

АНОТАЦІЯ

Івахненко О. В. Динаміка неадіабатичних переходів в квантових та класичних дворівневих системах. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія» (10 – Природничі науки). – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, 2023.

Дисертація присвячена дослідженню фундаментальних динамічних явищ, які виникають внаслідок збудження квантових та класичних дворівневих систем у мікроскопічних та мезоскопічних структурах.

У **вступі** коротко обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та основні завдання дослідження, також об'єкт, предмет та методи дослідження. Сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації. Також приведені відомості про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Розділ 1 присвячено огляду та аналізу літератури за темою дисертації. В цьому розділі розглянуто основні явища, які виникають при збудженні дворівневих систем (ДРС), які ще також називаються кубітами. Зокрема введено перехід Ландау-Зінера-Штукельберга-Майорани (ЛЗШМ).

Представлено дворівневу систему, як одну з базових моделей в квантовій фізиці яка описує явища, які повсюдно зустрічаються в природі. З одного боку це одна з найпростіших непростих задач в квантовій механіці, з іншої сторони, це забезпечує основу для квантових технологій, де ДРС використовується в якості кубіта. Там також введено типовий гамільтоніан дворівневої системи, два основних базиси: діабатичний та адіабатичний, оператор переходу між цими двома базисами. Велика кількість різноманітних систем, можуть бути розглянуті як ДРС.

Обґрунтовано відношення всіх чотирьох науковців Ландау, Зінера, Штукельберга та Майорани до розв'язку задачі про лінійне збудження ДРС, яку вони розв'язали у різний спосіб на прикладі різних систем, але отримали такий же результат для вірогідності збудження.

Вивчено поточний стан проблеми динаміки ДРС та наведено зв'язок з попередніми роботами.

Розділ 2 присвячено детальному аналізу одноразового переходу ЛЗШМ та дослідженню його властивостей.

Детально перевиведено та розширено підхід Зінера до розв'язку задачі про збудження ДРС. Згідно підходу Зінера рівняння Шредінгера можна переписати у вигляді двох канонічних рівнянь для спеціальних функцій параболічного циліндру, в термінах яких отримано: вірогідність збудження; а також повний набір фази; аналітичну динаміку всіх параметрів ДРС під дією лінійного збудження; оператор прямого та зворотного діабатичного та адіабатичного переходу з фазою Стокса.

Застосовано аналітичні та наближені розв'язки для вивчення різних властивостей одноразового переходу ЛЗШМ, таких як динаміка для різних швидкостей переходу та різними початковими умовами, а також тривалості переходу ЛЗШМ в адіабатичному та діабатичному базисах. У цьому розділі також введено метод матриць переходу та, вперше, перехід зі збереженням заселеності, який приводить до того, що кінцева заселеність залишається такою ж як і до переходу не дивлячись на збудження.

Розділ 3 присвячено дослідженню різних підходів до багаторазових переходів ЛЗШМ під дією гармонічного сигналу збудження та деяких властивостей багаторазового переходу ЛЗШМ та порівнянню найбільш розповсюджених підходів.

В адіабатично-імпульсній моделі (АІМ) є два типи еволюції: адіабатична та діабатична (перехідна). Також там вивчено шлях для отримання матриці еволюції дворазового переходу ЛЗШМ з аналогією до інтерферометру Маха-Зендера, та шлях для узагальнення теорії на багаторазові переходи ЛЗШМ. Там продемонстровано конструктивну та деструктивну інтерференцію для багаторазових переходів ЛЗШМ, а також аналог частоти Рабі в АІМ. Отримані формули для усередненої за часом заселеності верхнього рівня в адіабатичному базисі та більш точна формула для діабатичного базису. Детально вивчено наближення хвилі, що обертається (НХО). Досліджено вплив частоти збудження на середню за часом вірогідність збудження, та інтерферограми. Показано багатофотонні осциляції Рабі на

інтерферограмах та вивчена можливість використовувати в НХО періодичні сигнали різної форми. Також в цьому розділі вивчено метод Флоке, який може бути застосований для будь-якого періодичного гамільтоніану. Першим наближенням по малій мінімальній відстані між рівнями, являється НХО, а узагальнена теорія збурень Ван-Флека дозволяє отримати друге наближення по теорії Флоке та дозволяє отримати поправку, яка відповідає за зміщення резонансів Блоха-Зігерта.

Досліджено вплив релаксації декогеренції та температури на динаміку дворівневої системи. За допомогою рівняння Ліндблада для ДРС у дисипативному середовищі, продемонстровано що нахил Фур'є образу інтерферограм пропорційний до коефіцієнту декогеренції. Продемонстровано можливість використання Фур'є образів інтерферограм для виявлення їх властивостей за допомогою квантової фазової томографії.

Детально порівняно найбільш популярні наближення, які використовуються для симуляції динаміки ДРС під дією періодичного збудження. Зокрема наведено порівняння інтерферограм з одними і тими ж параметрами, побудованими різними методами, та областей застосування різних методів. А також вперше представлена відносна складність розрахунків інтерферограм за різними методами як час необхідний на побудову однієї і тієї ж інтерферограми різними методами та наближеннями.

Розділ 4 присвячено дослідженню та демонстрації використання багаторазових неадіабатичних переходів ЛЗШМ як базису для квантових логічних операцій. Показано, що переходи ЛЗШМ мають декілька переваг над осциляціями Рабі, які зазвичай використовуються для квантових логічних операцій, такі як більша швидкість виконання операції при більшій точності. Що дозволяє зробити більше операцій до того моменту як вплив дисипативного середовища буде значущим.

Розділ 5 присвячено теоретичному вивченню взаємодії кубіту типу трансмон з напівобмеженою лінією передач, та коефіцієнту відбиття такої системи та порівнянню результатів з експериментальними даними. Особливості конструкції такої системи приводять до зникнення нульового резонансу на інтерферограмах. Вивчено особливості системи кубіт навпроти дзеркала та типові значення параметрів такої системи.

Вперше створено теорію для симуляції поведінки такої системи, зокрема наведено спосіб отримання гамільтоніану системи, подвійно застосовано НХО, перший раз для отримання так званого одягненого гамільтоніану, вдруге для отримання середньої за часом вірогідності збудження кубіту. Показано, що середня за часом вірогідність збудження пропорційна зменшенню коефіцієнту відгуку такої системи, продемонстровано схожість та відмінність теоретичних та експериментальних інтерферограм.

Вперше обговорено відмінності між теорією та експериментом на прикладі інтерферограм та пропонується ввести нелінійну поправку до амплітуди збудження для отримання кращого співпадіння з експериментом. Однією з переваг такого розташування кубіту та напівнескінченної лінії передач є можливість маніпулювати поглинанням дворівневої системи, що забезпечує новий спосіб маніпулювання квантовими станами.

Розділ 6 присвячено дослідженню схожості та відмінності між кубітом та класичними системами зв'язаних осциляторів.

За допомогою наближення повільно змінюваної оминаючої та ніближення малої релаксації можна перейти від рівняння Ньютона до рівняння Шредінгера для класичної системи з двох зв'язаних осциляторів. Також наводяться вирази для параметрів класичної системи, які аналогічні параметрам кубіту, та детально вивчені принципові відмінності між такою квантовою та класичною системами.

Описано розв'язок рівняння Шредінгера з класичними аналогами параметрів для отримання затухаючих осциляцій Рабі, та порівнюється теорія, чисельний розрахунок динаміки кубіту, та динаміки класичної системи. Детально досліджені інтерферограми, подібні до інтерферограм кубіту для різних параметрів, зокрема вперше розрахований результат інтерферометрії класичної системи під дією шумового збуджуючого сигналу прямокутної форми та продемонстрована її схожість до отриманого за допомогою кубіту. Цю аналогію можна використати для симуляції інтерференційних явищ на класичній системі, яка зазвичай не потребує екстремально низьких температур для роботи і може працювати при кімнатній температурі, що робить їх більш доступними.

Розділ 7 присвячено дослідженню динаміки стиснутої з боків мембрани,

яка має два стабільних стани для використання її як одієї з обкладок мем'ємності (конденсатор з ефектом пам'яті).

Досліджена динаміка стиснутої випуклої мембрани за допомогою теорії пружності, яка приводить до інтегро-диференційного рівняння четвертого ступеня. Це рівняння, в свою чергу, можна розкласти по власним функціям стиснутої мембрани, що призведе до системи диференційних рівнянь першого ступеня на власні функції. Вперше показано, що принципово є два типи перескоку мембрани симетричний та асиметричний, та що для асиметричного перескоку потрібна менша порогова сила, а отже перескок в основному буде відбуватись асиметрично. Також вперше показано, що для знаходження мінімальної порогової сили для переключення мембрани в інше положення достатньо розглядати всього дві власні функції, що значно спрощує розрахунок цієї сили. Показана можливість та розрахована порогова сила для зворотного перемикання після припинення дії цієї сили на стиснуту мембрану. Порівняно результати розрахунків для порогової сили необхідної для перемикання з іншими теоретичними та чисельними розрахунками, та показано гарний збіг порогової сили для несиметричного перемикання з іншими методами.

Ключові слова: Кубіт, дворівнева система, перехід Ландау-Зінера-Штукельберга-Майорани, метод матриць переходу, адіабатично-імпульсна модель, наближення хвилі що обертається, мем'ємність, наномеханічний резонатор, трансмон, інтерферометрія, неадіабатичний перехід, квантові логічні гейти, вигнута мембрана, шумовий сигнал, гармонічний осцилятор, спин $1/2$, тунелювання, непружне розсіяння.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Simulating quantum dynamical phenomena using classical oscillators: Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry, latching modulation, and motional averaging", *Sci. Rep.* **8**, 12218 (2018),
DOI: 10.1038/s41598-018-28993-8

2. Ruslan D. Yamaletdinov, **Oleg V. Ivakhnenko**, Olga V. Sedelnikova, Sergey N. Shevchenko, Yuriy V. Pershin, "Snap-through transition of buckled graphene membranes for memcapacitor applications", *Sci. Rep.* **8**, 3566 (2018), DOI: 10.1038/s41598-018-21205-3
3. P. Y. Wen, **O. V. Ivakhnenko**, M. A. Nakonechnyi, B. Suri, J.-J. Lin, W.-J. Lin, J. C. Chen, S. N. Shevchenko, Franco Nori, I.-C. Hoi, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry of a superconducting qubit in front of a mirror", *Phys. Rev. B* **102**, 075448 (2020), DOI: 10.1103/physrevb.102.075448
4. **Oleh V. Ivakhnenko**, Sergey N. Shevchenko, Franco Nori, "Nonadiabatic Landau–Zener–Stückelberg–Majorana transitions, dynamics, and interference", *Phys. Rep.* **995**, 1-89 (2022), DOI: 10.1016/j.physrep.2022.10.002

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів:

5. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, "Simulating quantum dynamical phenomena using classical oscillators", International school & conference on nanoscience and quantum transport (nanoQT-2016), 8-14 October, 2016, Kyiv, Ukraine, Poster, onsite (2016).
6. **O.V. Ivakhnenko**, and S.N. Shevchenko, "Interferometry with nanomechanical resonator", Student conference on Applied Physics "Actual problems of modern physics", 25 Nov, 2016, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 21 (2016).
7. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, R. D. Yamaletdinov, and Y. V. Pershin, "Dynamics of a membrane for creation of a memcapacitance", VIII International Conference for Professionals & Young Scientists low temperature physics (ICPYS-LTP2017), 29 May-2 June, 2017, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 147 (2017).
8. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, R. D. Yamaletdinov, and Y. V. Pershin, "Elastic dynamics of the membrane to create the memcapacitors", Student

- conference on Applied Physics "Actual problems of modern physics", 24 Nov, 2017, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 31 (2017).
9. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry, latching modulation, and motional averaging – dynamical quantum phenomena simulated by coupled classical oscillators", IX International Conference for Professionals & Young Scientists low temperature physics (ICPYS-LTP2018), 4-8 June, 2018, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 183 (2018).
 10. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Qubit and coupled mechanical resonators, similarities and differences of behaviour", International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics 2019 (ISNTT2019), 18-22 November, 2019, Atsugi, Japan.
 11. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Comparison of approaches for description of driven qubits", International Advanced Study Conference «Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020», (CM<P 2020), 8-14 June, 2020, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 167 (2020).
 12. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Occupation-conservation transition in a quantum two-level system", XI Conference of Young Scientists "Problems of Theoretical Physics", ("Problems of Theoretical Physics"), 21-23 December, 2020, Kyiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 23 (2020).
 13. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Simulating quantum dynamical phenomena using classical oscillators", American Physics Society March meeting 2021 ("APS March meeting"), 15-19 March, 2021, Online, USA, Abstracts, p. P31.003 (2021).
 14. **O. V. Ivakhnenko** and S. N. Shevchenko and Franco Nori, "Ultrafast Landau-Zener-Stückelberg-Majorana (LZSM) gates", International Symposium on Novel materials and quantum Technologies (ISNTT2021), 14-17 November, 2021, Atsugi, Japan, Online.

15. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions for interferometry and quantum control", American Physics Society March meeting 2022 ("APS March meeting"), 14-18 March, 2022, Chicago, USA, Online, Abstracts, p. Q38.00010 (2022).
16. **O. V. Ivakhnenko**, A. I. Ryzhov, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions for fast quantum logic gates", 29th International Conference on low temperature physics" (LT29), 18-24 August, 2022, Sapporo, Japan, Online, Abstracts, p. P20-SF4-24 (2022).
17. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions dynamics, and interference", American Physics Society March meeting 2023 ("APS March meeting"), 20-22 March, 2023, Los-Angeles, USA, Online, Abstracts, p. UU05.00006 (2023).

ABSTRACT

Ivakhnenko O. V. Dynamics of nonadiabatic transitions in quantum and classical two-level systems. — Qualification scientific work printed as manuscript.

dissertation for a Doctor of Philosophy degree in speciality 104 – «Physics and Astronomy» (10 – Natural Sciences). – B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv 2023.

The dissertation is devoted to the study of fundamental dynamical phenomena which emerge due to the driving of the quantum and classical two-level systems in microscopic and mesoscopic structures.

In the **introduction** is briefly justified the relevance of the dissertation topic, defined purpose and main tasks of the research, objects, subject, and research methods. The scientific novelty is formulated and the practical value of the obtained results are described. Also, this chapter has discussed the information about the publications, personal applicant's contribution, and approbation of the dissertation results. The information, about the structure and volume of the dissertation is also given.

The **chapter 1** is devoted to the review and analysis of the literature related to the topic of the dissertation. The main phenomena of two-level system (TLS) driving are briefly described. In particular, I introduce Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transition. This chapter has described that a two-level system (TLS) is one of the basic models in quantum physics and describes phenomena that are ubiquitous in nature. On one hand, this is the simplest nonsimple problem in quantum mechanics, on the other hand, this provides the basis for quantum technologies, where a TLS is used as a qubit. There also typical Hamiltonian of the TLS, with two main bases diabatic and adiabatic, and transition operators between these bases is introduced. A wide variety of different systems is demonstrated, which could be considered as a TLS.

There we describe the connection of all four scientists Landau-Zener-Stückelberg-Majorana to solving a problem about linear excitation of the TLS, they solved that problem in completely different ways on different systems, but they obtained the same result for the excitation probability. There are relations to the previous works described.

The **chapter 2** is devoted to derivation and analysis of single Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transition and its properties.

There we introduce and expand Zener's approach. According to Zener's approach, the Schrödinger equation could be rewritten as two canonical equations of parabolic cylinder special functions, in terms of which I obtained: analytical excitation probability; total gained phase; dynamics of all parameters of the two-level system under linear excitation; transition diabatic evolution operator with the Stokes phase.

I apply analytical and approximated solutions to investigate different properties of the single-passage LZSM transition such as dynamics for a different speed of transition and different initial conditions, as well as time of the transition in adiabatic and diabatic bases. This chapter has considered also the derivation of the transfer matrix method, and first time occupation conserving transition, which could lead to the same final occupation probabilities after the transition as it was before despite the excitation.

The **chapter 3** is devoted to describing different approaches for multiple LZSM passage driving, some properties of LZSM transition, and a comparison of the most widespread methods.

We describe the adiabatic-impulse model (AIM) in detail. The two types of evolution: adiabatic and diabatic (transition) are introduced. There we also explain the way to obtain an evolution matrix for double passages with the analogy to Mach-Zender interferometer for double transitions and the way to extend this theory to multi-passage LZSM transitions. There we demonstrate constructive and destructive interference for multiple LZSM transitions as well as the analog of the Rabi frequency in AIM. As a result of the AIM, we obtain formulas for the time-averaged upper-level occupation probability on the adiabatic basis, and a more precise formula for the diabatic basis.

The rotating wave approximation (RWA) is described in detail. The way to obtain a time-averaged probability of excitation is also described, and the influence of the excitation frequency on interferograms is demonstrated, multiphoton Rabi oscillations are described, and the possibility of using various shapes of periodic signals in RWA is demonstrated. Also in this section, the Floquet method is described, which can be applied to any periodic Hamiltonian.

The first approximation for a small minimum distance with levels is RWA, and the generalized Van Fleck perturbation theory allows obtaining a second approximation according to the Floquet theory and allows obtaining the correction responsible for the Bloch-Siegert shifting of resonances.

Then we describe the influence of decoherence, relaxation, and temperature on the dynamics of a two-level system. With the Lindblad equation for TLS in a dissipative environment, it is demonstrated that the Fourier slope of the interferogram image is proportional to the decoherence coefficient.

The possibility of using Fourier images of interferograms to study their properties using quantum phase tomography is demonstrated.

I compared the most popular approximations for describing the dynamics of TLS under periodic excitation and describe it in detail. In particular, a comparison of interferograms for the same parameters, calculated by different methods, and areas of application of different methods are given. And also, first time compared the relative computational complexity of calculating interferograms using different methods, which is presented as the time required to construct the same interferogram using different methods and approximations.

The **chapter 4** is devoted to the description and demonstration of the usage of multiple non-adiabatic LZSM transitions as a basis for quantum logic operations. LZSM transitions have several advantages over Rabi oscillations, which are commonly used for quantum logic operations, such as faster operation speed with higher accuracy. That allows us to apply more operations before the influence of the dissipative environment becomes significant.

The **chapter 5** is devoted to the theoretical description of the interaction of a transmon qubit with a semi-limited transmission line, the study of the reflection coefficient of such a system, and the comparison of the results with experimental data. Features of the design of such a system lead to the disappearance of zero resonance in interferograms.

The features of the qubit system in front of the mirror are described and typical values for the parameters of such system are given.

The theory for describing the behavior of such a system is investigated for the first time, in particular, the method to obtain the Hamiltonian of the system is demonstrated, the RWA approximation is applied twice, the first time to obtain

the so-called dressed-state Hamiltonian, and the second time to obtain the time-averaged probability of qubit being excited. We show that the time-averaged excitation probability is proportional to the decrease in the response coefficient of such a system, and the similarities and differences between theoretical and experimental interferograms are described.

Differences between theory and experiment are discussed for the first time on resulted interferograms, and a nonlinear correction to the excitation amplitude is proposed to obtain a better agreement with the experiment. One of the advantages of this qubit arrangement of the semi-infinite transmission line is the ability to manipulate the absorption properties of the two-level system, which provides a new way to manipulate quantum states.

The **chapter 6** is devoted to the study of similarities and differences between the qubit and classical systems of two coupled oscillators.

There we describe the transition from Newton's equations to the Schrödinger equation for two coupled classical oscillators and the approximations that are used for it. Expressions for the parameters of the classical system, and analogy to parameters of the qubit, are also demonstrated, fundamental differences between such quantum and classical systems are described.

The solution of the Schrödinger equation with classical analogs of the parameters for obtaining damped Rabi oscillations is described. The theory, numerical calculation of the qubit dynamics, and the dynamics of the classical system are compared. Numerical calculation of interferograms which are similar to qubit interferograms for various parameters is also described, in particular for the first time, the result of interferometry of classical system under the action of a noisy excitation rectangular signal is given and its similarity to that obtained using a qubit is discussed. This analogy can be used to simulate interference phenomena on a classical system, which usually does not require extremely low temperatures to operate and can operate at room temperature, which makes them more accessible.

The **chapter 7** is devoted to the study of dynamics of the laterally compressed buckled membrane, which has two stable states for its use as one of the plates of a memcapacitor (a capacitor with a memory effect).

The dynamics of a compressed buckled membrane are described using the theory of elasticity, which leads to a fourth-degree integrodifferential

equation. This equation can be decomposed into eigenfunctions of the buckled membrane, which will lead to a system of differential equations of the first degree for eigenfunctions. We show that there are two types of membrane switching, symmetric and asymmetric, and that asymmetric switching, leads to a smaller required threshold force. Therefore, the switching will mainly take place asymmetrically. This chapter is also shown, for the first time, that to find the minimum threshold force for switching the membrane to another position, it is enough to consider only two eigenfunctions, which greatly simplifies the calculation of this force. The possibility to reverse switching after the removing force on the buckled membrane is demonstrated and the threshold force for this is calculated.

The results of calculations for the threshold force required for switching are compared with other theoretical and numerical calculations, and a good agreement of the threshold force for asymmetric switching with other methods is demonstrated.

Keywords: Qubit, two-level system, Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transition, transfer matrix method, adiabatic-impulse model, rotating wave approximation, memcapacitor, nanomechanical resonator, transmon, interferometry, non-adiabatic transition, quantum logic gate, buckled membrane, noise signal, harmonic oscillator, spin 1/2, tunneling, inelastic scattering.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE CANDIDATE BY THE TOPIC OF THE DISSERTATION

Scientific works in which the main results of the dissertation are published:

1. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Simulating quantum dynamical phenomena using classical oscillators: Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry, latching modulation, and motional averaging", *Sci. Rep.* **8**, 12218 (2018), DOI: 10.1038/s41598-018-28993-8
2. Ruslan D. Yamaletdinov, **Oleg V. Ivakhnenko**, Olga V. Sedelnikova, Sergey N. Shevchenko, Yuriy V. Pershin, "Snap-through transition of buckled graphene membranes for memcapacitor applications", *Sci. Rep.* **8**, 3566 (2018), DOI: 10.1038/s41598-018-21205-3

3. P. Y. Wen, **O. V. Ivakhnenko**, M. A. Nakonechnyi, B. Suri, J.-J. Lin, W.-J. Lin, J. C. Chen, S. N. Shevchenko, Franco Nori, I.-C. Hoi, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry of a superconducting qubit in front of a mirror", *Phys. Rev. B* **102**, 075448 (2020), DOI: 10.1103/physrevb.102.075448
4. **Oleh V. Ivakhnenko**, Sergey N. Shevchenko, Franco Nori, "Nonadiabatic Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions, dynamics, and interference", *Phys. Rep.* **995**, 1-89 (2022), DOI: 10.1016/j.physrep.2022.10.002

Scientific works certifying the approbation of the results:

5. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, "Simulating quantum dynamical phenomena using classical oscillators", International school & conference on nanoscience and quantum transport (nanoQT-2016), 8-14 October, 2016, Kyiv, Ukraine, Poster, onsite (2016).
6. **O.V. Ivakhnenko**, and S.N. Shevchenko, "Interferometry with nanomechanical resonator", Student conference on Applied Physics "Actual problems of modern physics", 25 Nov, 2016, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 21 (2016).
7. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, R. D. Yamaletdinov, and Y. V. Pershin, "Dynamics of a membrane for creation of a memcapacitance", VIII International Conference for Professionals & Young Scientists low temperature physics (ICPYS-LTP2017), 29 May-2 June, 2017, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 147 (2017).
8. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, R. D. Yamaletdinov, and Y. V. Pershin, "Elastic dynamics of the membrane to create the memcapacitors", Student conference on Applied Physics "Actual problems of modern physics", 24 Nov, 2017, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 31 (2017).
9. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana interferometry, latching modulation, and motional

- averaging – dynamical quantum phenomena simulated by coupled classical oscillators”, IX International Conference for Professionals & Young Scientists low temperature physics (ICPYS-LTP2018), 4-8 June, 2018, Kharkiv, Ukraine, Abstracts, p. 183 (2018).
10. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, ”Qubit and coupled mechanical resonators, similarities and differences of behaviour”, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics 2019 (ISNTT2019), 18-22 November, 2019, Atsugi, Japan.
 11. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, ”Comparison of approaches for description of driven qubits”, International Advanced Study Conference «Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020», (CM<P 2020), 8-14 June, 2020, Kharkiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 167 (2020).
 12. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, ”Occupation-conservation transition in a quantum two-level system”, XI Conference of Young Scientists ”Problems of Theoretical Physics”, (”Problems of Theoretical Physics”), 21-23 December, 2020, Kyiv, Ukraine, Online, Abstracts, p. 23 (2020).
 13. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, ”Simulating quantum dynamical phenomena using classical oscillators”, American Physics Society March meeting 2021 (”APS March meeting”), 15-19 March, 2021, Online, USA, Abstracts, p. P31.003 (2021).
 14. **O. V. Ivakhnenko** and S. N. Shevchenko and Franco Nori, ”Ultrafast Landau-Zener-Stückelberg-Majorana (LZSM) gates”, International Symposium on Novel materials and quantum Technologies (ISNTT2021), 14-17 November, 2021, Atsugi, Japan, Online.
 15. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, ”Landau-Zener-Stuckelberg-Majorana transitions for interferometry and quantum control”, American Physics Society March meeting 2022 (”APS March meeting”), 14-18 March, 2022, Chicago, USA, Online, Abstracts, p. Q38.00010 (2022).

16. **O. V. Ivakhnenko**, A. I. Ryzhov, S. N. Shevchenko, M. F. Gonzalez-Zalba, and Franco Nori, "Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions for fast quantum logic gates", 29th International Conference on low temperature physics" (LT29), 18-24 August, 2022, Sapporo, Japan, Online, Abstracts, p. P20-SF4-24 (2022).
17. **O. V. Ivakhnenko**, S. N. Shevchenko, and Franco Nori, "Nonadiabatic Landau-Zener-Stuckelberg-Majorana transitions dynamics, and interference", American Physics Society March meeting 2023 ("APS March meeting"), 20-22 March, 2023, Los-Angeles, USA, Online, Abstracts, p. UU05.00006 (2023).

Ivakhnenko Oleg S.