

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертацію Вахненка Олексія Олексійовича

“Нелінійна динаміка багатокомпонентних структурованих низьковимірних систем”,

**продану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика**

В дисертації О.О. Вахненка в рамках запропонованої дисертантом оригінальної нелінійної моделі, що складається з двох підсистем, розв'язано низку теоретичних задач з пояснення та передбачення некласичних резонансних ефектів в структурованих геофізичних породах. Дослідження їхніх фізичних властивостей є важливою для адекватного зондування сейсмологічних процесів. З іншого боку, для опису динаміки нелінійних збуджень електронної чи екситонної природи в багатокомпонентних структурованих низьковимірних системах перспективних для застосувань в наноелектроніці в дисертації побудовано та досліджено велике коло нових інтегрованих багатокомпонентних нелінійних систем на квазіодновимірних гратках з кількома структурними елементами в елементарній комірці. Варто підкреслити, що напівдискретні нелінійні системи, тобто системи з дискретизованими просторовими та неперервними часовими змінними, останнім часом стали важливим атрибутом моделювання динаміки носіїв заряду в нелінійних електрических передавальних мережах, ланцюжках джозефсонівських контактів, а також неодмінним інструментом вивчення поперечного перерозподілу світла у зв'язаних оптических волокнинах (фотонних гратках) і хвильоводах під впливом різноманітних факторів та дослідження впливу нелінійних ефектів на стабільність лазерного нагнітання в ланцюжках когерентно зв'язаних напівпровідниковых лазерів. Окрім того, є вагомі підстави, аби моделювання динаміки носіїв заряду в рамках напівдискретних нелінійних систем стало визнаним засобом розгляду і таких важливих фізических об'єктів як наностюжки, нанотрубки та низьковимірні напівпровідникові регулярні надструктури. Отже, проведеті в дисертації дослідження нелінійної динаміки різноманітних багатокомпонентних структурованих низьковимірних систем видаються актуальними як в загальнофізичному, так і в прикладному аспектах.

В дисертації О. О. Вахненка чітко сформульовано мету досліджень, постановку задач, розв'язано багато важливих теоретичих задач та висвітлено наукову новизну одержаних результатів.

Дисертаційна праця містить усі складові частини, вказані у вимогах до оформлення дисертацій, а саме – титульний аркуш, зміст, анотацію (українською та англійською мовами), основну частину, список бібліографічних посилань на першоджерела та два додатки. Окрім вступу та висновків, до основної частини дисертації входять шість розділів, розбитих

на підрозділи. Загальний обсяг дисертації складає 333 сторінки тексту, 49 рисунків та 255 бібліографічних посилань на першоджерела.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження для дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження. Розкрито наукову новизну здобутих результатів та висвітлено їхнє практичне значення.

В **першому розділі** дисертації завдяки широкому аналізові фізичної природи різноманітних нелінійних та релаксаційних явищ, встановлених експериментально для некласичного резонансного відгуку стрижнеподібних зразків осадових порід (зебельшого пісковиків) на повздовжнє високочастотне збуджування, сформульовано теоретичні засади моделювання некласичного резонансного відгуку стрижнеподібних осадових порід на повздовжнє високочастотне збуджування в рамках двох взаємозв'язаних підсистем, а саме – підсистеми повздовжніх зміщень та підсистеми пошкоджених міжзернинних когезійних зв'язків. Істотні пункти запропонованої моделі полягають у взаємодії між швидкою пружною підсистемою та повільною підсистемою пошкоджених зв'язків з одного боку, і специфікуються нетривіальною кінетикою розірваних міжзернинних зв'язків – з іншого. Запропонований механізм взаємодії забезпечує, аби пружна підсистема запускала еволюційні процеси в підсистемі порушених зв'язків змінюючи умови її рівноваги, і разом з цим аби підсистема порушених зв'язків зворотньо впливала на пружну підсистему зменшуючи (збільшуючи) її модуль Юнга пропорційно до надлишкової (зниженої) концентрації дефектів (порушених зв'язків). Внаслідок значного перевищення жвавості розриву зв'язків над жвавістю їхнього відновлювання підсистема порушених зв'язків порушує симетрію динамічного відгуку усієї системи на альтерноване зовнішнє нагнітання. Ця асиметрія породжує більшість нетривіальних гістерезних та релаксаційних ефектів в осадових породах. На основі розвинутої моделі примусових повздовжніх коливань стрижнеподібних осадових порід в дисертації подано теоретичне обґрунтування суттєво динамічного гістерезного ефекту прикінцевої (дискретної) пам'яти, який згодом знайшов своє експериментальне підтвердження.

В **другому розділі** запропоновано нелінійну модель внутрішньовузлових збуджень Шрьодінгерового типу на драбинчастій гратці, утвореній довільним числом паралельних ланцюжків з урахуванням поперечних (міжланцюжкових) резонансних зв'язків між збудженнями. Модель сформульовано в термінах фізично скоригованих польових амплітуд, що мають сенс амплітуд присутності збуджень на вузлах гратки.

Досліджено вплив різноманітних драбинчастих граток. Показано, що солітонні розв'язки запропонованої системи точно враховують дію зовнішнього повздовжнього однорідного магнітного поля за допомоги фаз комплекснозначних параметрів поперечної міжвузлової резонансної

взаємодії (фаз Паєрлса). Різноманітні сценарії руху солітоноподібного збудження, виявлені в результаті проведеного дослідження, вказують на важливу роль синхронізації повздовжнього та поперечного рухів солітона, керованої магнітним полем в регулярній гратці, для селективного транспорту солітонного збудження до наперед вказаного вузла гратки.

З іншого боку, дія зовнішнього повздовжнього однорідного електричного поля на електрично заряджені збудження системи призводить до повздовжніх осциляцій солітона як цілого за механізмом Блоха–Зінера.

Розглянуто задачу про поширювання солітонного збудження на драбинчастій гратці з регулярно розташованими точковими домішками. Спираючись на уявлення про незбурену синусоподібну траєкторію руху центру солітонного пакету у випадку дволанцюжкової гратки показано, що за умов синхронізації повздовжнього та поперечного рухів солітона доречним вибором початкових параметрів солітонного пакету, солітон здатен безперешкодно оминути одновузлові домішки на значній ділянці їхнього зигзагоподібного просторового розташування завдяки слаломному ефекту.

Вивчено повздовжню динаміку солітонного збудження на багатоланцюжковій драбинчастій гратці з локально модифікованими поперечними міжвузловими зв'язками. Встановлено досить незвичний результат про вплив суто фазових параметрів поперечної динаміки солітона на характер (притягувальний або відштовхувальний) ефективного повздовжнього потенціалу взаємодії солітона з модифікаційним дефектом поперечних резонансних міжвузлових зв'язків.

У третьому розділі досліджено нову інтегровну нелінійну модель шрьодінгерівських полів на пласкій фермоподібній гратці.

З огляду на симетрію між польовими амплітудами, сформульовано два різновиди прямої задачі розсіяння – координатно-висхідний та координатно-низхідний.

Зваживши на властивості регулярності та симетрії розв'язків Йоста, а також матриць монодромії, виведено два типи рівнянь Марченка для коефіцієнтів розкладу векторів Йоста за спектральним параметром та оберненим спектральним параметром і вписано комплементарні формули для польових амплітуд в термінах найнижчих коефіцієнтів розкладу.

Описано процедуру розв'язування рівнянь Марченка в і знайдено багатосолітонний розв'язок нередукованої нелінійної системи з еволюцією в часі, опосередкованою часовими залежностями даних розсіяння.

Проаналізовано найпростішу реалізацію односолітонної динаміки за редукції до комплексно спряжених польових амплітуд та зроблено повну інтерпретацію солітонних параметрів. Наголошено також на цілком природній кореляції між двовузловою будовою елементарної комірки гратки-носія та двогілковим розщепленням солітонного розв'язку.

Нарешті, знайдено явно низку найважливіших законів збереження досліджуваної чотирикомпонентної інтегровної нелінійної гратчастої системи та вказано на її Гамільтонове представлення як в термінах вихідних

польових функцій, так і в термінах спеціально введених фізично скоригованих функцій, що набувають сенсу повноправних амплітуд присутності збудження на правому вузлі та лівому вузлі n -тої елементарної комірки.

У четвертому розділі побудовано чотирикомпонентну напівдискретну інтегровну нелінійну Шрьодінгерову систему з фоновозалежними міжузловими резонансними зв'язками, що уособлюють собою принципово новий тип резонансних зв'язків і призводять до ефективного стъожкування гратки носія збуджень у вигляді стъожки трикутної гратки.

Доведено інтегровність (в сенсі Лакса) цієї нелінійної Шрьодінгерової системи безпосередньою побудовою представлення нульової кривини з доречно вибраними спектральною та еволюційною матрицями другого (а окрім того і четвертого) порядку.

З метою найраціональнішого пошуку солітонних розв'язків досліджуваної нелінійної системи розвинуто адекватну форму перетворення Дарбу для допоміжних функцій асоційованої лінійної задачі, доповнену неявним перетворенням Беклунда для польових функцій оригінальної нелінійної задачі.

Методом одягання тривіального засівного розв'язку за допомоги розвинутих перетворень Дарбу та Беклунда знайдено ужинковий багатокомпонентний односолітонний розв'язок для досліджуваної нелінійної Шрьодінгерової системи з нелінійностями притягувального типу.

Виявлено велику низку нетривіальних властивостей цієї системи пов'язаних з критичістю її динаміки відносно головного фонового параметра і вказано на важливу роль фаз Паєрлса в параметрах резонансної міжузлової взаємодії для точного моделювання дії поперечного магнітного поля.

Запропоновано прямий узагальнений рекурсивний підхід до пошуку нескінченної множини локальних законів збереження для напівдискретних інтегровних нелінійних систем, асоційованих з тією чи іншою допоміжною спектральною задачею довільного порядку. В рамках цього підходу знайдено кілька найважливіших локальних законів збереження для нелінійної інтегровної Шрьодінгерової системи на стъожці трикутної гратки.

Знайдено Гамільтонове представлення для напівдискретної інтегровної нелінійної Шрьодінгерової системи з фоновозалежними міжузловими резонансними зв'язками, пов'язане з досить складною нестандартною дужкою Пуассона і специфіковане суттєво нерозщепною структурною (симплектичною) матрицею.

Розв'язано задачу з переформулюванням оригінальної напівдискретної інтегровної нелінійної Шрьодінгерової системи з залежними від фонових значень міжузловими резонансними зв'язками в термінах фізично скоригованих польових амплітуд з усіма ознаками амплітуд присутності збуджень на вузлах гратки.

В процесі стандартизації з'ясовано, що кожен із двох допустимих варіантів стандартизованої системи складається із слабкої і сильної

підсистем. Взагалі, симетрія між слабкою підсистемою і сильною підсистемою є суттєво порушену і підлягає відновленню лише за нульової величини фонового параметра. В докритичній області фонового параметра обидві канонічні підсистеми є підсистемами світлих нелінійних збуджень, тоді як в надкритичній області слабка підсистема обертається в підсистему темних нелінійних збуджень. В самій критичній точці слабка підсистема стає перманентно повністю незбуджуваною.

В п'ятому розділі запропоновано велику низку двокомпонентних та кількомпонентних напівдискретних інтегровних нелінійних систем, асоційованих з допоміжними лінійними спектральними задачами другого, третього та четвертого порядків.

Вказано на кілька найрепрезентативніших напівдискретних інтегровних нелінійних систем, однією з яких є система взаємозв'язаних PT-симетричних екситонів і коливань гратки нелінійного Тодового типу, а іншою – найбільш неочікувана система PT-симетричних екситонів і нелінійних коливань гратки з калібрувальною природою зв'язку між підсистемами.

Окрім того сформульовано умови здійснення параметричної локалізації солітонного пакету та доведено калібрувальну еквівалентність між параметричними коливаннями солітона в параметрично розгойдуваних напівдискретних інтегровних системах Шрьодінгерового типу з далекосяжним характером резонансної взаємодії та Блоховими коливаннями солітона в напівдискретних інтегровних системах з далекосяжним характером резонансної взаємодії під дією лінійного потенціалу.

У шостому розділі викладено ключові властивості загальної напівдискретної інтегровної нелінійної системи на квазіодновимірній гратці з трьома структурними елементами в елементарній комірці з її наступною редукцією до шестикомпонентної напівдискретної інтегровної нелінійної системи Шрьодінгера з притягувальним типом нелінійностей.

Детальний розгляд конкретної редукції до напівдискретної інтегровної нелінійної системи Шрьодінгерового типу вказав на надзвичайно нетривіальний вплив супутніх полів за їхніх ненульовими фонових значень на Пуассонову структуру, уособлену п'ятдесятма п'ятьма фундаментальними дужками Пуассона між польовими амплітудами, та на Гамільтонове формулювання динаміки системи в цілому.

Показано, що представлення нульової кривини для загальної напівдискретної інтегровної нелінійної системи є неодмінним ключем до інтегрування рівнянь системи методом послідовного одягання засівного (тривіального або вже відомого) розв'язку в рамках перетворення Дарбу для допоміжної лінійної задачі та неявного перетворення Беклунда для польових функцій. Внаслідок симетрій, притаманних шестикомпонентній напівдискретній інтегровній нелінійній системі Шрьодінгера з притягувальним типом нелінійностей, загальна схема одягання Дарбу–Беклунда зазнає відчутних

спрощень, які приводять до прийнятно параметризованого ужинкового багатокомпонентного солітонного розв'язку, що складається з шести основних та чотирьох супутніх компонент.

Звернено увагу на досить продуктивну концепцію супутніх полів, типову для напівдискретних інтегровних систем, чий допоміжний спектральний оператор має детермінант, залежний від спектрального параметра.

Нарешті, запропоновано загальний принцип побудови багатокомпонентних нелінійних інтегровних систем Шрьодінгерового типу резонансними міжузловими зв'язками фоновозалежними на квазіодновимірній гратці з багатьма структурними елементами в елементарній комірці.

Дисертаційна робота є завершеним та цілісним науковим дослідженням, яке розв'язує цілий ряд актуальних наукових проблем в області нелінійної фізики. Проте, дисертаційна робота не позбавлена певних недоліків.

1. В роботі досліджено велику кількість різноманітних нелінійних інтегровних систем, які можна застосовувати як певні динамічні наближення до реальних фізичних систем, що насправді знаходяться під впливом випадкових збурень різної природи. Цікаві результати було отримано автором дисертації щодо впливу детермінованих збурень на динаміку солітонів. Але вплив стохастичних збурень на властивості отриманих солітонних розв'язків не було систематично розглянуто. Було б доречно обговорити можливі впливи таких збурень на отримані результати.
2. Більшість теоретичних результатів в дисертаційній роботі отримано в моделях придатних для широкого використання при опису різноманітних фізичних систем. Проте автор не приділив достатньої уваги аналізу можливості експериментальної перевірки отриманих результатів, за винятком першого розділу дисертації, де такий аналіз показав дуже гарне узгодження з експериментом.
3. Аналіз нелінійних моделей з дискретними просторовими координатами та неперервним часом дозволив дослідити в дисертаційній роботі низку цікавих фізичних ефектів, що можуть мати місце і в системах з неперервними просторовими змінними. На мою думку, в роботі варто було приділити більше уваги можливостям розширити область застосувань отриманих результатів, в тому числі на багатокомпонентні нелінійні системи з неперервними змінними.
4. До недоліків, що ускладнюють розуміння тексту дисертації я відніс би дещо нестандартну українську термінологію. Наприклад, «магнетне поле», «тлозалежний», «хлипавка». На мою думку, розвиток української термінології - важлива справа, але ці нововведення не мають ускладнювати розуміння суті наукової роботи.

Наведені вище зауваження не знижують загальної високої оцінки здобутих диссидентом результатів і ці зауваження варто розглядати скоріше як побажання до майбутніх цікавих та важливих досліджень. В цілому докторська дисертація О.О. Вахненка є важливою і завершеною науковою працею, яка містить фундаментальні оригінальні результати з актуального напрямку сучасної теоретичної фізики – нелінійної динаміки багатокомпонентних структурованих низьковимірних систем. Результати дисертації є новими, достовірними та обґрунтованими. Результати дисертації вчасно і у повному об'ємі опубліковано в 43 статтях (з них 30 одноосібних) в провідних фахових наукових виданнях та оприлюднено на авторитетних наукових конференціях і семінарах. Наукові розробки дисертації О.О. Вахненка широко відомі в наукових колах і мають значний розвиток в роботах інших авторів.

Автореферат дисертації повністю передає зміст і результати дисертації.

Результати дисертації мають практичну цінність і варти широкого застосування при проведенні подальших теоретичних досліджень та при підготовці експериментів в найрізноманітніших областях фізики від фізики низьковимірних наноструктур, фізики напівпровідників надструктур, нелінійної оптики, біофізики і до геофізики.

Розроблені підходи та здобуті результати також можуть бути внесені до спецкурсів для студентів-фізиків з теоретичних спеціальностей.

Враховуючи актуальність обраної теми досліджень, наукову новизну підходів, величезний об'єм виконаних досліджень, теоретико-фізичну цінність, обґрунтованість та новизну здобутих наукових результатів, вважаю, що дисертаційна праця **“Нелінійна динаміка багатокомпонентних структурованих низьковимірних систем”** цілком відповідає усім вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор, **Олексій Олексійович Вахненко**, безсумнівно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри квантової теорії поля
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка МОН України

Якименко О.І. Якименко

Підпис доктора фізико-математичних наук
Якименка Олександра Ілліча засвідчує:

