

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Лебеденко Яна Олександрівна

УДК 534.1; 519.6; 517.9

ДИСЕРТАЦІЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ ТА
ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ З ОБМЕЖЕНОЮ
ПОТУЖНІСТЮ

113 – Прикладна математика

11 – Математика та статистика

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Лебеденко Я.О.

Науковий керівник:
Міхлін Юрій Володимирович,
доктор фізико-математичних наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Лебеденко Я.О. Дослідження резонансних стаціонарних режимів та перехідних процесів у нелінійних системах з обмеженою потужністю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Україна, Харків, 2023.

Об'єкт дослідження – динаміка систем з обмеженим збудженням в околі резонансу між частотами збудження та пружної підсистеми.

Предмет дослідження – аналіз стаціонарних резонансних режимів коливань та перехідних процесів в системах з обмеженим збудженням, які моделюються динамічними системами з трьома степенями свободи.

В дисертаційній роботі розглядається динаміка деяких систем з обмеженим збудженням в околі резонансу. До систем з обмеженим збудженням (або неідеальних систем) відносяться такі системи, де зворотній вплив пружних елементів системи на джерело енергії є суттєвим. Зокрема, до таких систем можна віднести системи, де потужність двигуна є не дуже значною. В таких системах збудження залежить від переміщень збудженої пружної підсистеми. На початку 20 сторіччя відомий німецький фізик А.Зоммерфельд вперше описав ефект значних резонансних коливань, коли значна частина енергії двигуна уходить на підтримання цих резонансних коливань, що заважає виходу двигуна на номінальні оберти. Вже в 50-ті роки минулого сторіччя відомий український вчений В.О. Кононенко дав перший аналітичний опис ефекту Зоммерфельда. Після цього дослідження в цьому напрямку продовжував як В.О. Кононенко, так і інші вчені. Кількість робіт з динаміки неідеальних систем значно поширилась в останні роки. В дисертаційній роботі розглянуто три моделі неідеальних систем. Одна з них – це модель, що містить джерело енергії, пружну підсистему та маятниковий гаситель коливань. Інші системи пов'язані з динамікою порталльної системи (яка представлена пружною підсистемою), ротора та неврівноваженої маси в

якості гасителя. Для однієї моделі обрано суттєво нелінійний зв'язок між вказаною масою та порталною рамою, для іншої в цей зв'язок додано лінійну складову. Всі моделі описано нелінійними системами з 3 степенями свободи. Методом багатьох масштабів побудовано стаціонарні резонансні режими коливань систем, що розглядаються. Далі з використанням апроксимацій Паде побудовано перехідні процеси. За допомогою чисельного моделювання досліджується можливість зменшення резонансних пружних коливань шляхом зміни параметрів вказаних систем.

В першому розділі дисертаційної роботи зроблено огляд історії досліджень систем з обмеженою потужністю та огляд сучасного стану цієї проблеми. Описано також проблему розвитку асимптотичних методів, які активно використовуються для аналітичного дослідження нелінійних систем. Зроблено також огляд проблеми гасіння коливань, здебільшого шляхом використання пасивних динамічних гасителів, серед яких можуть бути маятникові гасителі, елементи у вигляді ферми Мізеса, віброударні елементи, суттєво нелінійні осцилятори та ін.

В другому розділі роботи дано опис основних моделей, що розглядаються, зокрема, представлено відповідні рівняння руху у вигляді нелінійних систем з 3 степенями свободи. Обговорюється введення в ці рівняння малого параметру, що важливо для подальшого використання асимптотичного аналізу. Дана інформація щодо ефективності методу багатьох масштабів, який використовується в роботі для побудови стаціонарних режимів руху, та апроксимацій Паде, які використано для побудови перехідних процесів. Представлена також інформація відносно комп'ютерних програм, які використовуються для моделювання стаціонарних та перехідних режимів та для вибору таких параметрів систем, які дозволяють зменшити амплітуди коливань.

Третій розділ роботи присвячено побудові стаціонарних режимів руху систем з обмеженою потужністю при наявності резонансу 1:1. Методом багатьох масштабів отримано амплітуди коливань як функції параметрів

системи, які можуть бути знайдені з системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, яка розв'язується методом Ньютона. Зроблено порівняння отриманих аналітичних результатів з результатами чисельного моделювання, яке продемонструвало достатньо високу точність цих результатів.

В четвертому розділі розглядається побудова перехідного процесу у вказаних вище системах. Вводяться нові змінні для ефективного представлення перехідних процесів; крім того, розв'язки рівнянь, отриманих раніше методом багатьох масштабів, представлено в степеневих рядах. Далі ці ряди використовуються при побудові дробно-раціональних апроксимацій Паде, що містять експоненти. При цьому використовується також додаткова умова наближення перехідних процесів до побудованих раніше стаціонарних резонансних режимів. Чисельне моделювання показало достатньо високу точність запропонованого представлення перехідного процесу. Комп'ютерне моделювання демонструє, що навіть при наявності інших резонансів, в розглянутих системах найважливішим є саме резонанс 1:1.

П'ятий розділ роботи присвячено аналізу можливості зменшення амплітуд стаціонарних резонансних коливань шляхом зміни параметрів систем, що зроблено шляхом комп'ютерного моделювання. Виділено ті параметри, які є найбільш вагомими для вказаного зменшення амплітуд. Зокрема, для всіх розглянутих систем дуже важливим для цього виявився параметр нелінійності в характеристиках пружних елементів систем, що розглядаються. Саме зростання цього параметру приводить до суттєвого зменшення амплітуд пружних коливань.

Ключові слова: *нелінійні коливання, вільні та вимушені коливання, неідеальні системи, резонанс, частоти, асимптотичні методи, чисельні моделі, перехідний процес.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА:

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Lebedenko, Y.O., Mikhlin, Y.V., and Pinsky, M.A. Resonance Dynamics of the Non-ideal System Having the Pendulum as Absorber of Elastic Vibrations // Nonlinear Vibrations Excited by Limited Power Sources Mechanisms and Machine Science / ed. by J. M. Balthazar. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – Vol. 116. – P. 139–149. doi: 10.1007/978-3-030-96603-4_9. (Scopus, Швейцарія, Q4).
2. Лебеденко, Я. О., Міхлін, Ю. В. Стаціонарний режим та перехідний процес в системі з обмеженим джерелом енергії, що містить маятниковий гаситель коливань // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2022. – Вип. 34. – С. 71 – 92. doi: 10.15421/4222107. (Б)
3. Я. О. Лебеденко, Ю. В. Міхлін. Дослідження стаціонарних та перехідних процесів в суттєво нелінійній системі з трьома степенями свободи з обмеженим збудженням // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро : Ліра, 2023. – Вип. 36. – С. 79 – 94. DOI: 10.15421/4223107. (Б)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

4. Yuri V. Mikhlin and Yana O. Lebedenko. Resonance Steady State and Transient in the Non-Ideal System Having the Pendulum Absorber // The 10th European Nonlinear Oscillations Conference (ENOC). – 2022. – Book of abstracts. Lyon, France. – P. 1013–1019.
5. Лебеденко Я.О. Резонансна динаміка системи з обмеженою потужністю, що має маятниковий гаситель коливань // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2021, 18–20 травня 2021 р.: у 5 ч. Ч. I. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – С. 333.

6. Mikhlin Y.V., Lebedenko Y.O. Resonance Regimes in the Non-Ideal System Having the Pendulum as Absorber // 16th Conference on DYNAMICAL SYSTEMS – Theory and Applications (DSTA). – Abstracts. / Lodz Technical University – Poland, December 6 – 9, 2021. – P. 96 – 97.
7. Лебеденко Я.О. Дослідження стаціонарного режиму та перехідного процесу в системі з обмеженою потужністю, що має маятниковий гаситель // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2022, 19–21 жовтня 2022 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ "ХПІ", 2022. – С. 318.
8. Я.О. Лебеденко, Ю.В. Міхлін. Дослідження стаціонарного режиму та перехідного процесу в неідеальних системах // 2022 International Conference on Innovative Solutions in Software Engineering (ICISSE) / Mykola Kuz and Mykola Kozlenko Eds., Ivano-Frankivsk, Ukraine: Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 2022. – P. 235 – 237.
9. Я.О. Лебеденко, Ю.В. Міхлін. Вплив параметрів системи при побудові стаціонарних розв'язків двох неідеальних систем // XVI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (14–16 грудня 2022 року): матеріали конференції / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – С. 39 – 40.
10. Я.О. Лебеденко, Ю.В. Міхлін. Дослідження резонансного стану та перехідного процесу в двох неідеальних системах // Сучасні проблеми механіки та математики – 2023: збірник наукових праць / за за. ред. акад. НАН України Р.М. Кушніра та чл.-кор. НАН України В.О. Пелиха [Електронний ресурс] // Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – 2023. – С. 267 – 268.
11. Лебеденко Я.О. Дослідження резонансної поведінки неідеальної системи, що містить порталну раму з валом // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI

- міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD–2023, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ "ХПІ", 2023. – С. 429.
12. Yuri V. Mikhlin, Yana O. Lebedenko. Resonance steady states and transient in some non-ideal systems // Book of Abstracts of the Third International Nonlinear Dynamics Conference. – 2023. – Rome, Italy. – P. 530.

ABSTRACT

Lebedenko Ya. O. Research of the resonance stationary modes and transients in nonlinear systems with limited power supply. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 113 – Applied mathematics. – National technical university "Kharkiv polytechnic institute". – Ukraine, Kharkiv, 2023.

The object of study is a dynamics of the systems with limited power supply in the vicinity of the resonance between frequencies of excitation and elastic subsystem.

The subject of the research is an analysis of the resonance steady states and transient in systems with limited power supply, which are modelled by dynamical systems having three degrees of freedom.

In the dissertation the dynamics of some systems with limited excitation in the vicinity of resonance is considered. Systems with limited power supply (or non-ideal systems) include such systems where the reverse influence of the elastic elements of the system on the energy source is significant. In particular, such systems include systems where the motor power is not very significant. In such systems, the excitation depends on the movements of the excited elastic subsystem. At the beginning of the 20th century, the famous German physicist A. Sommerfeld first described the effect of large amplitude resonant oscillations, when a significant part of the motor's energy goes into maintaining these resonant oscillations, which prevents the motor from reaching its nominal speed. Already in the 50s of the last century, the famous Ukrainian scientist V.O. Kononenko gave the first analytical description of the Sommerfeld effect. Then investigations in this direction were continued as by V.O. Kononenko, as well by other scientists. The number of works on the dynamics of non-ideal systems has increased significantly in recent years. Three models of non-ideal systems are considered in the dissertation. One of them is a model containing an energy source, an elastic

subsystem and a pendulum damper. Other systems are related to the dynamics of the portal frame (which is represented by an elastic subsystem), the rotor, and the unbalanced mass as a damper. For one model, a significantly nonlinear relationship between the unbalanced mass and the portal frame was chosen, for the other one, a linear component was added to this relationship. All models are described by nonlinear systems with 3 degrees of freedom. Stationary resonance modes of oscillations of the systems under consideration were constructed by the multiple scales method. Next, transient is constructed using Padé approximants containing exponents. With the help of numerical modeling, the possibility of reducing resonant elastic oscillations by changing the parameters of the specified systems is analyzed.

In the first Section of the dissertation, an overview of the history of research into systems with limited power supply and an overview of the current state of this problem is made. The problem of the development of asymptotic methods, which are actively used for the analytical study of nonlinear systems, is also described. An overview of the problem of vibration damping is also presented, mostly by using passive dynamic dampers, which may include pendulum dampers, elements in the form of a Mises truss, shock elements, significantly nonlinear oscillators, etc.

In the second section of the work, a description of the main models under consideration is given. In particular, the corresponding equations of motion in the form of nonlinear systems with 3 degrees of freedom are presented. The introduction of a small parameter into these equations is discussed, which is important for the further use of asymptotic analysis. Information is given on the effectiveness of the multiple scales method used in the work to construct stationary modes of motion, and on the Padé approximations used to construct transients. Information is also presented regarding computer programs that are used to simulate stationary and transient modes and to select such system parameters that allow reduce the amplitudes of oscillations.

The third section of the work is devoted to the construction of stationary regimes of systems with limited power in the presence of 1:1 resonance. The amplitudes of oscillations as a function of the system parameters, which can be found from the system of nonlinear algebraic equations solved by Newton's method, are obtained by the method of many scales. A comparison of the obtained analytical results with the results of numerical modeling was made, which demonstrates a sufficiently high accuracy of these results.

The fourth section examines the construction of the transient in the above-mentioned systems. New variables are introduced to effectively represent transient processes; in addition, the solutions of the equations previously obtained by the method of many scales are presented in power series. Further, these series are used in the construction of the fractional-rational Padé approximants. At the same time, the additional condition of the approach of the transient to previously constructed stationary resonance modes is also used. Numerical modeling shows a sufficiently high accuracy of the proposed representation of the transient. Computer simulations demonstrate that even in the presence of other resonances, the most important is the 1:1 resonance in the considered systems.

The fifth section of the work is devoted to the analysis of the possibility of reducing the amplitudes of stationary resonant oscillations by changing the system parameters, which is done by computer simulation. Those parameters that are the most significant for the indicated reduction of amplitudes are highlighted. In particular, for all the considered systems, the parameter of nonlinearity in the characteristics of the elastic elements of the considered systems turned out to be very important for this. It is the growth of this parameter that leads to a significant decrease in the amplitudes of elastic oscillations.

Conclusions complete the dissertation work.

Keywords: *nonlinear oscillations, free and forced vibrations, non-ideal systems, resonance, frequencies, asymptotic methods, numerical models, transitory process.*

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS:

Scientific works in which the main scientific results were published:

1. Lebedenko, Y.O., Mikhlin, Y.V., and Pinsky, M.A. Resonance Dynamics of the Non-ideal System Having the Pendulum as Absorber of Elastic Vibrations // Nonlinear Vibrations Excited by Limited Power Sources Mechanisms and Machine Science / ed. by J. M. Balthazar. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – Vol. 116. – P. 139–149. doi: 10.1007/978-3-030-96603-4_9. (Scopus, Switzerland, Q4)
2. Lebedenko, Y. O., Mikhlin, Y. V. Stationary state and transient process in a system with a limited energy supply containing a pendulum absorber // Problems of computational mechanics and strength of structures: coll. of science works. – Dnipro: Lira, 2022. – Issue 34. – P. 71 – 92. doi: 10.15421/4222107. (B)
3. Y.O. Lebedenko, Yu.V. Mikhlin. Research of stationary and transient processes in a substantially nonlinear system with three degrees of freedom with limited excitation // Problems of computational mechanics and strength of structures: coll. of science works. – Dnipro : Lira, 2023. – Issue 36. – P. 79 – 94. doi: 10.15421/4223107. (B)

Published works of approbation nature:

4. Yuri V. Mikhlin and Yana O. Lebedenko. Resonance Steady State and Transient in the Non-Ideal System Having the Pendulum Absorber // ENOC. – 2022. – Book of abstracts. Lyon, France. – P. 1013 –1019.
5. Lebedenko Ya. O. Resonance dynamics of a power-limited system with a pendulum vibration absorber // Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXIX International scientific and practical conference MicroCAD-2021, May 18-20, 2021 : in 5 p. Part I. / edited by Prof. E.I. Sokol – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2021. – P. 333.

6. Mikhlin Y.V., Lebedenko Y.O. Resonance Regimes in the Non-Ideal System Having the Pendulum as Absorber // 16th Conference on Dynamical Systems – Theory and Applications (DSTA). – Abstracts. / Lodz Technical University – Poland, December 6 – 9, 2021. – P. 96 – 97. – DOI: 10.34658/9788366741201.
7. Lebedenko Ya.O. Research of steady-state mode and transient process in a power-limited system with a pendulum absorber // Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of XXX International scientific and practical conference MicroCAD–2022, October 19–21, 2022 . / edited by Prof. E.I. Sokol – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. – P. 318.
8. Y. O. Lebedenko, Yu. V. Mikhlin. Research of steady state and transient process in non-ideal systems // 2022 International Conference on Innovative Solutions in Software Engineering (ICISSE) / Mykola Kuz and Mykola Kozlenko Eds., Ivano-Frankivsk, Ukraine: Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 2022. – P. 235 – 237. doi: 10.5281/zenodo.7502536.
9. Ya. O. Lebedenko, Yu.V. Mikhlin. The influence of system parameters when constructing stationary solutions of two non-ideal systems // XVI International Scientific and Practical Conference of Master's and Postgraduate Students "Theoretical and Practical Research of Young Scientists" (December 14–16, 2022): conference materials / edited by Prof. E.I. Sokol - Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. – P. 39 – 40.
10. Ya. O. Lebedenko, Yu. V. Mikhlin. Research of the resonant state and transition process in two non-ideal systems // Contemporary problems of mechanics and mathematics – 2023: collection of scientific works / by General ed. by Acad. of the NAS of Ukraine R.M. Kushnir and member-cor. NAS of Ukraine V.O. Pelikh [Electronic resource] // Institute of applied problems of mechanics and mathematics named to Ya. S. Pidstryhach of the NAS of Ukraine. – 2023. – P. 267–268.

11. Lebedenko Ya.O. Research on the resonance behavior of a non-ideal system containing a portal frame with a shaft // Information technologies: science, technology, technology, education, health: abstracts of reports of the XXXI International scientific and practical conference MicroCAD–2023, May 17–20, 2023 / by ed. Prof. E.I. Sokol – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023. – P. 429. – ISSN 2222-2944.
12. Yuri V. Mikhlin, Yana O. Lebedenko. Resonance steady states and transient in some non-ideal systems // Book of Abstracts of the Third International Nonlinear Dynamics Conference (NODYCON). – 2023. – Rome, Italy. – P. 530.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
--------------------	----------

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	12
---	-----------

1.1. Системи з обмеженою потужністю (неідеальні системи)	12
1.1.1. Ефект Зоммерфельда	12
1.1.2. Задача Кононенка	13
1.1.3. Подальший розвиток досліджень динаміки неідеальних систем	14
1.2. Асимптотичні методи в нелінійних задачах	16
1.3. Проблеми гасіння коливань в нелінійних системах	19
1.3.1. Класифікація гасників	21
1.4. Висновки за розділом	24

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ СИСТЕМ З ОБМЕЖЕНОЮ ПОТУЖНІСТЮ (НЕІДЕАЛЬНИХ СИСТЕМ), ЩО РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ, ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ АНАЛІЗУ	26
--	-----------

2.1. Неідеальна система з маятниковим гасником коливань	26
2.2. Неідеальна система з портальною рамою	28
2.3. Уточнена неідеальна система з портальною рамою	30
2.4. Метод багатьох масштабів для аналізу стаціонарних резонансних режимів коливань	31
2.5. Апроксимації Паде для побудови перехідних процесів в неідеальних системах	35
2.6. Чисельні процедури, що використані для представлення розв'язків	37
2.7. Висновки за розділом	38

РОЗДІЛ 3. СТАЦІОНАРНІ РЕЗОНАНСНІ РЕЖИМИ В СИСТЕМАХ З	
---	--

ОБМЕЖЕНОЮ ПОТУЖНІСТЮ	39
3.1. Стаціонарні режими коливань в неідеальній системі з маятниковим гасником коливань при наявності резонансу 1:1	39
3.2. Побудова стаціонарних резонансних режимів в неідеальній системі з порталною рамою	45
3.3. Побудова стаціонарних резонансних режимів в уточненій неідеальній системі з порталною рамою	52
3.4. Висновки за розділом	58
 РОЗДІЛ 4. ПОБУДОВА ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕІДЕАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	59
4.1. Побудова перехідного процесу в системі з маятниковим гасителем коливань	59
4.2. Побудова перехідного процесу в системі з порталною рамою	65
4.3. Побудова перехідного процесу в уточненій системі з порталною рамою	70
4.4. Перехідні процеси при наявності інших резонансів в розглянутих системах	73
4.5. Висновки за розділом	82
 РОЗДІЛ 5. ПРОБЛЕМА ЗМЕНШЕННЯ АМПЛІТУД СТАЦІОНАРНИХ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ.....	83
5.1. Можливість зменшення амплітуд коливань в неідеальній системі з маятниковим гасителем коливань	83
5.2. Зменшення амплітуд коливань в неідеальній системі з порталною рамою	90
5.3. Зменшення амплітуд коливань в уточненій неідеальній системі з порталною рамою	96
5.4. Висновки за розділом	113

ВИСНОВКИ	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	116
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	125
ДОДАТОК Б АКТ ТА ДОВІДКА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	128