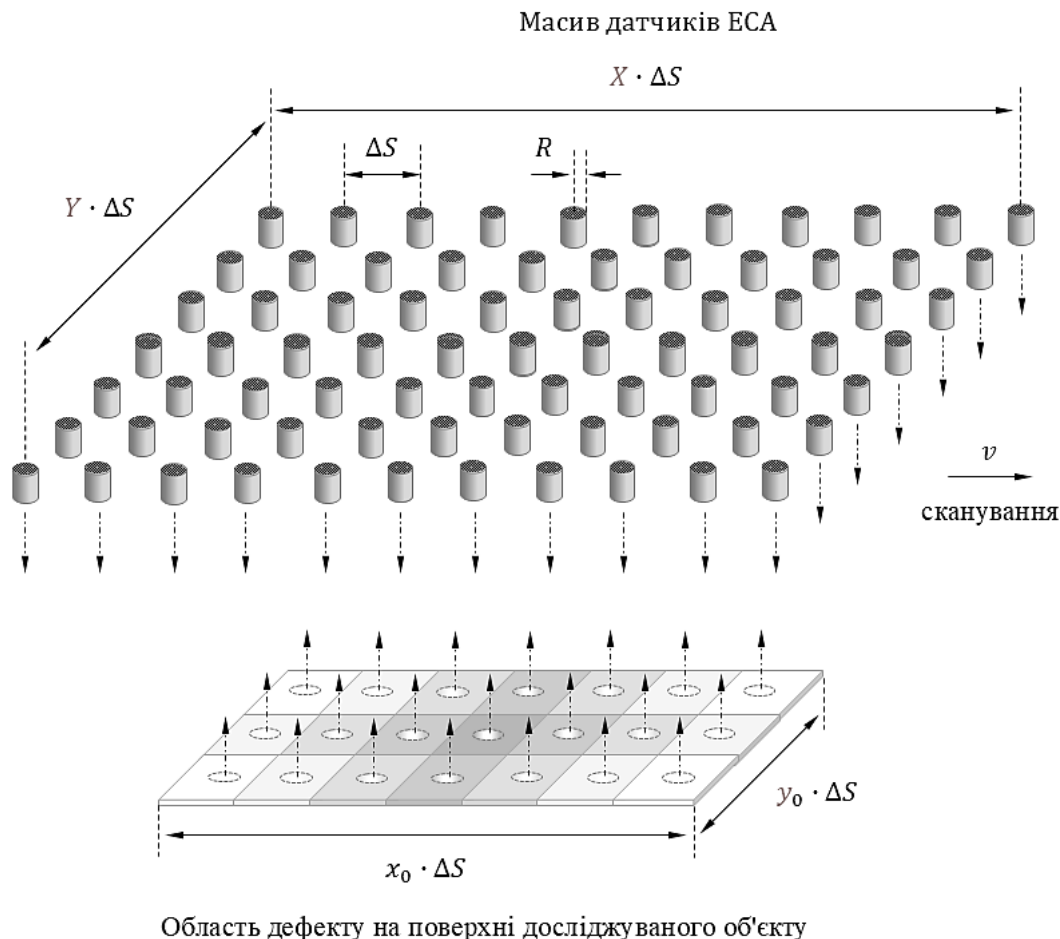


Рис. 4. Базова схема проведення процедури дефектоскопії планарним масивом датчиків ЕСА

Сигнали, що надходять від кожного датчика у процесі сканування, відображають динаміку зміни рівня напруги у часі $U(t) \in [U_{min}; U_{max}]$, яка змінюється при проходженні над поверхневими або приповерхневими дефектами. Аналогові сигнали, отримані від датчиків, надходять на комутатор, де виконується їх порівняння. Це дозволяє перетворити варіації сигналу у цифрові значення, що є інформативними відповідають глибині виявлених дефектів. Якщо у момент часу $(t_0 + n \cdot \Delta t)$ набір датчиків $(x_0 \cdot \Delta S) \times (y_0 \cdot \Delta S)$ знаходяться над поверхневим чи приповерхневим дефектом у відповідних датчиках виникають локальні зміни напруги, що однозначно інтерпретуються на рівні цифрового інтерфейсу вихрострумового дефектоскопу і, таким чином, надають визначити глибину кожної з областей дефекту (рис. 4). Надалі у процесі сканування формується тривимірна карта досліджуваного об'єкта з компенсацією шумів завдяки співставленню сигналів від датчиків. Відповідно до сучасних вимог до засобів вихрострумового контролю, співвідношення відстані між сусідніми датчиками та радіусу датчика має становити приблизно $\Delta S \approx R$. Це знижує роздільну здатність ЕСА непередбачуваним чином для сканування області поверхні досліджуваного об'єкту. Водночас, зменшення відстані між датчиками до значень $\Delta S < R$ збільшує взаємний вплив датчиків і виникає до появи перехресних завад, що негативно впливає на точність моніторингу і не може бути компенсовано програмними методами фільтрації. Для усунення цього ефекту застосовується схема розміщення датчиків у два ряди зі зміщенням на $(\Delta S + R)/2$, що надає можливість мінімізувати вплив

сусідніх датчиків. Додатково використовуються спеціалізовані алгоритми керування підключенням, які унеможливають одночасну активацію суміжних датчиків, як то механізм почергового відключення парних і непарних рядів датчиків, розташованих перпендикулярно до рядів, одночасно зі збільшенням швидкості сканування до $2v$ і зменшення часу дискретизації до $t/2$, що забезпечує стабільність сигналу та покращує якість контролю.

Для створення ефективної методологічної бази пропонується схема послідовного перемикання вихрострумів датчиків у матричній структурі, при якій у кожен момент часу активним залишається лише один датчик. Такий підхід дозволяє значно спростити загальну конструкцію, використовуючи генератор сигналу та два комутатори: перший автоматично перемикає датчики, а другий обробляє отримані сигнали та мінімізує вплив завад. При цьому аналогові сигнали передаються через цифровий інтерфейс на робочу станцію, де програмне забезпечення будує тривимірну карту дефектів контрольованого об'єкта. Основний недолік цієї схеми полягає в низькій швидкості сканування, оскільки переміщення датчиків має узгоджуватися з часом їхнього перемикавання та загальною кількістю елементів у матриці. Це обмеження робить такий підхід доцільним лише у випадках, коли немає жорстких вимог до швидкості діагностики, або якщо кількість датчиків є мінімальною. Альтернативним рішенням є схема паралельного підключення датчиків, яка забезпечує високу швидкість сканування незалежно від їхньої кількості. Напруга з генератора сигналу подається на всі датчики через підсилювачі потужності, а обробка сигналів здійснюється за допомогою окремих вимірювальних каналів, що містять підсилювачі, фільтри та аналого-цифрові перетворювачі. Однак реалізація такої схеми є складною через необхідність синхронної роботи великої кількості вимірювальних каналів.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК УДАНОМУ НАПРЯМІ

У дослідженні проведено аналіз методів налаштування та оптимізації автоматизованого вихрострумів контролю в технічній діагностиці. Визначено його класифікацію за широким набором характеристик та зазначено необхідність врахування нормативно-правових вимог і економічної доцільності для оптимізації витрат та відповідності міжнародним стандартам. Вказано, що використання багатоканальних сенсорних масивів значно підвищує ефективність діагностики, знижуючи час моніторингу та підвищуючи виявлення дефектів. Важливим аспектом є ефективна обробка електричних сигналів від детекторів для отримання точних амплітудних та фазових характеристик. Зазначено, що цифрове виділення характеристик за допомогою дискретного перетворення Гільберта дозволяє зменшити похибки та підвищити точність діагностики. Запропоновано математичне моделювання для виявлення дефектів на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалів, а також для виявлення тріщин і механічних пошкоджень у складних об'єктах. В процесі сканування формується тривимірна карта об'єкта, а для покращення точності застосовуються алгоритми управління датчиками.

References

1. Brauer, H. (2018). *Motion-induced Eddy current techniques for non-destructive testing and evaluation*. Institution of Engineering and Technology.
2. Bray, D. E., & Stanley, R. K. (2018). *Nondestructive evaluation: A tool in design, manufacturing and service*. CRC Press.
3. Domin, J., Kielan, P., & Lamkowski, K. (2019). Robotic Measurement System dedicated for inspection and diagnostics of building structures using thermography techniques. 2019 Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine (PTZE). <https://doi.org/10.23919/ptze.2019.8781725>.
4. Yumnam, M., Gupta, H., Ghosh, D., & Jaganathan, J. (2021). Inspection of Concrete Structures externally reinforced with FRP composites using active infrared thermography: A Review. *Construction and Building Materials*, 310, 125265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125265>.
5. NDT Resource Center: The Collaboration for NDT Education, Iowa State University, Ames, Iowa, USA. <http://www.ndt-ed.org> (2014). Accessed 10 Oct 2017.
6. Egorov, A. V., Polyakov, V. V., Salita, D. S., Kolubaev, E. A., Psakhie, S. G., Chernyavskii, A. G., & Vorobei, I. V. (2015). Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method. *Defence Technology*, 11 (2), 99–103. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2014.12.002>.
7. Postolache, O., Ribeiro, A. L., & Ramos, H. G. (2013). GMR Array Uniform Eddy current probe for defect detection in conductive specimens. *Measurement*, 46(10), 4369–4378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.050>.
8. Ramos, H. M., Rocha, T., Pasadas, D., & Ribeiro, A. L. (2013). Velocity induced eddy currents technique to inspect cracks in moving conducting media. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2013.6555552>.
9. Rocha, T. J., Ramos, H. G., Lopes Ribeiro, A., Pasadas, D. J., & Angani, C. S. (2015). Studies to optimize the probe response for velocity induced eddy current testing in aluminium. *Measurement*, 67, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.003>.
10. Tan, Y., Wang, X., & Moreau, R. (2015). An innovative contactless method for detecting defects in electrical conductors by measuring a change in electromagnetic torque. *Measurement Science and Technology*, 26(3), 035602. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/3/035602>.
11. Johnathan Hernandez, Quentin P. Fouliard, Khanh Vo and Seetha Raghavan (2020). Characterization of corrosive defects through pulsed eddy current thermography for aircraft panels. *Structural Health Monitoring and Prognosis II*. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0433>.vid.

12. Wen, Y., Jia, Y., Zhang, Y., Luo, X., & Wang, H. (2017). Defect detection of adhesive layer of thermal insulation materials based on improved particle swarm optimization of ECT. *Sensors*, 17(11), 2440. <https://doi.org/10.3390/s17112440>.
13. Wincheski, B., Yu, F., Simpon, J., Williams, P., & Rackow, K. (2010). Development of SDT sensor based eddy current probe for detection of deep fatigue cracks in multi-layer structure. *NDT & E International*, 43 (8), 718-725. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.08.005>.
14. Mussatayev, M., & Alanesi, M. (2024). *Towards Real-Time Railroad Inspection Using Directional Eddy Current Probe*. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1075.v1>.
15. Park, J.-U., Jang, M.-S., Gim, G.-J., & Kim, B.-K. (2015). Development of new low frequency ECT sensor to detect inner defects(i) - characteristic of loss of induced electromotive force. *Journal of Welding and Joining*, 33(4), 57-62. <https://doi.org/10.5781/jwj.2015.33.4.57>.
16. Lombardini, M., Deiterding, R., & Pullin, D. I. (2008). Large eddy simulations of the Richtmyer–meshkov instability in a converging geometry. *Ercoftac Series*, 283–294. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8578-9_23.
17. Lysenko, I., Kuts, Y., Uchanin, V., Mirchev, Y., & Levchenko, O. (2024). Evaluation of eddy current array performance in detecting aircraft component defects. *Transactions on Aerospace Research*, 2024(2), 1–9. <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0007>.
18. Foster, E. A., Bolton, G., Bernard, R., McInnes, M., McKnight, S., Nicolson, E., Loukas, C., Vasilev, M., Lines, D., Mohseni, E., Gachagan, A., Pierce, G., & Macleod, C. N. (2022). Automated real-time eddy current array inspection of nuclear assets. *Sensors*, 22(16), 6036. <https://doi.org/10.3390/s22166036>.
19. Li, Yongzeng, Li, J., Song, X., Cui, L., Yu, H., & Ma, G. (2021). Research on braking characteristics of rail eddy current brake with AC Excitation. *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ldia49489.2021.9505870>.
20. Sun, Q., Wang, M., Li, J., Kang, K., & Li, L. (2021). Eddy current damping suppression of long primary linear synchronous motor. *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ldia49489.2021.9505770>.
21. Gao, S., Zheng, Y., Li, S., Zhang, J., Bai, L., & Ding, Y. (2024). Eddy current array for defect detection in finely grooved structure using MSTSA network. *Sensors*, 24(18), 6078. <https://doi.org/10.3390/s24186078>.
22. Non-destructive testing — Equipment for eddy current examination Part 1: Instrument characteristics and verification. *ISO 15548-1:2013*. ISO. (2023, July 3). <https://www.iso.org/standard/62836.html>.
23. Non-destructive testing of welds — Eddy current testing of welds by complex-plane analysis. *ISO 17643:2015*. ISO. (2020, July 3). <https://www.iso.org/standard/61100.html>.
24. Zhang, W., Wang, C., Xie, F., & Zhang, H. (2020). Defect imaging curved surface based on flexible eddy current array sensor. *Measurement*, 151, 107280. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107280>.
25. *General introduction to eddy current (EC) testing*. General Introduction to Eddy Current (EC) Testing | Olympus IMS. (n.d.). Retrieved October 28, 2022, from <https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/eca-tutorial/intro>