

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



*Одеська державна академія
технічного регулювання та якості*

ISSN 2412 – 5288 (Print)

ISSN 2414 – 9780 (Online)

DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

2(19) 2021

ОДЕСА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ
Випуск 2(19) 2021

Заснований у 2012 р.

Засновник: Одеська державна академія технічного регулювання та якості

65020, м. Одеса, вул. Ковальська (Кузнечна), 15

Телефон: (048)726-68-92, факс: (048)726-76-95

E-mail: odatry@gmail.com

Сайти: <https://osatrq.edu.ua>, odatrya.org.ua.

Редакційна колегія

Голова редакційної колегії

Коломієць Леонід Володимирович (д.т.н., професор)

Заступник голови редакційної колегії

Братченко Геннадій Дмитрович (д.т.н., професор)

Аніскін Олексій (к.т.н., доцент, Республіка Хорватія)

Банзак Оксана Вікторівна (д.т.н., професор)

Боряк Костянтин Федорович (д.т.н., професор)

Ваганов Олександр Іванович (д.т.н., професор)

Величко Олег Миколайович (д.т.н., професор)

Волков Сергій Леонідович (д.т.н., доцент)

Гасанов Юсиф Надир огли (д.т.н., професор, Азербайджанська Республіка)

Гордієнко Тетяна Богданівна (д.т.н., професор)

Грабовський Олег Вікторович (к.т.н., доцент)

Діденко Віктор Дмитрович (д.ф.-м.н., професор)

Зборовська Ірина Адамівна (к.т.н., доцент)

Квасніков Володимир Павлович (д.т.н., професор)

Корсун Валерій Іванович (д.т.н., професор)

Кучерук Володимир Юрійович (д.т.н., професор)

Лещенко Олег Іванович (к.т.н., доцент)

Мілковіч Марін (к.т.н., професор, Республіка Хорватія)

Мілованов Валерій Іванович (д.т.н., професор)

Меленчук Тетяна Михайлівна (д.т.н., професор)

Салсеану Александру (д.т.н., професор, Румунія)

Семенова Алла Василівна (д.пед.н., професор)

Скачков Валерій Вікторович (д.т.н., професор)

Солдо Божо (д.т.н., професор, Республіка Хорватія)

Чундева-Блаєр Марія (д.т.н., професор, Республіка Північна Македонія)

Янковський Олег Георгійович (к.т.н., доцент)

Відповідальний секретар Братченко Геннадій Дмитрович

Внесений наказами Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886 та від 24.09.2020 № 1188 до Переліку наукових фахових видань України (Категорія «Б»), галузь – технічні науки, спеціальності – 275, 151, 152.

Затверджений до друку і розповсюдження через мережу Інтернет Вченою Радою факультету електроніки, автоматики та метрології (протокол № 6 від 23.12.2021 р.).

Свідectво про державну реєстрацію КВ № 18770-7570Р від 30.01.2012 р.

© Одеська державна академія технічного регулювання та якості

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ZBİRNİK NAUKOVİH PRAC' ODES'KOİ DERŽAVNOİ AKADEMİİ
TEHNİČNOGO REGULŪVANNÂ TA ÂKOSTİ (COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS OF THE ODESA STATE ACADEMY OF TECHNICAL REGULATION
AND QUALITY)
Issue 2(19) 2021

Established in 2012

Founder is Odesa state academy of technical regulation and quality

15 Kovalska street, Odesa, 65020, Ukraine

Phone: (048) 726-68-92, fax: (048) 726-76-95

E-mail: odatry@gmail.com

Websites: <https://osatrq.edu.ua>, odatrya.org.ua.

Editorial board

Editor-in-Chief

Kolomiets Leonid (DSc, Professor, Ukraine)

Deputy Editor

Bratchenko Hennadii (DSc, Professor, Ukraine)

Aniskin Aleksej (PhD, Associate Professor, Republic of Croatia)

Banzak Oksana (DSc, Professor, Ukraine)

Boriak Kostiantyn (DSc, Professor, Ukraine)

Vahanov Oleksandr (DSc, Professor, Ukraine)

Velychko Oleh (DSc, Professor, Ukraine)

Volkov Serhii (DSc, Associate Professor, Ukraine)

Hasanov Yusif Nadir Ogly (DSc, Professor, Azerbaijan Republic)

Gordiyenko Tetyana (DSc, Professor, Ukraine)

Hrabovskyi Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Didenko Viktor (DSc, Professor, Ukraine)

Zborovska Iryna (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Kvasnikov Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Korsun Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Kucheruk Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Leshchenko Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Milković Marin (PhD, Professor, Republic of Croatia)

Milovanov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Melenchuk Tetiana (DSc, Professor, Ukraine)

Salceanu Alexandru (DSc, Professor, Romania)

Semenova Alla (DSc, Professor, Ukraine)

Skachkov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Soldo Božo (DSc, Professor, Republic of Croatia)

Cundeva-Blajer Marija (DSc, Professor, Republic of North Macedonia)

Yankovskyi Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)

Secretary Bratchenko Hennadii

Included by orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 02.07.2020 No. 886 and from 24.09.2020 No. 1188 to the List of scientific professional publications of Ukraine (Category "B"), branch – technical sciences, specialties – 275, 151, 152.

Approved for printing and distribution through the Internet by the Academic Council of the Faculty of Electronics, Automation and Metrology (protocol No. 6 dated December 23, 2021).

Свідectво про державну реєстрацію KB № 18770-7570P від 30.01.2012 р.

© Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality

ЗМІСТ

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості	5
М. І. Сичов, к.х.н., К. Ф. Боряк, д.т.н. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ФАЛЬСИФІКАТИВ У МОЛОЧНИХ ПРОДУКТАХ (оглядова стаття)	6
Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення	16
Л. В. Коломієць, д.т.н., А. Г. Цимбалюк, Д. А. Цимбалюк МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛИТ КРАНОВИХ ВАГ (оригінальна стаття).....	17
Інформаційно-вимірювальна техніка, інформаційно-вимірювальні та транспортні технології	30
L. Kolomiets, DSc, V. Khamray, O. Lymarenko, PhD, A. Bazhanova, PhD, A. Ponomarenko DEVELOPMENT OF A FORMULA OF DEPENDENCE BETWEEN VEHICLE GEOMETRIC PARAMETERS AND DYNAMIC CHARACTERISTICS (оригінальна стаття).....	31
Д. П. Орнатський, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. О. Катаєва, к.т.н. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ (оригінальна стаття).....	37
Г. Д. Братченко, д.т.н., Смаглюк Г. Г., Коптелов В. О., Мартинов М. А. ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МИТТЄВИХ ЧАСТОТ ТА ФАЗ КОМПОНЕНТ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО СИГНАЛУ (оригінальна стаття).....	48
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	63
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	64

РОЗДІЛ 1

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості

УДК 613.26.29

М. І. Сичов, к.х.н., К. Ф. Боряк, д.т.н.*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса***ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ
ФАЛЬСИФІКАТИВ У МОЛОЧНИХ ПРОДУКТАХ**

Наведені основні види та способи фальсифікації молочної продукції. Проведено аналіз видів і особливостей впливу фальсифікатів на здоров'я людини, основних джерел їх токсикологічної небезпеки, стану законодавчих та нормативних документів щодо технічних умов і вимог до якості молочних продуктів в Україні та в інших країнах, існуючих лабораторних методів встановлення їх якості та безпеки. Розглядається необхідність введення в існуючу нормативну документацію у вигляді технічних умов вимог щодо видів аналізів в Україні. Розглянуті особливості та переваги хроматографічних методів аналізу молочних продуктів та можливість застосування більш простих і доступних засобів встановлення натуральності молочної продукції. Пропонується введення вимог з проведення аналізів щодо вмісту меламіну, як високотоксичного сурогату білку, нових методів аналізу для виявлення фальсифікатів-замінників молочного жиру на рослинні.

Ключові слова: продукти молочні, фальсифікація, ідентифікація, натуральність, склад, безпека, меламін, методи аналізу, хроматографія.

М. И. Сычев, к.х.н., К. Ф. Боряк, д.т.н.**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ ВИЯВЛЕНИЯ
ФАЛЬСИФИКАТОВ В МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТАХ**

Представлены основные виды и способы фальсификации молочной продукции. Проведен анализ видов и особенностей влияния фальсификатов на здоровье человека, основных источников их токсикологической опасности, состояния законодательных и нормативных документов относительно технических условий и требований к качеству молочных продуктов в Украине и других странах, существующих лабораторных методов установления их качества и безопасности. Рассматривается необходимость введения в существующую нормативную документацию в виде технических условий требований к видам анализов в Украине. Предлагается введение требований по проведению анализов по содержанию меламина, как высокотоксичного суррогата белка, новых методов анализа для выявления фальсификатов-заменителей молочного жира на растительные. Рассмотрены особенности и преимущества газохроматографических методов анализа молочных продуктов и возможность применения более простых и доступных аналитических средств установления натуральности молочной продукции.

Ключевые слова: продукты молочные, фальсификация, идентификация, натуральность, состав, безопасность, меламин, методы анализа, хроматография.

M. I. Sychov, PhD, K. F. Boriak, DSc**PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR THE APPLICATION OF METHODS FOR
DETECTION OF COUNTERFEITS OF DAIRY PRODUCTS**

An analysis was made of the types and characteristics of the influence of counterfeit products on human health, the main sources of their toxicological danger, and the state of legislative and regulatory documents regarding the technical conditions and requirements for the quality of dairy products in Ukraine and other countries, and the existing laboratory methods for determining their quality and safety. The necessity of introducing requirements for the types of analyzes in Ukraine into the existing regulatory documentation in the form of technical conditions is considered. It is proposed to introduce a new method of analysis to identify vegetable fat in falsified milk fat substitutes. It is proposed to focus on the composition of the sterol fraction, which highly depends on the nature of the fat: animal or vegetable origin when evaluating the test results of

dairy products. If the content of only milk fat in the sterol fraction should be only cholesterol. It is absent in vegetable fats, but other sterols are present: brassicasterin, campasterin, stigmasterol, β -sterol and others. Thus, the falsification assessment of the fat component of dairy products is established by comparing the obtained ratios of the mass fractions of methyl esters of fatty acids or their amounts with well-studied average indicators.

For the practice of laboratories, it is more appropriate to determine the Reichert-Meissl number, which is one of the constants of the milk fat and characterizes the content of low molecular weight water-soluble volatile fatty acids in 5 g of fat. If for milk fat this number is from 20 to 37, then for vegetable fats the Reichert-Meissl number is from 0.3 to 2.5 for corn and respectively 6-9 for coconut, 4-7 for palm kernel, 0.1-1.5 for palm fats. It is also possible to use another constant – iodine value. It characterizes the content of unsaturated acids in fat and makes it possible to distinguish milk fat from vegetable. In this case, use the ratio of iodine number and Reichert-Meissl number, which for milk fat is 2.5, and for vegetable fats from 90.8 (palm) to 754.2 (sunflower). This technique can be effectively used to detect counterfeits of dairy products.

Keywords: dairy products, falsification, authentication, naturalness, composition, safety, cyanotriamide, method of analysis, chromatography.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19-6-15

Молочні продукти мають чи не найбільший асортимент, відрізняючись по групах:

- цільномолочна продукція, в тому числі і частково знежирена або з добавками (вітаміни, білок);
- кисломолочна: кефір, сметана, ряжанка, йогурти;
- масла на основі жирів молока;
- продукти переробки молока – сири, консерви.

В літрі молока вміщується добова норма жиру, кальцію та фосфору, що необхідні організму зрілої людини, 53 % добового споживання білків, 35 % вітамінів «А», «В» та інших. Молоко по своїй біологічній природі має збалансований вміст в ньому всіх необхідних для людського організму харчових речовин, що легко перетравлюються. Хімічний склад молока відмінний для різних тварин, його властивості залежать від складу їжі цих тварин, пори року, умов утримання, догляду, віку. Найбільш цінна складова частина молока – це білки, кількість яких складає до 3,3 % і які містять всі незамінні амінокислоти. Молочний жир складається із складної суміші ацилглицеридів, в яких насичених жирних кислот 60-75 %, ненасичених – біля 30 %. Молочний жир вміщує також низькомолекулярні насичені жирні кислоти: масляну, капронову, каприлову і капрінову (4-10 %), які обумовлюють специфічний смак молочного жиру. Ненасичені жирні кислоти (лінолева, ліноленова і арахідонова) при вмісті 3-5 % надають молочному жиру легкоплавкість в 27-34 °С, що обумовлює добре засвоєння. Основними вуглеводами молока є лактоза, моносахариди (глюкоза, галактоза та ін.). Мінеральних речовин в молоці вміщується до 1 %, в їх

складі 50 елементів, основними з яких калій, натрій, кальцій, магній, фосфор, сірка, хлор. Серед мікроелементів найбільш важливими є залізо, мідь, кремній, селен, олово, хром, свинець, цинк, марганець, алюміній, кобальт. Мікроелементи забезпечують будову і активність життєво важливих ферментів, вітамінів і гормонів, які необхідні для обміну речовин. Молоко вміщує ферменти, основні з яких редуктаза, пероксидаза, каталаза, фосфатаза, ліпаза та інші. В молоці присутні жиророзчинні вітаміни (А, D, Е, К) і водорозчинні (групи В і аскорбінова кислота).

Незважаючи на властиві кожному продукту вимоги щодо якості і безпеки, є одна головна вимога – натуральність, відсутність сировинних складових, не властивих природньому продукту тваринного походження. На молочні продукти існують відповідні державні стандарти України, в яких зазначено органолептичні, фізико-хімічні та токсикологічні вимоги до цього продукту (ДСТУ 2661:2010; ДСТУ 4274:2003; ДСТУ 4399:2005; ДСТУ 4418: 2005; ДСТУ 4421:2005).

Постановка проблеми в загальному вигляді. Ризики від споживання неякісної контрафактної харчової продукції найбільш суттєво впливають не тільки на здоров'я та безпеку людини, але й припиняють конкурентоспроможність продукції українських виробників на світовому ринку. В законі України [1] зазначені основні принципи та вимоги при виробництві харчових продуктів. Нові економічні відносини, які склалися сьогодні між державою та виробниками, відкритість ринку для збільшення конкурентності виробництва, водночас збільшили і появу у торговій мережі кількість фальсифікатів і контрафактних харчових продуктів. Великий попит і спо-

живання населенням молочних продуктів є привабливим для зловживання цим становищем недобросовісними підприємцями.

Появі та розповсюдженню контрафактної та сфальсифікованої продукції сприяють прийняті на сьогодні методи дослідження тільки загальних властивостей молочних продуктів, що не дають уяви і фактичних даних про натуральність продукту [2], а виявлення фальсифікатів можливе лише за результатами ідентифікації, фізико-хімічних аналізів, підчас доволі складних. Процесу фальсифікації сприяє фактична відсутність дієвого контролю уповноваженими органами виконавчої влади продукції, що реалізується. Відсутні опитування споживачів, виведення рейтингу якості молочних продуктів, аналіз скарг громадян на факти реалізації неякісної продукції. Споживач довіряє рекламі, інформації на упаковці товару та власним смаковим уподобанням. Недостатньо і публічної інформації, виступів експертів щодо наявності фальсифікатів і способів їх виявлення. У відношенні методів ідентифікації і аналізів молочних продуктів на натуральність існує достатня їх кількість, які мають різну ступінь складності й різне призначення [3]. Деякі з них достатньо прості і придатні для використання споживачами на побутовому рівні, наприклад встановлення вмісту муки або крохмалю йодною реакцією, вмісту соди або крейди оцтом, натуральності масла вершкового по смаку та плавкості.

Складні методи потребують лабораторного обладнання і не можуть бути застосовані в умовах реалізації на ринках ветеринарними лабораторіями, що дають посвідчення про якість молочних продуктів. Повну ідентифікацію продуктів, що має на меті встановлення якості, проводять органи з оцінки відповідності та випробувальні лабораторії.

Недосконалість існуючих методів визначення показників якості молочної продукції та ідентифікації їх натуральності у відповідності до вимог у чинних нормативних документах щодо їх якості та безпеки спонукають до проведення нових наукових досліджень в цьому напрямку. Із зростанням вартості сільськогосподарської сировини кількість випадків та різноманітність видів фальсифікації молочних продуктів на ринку буде теж збільшуватися. Тому вироблення практичних рекомендацій у боротьбі з контрафактною та небезпечною для здоров'я людей продукцією, вдосконалення методів лабораторного контролю і розробка відповідних дій для захисту прав споживачів з боку державних контролюючих органів із внесенням нових засад до діючих стандартів виробництва молочних продуктів є актуальним

завданням.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. За даними офіційної статистики [4] фальсифікована продукція у Європі складає 7 %, у Росії – 12 %, Україна ж посідає 10 місце у світі з випуску фальсифікованої продукції. Фальсифікаторів не цікавлять інші мотиви, окрім фінансової вигоди, тому напрямок збуту фальсифікатів молочної продукції завжди буде приваблювати злодіїв надприбутками. Найбільш небезпечною для здоров'я людини є фальсифікація молочної продукції із заміною корисних для споживача властивостей, наприклад, заміною натуральних компонентів складу штучними дешевими замінниками або хімічними речовинами. Саме такі види фальсифікації найбільш розповсюджені у виробництві молочних продуктів, які мають широкий асортимент виробів та фізико-хімічних показників встановлених стандартами норм. У порівнянні з м'ясними та рибними виробами молочні продукти є дешевшими, водночас достатньо корисними, і тому більш доступними для споживача.

Методи фальсифікації завжди зводяться до порушень технології виробництва за рахунок використання невідповідної сировини із доведенням значень нормованих показників до зазначених в стандартах. Виходячи з досвіду вивчення фальсифікації молочних продуктів [5], на практиці найчастіше зустрічаються такі способи фальсифікації молочних продуктів [6]:

- використання немолочних видів сировини, часткова або повна заміна жиру коров'ячого молока на рослинні жири;
- фальсифікація натуральних молочних білків, часткова або повна заміна їх меламіном та соєвим білком;
- застосування консервантів;
- застосування харчових фарб (за винятком β -каротину);
- застосування підсолоджувачів;
- застосування загусників для придання консистенції у вершках, сметані, згущеному молоці;
- застосування нейтралізуючих речовин (соди, крейди, аміаку, інших).

Вважається, що найбільш небезпечними серед компонентів фальсифікатів молока і молочних продуктів є :

- консерванти (саліцилова, борна, сорбінова, бензойна кислоти);
- рослинні жири, які частково або повністю заміщують молочні жири в сметані, вершках, згущеному молоці, сирах і навіть в самому молоці;
- штучне підвищення вмісту білку добавками соєвих продуктів та меламіну.

Звичайно ж, що не всі сфальсифіковані продукти тотожні щодо їх негативного впливу на здоров'я людини. Так, загущення мукою, крохмалем, зниження кислотності содою ведуть до зниження харчової цінності та смаків, тобто відмінності від природніх споживчих властивостей молочної продукції. А от застосування консервантів, які не дозволені гігієнічними нормами, вже створює загрозу здоров'ю. Застосування аспартаму в якості підсолоджувача теж пряма загроза хворим на фенілкетонурію. І особливо небезпечним в молоці є меламін, який додають для створення враження (компенсації) вмісту білку.

В Російській Федерації з 2008 року діє Федеральний закон від 12.06.2008 № 88-ФЗ «Технічний регламент на молоко и молочную продукцию». Для встановлення фальсифікації молока і молочної продукції та її безпечності випробування проводять по таких показниках [7, 8]:

- вмісту сухих речовин молока;
- наявності і вмісту жирів немолочного походження та їх кількості;
- вмісту білку і співвідношенню сивороточних білків і казеїну, наявність вмісту меламіну.

Важлива роль відводиться змісту споживчого маркування, складу продукту, його харчовій цінності та складу сировини. Між виробниками молока великої рогатої худоби та виробниками молока на рослинній основі (напої з таких інгредієнтів як мигдаль, соя та рис) називають суперечки про те, які продукти насправді можна назвати «молоком». Це спонукало Федеральне управління з лікарських засобів США переглянути на рівні законодавства визначення молока відповідно до федеральних норм, щоб захистити здоров'я населення та гарантувати, що споживачі купують те, що вони очікують, виходячи з етикетки продукту [9].

Згідно Технічного регламенту Республіки Казахстан «Требования к безопасности молока и молочной продукции» ідентифікація молока і молочної продукції проводиться для оцінки споживчої інформації, встановлення її відповідності або ж наявності фальсифікатів по наступних показниках: вміст сухих речовин, наявність вмісту жирів немолочного походження, жирнокислотному складу жирової фази молока і молочної продукції [10].

Застосування рослинних жирів [11], в основному пальмового [12], кокосового і пальмоядрового – один із найбільш розповсюджених видів фальсифікації молочних продуктів [13]. Ці жири одержують з м'якоті або ядер плодів тропічних масляних культур пресуванням або екстракцією жирів органічними розчинниками. Тропічні жири не притаманні для споживання жителями України,

тому і виникають проблеми токсиколого-гігієнічного характеру при введенні їх в наш раціон. Особливий негативний вплив ці жири мають на людей з хворобами шлунково-кишкового тракту та серцево-судинної системи. Необхідне глибоке вивчення впливу на організм людини транс-ізомерів жирних кислот тропічних жирів та залишкових кількостей екстрагентів. Тропічні жири піддають гідрогенізації воднем для збільшення термінів зберігання, при цьому жирні кислоти переходять в форму транс-ізомерів. А такі транс-ізомери порушують ліпідний обмін організму людини, вражають судини, викликають артеросклероз, серцево-судинні захворювання, діабет, онкологію, хворобу Альцгеймера, особливо при споживанні з раннього віку. Пальмовий жир займає другу позицію (31 %) серед інших у їх світовому виробництві, соняшникова олія – четверте місце (9,14 %).

В розвинутих країнах світу прийнято декларувати вміст транс-ізомерів в харчових продуктах. Враховуючи, що ринок України заповнений гідрогенізованими рослинними жирами, в яких вміст транс-ізомерів досягає 49 %, необхідно проводити контроль вмісту транс-ізомерів в масложирових продуктах на стадії державної експертизи і атестації виробництв, а також проводити періодичний контроль їхньої продукції і об'ємів використання тропічних жирів. Так, за даними проведених досліджень експертами ДП «Укрметрестандарт» із перевірених зразків масла вершкового тільки у 20 % продукту не було вмісту рослинних жирів, наявність таких було виявлено в 40 % продукції вітчизняних виробників молока згущеного та сметани. Виявлені не тільки рослинні жири в таких продуктах, але й консерванти у виді сорбінової та бензойної кислот [14]. У даний час вміст транс-ізомерів жирних кислот нормується і передбачається їх контроль в тваринно-рослинних жирах (спредах) згідно ДСТУ ISO 5508-2001. Закон України «Про молоко і молочні продукти» встановлює розмежування між молочними продуктами і продуктами, що вміщують заміники молочних складових, про що і повинно повідомлятися в споживчому маркуванні [15].

Вкрай актуальним щодо оцінки безпеки продуктів є виявлення імітації вмісту білку в молоці і молочних продуктах із застосуванням меламіну. Увага до меламіну виникла в 2007-2008 роках, після масового захворювання тварин внаслідок поїдання штучних кормів. Надалі стало відомо про забруднення меламіном в кількості до 2560 мг/кг різних видів харчових продуктів (молоко, сухе молоко, дитячі молочні суміші, йогурти, цукерки, шоколад, напої) в Китаї і в ряді країн

Південно-Східної Азії. Середня смертельна доза мелаїну в дослідях з пацюками складала 3161 мг/кг маси тіла (LD₅₀) [16].

Характерна дія мелаїну на організм людини виражена перш за все в ураженні сечовидільної системи: випадіння кристалів в сечі з наступним утворенням камінців в нирках і розвитком ниркової недостатності. За останні роки на перше місце вийшли факти фальсифікації продуктів мелаїном деякими фірмами в Китаї, причому мелаїн був добавлений в продукти харчування навмисно. Посуд з мелаїну з часом втрачає захисний шар полімеру і мелаїн переходить в їжу, тому посуд з мелаїну заборонений на території Росії [17]. Заборона Роспотребнадзора [18] відноситься і до імпорту молока, молочних продуктів і продуктів, що містять молоко з Китаю.

Більшість вчених [19], медиків [20] та дослідників [21] схилиються до визнання негативних наслідків на людський організм від вживання рослинних жирів, які використовуються у вигляді добавок на заміну натурального жиру в молоці. Визначення масової частки жиру в молочних продуктах входить в задачі технохімічного контролю якості. В Україні прийнято бутирометричний метод визначення загального вмісту молочних жирів. В останні роки в багатьох країнах активно проводяться науково-дослідні роботи, які направлені на пошук нових експресних методів визначення жирів [22]. При цьому використовують деякі властивості жирів:

- здатність змінювати швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в середовищі;
- здатність кульок жиру поглинати окремі спектри інфрачервоного випромінювання;
- здатність жирних кислот до люмінесценції під дією ультрафіолету або флуоресціювати під дією лазерного випромінювання;
- здатність жиру змінювати теплопровідність молока;
- здатність атомів водню в молекулах тригліцеридів резонувати під дією магнітних імпульсів та інші. Ряд методів були втілені в роботу приладів – аналізаторів.

Найбільш прийнятним і започаткованим у всіх дослідженнях та у практиці випробувальних лабораторій методом визначення справжності та відповідності є вивчення жирно-кислотного складу продуктів. Звичайно, що цей метод є прерогативою оснащених лабораторій і випробувальних центрів. Таким, що викликає найбільшу увагу вчених і практиків лабораторій, є газохроматографічне визначення жирнокислотного складу молочних продуктів і виявлення фальсифікатів [23-25].

Недоліком газохроматографічного методу

вважають його складність, особливість процесів підготовки проб, вплив індивідуальних характеристик приладів. Є дискусійним і граничне значення вмісту тих чи інших кислот, для чого потрібні більш прості і надійні для оператора лабораторії алгоритми інтерпретації аналітичних результатів. Хроматографічний метод, який зазначено у ГОСТ Р 54471-99 «Жир молочный. Метод обнаружения растительных жиров газожидкостной хроматографией стерина», що гармонізований з міжнародним стандартом ISO 3594, прийнятий в «Техническом регламенте на молоко и молочную продукцию» в Російській Федерації як основний арбитражний методу контролю.

Контроль, що здійснюється органами сертифікації продукції, має явно недостатню кількість критеріїв і сучасних засобів виконання. Це має відношення і до роботи лабораторій органів контролю. Діючі державні стандарти України щодо якості і безпеки молочних продуктів містять тільки узагальнені показники і перелік методів аналізів, які не дають можливості виявити денатуризовані, сурогатні, сфальсифіковані і контрафактні молочні продукти, розширити область визначення ще не введених в перелік обов'язкового визначення речовин – токсикантів. Існуючі методи «відбитків пальців», що характерні для кожного молочного продукту і є доступними для проведення аналізів та наступної ідентифікації, не введені в зміст та в практику дії стандартів, які потребують доповнення такими сучасними методами. Численні наукові дослідження, запропоновані хроматографічні методи аналізу та новітні вітчизняні прилади та їх зарубіжні аналоги не доведені до практичного втілення в роботу підприємств для контролю їх продукції, що є вимогою часу та міжнародних норм щодо якості і безпеки молочної продукції. Зрозуміло, наскільки актуальним є питання організації і проведення випробувань щодо найбільш важливих та шкідливих для здоров'я людини показників складу, натуральності і безпеки молочних продуктів.

Мета статті: на підставі аналізу різновидів та способів фальсифікації молочних продуктів, спираючись на існуючі положення законодавчих актів, нормативних документів виробників та чинних державних стандартів щодо якості та методів контролю цієї продукції, надати практичні рекомендації щодо вдосконалення методів виявлення фальсифікатів, встановлення відповідності та натуральності у випадках фальсифікації із застосування рослинних жирів як замінників натуральних молочних.

Основна частина. Основними методами визначення фальсифікатів в Україні є: інформацій-

ний, органолептичний, фізико-хімічний, хіміко-токсикологічний, радіологічний та мікробіологічний. Існує і ряд спеціальних досліджень щодо вмісту контамінантів та ксенобіотиків біологічного походження.

В роботі [11] вказано, що саме жирнокислотний склад молочного жиру молока і продуктів з нього є «відбитком пальців», що буде свідчити про справжність або ж фальсифікацію продуктів. Відмінними особливостями складу жирних кислот натурального молочного жиру є:

- наявність масляної кислоти;
- наявність міnorних компонентів (пентадеканової, пальмітинової, маргаринової кислот);
- можлива присутність транс-ізомерів ненасичених жирних кислот (в основному транс-ізомерів олеїнової кислоти) – не більше 3-5 %.

При оцінці результатів випробувань слід зосередитися на складі стерінової фракції, яка безпосередньо залежить від природи жиру: тваринного або рослинного походження. При вмісті виключно молочного жиру в стеріновій фракції повинен бути тільки холестерин. В рослинних жирах він відсутній, але присутні інші стерини: брасикастерин, кампастерин, стигмастерин, β -стерин та інші.

Таким чином, оцінка фальсифікації жирової фази молочних продуктів встановлюється за результатами порівняння одержаних співвідношень масових часток метильних естерів жирних кислот або їх сум з показниками, що є середньостатистичними і добре вивченими. Фальсифікацію жирової фази масла з коров'ячого молока жирами немолочного походження встановлюють по результатам порівняння одержаних співвідношень масових часток метильних естерів жирних кислот із співвідношеннями, які надані в таблиці 1.

Для практики роботи лабораторій більш придатним є визначення числа Рейхарта-Мейсля, яке є однією з констант молочного жиру і характеризує вміст в 5 г жиру низькомолекулярних водорозчинних летючих жирних кислот [22]. Якщо для молочного жиру це число складає від 20 до 37, то для рослинних жирів число Рейхарта-Мейсля складає, наприклад: для кукурудзяного від 0,3 до 2,5, для кокосового жиру – у межах 6-9, для пальмоядрового жиру – 4-7 і для пальмового жиру – 0,1-1,5 відповідно (таблиця 2). Таким чином, число Рейхарта-Мейсля може бути застосовано як визначальний показник при виявленні фальсифікації молочних продуктів [22].

Також можливо застосувати ще одну константу – йодне число. Воно характеризує вміст ненасичених жирних кислот в жиру і дає можливість відрізнити молочний жир від рослинного. Йодне число обчислюється в грамах йоду, приєд-

наних по місту розриву подвійних зв'язків в молекулах жирних кислот у 100 г жиру (табл. 3).

Таблиця 1 – Співвідношення долі метильних естерів жирних кислот [22]

Співвідношення метильних естерів жирних кислот молочного жиру	Діапазон співвідношення масових часток метильних естерів жирних кислот у молочному жирі
Пальмітинової ($C_{16:0}$) к лауринової ($C_{12:0}$)	від 5,8 до 14,5
Стеаринової ($C_{18:0}$) к лауринової ($C_{12:0}$)	від 1,9 до 5,9
Олеїнової ($C_{18:1}$) к миристинової ($C_{14:0}$)	від 1,6 до 3,6
Линолевої ($C_{18:2}$) к миристинової ($C_{14:0}$)	від 0,1 до 0,5
Суми олеїнової і лінолевої до суми лауринової, миристинової, пальмітинової і стеаринової	від 0,4 до 0,7

Таблиця 2 – Числа Рейхарта-Мейсля для жирів різних рослинних олій [22]

Жир	Число Рейхарта-Мейсля, мг КОН
Молочний:	от 20 до 37
Рослинна олія:	
соняшникова	до 0,6
ріпакова	до 0,8
кукурудзяна	от 0,3 до 2,5
соєва	от 0,5 до 0,8
кокосова	от 6,0 до 9,0
пальмове	от 0,1 до 1,5
пальмоядрова	от 4,0 до 7,0
арахісова	от 0,3 до 1,8
оливкова	от 0,2 до 1,0
бавовняна	от 0,2 до 1,0

Таблиця 3 – Значення величин йодних чисел жирів різних олій [22]

Жир	Йодне число, г йоду/100 г жиру
Молочний	від 25 до 46
Рослинна олія:	
соняшникова	від 125 до 136
соєва	від 120 до 140
ріпакова	від 84 до 103
кокосова	від 7 до 12
пальмова	від 46 до 58
пальмоядрова	від 15 до 20
кукурудзяна	від 111 до 133

Ефективність використання йодного числа з метою ідентифікації молочного жиру може бути завищена. Для уникнення помилки застосовують співвідношення йодного числа і числа Рейхарта-Мейсля, яке для молочного жиру становить 2,5, а для рослинних жирів від 32 для пальмоядрової олії до 754,2 для соняшникового (таблиця 4).

Таблиця 4 – Співвідношення значень йодного числа до числа Рейхарта-Мейсля для жирів різних рослинних олій [22]

Жир	Співвідношення йодного числа до числа Рейхарта-Мейсля, кількість молей йоду / кількість молей низькомолекулярних жирних кислот
Молочний	2,5
Рослинна олія:	
соняшникова	754,2
соєва	356,7
кукурудзяна	88,1
ріпакова	509,6
пальмова	90,8
кокосова	103
пальмоядрова	32

В такому разі розглядаються дві ознаки відмінності рослинних жирів від молочного жиру – кількість ненасичених сполук, яких в рослинних жирах більше, ніж в молочному жирі, і вміст водорозчинних летючих жирних кислот, який в рослинних жирах менший, ніж в молочному жирі. Завдяки цьому показники за своїми значеннями значно відаляються від контрольних значень, одержаних для молочного жиру [23].

В Україні існує методика, яка застосовується для визначення масової долі немолочних жирів в комбінованій жировій (тваринно-рослинній фазі, спредах) [27]. В той же час, методика оцінки їх і співвідношення по числу Рейхарта-Мейсля і величині йодного числа не є складною для більшості лабораторій в Україні і може бути ефективно використана для визначення фальсифікатів молочної продукції. На жаль, методика визначення числа Рейхарта-Мейсля і йодного числа, та оцінка їх співвідношення, як дієвий і відносно нескладний вид аналізу для встановлення натуральності жирової фази молочних продуктів, не прописана в існуючих нормативних документах в Україні. Тому більшість наших лабораторій, на відміну від дослідників більшості країн світу, не використовують таку методику щодо визначення натуральності жирів у молочних продуктах і визначення фальсифікатів.

В окремих складних і спірних випадках, як арбітражний, може бути використаний газохроматографічний метод визначення стерінових фракцій [24-26]. Результати визначення стеринів в жировій фазі молочних продуктів газохроматографічним методом є незаперечними при рішенні експертами спірних питань. Його складність визначається тільки наявністю кваліфікованого персоналу та відповідного газохроматографічного обладнання, якого в Україні на жаль поки не має.

Висновки. Аналіз положень основних законодавчих і нормативних актів України щодо якості молочних продуктів не дозволяє зробити висновки про однозначність вимог до способу їх виробництва, ідентифікації і контролю якості та натуральності, наявності нормативних положень щодо виявлення фальсифікатів даного виду харчових продуктів стандартизованими методами контролю.

Виконання попереджувальних дій із застосуванням законодавчої та нормативної бази, ведення моніторингу та статистики виявлення фальсифікатів на ринку молочних продуктів, об'єктивного і неупередженого контролю з боку виробника і держави, усунення можливостей застосування засобів фальсифікації і невідповідної сировини, активне введення системи аналізу ризиків та контролю по ISO 22000 (HACCP) і ДСТУ 4161-2003 «Системи управління безпекою харчових продуктів», наявність в доступу до інформації в ланцюгу: виробник ↔ реалізатор ↔ споживач повинні виключити появу фальсифікатів у молочних продуктах.

Список використаних джерел

1. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів : Закон України від 23.12.1997 р. № 771/97-ВР. Дата оновлення: 13.11.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 25.11.2021).
2. Про молоко та молочні продукти : Закон України від 24.06.2004, № 1870-IV. Дата оновлення: 16.10.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1870-15#Text> (дата звернення: 25.11.2021).
3. Симоненко С. В., Симоненко Е. С., Антипова Т. А., Фелик С. В. Методы идентификации молока и молочной продукции. *Пищевая промышленность*. 2019. № 4. С. 92-94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-identifikatsii-moloka-i-molochnoy-produktsii>.

4. Гаврись О. М., Кратченко А. С. Аналіз методів виявлення фальсифікації продуктів харчування: теоретичний аспект товарознавства. *Збірник наукових праць НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. Харків, 2012. № 11. С. 8-14. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2012_11.pdf.
5. Петрова Т. И. Фальсификация молочной продукции. Дата: 18.02.2014. URL: http://12sanepid.ru/press/publications/2060.html?sphrase_id=9037.
6. Идентификация и фальсификация молока и молочной продукции. URL: <https://znaytovar.ru/new779.html>.
7. Reznichenko L., Nikolenko E., Noskov S., and Shcherbinin R. Development of histological detection methods of cottage cheese falsification. BIO Web Conf. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2020). Volume 27, 2020. Article Number 00098. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700098>.
8. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 9 июля 2013 г. № 33 «О надзоре за производством и оборотом молока и молочной продукции». Зарегистрировано в Минюсте России 10.09.2013 г. № 29921.
9. Rebecca Friedman. The Cry Over Fake Milk. URL: <https://blog.petrieflom.law.harvard.edu/2018/09/07/the-cry-over-fake-milk/> (дата звернення: 25.11.2021).
10. Об утверждении Технического регламента «Требования к безопасности молока и молочной продукции»: Постановление Правительства Республики Казахстан от 11.03.2008. № 230. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30168019.
11. Куликовская Т. С., Гусева Т. Б., Караньян О. М., Маркевич Т. Е. Обеспечение безопасности и качества масла сливочного и молочных консервов (Российская Федерация). Федеральное агентство по государственным резервам. URL: https://rosrezerv.gov.ru/Konsultativnij_sovet/Obmen_opitom/Obespechenie_bezopasnosti_i_kachestva_m_a.
12. Евгений Кузьменко. «Молочка» без молока: поможет ли запрет на пальмовое масло в борьбе с фальсификатом. URL: <https://eba.com.ua/molochka-bez-moloka-pomozhet-li-zapret-na-palmovee-maslo-v-borbe-s-falsifykatom/>.
13. Пальмовое масло: украинские традиции фальсификации продуктов. URL: https://censor.net/ru/resonance/198170/palmovee_maslo_ukrainskie_traditsii_falsifikatsii_produkto.
14. Молочные продукты грешат фальсификатом URL: <https://biz.liga.net/all/prodovolstvie/article/molochnye-produkty-greshat-falsifikatom>.
15. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів: Закон України від 06.12.2018 р. № 2639-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 7. Ст. 41. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#Text>.
16. Молчанова К. В., Фомина Е. Н., Носенко А. Л. Меламин в молочных и пищевых продуктах: динамика и современные подходы к решению проблемы. *Проблеми харчування*. 2009. Вип. 1-2. С. 14-21. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2009/1-2_09/str14.pdf.
17. Меламиновый скандал добрался из Китая до Европы. URL: <https://www.dw.com/ru/%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9-%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D0%BB-%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%81%D1%8F-%D0%B8%D0%B7-%D0%BA%D0%B8%D1%82%D0%B0%D1%8F-%D0%B4%D0%BE-%D0%B5%D0%B2%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%8B/a-3682952>.
18. Методические указания МУК 4.1.2420-08. 4.1. Методы контроля. Химические факторы. «Определение меламина в молоке и молочных продуктах». 2008. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293834/4293834260.htm>.
19. Dobson R. L., Motlagh S., Quijano M., et al. Identification and characterization of toxicity of contaminants in pet food leading to an outbreak of renal toxicity in cats and dogs. *Toxicological Sciences*. Volume 106, Issue 1, November 2008, pp. 251-262. URL: <https://academic.oup.com/toxsci/article/106/1/251/1708342>, DOI: <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfn160>. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.617.1556&rep=rep1&type=pdf>.
20. Wong S. N., Chiu M. C. The scare of melamine tainted milk products [Editorial]. *Hong Kong Journal of Paediatrics*. (New Series). 2008. Vol. 13, pp. 230-234. URL: <https://www.hkjpae.org/pdf/2008;13;230-234.pdf>.
21. Молчанова К. В., Фомина Е. О., Носенко А. Л. Меламин в молочных и пищевых продук-

тах: динамика и современные подходы к решению проблемы. *Проблеми харчування*. Київ, 2009. № 1-2. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2009/1-2_09/str14.pdf.

22. Лепилкина О. В., Тетерева Л. И. Методы установления фальсификации жировой фазы продуктов. *Сыроделье и маслоделие*. 2011. № 5. URL: <https://test.org.ua/usefulinfo/food/info/127>.

23. Лепилкина О. В., Тетерева Л. И. Методы контроля содержания жира в молочносодержащих продуктах. URL: <https://produkt.by/story/metody-kontrolya-soderzhaniya-zhira-v-molokosoderzhashchih-produktah>.

24. Лепилкина О. В., Тетерева Л. И. Методы установления фальсификации жировой фазы продуктов. *Сыроделье и маслоделие*. 2011. № 5. URL: <https://test.org.ua/usefulinfo/food/info/127>.

25. Чмиленко Ф. А., Минаева Н. П., Сандомирский А. В., Сидорова Л. П. Установление фальсификации молочной продукции методами газовой хроматографии. *Методы и объекты химического анализа*. 2009. № 1. С. 60-66. URL: <http://www.moca.net.ua/09/pdf/04012009-060.pdf>.

26. Нафталиев С. И., Мельникова Е. И., Селиванова А. А. Газохроматографическое определение жирнокислотного состава заменителей молочного жира и других специализированных жиров. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009. Т. 9. Вып. 4. С. 574-581.

27. Методика выполнения измерений массовой доли немолочных жиров в масле с комбинированной жировой фазой: Свидетельство о метрологической аттестации № 081/12-0086-03 от 05.05.2003. К.: УкрЦСМ.

References

1. Pro osnovni pryntsypy ta vymohy do bezpechnosti ta yakosti kharchovykh produktiv : Zakon Ukrainy vid 23.12.1997 r. # 771/97-VR. Data onovlennia: 13.11.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text>. (data zvernennia: 25.11.2021).

2. Pro moloko ta molochni produkty : Zakon Ukrainy vid 24.06.2004, # 1870-IV. Data onovlennia: 16.10.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1870-15#Text>. (data zvernennia: 25.11.2021).

3. Simonenko S. V., Simonenko E. S., Antipova T. A., Felik S. V. Metody identifikatsii moloka i molochnoy produktsii. *Pishhevaia promyshlennost'*. 2019. № 4. С. 92-94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-identifikatsii-moloka-i-molochnoy-produktsii>.

4. Havrys O. M., Kratchenko A. S. Analiz metodiv vyivlennia falsyfikatsii produktiv kharchuvannia: teoretychnyi aspekt tovaroznavstva. *Zbirnyk naukovykh prats NTU «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. Kharkiv, 2012. # 11. С. 8-14. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2012_11.pdf.

5. Petrova T. I. Fal'sifikatsiya molochnoy produktsii. Data: 18.02.2014. URL: http://12sanepid.ru/press/publications/2060.html?sphrase_id=9037.

6. Identifikatsiya i fal'sifikatsiya moloka i molochnoy produktsii. URL: <https://znaytovar.ru/new779.html>.

7. Ljudmila Reznichenko, Elena Nikolenko, Sergej Noskov, Roman Shherbinin. Razrabotka gistologicheskikh metodov vyjavleniya fal'sifikatsii tvoroga. Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferentsiya «Sel'skoe hozjajstvo i prodovol'stvennaja bezopasnost': tehnologii, innovatsii, rynki, chelovecheskie resursy» (FIES 2020). Tom 27, S. 98-102, 2020 g. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700098>.

8. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossijskoj Federatsii ot 9 iyulya 2013 g. № 33 «O nadzore za proizvodstvom i oborotom moloka i molochnoy produktsii». Zaregistirovano v Minyuste Rossii 10.09.2013 g. № 29921.

9. Rebecca Friedman. The Cry Over Fake Milk. URL: <https://blog.petrieflom.law.harvard.edu/2018/09/07/the-cry-over-fake-milk/> (date of application: 25.11.2021).

10. Ob utverzhdenii Texnicheskogo reglamenta «Trebovaniya k bezopasnosti moloka i molochnoy produktsii»: Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazaxstan ot 11.03.2008. № 230. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30168019.

11. Kulikovskaya T. S., Guseva T. B., Karan'-yan O. M., Markevich T. E. Obespechenie bezopasnosti i kachestva masla slivochnogo i molochnykh konservov (Rossijskaya Federatsiya). Federal'noe agentstvo po gosudarstvennym rezervam. URL: https://rosrezerv.gov.ru/Konsultativnij_sovet/Obmen_opitom/Obespechenie_bezopasnosti_i_kachestva_ma.

12. Evhenyy Kuz'menko. «Molochka» bez moloka: pomozhet ly zapret na pal'movoe maslo v bor'be s falsyfikatом. URL: <https://eba.com.ua/molochka-bez-moloka-pomozhet-ly-zapret-na-pal'movoe-maslo-v-bor-be-s-falsyfikatом/>.

13. Pal'movoe maslo: ukrainskie tradicii fal'sifikacii produktov. URL: https://censor.net/ru/resonance/198170/pal'movoe_maslo_ukrainskie_traditsii_falsifikatsii_produktov.
14. Molochnye produkty greshat fal'sifikatom <https://biz.liga.net/all/prodovolstvie/article/molochnye-produkty-greshat-falsifikatom>.
15. Pro informatsiyu dlya spozhyvachiv shchodo kharchovykh produktiv: Zakon Ukrayiny vid 06.12.2018 r. # 2639-VIII. Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny. 2019. # 7. St. 41. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#Text>.
16. Molchanova K. V., Fomina E. N., Nosenko A. L. Melamin v molochnyx i pishhevyx produktax: dinamika i sovremennye podxody k resheniyu problemy. *Problemy kharchuvannia*. 2009. Vyp. 1-2. S. 14-21. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2009/1-2_09/str14.pdf.
17. Melaminovyy skandal dobralsja iz Kitaja do Evropy. URL: <https://www.dw.com/ru/%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9-%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D0%BB-%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%81%D1%8F-%D0%B8%D0%B7-%D0%BA%D0%B8%D1%82%D0%B0%D1%8F-%D0%B4%D0%BE-%D0%B5%D0%B2%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%8B/a-3682952>.
18. Metodicheskie ukazaniya MUK 4.1.2420-08. 4.1. Metody kontrolya. Ximicheskie faktory. «Opređenje melamina v moloche i molochnyx produktax». 2008. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293834/4293834260.htm>.
19. Dobson R. L., Motlagh S., Quijano M., et al. Identification and characterization of toxicity of contaminants in pet food leading to an outbreak of renal toxicity in cats and dogs. *Toxicological Sciences*. Volume 106, Issue 1, November 2008, pp. 251-262. URL: <https://academic.oup.com/toxsci/article/106/1/251/1708342>, DOI: <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfn160>. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.617.1556&rep=rep1&type=pdf>.
20. Wong S. N., Chiu M. C. The scare of melamine tainted milk products [Editorial]. *Hong Kong Journal of Paediatrics*. (New Series). 2008. Vol. 13, pp. 230-234. URL: <https://www.hkjpae.org/pdf/2008;13;230-234.pdf>.
21. Molchanova K. V., Fomina E. O., Nosenko A. L. Melamin v molochnix i pishhevyx produktax: dinamika i sovremennye podxody k resheniyu problemy. *Problemy kharchuvannia*. Kyiv, 2009. # 1-2. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2009/1-2_09/str14.pdf.
22. Lepilkina O. V., Tetereva L. I. Metody ustanovleniya fal'sifikacii zhirovoj fazy produktov. *Syrodellie i maslodellie*. 2011. № 5. URL: <https://test.org.ua/usefulinfo/food/info/127>.
23. Lepilkina O. V., Tetereva L. I. Metody kontrolya soderzhaniya zhira v molokosoderzhashhix produktax. URL: <https://produkt.by/story/metody-kontrolya-soderzhaniya-zhira-v-molokosoderzhashchih-produktah>.
24. Lepilkina O. V., Tetereva L. I. Metody ustanovleniya fal'sifikacii zhirovoj fazy produktov. *Syrodellie i maslodellie*. 2011. № 5. URL: <https://test.org.ua/usefulinfo/food/info/127>.
25. Chmilenko F. A., Minaeva N. P., Sandomirskij A. V., Sidorova L. P. Ustanovlenie fal'sifikacii molochnoj produkcii metodami gazovoj xromatografii. *Metody i ob"ekty ximicheskogo analiza*. 2009. № 1. S. 60-66. URL: <http://www.moca.net.ua/09/pdf/04012009-060.pdf>.
26. Naftaliev S. I., Mel'nikova E. I., Selivanova A. A. Gazohromatograficheskoe opredelenie zhirkokislотного состава заменителей молочного жира и других специализированных жиров. *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*. 2009. T. 9. Vyp. 4. S. 574-581.
27. Metodika vypolnenija izmerenij massovoj doli nemolochnyh zhиров v masle s kombinirovannoj zhировой фазой: Svidetel'stvo o metrologicheskoy attestacii № 081/12-0086-03 ot 05.05.2003. K.: UkrCSM.

Надійшла до редакції 07.12.2021

РОЗДІЛ 2

Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення

УДК 681.269 (088.8)

Л. В. Коломієць, д.т.н., А. Г. Цимбалюк, Д. А. Цимбалюк

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса***МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛИТ КРАНОВИХ ВАГ**

У статті показано, що удосконалення технологічних процесів металургійного виробництва, яке направлено на підвищення якості металлоконструкції, збільшення виходу придатного продукту, стабілізацію його параметрів, неможливе без виваженої системи обліку сировинних матеріалів, напівфабрикатів та інших вантажів на всіх ділянках металургійного підприємства.

Аналіз конструктивних особливостей механізмів підйому вантажопідйомних кранів став основою для розробки пропозицій щодо вбудовування вантажоприймального вузла (ВВ) кранових ваг для автоматичного визначення маси рідкого чавуну на заливно-ковшовій ділянці цеху виливниць.

Метою роботи є розробка нової методики розрахунку плит ВВ кранових ваг, завдяки якій стане можливим визначити параметри напружено-деформованого стану плити під впливом основних видів механічних навантажень, що впливають на конструкцію зважувального пристрою у експлуатації, що призведе до зменшення похибки вимірювання маси і тим самим дозволить оптимізувати витрати споріднених матеріалів у технології ливарства та підвищити якість кінцевого продукту.

Розрахунок параметрів плит і подальші експериментальні дослідження дозволили надати рекомендації щодо оптимізації місць розміщення та кількості датчиків сили на опорній плиті.

Ключові слова: кранові ваги, вантажоприймальний вузол, маса, опорні плити, параметри, датчики, інформаційно-вимірювальна система.

Л. В. Коломиец, д.т.н., А. Г. Цымбалюк, Д. А. Цымбалюк

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛИТ КРАНОВЫХ ВЕСОВ

В статье показано, что усовершенствование технологических процессов металлургического производства, направленное на повышение качества металлоконструкции, увеличение выхода подходящего продукта, стабилизацию его параметров, невозможно без взвешенной системы учета сырьевых материалов, полуфабрикатов и других грузов на всех участках металлургического предприятия.

Анализ конструктивных особенностей механизмов подъема грузоподъемных кранов стал основой для разработки предложений по встраиванию грузоприемного узла (ГУ) крановых весов для автоматического определения массы жидкого чугуна на заливно-ковшовой области цеха изложниц.

Целью работы является разработка новой методики расчета плит ГУ крановых весов, благодаря которой станет возможным определить параметры напряженно-деформированного состояния плиты ГУ под влиянием основных видов механических нагрузок, влияющих на конструкцию взвешивающего устройства в эксплуатации, что приведет к уменьшению погрешности измерения массы и тем самым самым позволит оптимизировать расходы родственных материалов в технологии литейного производства и повысить качество конечного продукта.

Расчет параметров плит и последующие экспериментальные исследования позволили дать рекомендации по оптимизации мест размещения и количеству датчиков силы на опорной плите.

Ключевые слова: крановые весы, грузоприемный узел, масса, опорные плиты, параметры, датчики, информационно-измерительная система.

L. V. Kolomiets, DSc, A. G. Tsymbalyuk, D. A. Tsymbalyuk

METHOD OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF CRANE SCALE PLATES

The article shows that the improvement of technological processes of metallurgical production, which aims to improve the quality of metal structures, increase the yield of suitable product, stabilize its parameters, is not possible without a balanced accounting system of raw materials, semi-finished products and other cargo in all areas.

In the conditions of fast-moving processes of mass continuous production with an extensive network of cargo flows, electronic-tensometric weighing complexes are becoming more and more common, which make it possible to fully automate the process of technological weighing, ensuring documented registration of its results, increasing the objectivity of weight information.

The analysis of design features of lifting mechanisms of cranes became the basis for the development of proposals for the installation of the load-receiving unit of crane scales for automatic determination of the mass of liquid cast iron in the pouring-bucket section of the foundry shop. Based on the developed methodology and calculations of the parameters of the pressure base plates of the load-receiving unit, recommendations for optimizing the design of the plates, locations and number of sensors are issued.

The data obtained as a result of the calculations and experimental studies confirm the validity of the hypothesis, which was the basis of the method of calculating the slab of the load-receiving unit, which was that the calculation of slabs in the form of a beam on two hinged supports in the same plane does not reproduce the real process of slab bending in the space that passes as a result of the loading of the load-receiving unit in the built-in crane scales.

The aim of the work is to develop a new method for calculating the load bearing plates of crane scales, thanks to which it will be possible to determine the parameters of the stress-strain state of the load bearing plate under the influence of the main types of mechanical loads that affect the design of the weighing device in operation, which will lead to a decrease in the mass measurement error and thereby will optimize the cost of related materials in foundry technology and improve the quality of the final product.

Keywords: crane scales, load-receiving unit, weight, base plates, parameters, sensors, information-measuring system.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19-17-29

Вступ

Питання ефективного розвитку металургійної промисловості є актуальним для національної економіки. Металургійна промисловість України – невід’ємна частина світової галузі, і її розвиток відбувається у контексті глобальних тенденцій. Металургія, з одного боку, залишається одним з основних видів промислової діяльності, яка забезпечує до 16 % загального обсягу реалізованої промислової продукції, 20 % товарного експорту та більше 10 млрд доларів США експортної виручки, понад 200 тисяч робочих місць і приблизно 10 % у загальній середньообліковій кількості штатних працівників у промисловості, що робить її стратегічно важливою для майбутнього розвитку вітчизняної економіки. З іншого боку, галузь відрізняється низьким рівнем екологічності виробництва – близько 30% викидів шкідливих речовин в атмосферу загалом по вітчизняній економіці припадає на металургію, характеризується отриманням від’ємної чи зовсім невисокої рентабельності операційної діяльності металургійних підприємств, низькими темпами зростан-

ня прямих іноземних інвестицій та слабкою інноваційною активністю. Це підштовхує металургійну промисловість до рішучих змін і гостро ставить перед нею завдання підвищення ефективності виробництва [1].

Удосконалення технологічних процесів металургійного виробництва, яке направлене на підвищення якості металоконструкцій, збільшення виходу придатного продукту, стабілізацію його параметрів, неможливе без дуже вираженої системи обліку сировинних матеріалів, напівфабрикатів та інших видів вантажів на всіх ділянках металургійного підприємства. Належний облік матеріалів сприяє їх економному витраченню, поліпшує техніко-економічні показники підприємства та створює передумови для мало-відходних технологічних процесів. Найбільшою мірою цим завданням відповідає технологічний облік за масою металоконструкцій і вихідних матеріалів, що здійснюється за допомогою вагових пристроїв різного призначення.

В умовах швидкоплинних процесів масового безперервного виробництва з розгалуженою ме-

режею вантажопотоків все більшого поширення набувають електронно-тензометричні вагові комплекси, які дають можливість повністю автоматизувати процес технологічного зважування, забезпечуючи документовану реєстрацію його результатів, підвищують об'єктивність вагової інформації.

До складу вагових систем входять первинні перетворювачі – тензорезисторні датчики сили (ТДС), вантажоприймальні вузли (ВВ), які забезпечують точну передачу зусиль від об'єкта зважування до первинного перетворювача, і вторинні цифрові вимірювальні прилади, які виконані на сучасній мікроелектронній базі та здійснюють обробку і реєстрацію сигналу ТДС з подальшою передачею вагової інформації на цифровий друк, інформаційне табло або комп'ютер.

В представленій роботі досліджуються ВВ, як елементи вагових пристроїв, що базуються на типових рішеннях з формування силовимірних цілей стосовно умов експлуатації з урахуванням особливостей технологічного обладнання.

Об'єкт дослідження – вантажоприймальні вузли кранових вагових пристроїв для визначення маси рідкого чавуну в умовах діючого металургійного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Широке застосування знайшли навісні кранові ваги, які навішуються на гак крану.

Сучасне китайське виробниче підприємство Kinocranes випускає вантажопідйомні крани європейського та китайського стандарту, а також кранові ваги для них. Металургійні електронні кранові ваги складаються з датчика зважування, корпусу ваги та дисплея зважування [2].

Відомі конструкції кранових ваг, які розроблені вітчизняними підприємствами. Ваги електронні кранові компанії «Дніпровага» ВКД-А використовуються на складах, виробництвах, в металургійних і гірничо-збагачувальних галузях. Вони мають надійний металевий корпус, захищений по стандарту IP-54 та керуються за допомогою інфрачервоного пульта [3]. Широке застосування також знайшли кранові ваги типу ВК ЗЕВС, які розроблені ТОВ «ЛОАД-ТЕХ» та працюють в дозволеному діапазоні радіочастот. В комплект поставки також входить безкоштовне програмне забезпечення Easy scale, яке дозволяє вести облік і обробку результатів зважувань. Ваги ВК ЗЕВС внесені до державного реєстру засобів вимірювальної техніки України під № УЗ493-14 [4].

Одним із основних недоліків описаної установки кранових ваг на гак є складність підведення електроенергії для живлення датчиків.

В якості одного із основних варіантів виконання механічної частини технологічних ваг для металургійних кранів прийняте вбудування ВВ під основу верхніх нерухомих блоків поліспастиної системи механізму підйому крана [5, 6]. На підставі подібного вбудування можуть формуватися ВВ, які включають силопередавальні ланцюги із вмонтованими ТДС, як для кранів з одним механізмом підйому, так і для кранів, що використовують два механізми підйому при виконанні технологічних операцій, наприклад, кантування ківша при заливці рідкого чавуну в плавильні агрегати або при його розливі у форми або виливниці.

Якісна оцінка метрологічних характеристик силовимірювальної системи може бути виконана на базі експериментальних досліджень шляхом моделювання процесу на макеті, конструкція якого дозволила би максимально врахувати вплив різних факторів, супутніх зважуванню в реальних умовах експлуатації, на процес зважування.

Макет силовимірювального пристрою, який призначений для експериментальних досліджень точнісних характеристик процесу зважування, реалізованого за допомогою ВВ кранових ваг, вбудованих під верхні блоки поліспастиної механізму підйому крана, представлений в роботі [6]. Основними силопередавальними елементами макету є натискна (верхня) та опорна (нижня) плити з розташуванням між ними ТДС.

При розробці типових технічних пропозицій по формуванню подібних ВВ методика вибору геометричних параметрів плит припускала їх спрощений розрахунок, як балки на двох шарнірних опорах. При цьому з урахуванням допущень в роботі [7] визначались прогини і кути повороту плити.

Результати експериментальних досліджень, отримані автором, показали, що дані прогинів і кутів поворотів плит суттєво відрізняються від розрахункових, де за основу була вибрана балка на двох шарнірних опорах [7, 8]. Що характерно, найбільші деформації плит спостерігались при навантаженні значно менших розрахункових номінальних значень. У зв'язку з цим, виникла реальна потреба створення більш точної математичної моделі силопередавальної системи та методики розрахунку верхніх натискних плит ВВ кранових ваг, враховуючих граничні умови на контурі плит, навантаження плит зосередженими силами та іншими уточнюючими факторами.

Аналіз конструкцій заливальних кранів цеху виливниць та технічних рішень ВВ

Побудова розрахункової моделі реалізується на базі конкретних технічних рішень по форму-

ванню структури ВВ кранових ваг. При цьому слід врахувати специфічні конструктивні особливості механізмів підйому діючих кранів, в яких припускається вбудування ваг. Водночас, незважаючи на відмінність в діючих конструкціях опоро-навантажувальних елементів, повинен бути створений єдиний підхід до оцінки їх механічних і жорсткісних характеристик. У зв'язку з цим, досліджено типову групу мостових кранів заливно-ковшової ділянки цеху виливниць, які підлягають оснащенню ваговими системами.

Мостовий кран, вантажопідйомністю 125/30 тон (№ 1), має роздільні механізми головного та допоміжного підйомів. Верхні блоки поліспаотної системи механізму головного підйому змонтовані на плиті, яка приварена до настилу вантажного візка крану. В механізмі допоміжного підйому блоки поліспаотної системи знаходяться нижче основи вантажного візка. Основа блоків у вигляді плити приварена знизу до рами візка крану.

Мостовий кран, вантажопідйомністю 125/32 тони (№ 2), теж має роздільні механізми головного і допоміжного підйомів. Вузол верхніх блоків поліспаотної системи механізму головного підйому аналогічний вищеописаному. Різниця лиш в способі кріплення опорної плити до рами візка. Плита змонтована на 6 болтах. В механізмі допоміжного підйому вісі блоків поліспаота коаксіальні трансмісійному валу привода. Зрівняльний блок змонтований окремим вузлом, його вісь спочиває в підшипниках, корпуси яких прикріплені зверху до настилу візка. Вісь обертання блоку запресована в шoki та жорстко зв'язана з вісю кочення вузла. Блок розміщений нижче рівня візка.

ВВ ваг вбудований в металоконструкцію крана, містить ТДС і повинен бути максимально простим в конструктивному виконанні, технологічним і не викликати суттєвих переробок основних функціональних вузлів механізму підйому крана.

Застосування ТДС вимагає додаткових вимог до системи силопередачі зусиль через конструкцію ВВ, пов'язаних з необхідністю розвантаження ТДС від поперечних зусиль в горизонтальній площині, щоб не викликало збільшення похибки вимірювання маси вантажу (ківша з металом). Для реалізації цих вимог необхідно або застосувати розвантажувально-цетрувальні пристрої типу шарикових напрямних і мембранних пристроїв, або використання спеціальних ТДС з жорстким двостороннім кріпленням до натискної і опорної плит ВВ кранових ваг.

Конструкція ВВ ваг повинна забезпечувати рівномірний розподіл зовнішнього навантаження між датчиками, вільний доступ до них з метою

контролю їх технічного стану, зручність складання, розбирання і технічного обслуговування, належну міцність і жорсткість елементів, захист датчиків від перевантаження і загальну експлуатаційну надійність конструкції не нижче рівня, обумовленого Правилами охорони праці під час експлуатації вантажопідйомальних кранів, підйомальних пристроїв і відповідного обладнання [9]. Вантажоприймальні вузли кранових ваг можуть бути вбудовані в один, головний чи обидва механізми підйому крана. При вбудуванні ВВ тільки в механізм головного підйому при маніпулюванні з розливочним краном в процесі кантування ківша, тобто при одночасній роботі обох механізмів перерозподіл навантажень між механізмами можливо врахувати за допомогою коригувальної функції, отриманої у вигляді аналітичної залежності. Пристрої для реалізації цієї функції повинні бути передбачені в цьому випадку у вимірювальних ланцюгах вторинної апаратури.

У випадку коли є необхідність зважування вантажів, які транспортуються виключно одним механізмом допоміжного підйому, ВВ повинні вбудовуватись в обидва механізми підйому. В цьому випадку не потрібні додаткові каскади в пристрої обробки сигналів від ТДС для обліку перерозподілу навантажень при сумісній роботі двох механізмів. Інформація про масу вантажу отримується простим підсумовуванням вхідних сигналів, які поступають в пристрій обробки вагової інформації по двом роздільним каналам. Вбудовування ВВ кранових ваг передбачується у візки кранів. Аналіз результатів обстеження кранів, які підлягають обладнанню ваговими системами, дозволяє зробити висновок, що ВВ в механізмах головних підйомів обох типів кранів можуть бути однотипними, якщо вмонтування здійснити під основу вузлів нерухомих верхніх блоків поліспаотної системи [7].

Установку ВВ у допоміжний механізм підйому крана № 1 доцільно виконати під вузол блоків поліспаоту, а в крані № 2 – вмонтувати під опорні шийки вісі котіння зрівнювального блоку. У обох вузлах доцільно застосування однотипних ТДС з гвинтовою намоткою тензорезисторів. ВВ доцільно конструювати, використовуючи відомі і перевірені практикою експлуатації статично визначені схеми [6], у зв'язку з чим ВВ механізмів головного підйому обох кранів потребують вмонтування трьох датчиків в кожний вузол.

ВВ у механізмах допоміжного підйому, розміщують по одному під кожну із двох опор вісі кочіння вузла зрівняльного блоку для крана № 1 та вмонтованих у вузол верхніх блоків для крана № 2.

Значний досвід експлуатації і теоретико-експериментальні дослідження кранових ваг підтвердили правомочність прийнятих основних передумов до розрахунку та проектуванню і дозволили вказати шляхи удосконалення діючих методик розрахунку та конструювання ВВ і їх елементів.

Методики розрахунку опорної та натискної плит ВВ побудовані, виходячи із спрощених передумов їх циліндричного прогину, а тому потребують деяких уточнень.

Дослідження показують, що достатня для цілей технологічного визначення маси вантажу точність досягається без застосування пристроїв центрування, ускладнюючих конструкцію ВВ [10]. Тому в такому випадку рекомендовано застосування жорстких ТДС.

Погодження поперекових розмірів плит по критеріям міцності і жорсткості доцільно виконувати за рахунок їх оребрень.

Більшість із діючих методів розрахунку пластин прямокутної форми є приблизними, однак достатніми для інженерних розрахунків. До числа найбільш відомих слід віднести методи, які зазначені у роботі [11]. Ці методи у застосуванні до бігармонічної проблеми мають до деякої ступені подібність. Згідно обом методам рішення вибирається у вигляді функції, яка точно задовольняє граничним умовам, а потім знаходиться значення, вхідних до неї постійних. Отримане таким чином рішення лише приблизно задовольняє диференційному рівнянню згину пластини [7]. Існує ряд методів рішення задачі згину прямокутних пластин, які при точному задоволенні граничних умов приблизно задовольняє диференційному рівнянню задачі (наприклад, метод Кантаровича, який займає проміжне місце між точним рішенням задачі і описаними методами) Ю а також приблизні методи, рішення яких точно задовольняють диференційному рівнянню згину пластини та приблизно граничним умовам [8].

Точне рішення задачі згину пластин відомо тільки для окремих порівняно простих задач [7]. Наприклад, для визначення прогинів та зусиль в прямокутній пластині, шарнірно опертій по чотирьом сторонам, використовується метод подвійних тригонометричних рядів. Для прямокутної пластини, два протилежних краї якої шарнірно оперті, використовується метод ординарного тригонометричного ряду. В цих задачах граничні умови на контурі пластини дозволяють використати метод Фур'є [8].

Найбільш поширеними для таких задач є рішення Л. Нав'є і М. Леві [8]. Однак, як показав аналіз даних рішень, якщо рішення Л. Нав'є при-

датне тільки для прямокутних пластин, шарнірно опертих по контуру, то рішення М. Леві є більш загальним. Воно придатне для прямокутних пластин, два протилежних края якої шарнірно оперті, а два інших мають кріплення (затискання, шарнірне опирання) або вільні.

Оскільки в конструкціях ВВ кранових ваг верхні (натискні) плити можливо розглядати шарнірно-опертими по двом протилежним кінцям, які збігаються із зоною установки стійок вузла верхніх блоків, і вільними від закріплення по двом іншим краям, для уявлення модельної задачі доцільно скористатись точним рішенням М. Леві.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка нової методики розрахунку плит вантажоприймальних вузлів кранових ваг, завдяки якій стане можливим визначити параметри напружено-деформованого стану плити ВВ під впливом основних видів механічних навантажень, що впливають на конструкцію зважувального пристрою у експлуатації, що призведе до зменшення похибки вимірювання маси і тим самим дозволить оптимізувати витрати споріднених матеріалів у технології ливарства та підвищити якість кінцевого продукту.

Основний зміст досліджень

В якості розрахункової схеми плит вибрана тонка пластина. Згідно із прийнятими в роботі [11] рекомендаціями, до тонких відносяться пластини, які мають відношення товщини до найменшого характерного розміру в плані h/b в межах від $1/30$ до $1/80$ та величини очікуваних прогинів не більше $1/4 h$. Очікується, що подібне уточнення розрахункової схеми несучих елементів ВВ призведе до більш точних результатів, які в подальшому дозволять оптимізувати параметри несучих елементів та характер розташування силовирних опор.

Типові технічні рішення по формуванню ВВ передбачають можливість опирання опорної плити на п'яти, чотирьох, трьох і двох ТДС. Широко застосовуються кранові ваги, у яких натискна плита опирається на 4 та 3 датчика в основному механізмі підйому і на 2 та 1 датчики у допоміжному. На опорній плиті змонтований вузол верхніх блоків, який представляє собою жорсткий коробчатий корпус, забезпечений ребрами жорсткості та основами у вигляді плити.

Вузол верхніх блоків можна представити у вигляді смуги, що передає зовнішнє навантаження від зусиль в підйомних канатах на плиту. Характер сполучення вузла верхніх блоків з плитою завдяки болтовому з'єднанню між собою дає можливість вважати плиту, два протилежних краї якої шарнірно оперті, а два інших вільні,

завантаженою зосередженою силою. Тоді розрахункова схема матиме вигляд (рис. 1).

Задача визначення напружено-деформівного стану натискних плит зводиться до вирішення деформаційних рівнянь коливань пластини. Параметри плит вибираються таким чином, щоб під впливом зовнішнього навантаження у цій плиті виникали пружні деформації.

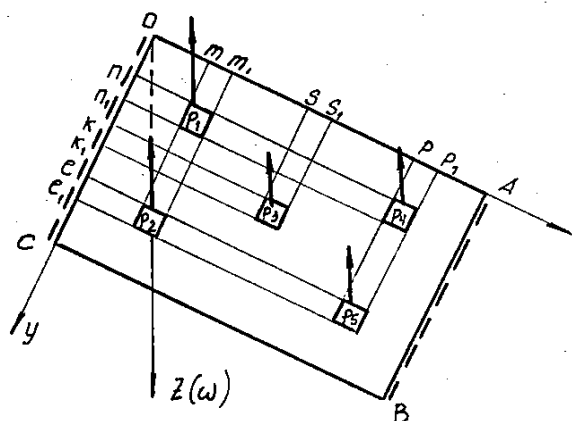


Рисунок 1 – Розрахункова схема плити:
 P_1, P_2, P_3, P_4 та P_5 – зусилля від ТДС.

Тому, розглянемо диференціальне рівняння коливань пластини в рамках гіпотези Кірхгофа-Лява [11]:

$$D \left\{ \frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \cdot \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} \right\} + \frac{\rho h}{g} \cdot \frac{d^2 w}{dt^2} = q(x, y, t), \quad (1)$$

де для стислості запису $w = w(x, y, t)$ – прогин середини поверхні пластини;

g – прискорення вільного падіння;

ρ – густина матеріалу.

В загальному випадку навантаження можна представити рядом Фур'є

$$Q(x, y, t) = Q_0(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} (Q_{2n-1}(x, y) \sin \alpha_{2n-1} t + Q_{2n}(x, y) \cos \alpha_{2n} t). \quad (2)$$

Ця залежність охоплює всі можливі випадки навантаження, які можуть зустрічатися при експлуатації крану.

Вплив кожної гармоніки зовнішнього зусилля моделюється шляхом його рівномірного розподілу по всім контактним площадкам натискної плити

$$q_n(x, y) = \frac{Q_n(x, y)}{S}, \quad (3)$$

де площа контактних площадок –

$$S = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_{k-1} b_{k-1} = \sum_{k=1}^{\infty} a_k b_k.$$

Таким чином розподілене навантаження матиме вид

$$q(x, y, t) = q_0(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} (q_{2n-1}(x, y) \sin \alpha_{2n-1} t + q_{2n}(x, y) \cos \alpha_{2n} t). \quad (4)$$

Для зручності викладок введена функція відрізка у вигляді

$$L(z_0, z_1, z) = \begin{cases} 0, & -\infty < z < z_0 \\ 1, & z_0 < z < z_1 \\ 0, & z_1 < z < z_2 \end{cases} = \frac{1}{4} [1 + \text{sign}(z - z_0)] [1 - \text{sign}(z - z_1)]. \quad (5)$$

Тоді, при розподілі навантаження по площадці, навантаження постійної інтенсивності можна записати:

$$q_n(x, y) = q_n \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y), \quad (6)$$

$$l_k(x) = L\left(x_k - \frac{\alpha_k}{2}, x_k + \frac{\alpha_k}{2}, x\right);$$

$$l_k(y) = L\left(y_k - \frac{\alpha_k}{2}, y_k + \frac{\alpha_k}{2}, y\right),$$

де q_n – амплітуда рівномірно розподіленого навантаження по площадкам контакту n -ої гармоніки навантаження.

Така форма відображення дозволяє застосовувати метод Фур'є, так як у зовнішньому навантаженні при побудові рішення вдається розділити x та y .

Підставляючи (6) в (4) отримаємо

$$q(x, y, t) = q_0 \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y) + \sum_{n=1}^{\infty} (q_{n-1} \sin \alpha_{2n-1} t + q_{2n} \cos \alpha_{2n} t) \cdot \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y). \quad (7)$$

Таким чином, прикладене до натискної плити зовнішнє навантаження перетворюється в рівномірно розподілене навантаження (7).

Тому в диференціальному рівнянні (1) враховуються всі динамічні складники зовнішнього навантаження. Оскільки у (7) x та y змінюються у прямокутнику $0 < x < a$; $0 < y < b$ при $t > 0$, то ряд (7), одержаний з рівномірно і абсолютно збіжного ряду (2), також буде рівномірно та абсолютно збігатися.

Поставлену вище диференціальну задачу вирішимо за допомогою метода Фур'є. Для цього, представимо рішення задачі у вигляді

$$w(x, y, t) = w_0(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} (w_{2n-1}(x, y) \sin \alpha_{2n-1} t + w_{2n}(x, y) \cos \alpha_{2n} t). \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (1) і змінюючи порядок підсумовування та диференціювання, отримаємо

$$\begin{aligned} & D \left[\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} \right] + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ D \left[\frac{\partial^4 w_{2n-1}}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w_{2n-1}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_{2n-1}}{\partial y^4} \right] - \frac{\rho}{g} h \alpha_{2n-1}^2 w_{2n-1} \right\} \times \\ & \times \sin \alpha_{2n-1} t + \\ & + D \left[\frac{\partial^4 w_{2n}}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w_{2n}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_{2n}}{\partial y^4} \right] - \frac{\rho}{g} h \alpha_{2n}^2 w_{2n} \cdot \cos \alpha_{2n} t \Big\} = \\ & = q_0 \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y) + \sum_{n=1}^{\infty} (q_{2n-1} \sin \alpha_{2n-1} t + q_{2n} \cos \alpha_{2n} t) \times \\ & + \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y), \end{aligned} \quad (9)$$

де прийнято $w_n = w_n(x, y)$.

Оскільки рішення диференціального рівняння має бути справедливим для кожного t , тому коефіцієнти, що стоять перед $\sin$ і $\cos$ відповідно рівні. Вони відрізняються тільки значенням індексу. Тому приходимо до наступної системи рівнянь:

$$D \left[\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4} \right] = q_0 \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y); \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & D \left[\frac{\partial^4 w_n}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w_n}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_n}{\partial y^4} \right] - \frac{\gamma}{g} h \alpha_n^2 w_n = \\ & = q_n \sum_{k=1}^5 l_k(x) l_k(y). \end{aligned} \quad (11)$$

Бачимо, що перше рівняння описує деформацію при статичному навантаженні, а друге рівняння враховує динамічну складову навантаження. Цей факт дозволяє застосувати метод Фур'є, у зв'язку з чим, для обох рівнянь використаємо рішення в формі Леві.

Після розкладання правої частини диференціальних рівнянь (10), (11) в ряд Фур'є по перемінній y , рішення цих диференціальних рівнянь будемо шукати у вигляді:

$$w_n(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} w_{nm}(x) \sin \beta_m y \quad (n = 0, 1, \dots). \quad (12)$$

Підставляючи (12) в (10) і (11), приходимо до наступних систем диференціальних рівнянь відповідно:

$$\begin{aligned} & \frac{d^4 w_{nm}(x)}{dx^4} - 2\beta_m^2 \cdot \frac{d^2 w_{nm}(x)}{dx^2} + \beta_m^4 w_{nm}(x) = q_{0m}(x); \quad (13) \\ & \frac{d^4 w_{nm}(x)}{dx^4} - 2\beta_m^2 \cdot \frac{d^2 w_{nm}(x)}{dx^2} + \left(\beta_m^4 - \alpha_n^2 \frac{\rho h}{D} \right) w_{nm}(x) = \\ & = \frac{2}{b_0 \beta_m} \cdot \frac{q_0}{D} \sum_{k=1}^5 l_k(x) \sin \beta_m y_k \sin \frac{b_k}{2} \\ & \left(n = 1, 2, 3, \dots \right), \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{де } q_{0m}(x) = \frac{2}{\beta_m b_0} \cdot \frac{q_0}{D} \sum_{k=1}^5 l_k(x) \sin \beta_m y_k \sin \beta_m \frac{b_k}{2} \\ & (m = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (15)$$

У зв'язку з тим, що при $y = 0$ і $y = b$ функція повинна задовольняти граничним умовам

$$\beta_m = \frac{2n}{b_0} \cdot m. \quad (16)$$

Цим і пояснюється форма розкладання зовнішнього навантаження. Наближення введених функцій рядом Фур'є по $\sin$ дає цілком прийнятну точність обчислень для практики.

Із урахуванням представлення рішення у вигляді ряду (12) загальні граничні умови перетворюються в еквівалентні для функцій такого виду:

$$\begin{cases} w_{nm}^{(0)}(x) - \beta_m^2 v w_{nm}^{(0)}(x) \Big|_{x=0, a_0} = 0; \\ w_{nm}^{(00)}(x) - \beta_m^2 (2-v) w_{nm}^{(0)}(x) \Big|_{x=0, a_0} = 0, \end{cases} \quad (17)$$

$$(n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

Побудовано рішення диференціального рівняння (1) окремо для статичного і динамічного випадків, хоча статичне рішення задачі взагалі входить, як окремий випадок вирішення динамічної задачі.

Так в формулі (11), вважаючи $\alpha_n = 0$, отримуємо теоретично статичний випадок.

Однак при здійсненні обчислень такий граничний перехід здійснити достатньо складно. Це пов'язано з тим, що в рівнянні (15) коефіцієнт, що стоїть перед невідомою функцією в залежності від видів навантаження може бути додатнім або від'ємним. У цьому випадку рішення рівняння (15) потрібно строїти в комплексній формі, а це збільшує принаймні вдвічі обсяг обчислень.

Побудову рішення диференціального рівняння (13) здійснено методом Фур'є. Для скоро-

чення подальших записів та зручності здійснення викладок ведено позначення

$$q(x) = q_{0m}(x), w(x) = w_{0m}(x), \beta = \beta_m, \\ (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (18)$$

В цих позначеннях дифрівняння (13) та граничні умови (17) будуть мати відповідно вид:

$$y''''(x) - 2\beta^2 y''(x) + \beta^4 y(x) = q_*(x), \quad (19)$$

$$\begin{cases} y''(x) - \beta^2 y(x) \big|_{x=0, a_0=0} \\ y''(x) - \beta^2 y(x) \big|_{x=0, a_0=0} \end{cases} \quad (20)$$

Для побудови єдиного рішення даної диференціальної задачі спочатку будується загальне рішення однорідного диференціального рівняння (19) і складається з частковим рішенням. Довільні постійні, які входять в загальну частину цього рішення визначаються з граничних умов (20).

Власні функції диференціального оператора (19) мають вигляд:

$$\begin{aligned} y_0(x) &= sh\beta x, y_1(x) = ch\beta x, \\ y_2(x) &= xsh\beta x, y_3(x) = xch\beta x. \end{aligned} \quad (21)$$

Тому єдине рішення диференціальної задачі можна представити у вигляді

$$\bar{y} = y(x) + y_*(x), \quad (22)$$

де $y(x)$ – загальне і $y_*(x)$ – часткове рішення.

Загальне рішення побудовано з використанням функцій (21):

$$y(x) = c_0 y_0(x) + c_1 y_1(x) + c_2 y_2(x) + c_3 y_3(x), \quad (23)$$

де довільні постійні мають вигляд:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{Z_1(y'' - (2-\nu)\beta^2 y_*) - \beta Z_3(y_* - \beta^2 y_*)}{\beta^3 [Z_0 Z_3 - Z_1 Z_2]}, \\ C_1 &= \frac{-Z_0(y'' - (2-\nu)\beta^2 y_*) + \beta Z_3(y_* - \beta^2 y_*)}{\beta^3 [Z_0 Z_3 - Z_1 Z_2]}, \\ C_2 &= \frac{-1-\nu}{2} \beta C_1, C_3 = \frac{1-\nu}{1+\nu} \beta C_0. \end{aligned} \quad (24)$$

Для отримання часткового рішення диференціального рівняння (19) побудовані спеціальні рішення $\psi(x)$, які задовольняють граничним умовам

$$\psi(0) = \psi'(0) = \psi''(0) = 0, \psi'''(0) = 1. \quad (25)$$

Загальне рішення диференціальної задачі (19) з граничними умовами (25) побудовано у вигляді:

$$\psi(x) = C_0^* y_0 + C_1^* y_1 + C_2^* y_2 + C_3^* y_3, \quad (26)$$

де $C_0^* - C_3^*$ – невідомі постійні.

Після підстановки рішення (26) отримає вигляд

$$\psi(x) = \frac{\beta x ch\beta x - sh\beta x}{2\beta^3}. \quad (27)$$

Часткове рішення в даному випадку матиме вигляд

$$y_*(x) = \frac{1}{2\beta^3} \int_0^0 [\beta(x-t)ch\beta(x-t) - sh\beta(x-t)] q(t) dz. \quad (28)$$

Здійснюючи диференціювання в формулі (28), а також провівши ряд підстановок та перетворень можемо записати вираз довільних, які входять в формули (24):

$$\begin{aligned} y_*(x) &= \frac{1}{mn} \frac{q_0}{D} \sum_{k=1}^5 \sin\left(2\pi m \frac{y_k}{b_0}\right) \sin\left(2\pi m \frac{b_k}{b_0}\right) \cdot \frac{1}{2\beta^3} [C_k^I(x) - S_k^0(x)], \\ y'_*(x) &= \frac{1}{mn} \frac{q_0}{D} \sum_{k=1}^5 \sin\left(2\pi m \frac{y_k}{b_0}\right) \sin\left(2\pi m \frac{b_k}{b_0}\right) \cdot \frac{1}{2\beta^2} [S_k^0(x)], \\ y''_*(x) &= \frac{1}{mn} \frac{q_0}{D} \sum_{k=1}^5 \sin\left(2\pi m \frac{y_k}{b_0}\right) \sin\left(2\pi m \frac{b_k}{b_0}\right) \cdot \frac{1}{2\beta} [C_k^I(x) + S_k^0(x)], \\ y'''_*(x) &= \frac{1}{mn} \frac{q_0}{D} \sum_{k=1}^5 \sin\left(2\pi m \frac{y_k}{b_0}\right) \sin\left(2\pi m \frac{b_k}{b_0}\right) \cdot \frac{1}{2} [C_k^I(x) + S_k^0(x)], \end{aligned} \quad (29)$$

де

$$C_k^j(x) = \int_0^x \left[\beta(x-t) \right]^j ch\beta(x-t) l_k(x) \Big|_{x=t, j=0,1},$$

$$S_k^j(x) = \int_0^x \left[\beta(x-t) \right]^j sh\beta(x-t) l_k(x) \Big|_{x=t, j=0,1}.$$
(30)

Обчислюючи інтеграли з урахуванням властивостей функцій $l_k(x)$ та гіперболічних функцій, отримаємо

$$\begin{aligned} \bar{C}_k^o(x) &= \frac{1}{\beta} sh\beta \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right), \bar{\bar{C}}_k^o(x) = \frac{2}{\beta} sh \frac{\alpha_k}{2} ch(x - x_k), \\ \bar{S}_k^o(x) &= -\frac{1}{\beta} \left[1 - ch\beta \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) \right], \bar{\bar{S}}_k^o(x) = \frac{2}{\beta} sh\beta \frac{\alpha_k}{2} sh(x - x_k), \\ \bar{C}_k^1(x) &= \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) ch\beta \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) - S_k^0(x), \\ \bar{\bar{C}}_k^o(x) &= 2(x - x_k) sh\beta \frac{\alpha_k}{2} ch\beta(x - x_k) + \alpha_k ch\beta \frac{\alpha_k}{2} sh\beta(x - x_k) - \bar{\bar{S}}_k^0(x), \\ \bar{S}_k^1(x) &= \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) ch\beta \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) - \bar{C}_k^0(x), \\ \bar{\bar{S}}_k^o(x) &= -\left(x - x_k - \frac{\alpha_k}{2} \right) ch\beta \left(x - x_k - \frac{\alpha_k}{2} \right) + \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) \\ &\quad ch\beta \left(x - x_k + \frac{\alpha_k}{2} \right) - \bar{\bar{C}}_k^0(x). \end{aligned}$$
(31)

Таким чином, часткове рішення рівняння (19) побудовано. Для його обчислення потрібно в (29) підставити інтеграли (30) та врахувати формули (31).

Для побудови загального рішення належить в формулу (23) підставити значення довільних постійних $C_0, C_1, \dots, C_3$ з формул (24).

Збудоване таким чином часткове і загальне рішення диференційної задачі (19) з граничними умовами (20) підставляємо в формулу (22) і одержуємо невідомі коефіцієнти ряду Фур'є в формулі (12) при $n = 0$. Таким чином, статична скла-

дова рішення диференціального рівняння (1) побудована.

При динамічній постановці диференційне рівняння та граничні умови мають вигляд:

$$y^{iv}(x) - 2\beta^2 y''(x) + (\beta^4 - \alpha^2) y(x) = q(x), \quad (32)$$

$$\begin{cases} y''(x) - \nu \beta^2 y(x) = 0 \\ y'''(x) - (2 - \nu) \beta^2 y'(x) = 0 \end{cases} \Big|_{x=0, a_0} \quad (33)$$

У цьому випадку рішення диференційної задачі має вигляд

$$y(x) = C_0 Y_0(x) + C_1 Y_1(x) + C_2 Y_2(x) + C_3 Y_3(x) + y_*(x). \quad (34)$$

Після різного роду перетворень в кінцевому випадку одержимо:

$$C_0 = \Delta^{-1} \{ [\gamma_0 \beta_-^2 y_0 - \gamma_1 \beta_+^2 y_2] M_* + \gamma_1 \beta_- \beta_+^2 (y_1 - y_3) N_* \},$$

$$C_1 = \Delta^{-1} \{ [\gamma_1 \beta_+^2 y_0 - \gamma_0 \beta_-^2 y_2] N_* + \gamma_1 \beta_+ \beta_-^2 (y_1 - y_3) \},$$
(35)

$$C_2 = -\frac{\gamma_0 [(1-\gamma) \beta^2 - \alpha]}{\gamma_1 [(1-\gamma) \beta^2 + \alpha]} C_0, C_3 = \frac{(1-\gamma) \beta^2 + \alpha}{(1-\gamma) \beta^2 - \alpha} C_1, \quad (36)$$

де

$$\begin{aligned} \beta_+ &= (1-\nu) \beta^2 + \alpha, \beta_- = (1-\nu) \beta^2 - \alpha, \\ y_k(\alpha_0) &= y_k, k = (0, 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (37)$$

Коефіцієнти γ_0 , γ_1 та γ – комплексні числа, якщо $\beta^2 < \alpha$. Тому окремо розглядаються два випадки: $\beta^2 < \alpha$ та $\beta^2 > \alpha$.

При виконанні умови $\beta^2 < \alpha$ (36) з урахуванням (37) приймуть вид:

$$C_2 = \frac{\gamma_0 \beta_-}{\gamma_1 \beta_+} C_0, C_3 = \frac{\beta_+}{\beta_-} C_1, \\ \Delta = 2\gamma_0 \gamma_1 \beta^2 - \beta_+^2 (ch \gamma_0 a_0 - \cos \gamma_1 a_0) \quad (38) \\ ch \gamma_0 a_0 - [\gamma_1^2 \beta_+^4 + \gamma_0^2 \beta_-^4] sh \gamma_0 a_0 \sin \gamma_1 a_0.$$

При виконанні умови $\beta^2 > \alpha$ замість (38) потрібно взяти:

$$C_2 = -\frac{\gamma_0 \beta_-}{\gamma_1 \beta_+} C_0, C_3 = \frac{\beta_+}{\beta_-} C_1, \\ \Delta = 2\gamma_0 \beta^2 - \gamma_1 \beta_+^2 ch(\gamma_0 + \gamma_1) a_0 ch(\gamma_0 - \gamma_1) a_0 + \quad (39) \\ + \frac{1}{2} [\gamma_1 \beta_+^2 - \gamma_0 \beta_-^2] ch(\gamma_0 - \gamma_1) a_0 - \\ - \frac{1}{2} [\gamma_1 \beta_+^2 + \gamma_0 \beta_-^2] ch(\gamma_0 + \gamma_1) a_0.$$

Таким чином, всі невідомі константи, які входять в загальне рішення (34) визначені. Тому, підставляючи (35) в (38) або в (39), а потім отримані вирази в (34), одержимо рішення диференціальної задачі (32), (33).

У кінцевому підсумку за формулою (8) можемо обчислити функцію прогину натискної плити в заданій точці в будь-який момент часу, а також, використовуючи інші вирази, – згинаючі моменти, перерізуючі зусилля, напруження. В збудованому вигляді рішення враховуються всі види можливих навантажень, що діють на конструкцію зважувального пристрою у експлуатації.

Аналіз отриманих результатів досліджень

Як приклад, визначено прогини ω для плити, яка розміщена на трьох ТДС (рис. 2).

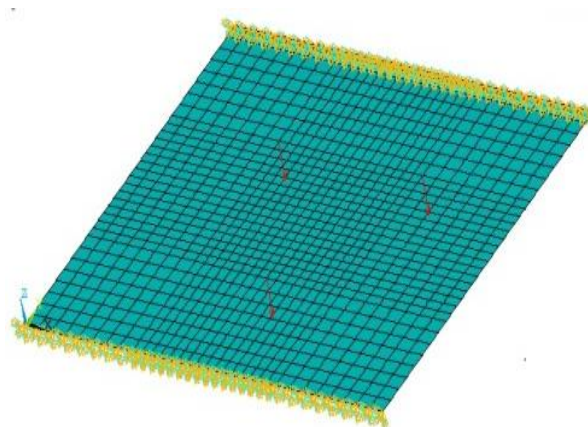


Рисунок 2 – Розрахункова схема плити на трьох ТДС

Розрахунок виконано для номінального значення сумарного навантаження $P = 160$ kN. Відповідно навантаження на кожний із трьох датчиків складало $P_1 = P_2 = P_3 = 53,3$ kN.

На рис. 3 – 7 представлені діаграми за розрахунком напружено-деформованого стану плити за допомогою універсального програмного пакету ANSYS [12-14].

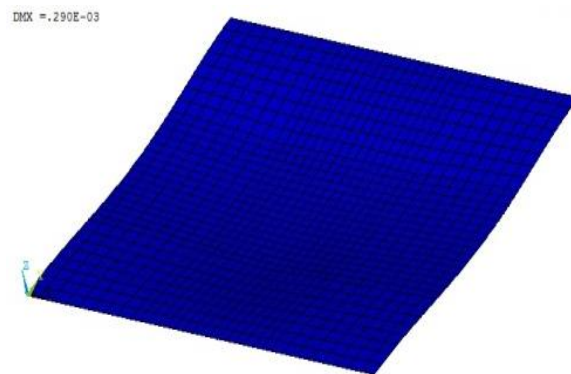


Рисунок 3 – Діаграма деформацій плити

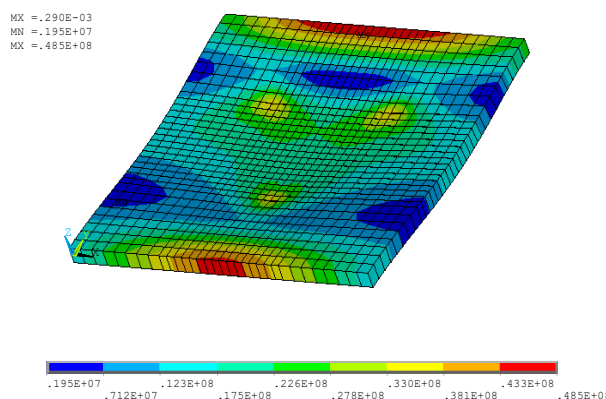


Рисунок 4 – Діаграма напружень плити

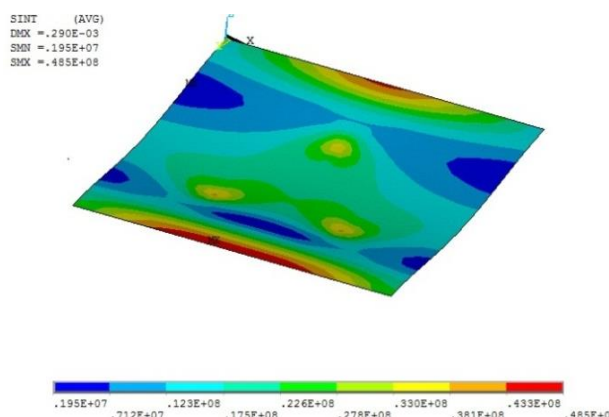


Рисунок 5 – Діаграма еквівалентних напружень плити

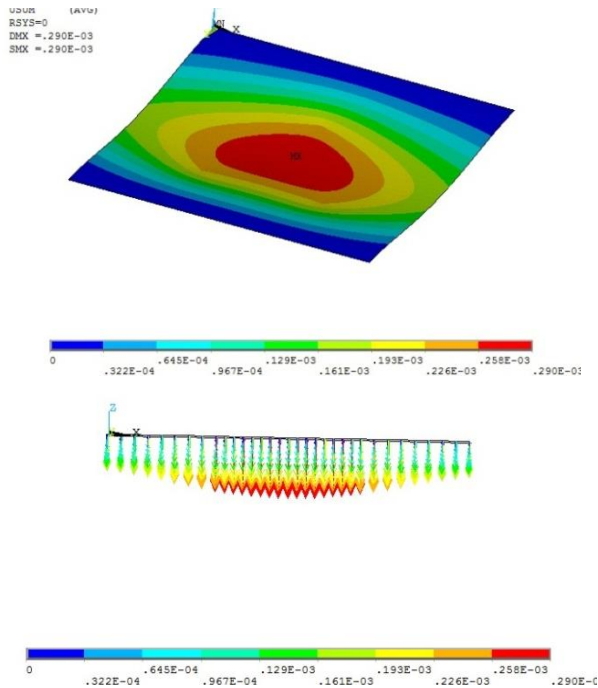


Рисунок 6 – Діаграми переміщень плити

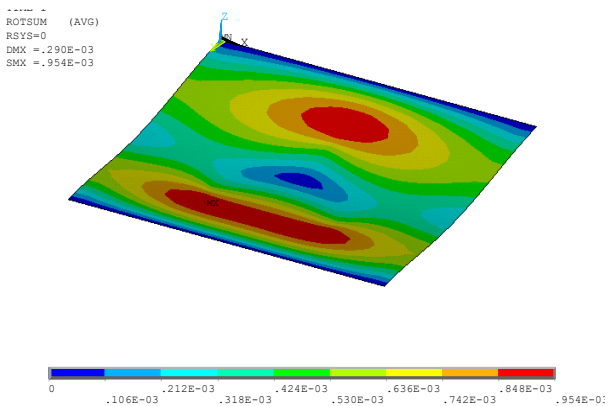


Рисунок 7 – Діаграма кутів повороту плити

Характер значень прогинів ω , отриманих в результаті розрахунків, показав, що натискні плити згинаються в двох площинах.

Підтвердженням цьому стали результати, які були отримані експериментальним шляхом.

На рис. 8 представлені розрахункові значення прогинів, а в скобках – значення отримані експериментальним шляхом.

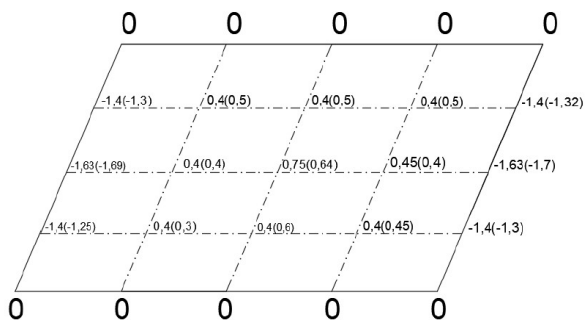


Рисунок 8 – Розрахункові значення прогинів

Експериментальна установка на базі силозадавної машини ОСМ-П-200-10 та елементи вантажоприймального вузла кранових ваг представлені відповідно на рис. 9 та 10.

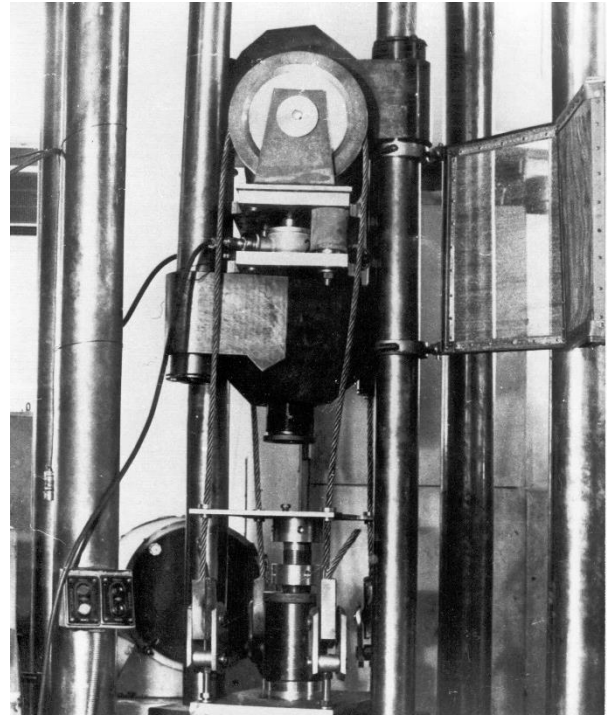


Рисунок 9 – Експериментальна установка на базі силозадавної машини ОСМ-П-200-10



Рисунок 10 – Елементи вантажоприймального вузла кранових ваг

Отримані в результаті проведених розрахунків та експериментальних досліджень дані підтверджують справедливості гіпотези, покладеної в основу методики розрахунку плити ВВ, яка полягала в тому, що розрахунок плит у вигляді балки на двох шарнірних опорах в одній площині не відтворюють реальний процес вигину плити у просторі, який проходить в результаті навантаження вантажоприймального вузла у вбудованих кранових ваг. Розбіжності результатів обчислень та даних експерименту можна пояснити нерівністю поверхні плит, похибкою самої вимірювальної установки, різновисотністю ТДС.

В цілому результати розрахунків прогинів задовольняють поставлену ціль та достатньо повно відображають реальну поведінку натискових плит ВВ кранових ваг.

Висновки

Проведені обстеження металургійних кранів, аналіз конструктивно-параметричних особливостей їх механізмів підйому дозволили розробити технічні пропозиції щодо можливості вмонтування вантажоприймальних вузлів кранових ваг для автоматичного визначення маси рідкого чавуну на заливно-ковшовій ділянці цеху виливниць.

Враховуючи специфіку технологічного процесу заливки металу, збережена структура ВВ, яка передбачає їх вмонтування у головний і допоміжний механізми підйому крана.

Розроблена нова методика розрахунку плит вантажоприймальних вузлів кранових ваг, завдяки якій стало можливим визначити параметри напружено-деформованого стану плити ВВ під впливом основних видів механічних навантажень, що впливають на конструкцію зважувального пристрою у експлуатації, що призводить до зменшення похибки вимірювання маси і тим самим дозволить оптимізувати витрати споріднених матеріалів у технології ливарства та підвищити якість кінцевого продукту.

Список використаних джерел

1. Нікіфорова В. Економічний огляд металургійної галузі України. Рейтинг. Бізнес в офіційних цифрах. 07 листопада 2019 року.

URL: <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-meta-lurhijnoi-haluzi-ukrainy/>.

2. Обзорная информация фирмы Kinocranes (Китай) станом на 21.10.2021 року.

URL: <http://m.ua.bridgecrane manufacturer.com/crane-parts/metallurgical-electronic-crane-scale.html>.

3. Проспект випускаємої продукції компанії «Дніпровага» станом на 21.10.2021 року. URL:

<http://dneproves.ua/news/sertifikat-pro-verki-tipa-na-kranovye-vesy-dneproves-vkd>.

4. Проспект продукції ТОВ «ЛОАД-ТЕХ» станом на 21.10.2021 року.

URL: <http://load-tech.com.ua/uk/>.

5. Семенюк В.Ф., Лингуп В.Н., Критико И.А. Влияние места установки датчика силы на точность защиты мостовых кранов от перегрузки. Підйомно-транспортна техніка. 2018. № 3(59). С. 46-56.

6. Коломиец Л. В. Предохранительные и силовые измерительные устройства тяжело нагруженных машин. Одесса: ВМВ, 2018. 144 с.

7. Вайнберг Д. В., Вайнберг Е. Д. Расчет пластин. Киев: Будивельник, 1970. 370 с.

8. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.

9. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання / Наказ Мінсоцполітики України 19.01.2018 № 62, зареєстровано в Мінюсті України 27.02.2018 № 244/31696.

10. Чукан Йозеф, Костиков Константин. Тензометрические датчики силы. Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 16 – 18.

11. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968.

12. Kolomiets L., Orobej V., Limarenko, A., Ovcharov Y., Tsilvik O. The study of the strength of dentures from different surface reliefs under the action of static load. Медичні перспективи. 2020. Т. 25, № 3. С. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2020.3.214644>.

13. Kolomiets L., Orobej V., Limarenko A., Dashchenko A., Ovcharov Y. Investigation of force factors and stresses at singular points of plate elements in special cranes Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Том 5, № 7(95). С. 6-12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142597>

14. Дашченко А. Ф., Коломиец Л. В., Лазарева Д. А., Сурьянинов Н. Г. Практикум по работе в программе ANSYS. Одесса: ТОВ Бондаренко, 2019. 106 с.

References

1. Nikiforova V. Ekonomichnyj oghljad metalurghijnoji ghaluzi Ukrainy. Rejtyng. Biznes v oficijnykh cyfrakh. 07 lystopada 2019 roku.

URL: <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-meta-lurhijnoi-haluzi-ukrainy/>.

2. Obzorna informacija firmy Kinocranes (Kytaj) stanom na 21.10.2021 roku. URL:

<http://m.ua.bridgecrane manufacturer.com/cra-ne-parts/metallurgical-electronic-crane-scale.html>.

3. Prospekt vypuskajemoji produkciji kompaniji «Dniprovagha» stanom na 21.10.2021 roku.

URL: <http://dneproves.ua/news/sertifikat-pro-verki-tipa-na-kranovye-vesy-dneproves-vkd>.

4. Prospekt produkciji TOV «LOAD-TEKh» stanom na 21.10.2021 roku.

URL: <http://load-tech.com.ua/uk/>.

5. Semenjuk V. F., Lingur V. N., Kritiko I. A. Vlijanie mesta ustanovki datchika sily na tochnost' zashhity mostovih kranov ot peregruzki. Pidiomno-transportna tekhnika. 2018. # 3(59). S. 46-56.

6. Kolomiec L.V. Predohranitel'nye i siloizmeritel'nye ustrojstva tjazhelo-nagruzhennyh mashin. Odessa: VMV, 2018. 144 s.

7. Vajnberg D. V., Vajnberg E. D. Raschet plastin. Kiev: Budivel'nik, 1970. 370 s.

8. Samul' V.I. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. M.: Vysshaja shkola, 1982. 264 s.

9. Pravyla okhorony praci pid chas ekspluataciji vantazhopidijmalnykh kraniv, pidijmalnykh prystrojiv i vidpovidnogho obladnannja / Nakaz Minsocpolityky Ukrainy. 19.01.2018 # 62, zarejestrovano v Minjusti Ukrainy 27.02.2018 # 244/31696.

10. Chukan Jozef, Kostikov Konstantin. Tenzometricheskie datchiki sily. Komponenty i tehnologii. 2010. № 1. S. 16 – 18.

11. Prochnost', ustojchivost', kolebanija. Spravochnik v 3-h tomah. Pod red. I.A. Birgera i Ja.G. Panovko. M.: Mashinostroenie, 1968.

12. Kolomiets L., Orobej V., Limarenko, A., Ovcharov Y., Tsilvik O. The study of the strength of dentures from different surface reliefs under the action of static load. Medicni perspektivi. 2020; 25(3):17-21.

13. Kolomiets L., Orobej V., Limarenko A., Dashchenko A., Ovcharov Y. Investigation of force factors and stresses at singular points of plate elements in special cranes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5. No. 7 (95). pp. 6-12.

14. Dashhenko A. F., Kolomiec L. V., Lazareva D. A., Sur'janinov N. G. Praktikum po rabote v programme ANSYS. Odessa: TOV Bondarenko, 2019. 106 s.

Надійшла до редакції 02.09.2021

РОЗДІЛ 3

Інформаційно-вимірювальна техніка, інформаційно-вимірювальні та транспортні технології

L. Kolomiets¹, DSc, V. Khamray², O. Lymarenko², PhD, A. Bazhanova², PhD, A. Ponomarenko²

¹ State University of Intellectual Technologies and Communications, Odesa

² Odesa Polytechnic National University, Odesa

DEVELOPMENT OF A FORMULA OF DEPENDENCE BETWEEN VEHICLE GEOMETRIC PARAMETERS AND DYNAMIC CHARACTERISTICS

The paper considers a method for developing a formula that allows one to determine the relationship between the geometric and kinematic parameters of a double-wishbone suspension of a car on its roll angle when cornering. The method for determining the formula is described in detail. Test verification models were built in the computer-aided design system to verify the results obtained. For the first time, mathematical dependencies were derived to determine the change in the roll angles of the car depending on the geometric parameters of the suspension, and the basic parameters of the car's movement. Calculations of the dependencies between the coordinates of the points of attachment of the suspension arms to the frame and the steering knuckle, respectively, on the roll angle of the car in the corner have been performed.

Keywords: double wishbone suspension, roll center, vehicle dynamics, racecar.

**Л. В. Коломиец, д.т.н., В. В. Хамрай, А. М. Лимаренко, к.т.н., А. Ю. Бажанова к.т.н.,
А. А. Пономаренко**

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА И ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В работе рассмотрен метод разработки формулы, позволяющей определить зависимость геометрических и кинематических параметров двухрычажной подвески автомобиля от угла ее крена при прохождении поворотов. Подробно описан способ определения формулы. В системе автоматизированного проектирования были построены тестовые проверочные модели для проверки полученных результатов.

Впервые были выведены математические зависимости, позволяющие определять изменение углов крена автомобиля в зависимости геометрических параметров подвески, и базовых параметров движения автомобиля. Выполнены расчеты зависимостей между координатами точек крепления рычагов подвески к раме и поворотного кулака соответственно от угла крена автомобиля в повороте.

Ключевые слова: двухрычажная подвеска, центр крена, динамика автомобиля, гоночный автомобиль.

**Л. В. Коломієць, д.т.н., В. В. Хамрай, О. М. Лимаренко, к.т.н., А. Ю. Бажанова, к.т.н.,
А. А. Пономаренко**

РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА ДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

У статті проаналізовано кінематичні параметри двоважільної підвіски гоночного автомобіля. Проведено аналіз параметра «Центр крену» та його вплив на рух автомобіля. Детально розглянуті рішення що застосовуються в міжнародному студентському проекті «Формула студент» (або Formula SAE). Розглянуті основні тенденції математичного моделювання шасі автомобілів як гоночних так і звичайних дорожніх транспортних засобів. Проведено кінематичний аналіз процесу руху автомобіля в повороті, визначено ключові характеристики автомобіля та основні дані руху автомобіля на гоночній трасі, включаючи рух прямої, рух у повороті, а також процеси прискорення та уповільнення. Визначено та оптимізовано двомірну модель двоважільної підвіски, що дозволило уточнити геометричні параметри відповідної моделі та підготувати двомірну схему для подальшого аналізу. Вперше були виведені математичні залежності, що дозволяють визначати зміну кутів крену автомобіля залежно від геометричних параметрів підвіски, та базових параметрів руху автомобіля. Покроково описано алгоритм визначення залежності. Виконано роботу з позначення точок двоважільної підвіски у двомірній площині що дозволить у майбутньому використовувати двомірні

координати. Це дозволить істотно автоматизувати розрахунок та аналіз двоколісних підвісок як гоночних так і звичайних дорожніх автомобілів. У системі автоматизованого проектування побудовано тестові перевіірочні моделі для перевірки отриманих результатів. Аналіз результатів показав високу точність отриманих математичних залежностей. За отриманими математичними формулами виконані розрахунки залежностей між координатами точок кріплення важелів підвіски до рами та поворотного кулака відповідно від кута крену автомобіля у повороті. Побудовано графіки залежностей кута крену від зміни положення точки кріплення нижнього важеля у вертикальній площині, визначено залежність кута крену автомобіля від зміни швидкості.

Проведена робота що до аналізу зміни куту крену автомобіля під час зміни відповідно точок кріплення верхнього переднього, верхнього заднього важеля та відповідно нижнього переднього та нижнього заднього важеля

Ключові слова: двоколісна підвіска, центр крену, динаміка автомобіля, гоночний автомобіль.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19-31-37

1. Introduction.

One of the ways to model automobile structures is computer modeling or computer experiment, which is based on numerical mathematical and geometric methods [1-3].

The capabilities of such methods depend on the tasks and research conditions [1].

The numerical analysis allows one to calculate different options for the design of the studied object with various combinations of loads [4].

It makes it possible to determine the dependence of the characteristics of vehicle parameters on the relative position of chassis structural elements [5].

The relevance of the research topic – the problem is determined by the insufficient perfection of methods for determining the parameters of a car during movement and its dependence on its design parameters [6-8].

2. Analysis of publications and literary sources

Analysis of literature sources shows [7, 8] that the main type of suspension for racing cars is a double-wishbone suspension. This is due to the wide range of suspension settings in racing cars, as well as the low mass relative to MacPherson suspensions.

A review of research shows that mathematical methods are used to calculate the parameters of a double wishbone suspension, as well as computer-aided design methods [9].

In the process of working with information sources, gaps in the data of design calculations for double-link suspensions became obvious, namely, about the influence of the mutual arrangement of the levers on the dynamic characteristics of the car [10]. It should be noted that the study of the movement of the car and the calculation of the suspension of the car are constantly being carried out [11-13].

Particular attention should be paid to the research FSAE cars. The main advantage of such studies is that the authors are able to quickly verify the results in practice (including car manufacturing processes) [14-16].

3. Purpose of the work

The purpose of the work is the determination and scientific basis of the mathematical-geometric dependence of the location of the suspension attachment points on the roll angle of the car in the turn.

4. Main purpose of the article

At the heart of the study of the parameters of a two-link suspension is the goal to derive the dependence of the mutual arrangement of the suspension arms on the dynamic characteristics of the car, namely the roll angle of the car in a turn.

Thanks to this dependence, it is possible to calculate the roll angle of the car in a corner even at the design stage.

The problem is solved by mathematical and geometric modeling of the car during movement along the radius of the expected turn.

During the passage of the car through the corner, a redistribution of masses occurs, the result of which is a lateral roll. The roll angle depends on two components – the stiffness of the spring, and the design of the suspension (Fig. 1). The hinge RC is the roll center, which is determined geometrically (Fig. 2) depending on the location of the suspension arms and the contact patch point of the wheel.

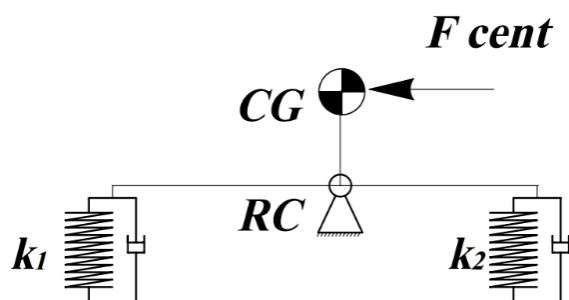


Figure 1 – Two-dimensional dynamic suspension layout

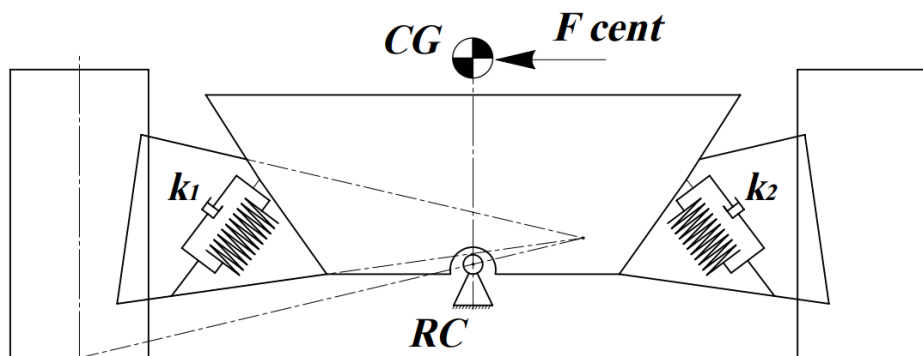


Figure 2 – Two-dimensional kinematic diagram of the suspension

During cornering, centrifugal force starts to reach the center of mass point F_{cent}

$$F_{cent} = m \cdot \frac{V^2}{R}$$

where m is the mass of the car;
 V is the speed of the car in the corner;
 R is the turning radius.

The equivalent circuit of a car in a corner is as follows (Fig. 3)

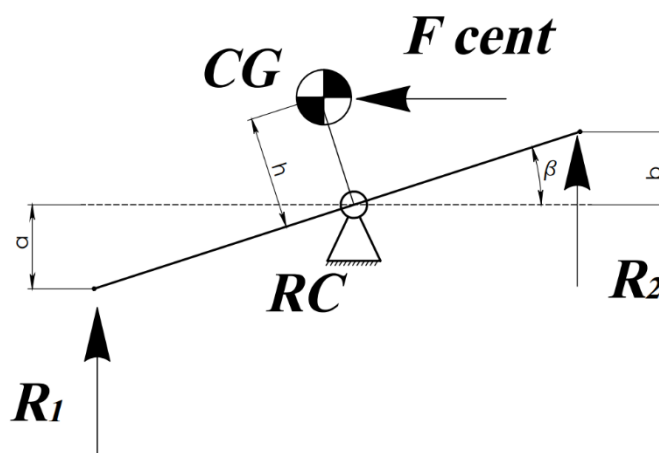


Figure 3 – Vehicle braking process

Based on the diagram in Fig. 3, one can compose an equilibrium equation

$$Fr = kx = R_1$$

where R_1 is the force coming to the damping element;

x is the relative extension of the damping element;

k is the coefficient of elasticity of the shock absorber of the car.

In this case, the parameter of the spring elongation will be equal to the parameters a and b , respectively

$$R_1 = k_1 a,$$

$$R_2 = k_2 b$$

where k_1 is the coefficient of elasticity of the left shock absorber;

k_2 is the coefficient of elasticity of the right shock absorber;

a is movement of the left shock absorber;

b is movement of the right shock absorber.

Then the equilibrium equation will look like this

$$\sin \beta = \frac{F_{cent} \cdot C(H)}{k_1 \cdot 2a + k_2 \cdot 2b}$$

where β is the vehicle roll angle;

$C(H)$ is the distance between the center of mass and the roll center of the vehicle (CG-RC) in Fig. 3, and CG-J in Fig. 4.

From the above derived formula, it follows that the angle of the longitudinal roll of the vehicle during braking will depend on the parameter $C(H)$, that is, on the distance between the center of gravity and roll center (RC in Fig. 3) (or J in Fig. 4).

The determination of the instantaneous center of mass can be done graphically, but in this case, it becomes impossible to integrate the method into automated computation systems.

In Fig. 4, the letters A and D indicate the attachment points of the levers to the steering knuckle. Letters B and C are the points of attachment of levers to the car frame. The section PO is equal to half the track of the car. Segment CG-O is the height of the center of mass of the vehicle. It is necessary to determine the relationship between the geometric parameters of the attachment of the levers and the segment GJ.

To determine the segment CG J, sequential geometric calculations are performed (Fig. 4).

$$C(H) = CGJ = GO - JO,$$

$$JO = \tan \angle JPO \cdot PO,$$

$$\tan \angle JPO = \tan (\angle OPD - \angle DPN),$$

$$\sin \angle DPN = \frac{DN \cdot \sin \angle PDN}{PN},$$

$$DN = \frac{AD \cdot \sin \angle DAB}{\sin \angle DNA}.$$

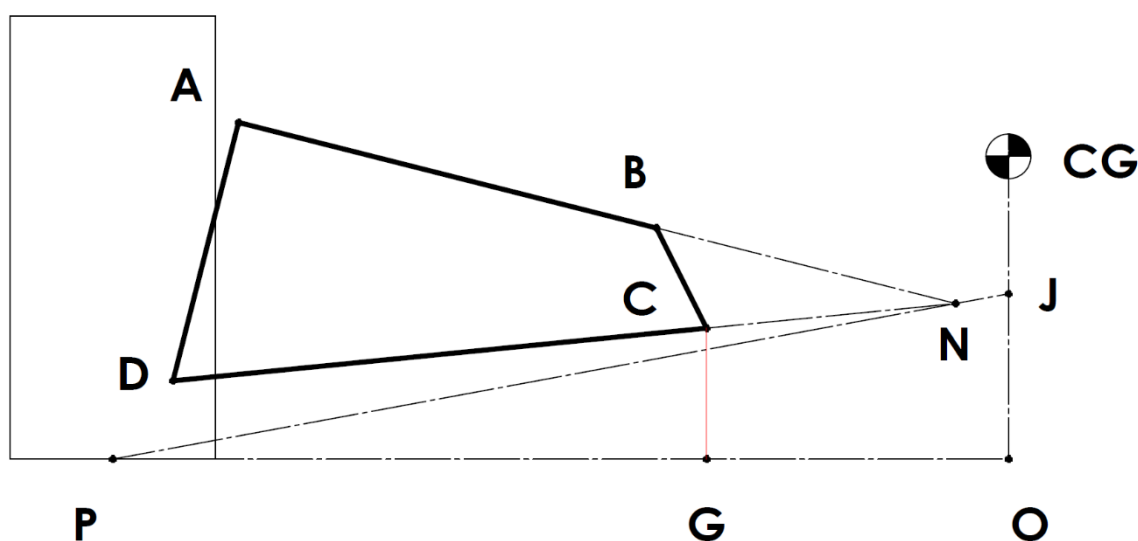


Figure 4 – Suspension geometry

$$DN = \frac{AD \cdot \sin \angle DAB}{\sin(180^\circ - (\angle DAB + \angle ADC))},$$

$$\sin \angle CPG = \frac{CG}{PC},$$

$$PN = \sqrt{DN^2 + PD^2 - 2(DN \cdot PD) \cdot \cos \angle PDN},$$

$$\sin \angle DPC = \frac{DC \cdot \sin \angle PDC}{PC},$$

$$\sin \angle PDN (PDC) = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{PD^2 + DC^2 - PC^2}{2 \cdot PD \cdot DC} \right)^2},$$

$$PC^2 = DC^2 + DP^2 - 2 \cdot DP \cdot DC \cdot \cos \angle PDC.$$

$$PC = \sqrt{PG^2 + GC^2},$$

$$\angle OPD = \angle DPC + \angle CPG,$$

5. Results

In the course of creating a mathematical-geometric model, the formula was derived

$$CGJ = GO - \left(PO \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\angle OPD - \left((AD \sin \angle DAB) / (\sin (180^\circ - \angle ADC)) \cdot \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{PD^2 + DC^2 - (PG^2 + GC^2)}{2 \cdot PD \cdot DC} \right)^2} \right)}{\sqrt{\left(\frac{AD \cdot \sin \angle DAB}{\sin (180^\circ - \angle ADC)} \right)^2 + PD^2 - 2(DN \cdot PD) \cdot \frac{PD^2 + DC^2 - (\sqrt{PG^2 + GC^2})}{2 \cdot PD \cdot DC}}} \right) \right)$$

where

$$\angle OPD = \left(\frac{DC \cdot \sin \angle PDC}{PC} \right) + \left(\frac{CG^2}{DC^2 + DP^2 - 2 \cdot DP \cdot DC \cdot \cos \angle PDC} \right).$$

Substituting the resulting formula into the dependence of the roll angle on the kinematic and dynamic parameters, the formula is as follows

$$\sin \beta = \frac{m \frac{V^2}{R} \cdot CGJ}{k_1 \cdot 2a + k_2 \cdot 2b}.$$

The resulting formula allows you to analyze the dependence of the suspension attachment points and the car's roll angle in a turn.

You can receive data such as:

- Dependence of the roll angle on the change in the position of the attachment point of the lower arm in the vertical plane (Fig. 5). Where the range of 67-88 mm at the speed of 30 m/s, turn radius 60 m.
- Dependence of the vehicle roll angle on the speed change (in the range from 1 to 22 m/s), and many other graphic dependencies (Fig. 6).

This data allows you to optimize the process of developing racecar suspension.

Conclusions

1. Methods for determining the roll center of a car with a double wishbone suspension are determined.

2. Dependences of the roll angle on the vehicle speed, turning radius, coefficient of spring stiffness, and its mass are determined.

3. The process of deriving a formula is shown in detail, which allows to show the relationship between the geometrical parameters of the suspension and the roll angle of the car in a corner.

4. Derived the final formula of the mathematical-geometric model of a car with a double wishbone suspension

5. The graphs of the dependences of the roll angle of the car on the geometric and physical parameters have been built.

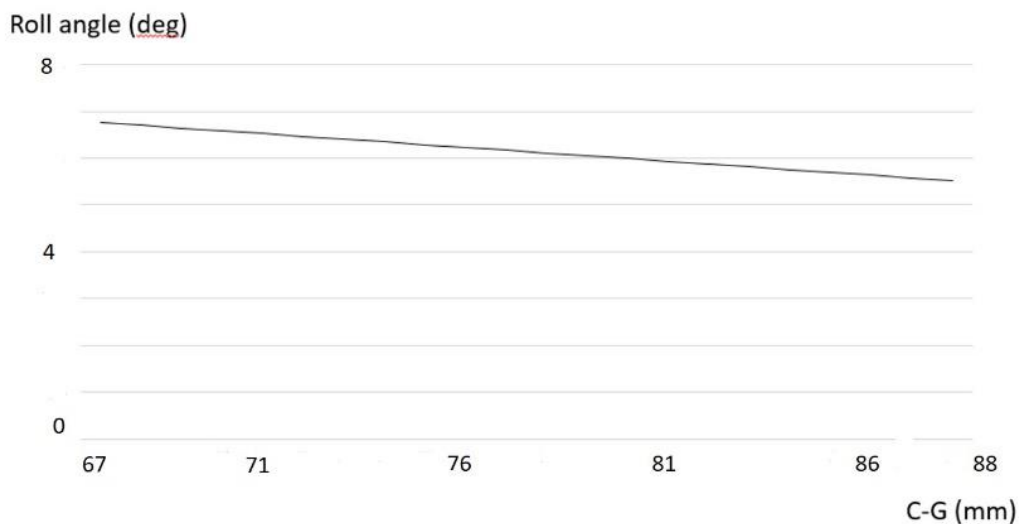


Figure 5 – Dependence of the roll angle on the change in the position of the attachment point of the lower arm in the vertical plane in the range of 65-170 mm at a speed of 30 m/s

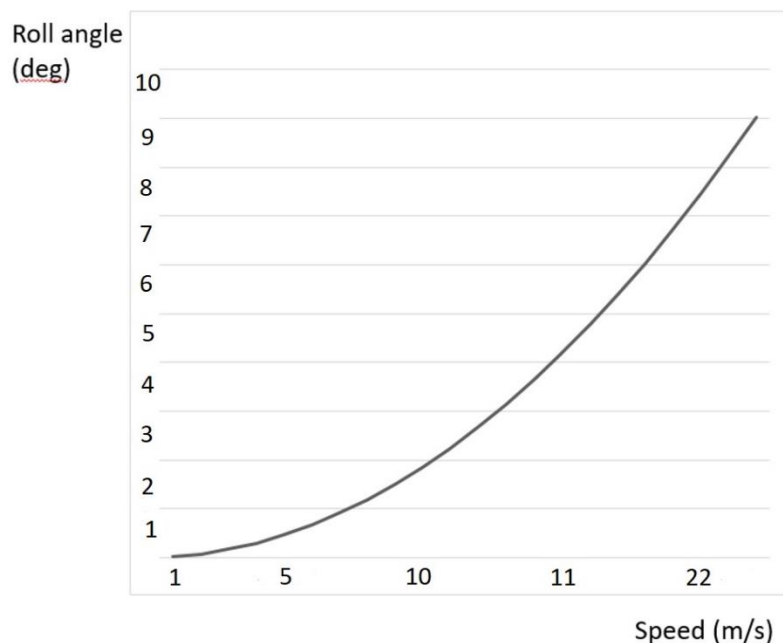


Figure 6 – Dependence of the vehicle roll angle on the speed change (in the range from 1 to 22 m/s)

References

1. Bazhenov V.A., Dashchenko A. F., Kolomiets L. V., Orobei V. F. *Budivelna mekhanika. Spetsialnyi kurs. Zastosuvannia MHE*. Odesa: Astroprint, 2001. 288 s.
2. Prochnost', ustojchivost', kolebaniya. *Spravochnik v 3-x tomax. Tom 3. Pod red. I. A. Birgera i Ya. G. Panovno*. M.: Mashinostroenie, 1968. 567 s.
3. Aleksandrov A. V., Lashhenikov B. Ya., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mexanika. Tonkostennye prostranstvennye sistemy*. 1983, 488 s.
4. Maslennikov A. M. *Raschet stroitel'nykh konstruktsiy chislennymi metodami*. L.: Izd-vo LGU, 1987. 225 s.
5. Orobei V., Kolomiets L., Limarenko A. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 4. P. 295-302.
6. Kolomiets L., Orobei V., Limarenko A. Method of boundary element in problems of stability of plane bending beams of rectangular cross section structures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 3. P. 59-65.
7. Theander A. *Design of a Suspension for a Formula Student Race Car*. 2004.
8. William F. Milliken, Douglas L. Milliken. *Race car vehicle dynamics*. 1995.
9. Limarenko A. M., Khamray V. V., Dashchenko A. A. The methodology for calculating the steering using Solidworks software module. Materials of the international scientific-practical conference "Modern research and development", Bolgaria, Sofia 2015. Tom 16. P. 11-13.
10. Limarenko A. M., Khamray V. V., Druzhynin A. A. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2015, no. 60, 440-443.
11. Mihon L., Lontiş N., Deac S. The behaviour of a vehicle's suspension system on dynamic testing conditions. *International Conference on Applied Sciences (ICAS2017)*, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2018) 012083 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012083>.
12. Faisal O. Mahroogi & Narayan S. Design and Analysis of Double Wishbone Suspension Systems for Automotive Applications. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. Vol. 9, Issue 4, Aug 2019, 1433–1442.
13. Vignesh B. S., Sufiyan Ahmed, Chandan V., Prashant Kumar Shrivastava. Double Wishbone Suspension System; A Research International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). Volume 8, Issue 2, July 2019, 5033-5037. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1084.078219>.
14. Li Sun, Zhao Deng, Qing Zhang. Design and Strength Analysis of FSAE Suspension. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8(1), 414-418. <https://doi.org/10.2174/1874155X01408010414>.
15. Abhishek Mahesh Sharma, Sidhant Konwar Roy, Anantha Krishnan, Nivedh Das Thaikoottattil. Structural analysis of bellcrank in a pullrod suspension system in an FSAE prototype. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*. Volume 23, Issue 10, October 2021, 236-246.
16. Wheatley Greg. On the design of racing car

suspension. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. September 2020, 14(3), 1003-1013. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00668-7>.

Список використаних джерел

1. Баженов В.А., Дащенко А. Ф., Коломієць Л. В., Оробей В. Ф. Будівельна механіка. Спеціальний курс. Застосування МГЕ. Одеса: Астропринт, 2001. 288 с.
2. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Том 3. Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановно. М.: Машиностроение, 1968. 567 с.
3. Александров А. В., Лашеников Б. Я., Шапошников Н. Н. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы. 1983, 488 с.
4. Масленников А. М. Расчет строительных конструкций численными методами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 225 с.
5. Orobej V., Kolomiets L., Limarenko A. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 4. P. 295-302.
6. Kolomiets L., Orobej V., Lymarenko A. Method of boundary element in problems of stability of plane bending beams of rectangular cross section structures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 3. P. 59-65.
7. Theander A. Design of a Suspension for a Formula Student Race Car. 2004.
8. William F. Milliken, Douglas L. Milliken. Race car vehicle dynamics. 1995.
9. Limarenko A. M., Khamray V. V., Dashchenko A. A. The methodology for calculating the steering using Solidworks software module. Materials of the international scientific-practical conference "Modern research and development", Bolgaria, Sofia 2015. Tom 16. P. 11-13.
10. Limarenko A. M., Khamray V. V., Dru-

zhynin A. A. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2015, no. 60, 440-443.

11. Mihon L., Lontiş N., Deac S. The behaviour of a vehicle's suspension system on dynamic testing conditions. *International Conference on Applied Sciences (ICAS2017)*, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2018) 012083 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012083>.

12. Faisal O. Mahroogi & Narayan S. Design and Analysis of Double Wishbone Suspension Systems for Automotive Applications. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. Vol. 9, Issue 4, Aug 2019, 1433-1442.

13. Vignesh B. S., Sufiyan Ahmed, Chandan V., Prashant Kumar Shrivastava. Double Wishbone Suspension System; A Research International. *Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. Volume 8, Issue 2, July 2019, 5033-5037. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1084.078219>.

14. Sun Li, Deng Zhao, Zhang Qing. Design and Strength Analysis of FSAE Suspension. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8, 414-418. <https://doi.org/10.2174/1874155X01408010414>.

15. Abhishek Mahesh Sharma, Sidhant Konwar Roy, Anantha Krishnan, Nivedh Das Thaikoothattil. Structural analysis of bellcrank in a pullrod suspension system in an FSAE prototype. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*. Volume 23, Issue 10, October 2021, 236-246.

16. Wheatley Greg. On the design of racing car suspension. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. September 2020, 14(3), pp. 1003-1013. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00668-7>.

Надійшла до редакції 10.06.2021

УДК 621.317

Д. П. Орнатський, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. О. Катаєва, к.т.н.

Національний авіаційний університет, м. Київ

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ

У статті вивчається залежність обертового моменту електрогенераторів та їх вихідних параметрів. На основі досліджень запропоновано метод вимірювання обертового моменту з використанням індуктивного сенсора, що дозволяє покращити метрологічні характеристики вимірювального каналу шляхом підвищення чутливості вимірювання. Таке підвищення досягається за рахунок того, що на котушки, які змінюють свою індуктивність під дією торсійного навантаження на вал електродвигуна, не впливають електромагнітні перешкоди, що створюються електрогенератором під час роботи. Для обробки результатів вимірювань та дослідження похибок, використовував-

ся моделюючий комплекс Matlab/Simulink, це дозволило візуалізувати перехідну характеристику вимірювального сигналу та оцінити можливу похибку.

Ключові слова: електрогенератор, обертальний момент, кутова швидкість, метод вимірювання, сенсор, електромагнітна індукція, інформаційна система.

Д. П. Орнатский, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н., М. А. Катаева, к.т.н.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

В статье изучается зависимость крутящих моментов электрогенераторов и их выходных параметров. На основе исследований предложен метод измерения крутящего момента с использованием индуктивного сенсора, позволяющего улучшить метрологические характеристики измерительного канала путем увеличения чувствительности измерения. Такое увеличение достигается за счет того, что на катушки, которые изменяют свою индуктивность под действием торсионной нагрузки, не влияют электромагнитные помехи, создаваемые электрогенератором во время работы. Для обработки результатов измерений и исследования погрешностей, использовался моделирующий комплекс Matlab/Simulink, что позволило визуализировать переходную характеристику измерительного сигнала и оценить погрешность.

Ключевые слова: электрогенератор, крутящий момент, угловая скорость, метод измерения, сенсор, электромагнитная индукция, информационная система.

D. P. Ornatskyi, DSc, D. M. Kvashuk, PhD, M. O. Kataieva, PhD,

METHODS OF MEASUREMENT OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ELECTRIC GENERATORS

The article investigates the methods and means of measuring the operating characteristics of electric generators, namely the output voltage, resistance, frequency, current and torque. The analysis of literature sources that characterize the structural elements and the principle of operation of synchronous generators is carried out. Methods of measuring the operating characteristics of electric generators are studied. Mathematical models that describe the relationships between physical quantities that characterize the parameters of electric generators are considered. The estimation of modern directions of development of means of measurement of torques of electric generators is carried out. Methods of data processing and visualization obtained by primary devices are studied. The dependence of the torque of electric generators and their output parameters is studied. A block diagram of a digital measuring sensor is constructed, which shows the main components of a device for measuring torque using an inductive sensor.

Based on research, a method for measuring torque using an inductive sensor has been proposed, which allows increasing the sensitivity of the measurement by improving the metrological characteristics of the measuring channel. This improvement is that the coils that change their inductance under the action of torsional load on the motor shaft are not affected by electromagnetic interference created by the generator during operation. Simulation of the electrical circuit using the proposed method allowed to obtain the attenuation coefficient of the in-phase signal 80 dB at an input signal frequency of 10 kHz, thus providing high sensitivity. This model was tested, which made it possible to obtain errors in the simulation in the operating mode. The standard deviation and the absolute measurement error are determined. The Matlab / Simulink modeling complex was used to process the measurement results and study the errors, which allowed visualizing the transient characteristics of the measuring signal and obtain a possible error.

Keywords: electric generator, torque, angular velocity, measurement method, sensor, electromagnetic induction, information system.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19-37-47

Вступ

Розвиток альтернативних видів енергетики вимагає оптимізації управління та вимірювання параметрів робочих характеристик електрогенераторів.

При високому рівні зносу та потребах у модернізації, а також для забезпечення економічності генераторів існує необхідність у вдоскона-

ленні систем контролю та вимірювання параметрів їх роботи. Особливо це стосується визначення параметрів збудження, вихідної напруги, швидкості обертання та обертового моменту.

В сучасних умовах актуальним є пошук нових способів отримання потрібної напруги шляхом підбору оптимальних вхідних параметрів.

Зважаючи на простоту в експлуатації, сфери застосування таких генераторів накладають серйозні вимоги щодо напруги джерела живлення, обертового моменту, швидкості обертання та інших вагомих параметрів, які мають задовольняти нормованим показникам якості та стабільності. Для цього потрібні точні вимірювання та прогнозування характеристик роботи таких генераторів, що є приводом до створення вимірювальних приладів з покращеними метрологічними характеристиками, за допомогою яких можна встановити оптимальні режими роботи таких електрогенераторів.

Аналіз публікацій та досліджень

Структуру синхронного генератора на постійних магнітах представлено на рис. 1, 2, де показано основні його конструктивні елементи та схему електричного з'єднання.

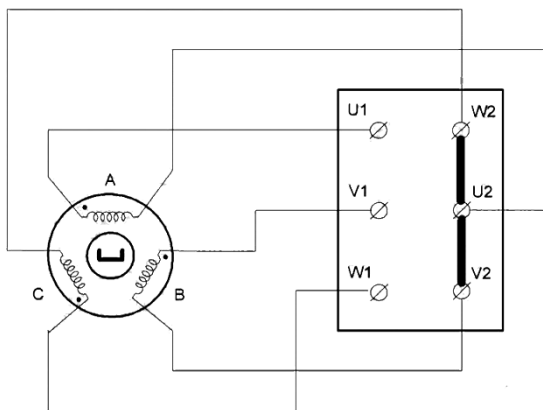


Рисунок 1 – Схема електричного з'єднання синхронного електрогенератора на постійних магнітах за типом (зірка)

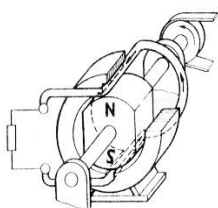


Рисунок 2 – Схематичне представлення конструктивних елементів та принципу дії синхронного електрогенератора на постійних магнітах [1]

Досліджуючи генератори на постійних магнітах слід, звернути увагу на закон електромагнітної індукції Фарадея, згідно з яким напруга на виході кожної обмотки генератора може бути розрахована за формулою [1]:

$$E_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (1)$$

де E_i – ЕРС індукції в контурі;

$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ – швидкість зміни магнітного потоку;

де t – поточний час.

Слід враховувати, що магнітний потік, через одну обмотку змінюється по гармонічному закону

$$\Phi = \Phi_0 \sin \frac{p \cdot \omega \cdot t}{2}, \quad (2)$$

де Φ_0 – максимальне значення магнітного потоку, яке може бути знайдено за формулою

$$\Phi_0 = B_s \cdot S, \quad (3)$$

де B_s – усереднене за площею полюса значення магнітної індукції в зазорі;

S – площа полюса магніту;

p – число полюсів генератора;

ω – кутова частота обертання генератора, число коливань, що здійснюються за 2π секунди, $\omega = \frac{2\pi}{T}$;

T – поточний час.

В такому випадку для поточного значення напруги однієї обмотки можна отримати наступний вираз

$$E_D = \frac{N \cdot B_s \cdot S \cdot p \cdot \omega}{2\sqrt{2}}, \quad (4)$$

де N – кількість витків обмотки.

В роботах [2, 3] представлено математичну модель номінального струму, який забезпечує потреби його споживання, у вигляді рівняння електричної рівноваги

$$\begin{cases} 1,5r_i d + 1,5L_d \frac{di_d}{dt} + 1,5L_q i_q n_G p + u_d = 0; \\ 1,5r_i q + 1,5L_q \frac{di_q}{dt} + 1,5L_d i_d v p - 1,5\psi n_G p + u_q = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де u_d, u_q, i_d, i_q – поздовжні та поперечні складові фазної напруги та струмів на виході синхронного генератора;

L_d, L_q – поздовжні та поперечні складові індуктивностей фазної обмотки статора синхронного генератора [4];

n_G – швидкість обертання якоря синхронного генератора;

p – число полюсів генератора;

r – активний опір фазної обмотки статора;

Ψ – загальний магнітний потік, зчеплений з усіма витками котушки, що чисельно дорівнює сумі магнітних потоків, які проходять через кожен виток котушки

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i, \quad (6)$$

де Φ_m – магнітний потік одного витка;

N – число витків у котушці;

Електромагнітний момент синхронного генератора можна визначити наступним співвідношенням [5]:

$$E_m = \frac{P}{\omega}, \quad (7)$$

де P – потужність генератора;

ω – кутова частота обертання генератора.

Є й інші підходи до його визначення [6]:

$$E_m = a_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot D_c^3 \cdot \lambda, \quad (8)$$

де $a_i \cong 0,72 \div 0,8$ – коефіцієнт полюсного перекриття;

$A \cong (10 \div 12) \cdot 10^3$ – лінійне навантаження;

$B_\delta \cong 0,29 \div 0,31$ – попереднє значення індукції в робочому зазорі;

D_c – діаметр статора;

$\lambda \cong 0,5$ – відношення активної довжини то-роїдального сердечника статора до його діаметра.

В роботі [7] представлено метод розрахунку потужності синхронних генераторів

$$P = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

де I_ϕ – фазний струм;

$\cos \varphi \cong 0,8 \div 0,85$ – коефіцієнт потужності, відношення активної потужності до повної. Фізично він показує, яка частина повної потужності йде на виконання корисної роботи.

$$I_\phi = \frac{P}{3U_\phi \cdot \cos \varphi}, \quad (10)$$

При навантаженні, струм обмотки якоря синхронного генератора створює власне магнітне поле, яке називається полем реакції якоря. Через міжполюсний простір магнітний опір потоку, що діє у напрямку поперечної осі, значно більше магнітного опору потоку, що діє на повздовжню вісь. Таким чином, індуктор (ротор) має магнітну несиметрію. Тому, однакова за значенням магні-

тно-рушійна сила якоря при її дії на повздовжню вісь, створює більший магнітний потік, ніж при дії на поперечну вісь.

Дослідження характеристик обертового моменту електрогенераторів представлено в роботах [8-10], де визначено основні методи вимірювання цього параметру.

Так, можна розглянути рівняння Даламбера для синхронного електрогенератора на постійних магнітах, приймаючи до уваги кутову швидкість та обертовий момент сили, що діє на вал,

$$J_{\text{вт}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{рух}} - M_{\text{гал}},$$

де $J_{\text{вт}}$ – момент інерції ротора;

$M_{\text{рух}}$ – рушійний момент електрогенератора;

$M_{\text{гал}}$ – гальмівний навантажувальний момент, обумовлений електромагнітним моментом генератора та механічними втратами.

Загалом, існує багато різноманітних методів вимірювання обертового моменту та пристроїв, які їх реалізують. Разом з тим, слід урахувати залежність обертового моменту електрогенератора від багатьох факторів. Так, слід звернути увагу на момент ковзання, який залежить від якості механізмів, швидкості обертання валу, потужності генератора, тощо. Загальновідомий вираз, яких характеризує обертовий момент електрогенератора та момент ковзання має наступний вигляд [10]

$$M = \frac{m \cdot p \cdot U^2}{\omega} = \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}, \quad (11)$$

де m – число фаз;

p – число пар полюсів статора;

U – фазна напруга на обмотці статора;

R'_2 – приведений активний опір обмотки ротора;

R_1 – активний опір обмотки статора;

s – ковзання;

x_1 – реактивний опір обмотки статора;

x'_2 – приведений активний опір обмотки ротора.

Враховуючи ряд зазначених факторів, які впливають на процес вимірювання обертових моментів електрогенераторів, слід відзначити, що умови їх експлуатації, вимоги до точності,

потужність та багато інших параметрів, накладають ряд обмежень на застосування вимірювальних приладів.

Серед найбільш поширених методів та засобів вимірювання обертальних моментів електрогенераторів, можна вважати такі:

вимірювання моменту обертання за допомогою тензометричних датчиків;

вимірювання обертального моменту за допомогою кутових датчиків обертання;

вимірювання обертального моменту з використанням нового покоління індуктивних датчиків.

Останній метод вимірювання набув широкої популярності через можливість проводити вимірювання на високих швидкостях (20000 об/хв та більше), надійність та простоту в експлуатації. Основною його перевагою у порівнянні із тензометричними методами є відсутність електронних компонентів на обертальних частинах сенсора. Показники знімаються індуктивним способом.

Застосування індуктивних методів вимірювання обертальних моментів представлено в роботах [11, 12]:

$$e = \frac{j\omega\Phi_m W_u}{2\pi R_{\text{ш}}} \sqrt{\frac{j\gamma\omega}{M_e}} \ln \cdot \frac{\left[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)} \sin\left(\frac{\pi}{4} - 2\varphi\right) \right]^2 + 4\lambda}{\left[\lambda + 1 + \sqrt{2(\lambda - 1)} \sin\left(\frac{\pi}{4} + 2\varphi\right) \right]^2 + 4\lambda} \cdot e^{i\alpha x}, \quad (12)$$

де j – уявна одиниця;

γ – електрична провідність матеріалу вала;

$\lambda = \frac{\mu_y}{\mu_x}$, μ_y , μ_x – значення магнітних

проникностей матеріалу вала вздовж дії головних нормальних напруг;

$M_e = \sqrt{\mu_y \mu_x}$ – еквівалентне значення магнітної

проникності;

φ – кут між координатними осями X_1 , Y_1 , пов'язаними з магнітопроводом перетворювача і головними осями анізотропії X , Y , що збігаються з напрямком головних нормальних напруг;

Φ_m – амплітудне значення магнітного потоку, що входить до контрольованої частини вала через полюси обмотки збудження;

Наведена залежність змінюється за періодичним законом функції кута та має екстремальні значення при $\varphi = \pi/4 \pm n\pi/2$, де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Проведений експеримент із застосуванням виразу (12), де були задіяні індуктивні сенсори, показав, що взаємний вплив обертального моменту та опорних конструкцій вимірювального приладу, що використовувався в експерименті, був відсутній [11]. В той же час точність роботи індуктивних сенсорів обертального моменту залежить від стабільності напруги, що зумовлюється якістю електричного живлення.

Вимірювання параметрів роботи та управління роботою електрогенераторів здійснюється з використанням контролерів керування, які включають в себе набір компонентів для обробки сигналів, зокрема сигналів від сенсорів для вимірювання обертального моменту, вихідної напруги, струму та потужності. У зв'язку з цим існує потреба у розробці вимірювальних систем, які призначені для обробки та візуалізації параметрів роботи електрогенераторів, що сприятиме підвищенню їх надійності та зменшенню експлуатаційних витрат.

Метою роботи є аналіз методів та моделей, які використовуються для вимірювання робочих характеристик електрогенераторів, та розробка практичних рекомендацій щодо вимірювання обертального моменту електрогенератора. Розробка методу вимірювання обертального моменту з використанням індуктивного сенсора.

Основна частина

З метою вивчення метрологічних характеристик вимірювального каналу приладів для вимірювання обертальних моментів електрогенераторів, первинний сигнал яких отримується з використанням індуктивних сенсорів, побудовано модель такого приладу в середовищі Matlab/Simulink. За основу було взято модель індуктивного датчика обертального моменту серії ТМ [13] (рис. 3). Розроблено функціональну схему вимірювального каналу з використанням датчика цієї серії (рис. 4).

У відповідності до рис. 4, змінний струм передається на котушку 2. Котушки 3, 4 реагують на зміну струму, яка виникає в результаті переміщення феромагнітного стержня між ними, що спричиняє відмінність струмів. Співвідношення, або різниця цих сигналів використовується для розрахунку абсолютного положення стержня. Так, за допомогою котушок індуктивності 3, 4 диференціального трансформатора LVDT (Linear Variable Differential Transformer, диференціальний трансформатор для вимірювання лінійних переміщень), він передається до перетворювача 6. Схематично принцип дії індуктивного LVDT перетворювача представлено на рис. 5.

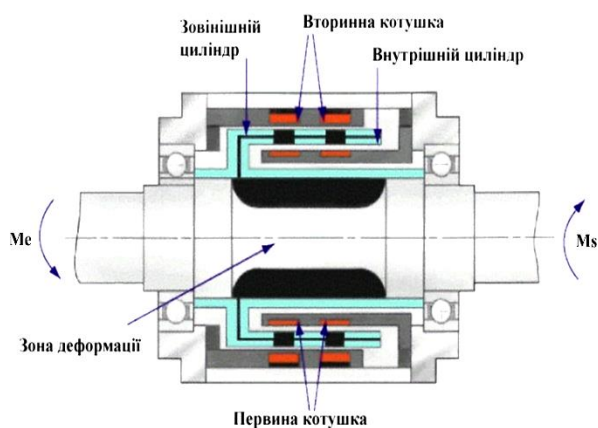


Рисунок 3 – Схематичне представлення конструктивних елементів та принципу дії перетворювача обертального моменту серії ТМ

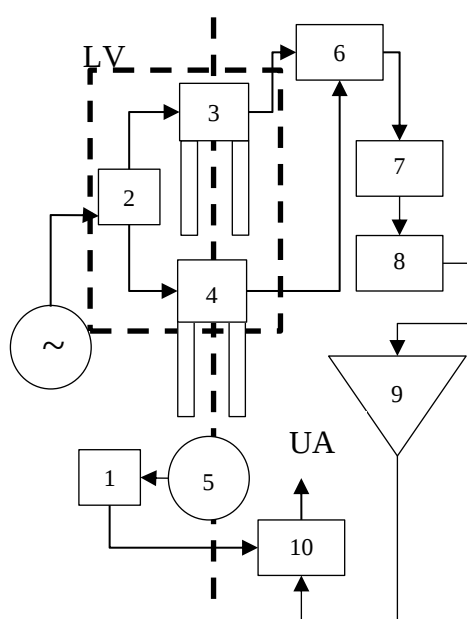


Рисунок 4 – Блок-схема цифрової передачі вимірювального сигналу

- 1 – накопичувач сигналу; ~ – генератор;
2, 3, 4 – котушки індуктивності; 5 – датчик кута повороту/частоти обертання; 6 – перетворювач;
7 – фільтр сигналів; 8 – підсилювач сигналу;
9 – АЦП; 10 – мікроконтролер

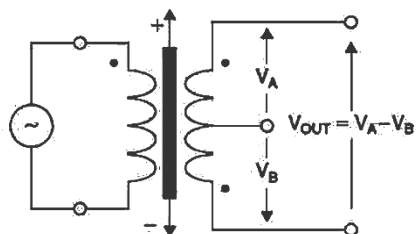


Рисунок 5 – Принцип індуктивного датчика перетворювача на трансформаторі

Основні переваги датчиків з LVDT: простота конструкції первинного та електронного перетворювачів, висока роздільна здатність, лінійність та відтворюваність, широкий діапазон робочих температур, відсутність рухомих електричних контактів і, як наслідок, довговічність.

Відхилення торсійного валу, на який закріплено феромагнітний стержень є пропорційним моменту сили, яка створюється електродвигуном. Таким чином, перетворювач 6 має бути дуже чутливим до зміни напруги, забезпечуючи при цьому лінійність перетворення сигналу. Вирішити таку задачу можна за допомогою схеми на операційних підсилювачах, що дозволяє зменшити вплив обмеження синфазних сигналів із зростанням частоти (рис. 6).

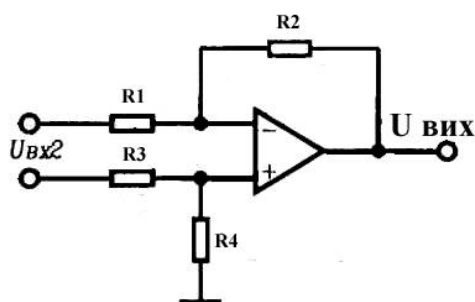


Рисунок 6 – Електрична схема вимірювального каналу приладу індукційного типу на операційних підсилювачах для вимірювання обертального моменту

Розроблено з використанням Electronics Workbench

В даному випадку (рис. 5), резистори R_3 та R_4 діють, як дільник напруги для входу не інвертуючого операційного підсилювача. Завдяки зворотному зв'язку через резистори R_3 та R_4 і великому внутрішньому коефіцієнту підсилення, напруга на інвертуючому вході підсилювача буде рівною напрузі на не інвертуючому вході. Відношення R_2/R_1 визначає коефіцієнт передачі підсилювача. Коли $R_1/R_2 = R_3/R_4$, підсилення диференціального сигналу набагато більше підсилення синфазного сигналу, і коефіцієнт послаблення синфазної напруги буде максимальним. Диференціальний коефіцієнт підсилення можна виразити наступним виразом

$$DK_p = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{k_p}\right)}, \quad (13)$$

де k_p – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, обумовлений розузгодженням резисторів буде рівний:

$$K_{cc1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 - R_4)}. \quad (14)$$

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу, що обумовлений кінцевим значенням коефіцієнту ослаблення синфазного сигналу операційного підсилювача буде дорівнювати

$$K_{cc2} = \frac{R_2}{R_1 \times K_{осц_{оп}}}, \quad (15)$$

де $K_{осц_{оп}}$ – коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу операційного підсилювача.

Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу усієї схеми буде дорівнювати

$$K_{осц} = \frac{R_2}{R_1 \times K_{осц_{оп}}}; \quad (16)$$

Диференційний вхідний опір можна виразити наступним чином

$$R_{вх.диф.} = R_1 + R_3. \quad (17)$$

Вхідний опір для синфазного сигналу (при $K_{осц} = \infty$), визначається виразом

$$R_{вх.диф.} = (R_1 + R_2) \parallel (R_3 + R_4). \quad (18)$$

Вихідний сигнал, тобто вихідна напруга зсуву (при $R_1 + R_3$ та $R_1 + R_4$) буде мати такий вираз:

$$U_{вх} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{вх} + \Delta I_{вх} R_2. \quad (19)$$

де $U_{вх}$ – приведена до входу напруга зсуву операційного підсилювача;

$\Delta I_{вх}$ – різниця вхідних струмів зсуву опера-

ційного підсилювача (по інвертуючому та не інвертуючому входах).

Отримати лінійну залежність між зміною моменту сили, що спричиняє переміщення феромагнітного елемента розміщеного на валу електрогенератора, та вихідною напругою перетворювача 6 (рис. 4) можна, поєднавши вирази (11) та (19):

$$M = \frac{R'_2 / s}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{вх} + \Delta I_{вх} R_2. \quad (20)$$

Такий підхід дозволить збільшити чутливість вимірювального каналу за рахунок оптимального підбору опорів (рис. 5). Крім того, індуктивний сенсор є стійким до електромагнітних завад.

Моделювання вимірювального каналу з використанням отриманого виразу (19) було проведено в середовищі Matlab Simulink, розробивши блок-схему моделюючого комплексу (рис. 7), який дозволяє моделювати переміщення феромагнітного елемента вздовж котушок індуктивності. В результаті моделювання отримано вихідний сигнал, який змінюється пропорційно до переміщення стержня під дією моменту сили (рис. 7).

Разом з тим, враховуючи, що момент сили створює переміщення феромагнітного стержня, умовно таке переміщення було встановлено в межах ± 10 мм. Тому, вхідним параметром моделі є переміщення стержня, а вихідним напруга. Так, при поступальному збільшенні навантаження на вал залежність між переміщенням стержня та вихідною напругою перетворювача буде лінійною.

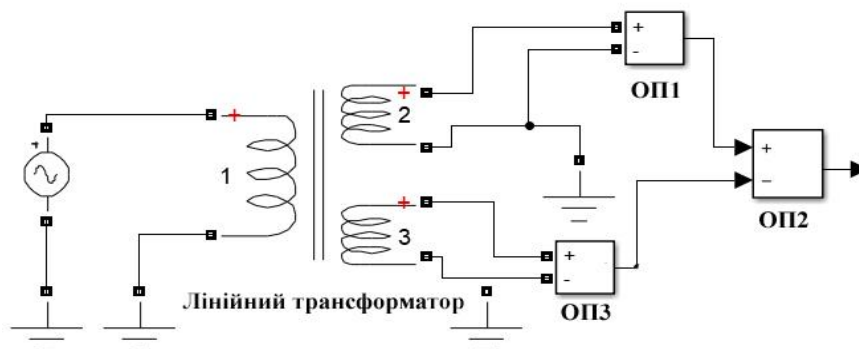


Рисунок 7 – Моделювання вимірювального каналу індуктивного перетворювача, оснований на операційних підсилювачах з інвертуючими каскадами

В результаті проведення моделювання отримані показники зміни напруги при поступальному переміщенні стержня лінійного перетворювача (0...10 мм) за період 20 с, в режимі розгону електрогенератора, показали наступну характеристику (рис. 8).

$$M = \frac{R'_2/s}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{\text{вх}} + \Delta I_{\text{вх}} R_2. \quad (20)$$

Такий підхід дозволить збільшити чутливість вимірювального каналу за рахунок оптимального підбору опорів (рис. 5). Крім того, індуктивний сенсор є стійким до електромагнітних завад.

Моделювання вимірювального каналу з використанням отриманого виразу (19) було проведено в середовищі Matlab Simulink, розробивши блок-схему моделюючого комплексу (рис. 7), який дозволяє моделювати переміщення феромагнітного елементу вздовж котушок індуктивності. В результаті моделювання отримано вихідний сигнал, який змінюється пропорційно до переміщення стержня під дією моменту сили (рис. 7).

Разом з тим, враховуючи, що момент сили створює переміщення феромагнітного стержня, умовно таке переміщення було встановлено в межах ± 10 мм. Тому, вхідним параметром моделі є переміщення стержня, а вихідним напруга. Так, при поступальному збільшенні навантаження на вал залежність між переміщенням стержня та вихідною напругою перетворювача буде лінійною.

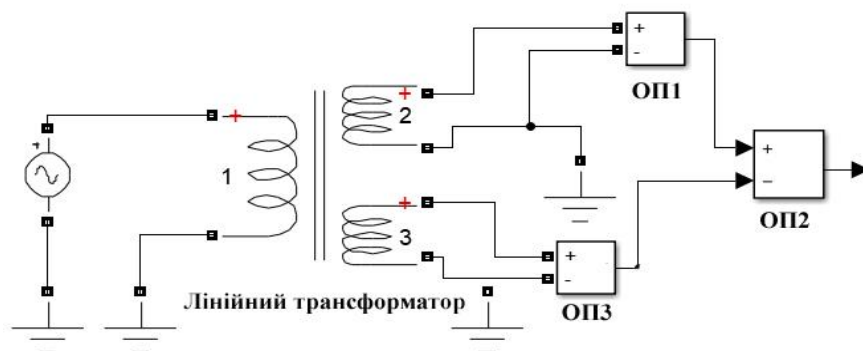


Рисунок 7 – Моделювання вимірювального каналу індуктивного перетворювача, основаного на операційних підсилювачах з інвертуючими каскадами та вихідної напруги.

Побудовано з використанням Matplotlib

В результаті проведення моделювання отримані показники зміни напруги при поступальному переміщенні стержня лінійного перетворювача (0...10 мм) за період 20 с, в режимі розгону електрогенератора, показали наступну характеристику (рис. 8).

Після проведення лінійного градування, залежність між обертовим моментом та переміщенням стержня може бути описана наступним чином:

$$M = W_\phi \omega \Phi = f(\delta), \quad (21)$$

де W_ϕ – число витків вимірювальної обмотки;

ω – частота напруги живлення;

Φ – амплітуда магнітного потоку;

δ – зазор між вихідним положенням сердечника та його поточним положенням.

Така залежність представлена на рис. 8.

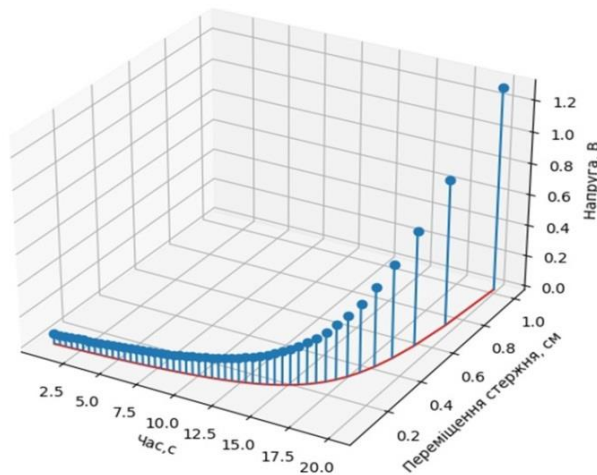


Рисунок 8 – Часові характеристики залежності переміщення стержня лінійного перетворювача

Так, попри лінійну залежність між зазначеними величинами, на рис. 9 показано змодельований вплив вібрацій, що присутні при обертанні валу електрогенератора, де спостерігається адитивна похибка.

Процес перетворення обертального моменту у вихідну напругу в режимі розгону валу електрогенератора, представлено на рис. 10.

В сталому режимі роботи, враховуючи змодельовану вібрацію, динаміка має наступні характеристики (рис. 11).

Отримані результати моделювання (рис. 11), були використані для визначення абсолютної похибки та середньоквадратичного відхилення.

Так, під час декількох спостережень, де здійснювалось 457 вимірювань обертального моменту, середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни моменту сили, склало 0,77.

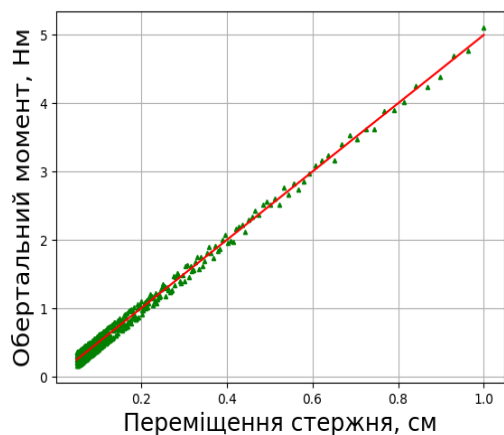


Рисунок 9 – Залежність між обертальним моментом та лінійним переміщенням стержня
Побудовано з використанням Matplotlib

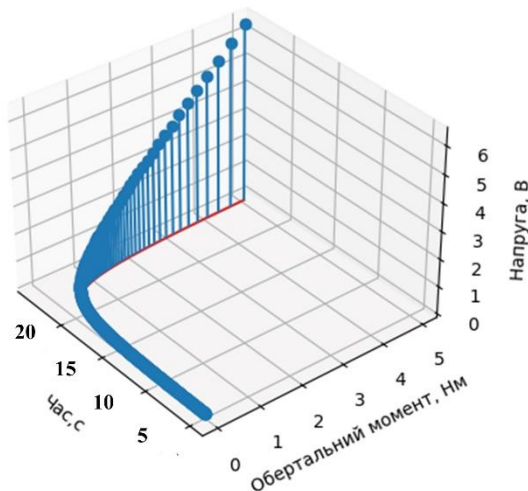


Рисунок 10 – Часові характеристики залежності обертального моменту та вихідної напруги.
Побудовано з використанням Matplotlib

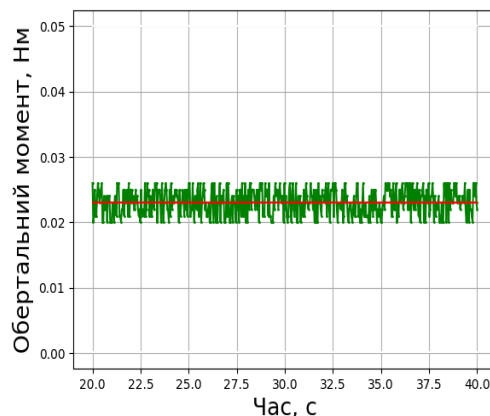


Рисунок 11 – Часові характеристики обертального моменту в сталому режимі роботи.
Побудовано з використанням Matplotlib

Середньоквадратичне відхилення кривої, що характеризує часові характеристики зміни обертального моменту, отримане за виразом:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}}, (\text{Н}\cdot\text{м}) \quad (22)$$

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}, \quad (23)$$

де: a_i – поточне значення обертального моменту;

$\bar{a}$ – середнє значення обертального моменту;

n – кількість спостережень проведених за один період часу (457 вимірювань).

Абсолютна похибка ΔA запропонованого вимірювального перетворювача з використанням LVDT лінійного трансформатора обчислена шляхом розрахунку похибок безпосередніх вимірювань з використанням коефіцієнта Стюдента при довірчій ймовірності 0,95.

Абсолютна похибка $\Delta A = 0,003$, визначена за наступним виразом:

$$\Delta A = t_{\gamma}, n-1 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n(n-1)}}, \quad (24)$$

де $t_{\gamma} = 0,95$ – довірчий інтервал;

a_i – поточне значення результату вимірювання;

$\bar{a}$ – середнє значення результатів вимірювань;

n – кількість вимірювань за один період.

В результаті, обертальний момент лежить в інтервалі від 0,020 до 0,026 з довірчою ймовірністю 95 %. $M = 0,023 \pm 0,003$ Н·м, в сталому режимі роботи.

Зважаючи на те, що отримані результати моделювання не враховують впливу тертя та температурних характеристик, дану модель можна вдосконалювати. Разом з тим, її застосування показало лінійну залежність зміни індуктивності LVDT під впливом моменту сили, яка діє на вал електрогенератора, що в подальшому дозволить проводити вимірювання обертального моменту з більш високою точністю.

Висновок

Запропонована модель вимірювального перетворювача у відповідності до електричної схеми (рис. 5) та математичної моделі (20), дозволила отримати лінійну залежність між обертальним моментом валу електрогенератора та вихідною напругою перетворювача, використовуючи параметри лінійного трансформатора та операційні підсилювачі.

Її тестування в сталому режимі, в програмному середовищі Matlab Simulink, дозволило отримати абсолютну похибку, яка знаходиться в інтервалі $\pm 0,003$ Н·м з довірчим інтервалом 95 %. Середнє значення вимірювальних результатів склало 0,023 Н·м.

Разом з цим, запропонована схема має недоліки, які обумовлені проблемою точності підбору її компонентів, що може суттєво вплинути на похибки результатів вимірювань.

Запропонований метод полягає у вимірюванні обертального моменту шляхом лінійного перетворення моменту сили, яка діє на феромагнітний стержень лінійного трансформатора, у вихідну напругу. Зразкова величина такої сили може бути регульована та доводиться до рівності з величиною, що вимірюється. При цьому вимірювальний прилад, який може бути побудований по такому принципу, буде мати високу чутливість, що закладена в індуктивних сенсорах відповідного типу.

Список використаних джерел

1. Кацман М. М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений. 3-е изд., испр. М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. 463 с.
2. Олейников А. М., Матвеев Ю. В., Канов Л. Н. Моделирование режима ветроэлектрической установки малой мощности. *Электротехника и электромеханика*. 2010. № 2. С. 16-20.
3. Олейников А. М., Матвеев Ю. В., Канов Л. Н., Зарицкая Е. И. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами. *Электротехника и электроэнергетика*. 2010. № 2. С. 62-67.
4. Войтенко В. А. Метод измерения индуктивности обмотки статора явнополюсного синхронного двигателя по продольной и поперечной осям обмотки возбуждения. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2012. № 6. С. 121-124.
5. Перминов Ю. Н., Монахов Е. А. Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2 (57). С. 54-60. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).54-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60).
6. Перминов Ю. Н., Коханевич В. П., Зинченко Т. В. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 2 (45). С. 45-49. URL: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/121>.
7. Фатеев Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки. М: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1948. 544 с.
8. Jian L. N., Chau K. T., Zhang D., Jiang J. Z. and Wang Z. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation. *Proceedings of 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA, 2007, pp. 573-580.
9. Dobzhanskyi O., Hossain Eklas, Amiri Ebrahim, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 44813-44822. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908348>
10. Яковлев А. И., Затучная М. А., Меркушев В. Н., Пашков В. Н. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах. Учеб. пособие по курсовому проектированию. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2003. 125 с.
11. Жадобин Н. Е. Магнитоупругие преобразователи в судовой автоматике. Л.: Судостроение, 1985. 36 с.
12. Жадобин Н. Е., Крылов А. П., Малышев В. А. Элементы и функциональные устройства

судовой автоматики: учебное пособие [2-е изд., перераб. и доп.]. СПб.: Элмор, 1998. 440 с.

13. Раянов Т. А. Обзор новых типов датчиков крутящего момента. *Транспортные системы и технологии*. 2020. № 1. С. 5-14.

References

1. Kacman M. M. *E'lektricheskie mashiny* [Electric machines]: Ucheb. dlya studentov sred. prof. uchebnykh zavedenij. 3-e izd., ispr. M.: Vyssh. shk.; Izdatel'skij centr «Akademiya», 2001. 463 s.
2. Olejnikov A. M., Matveev Yu. V., Kanov L. N. Modelirovanie rezhima vetroe'lektricheskoy ustanovki maloj moshhnosti [Modeling of the regime of a low-power wind power plant]. *E'lektro-texnika i e'lektromexanika*. 2010. № 2. S. 16-20.
3. Olejnikov A. M., Matveev Yu. V., Kanov L. N., Zarickaya E. I. Matematicheskaya model' avtonomnoj bezreduktornoj vetroe'lektricheskoy ustanovki na generatore s postoyannymi magnitami [Mathematical model of an autonomous gearless wind power plant based on a generator with permanent magnets]. *Elektrotehnika i elektroenerhetyka*. 2010. № 2. S. 62-67.
4. Vojtenko V. A. Metod izmereniya induktivnosti obmotki statora yavnopolyusnogo sinxronnogo dvigatelya po prodol'noj i poperechnoj osyam obmotki возбуждения [Method for measuring the inductance of the stator winding of a salient-pole synchronous motor along the longitudinal and transverse axes of the excitation winding]. *E'lektrotexnicheskie i komp'yuternye sistemy*. 2012. № 6. S. 121-124.
5. Perminov Yu. N., Monaxov E. A. Sravnenie variantov konstrukcij sinxronnykh generatortov s возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок [Comparison of design options for synchronous generators with excitation from permanent magnets for wind turbines]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2019. № 2 (57). S. 54-60. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).54-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60).
6. Perminov Yu. N., Koxanovich V. P., Zinchenko T. V. Algoritm rascheta sinxronnykh generatorov torcevoj konstrukcii s dvumya magnitnymi sistemami, raspolozhennymi po torcam statora, dlya vetroe'nergeticheskix ustanovok [Algorithm for calculation of synchronous generators of end structure with two magnetic systems located at the ends of the stator for wind power plants]. *Vidnovliuvana enerhetyka*. 2016. № 2 (45). S. 45-49. URL: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/121>.
7. Fateev E. M. *Vetrodvigateli i vetroustanovki*. [Wind motors and wind power plants] M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo sel'skoxozyajstvennoj literatury, 1948. 544 s.
8. Jian L. N., Chau K. T., Zhang D., Jiang J. Z. and Wang Z. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation. *Proceedings of 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA, 2007, pp. 573-580.
9. Dobzhanskyi O., Hossain Eklas, Amiri Ebrahim, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Prymak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 44813-44822. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908348>.
10. Yakovlev A. I., Zatuchnaya M. A., Merkushev V. N., Pashkov V. N. Raschet i proektirovanie vetroe'lektricheskix ustanovok s gorizonta'no-osevoj vetroturbinoj i sinxronnym generatorom na postoyannykh magnitax. [Calculation and design of wind power plants with a horizontal axis wind turbine and a permanent magnet synchronous generator]. Ucheb. posobie po kursovomu proektirovaniyu. Xar'kov: Nac. ae'rokosm, un-t «Xar'k. aviac. in-t». 2003. 125 s.
11. Zhadobin N. E. Magnitoupругie preobrazovateli v sudovoj avtomatike [Magnetoelastic converters in ship automation]. L.: Sudostroenie, 1985. 36 s.
12. Zhadobin N. E., Krylov A. P., Malyshev V. A. *E'lementy i funktsional'nye ustrojstva sudovoj avtomatiki: uchebnoe posobie* [Elements and functional devices of ship automation]. SPb.: E'lmor, 1998. 440 s.
13. Rayanov T. A. Obzor novyx tipov datchikov krutyashhego momenta. [Review of new types of torque sensors]. *Transportnye sistemy i tekhnologii*. 2020. № 1. S. 5-14.

Надійшла до редакції 10.06.2021

Г. Д. Братченко, д.т.н., М. О. Коптелов, Г. Г. Смаглюк, М. А. Мартинов

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МИТТЄВИХ ЧАСТОТ ТА ФАЗ КОМПОНЕНТ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО СИГНАЛУ

В роботі методом імітаційного моделювання отримані оцінки точності вимірювання миттєвої частоти та поточної фази кількох нестационарних частотно-модульованих компонент сигналу. Досліджувались методи вимірювання на основі короткочасного перетворення Фур'є та запропонованого методу з локальною адаптивною узгодженою фільтрацією компонент сигналу в частотній області у часовому ковзному вікні спостереження. Налаштування узгоджених фільтрів виконується окремо для кожної складової сигналу з поверненням у часову область та урахуванням налаштувань фільтра у попередньому часовому вікні. Отримані оцінки середніх квадратичних відхилень результатів вимірювань миттєвої частоти і поточної фази шляхом порівняння з їх відомими залежностями. Закони зміни частот компонент нестационарного сигналу обирались гармонічними, що дозволило також оцінити вплив нелінійності зміни миттєвої частоти на точність вимірювання.

Ключові слова: нестационарний сигнал, частотно-модульована компонента сигналу, короткочасне перетворення Фур'є, узгоджена фільтрація, вимірювання, миттєва частота, поточна фаза.

Г. Д. Братченко, д.т.н., М. А. Коптелов, Г. Г. Смаглюк, М. А. Мартынов

ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФАЗ КОМПОНЕНТ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО СИГНАЛА

В работе методом имитационного моделирования получены оценки точности измерения мгновенной частоты и текущей фазы нескольких нестационарных частотно-модулированных компонент сигнала. Исследовались методы измерения на основе кратковременного преобразования Фурье и предложенного метода с локальной адаптивной согласованной фильтрацией компонента сигнала в частотной области во временном скользящем окне наблюдения. Настройка согласованных фильтров выполняется отдельно для каждой составляющей сигнала с возвратом во временную область и учетом настроек фильтра в предыдущем временном окне. Получены оценки средних квадратических отклонений результатов измерений мгновенной частоты и текущей фазы по сравнению с их известными зависимостями. Законы изменения частот компонент нестационарного сигнала выбирались гармоническими, что позволило также оценить влияние нелинейности изменения мгновенной частоты на точность измерения.

Ключевые слова: нестационарный сигнал, частотно-модулированная компонента сигнала, кратковременное преобразование Фурье, согласованная фильтрация, измерение, мгновенная частота, текущая фаза.

H. D. Bratchenko, DSc, M. O. Koptielov, H. H. Smahliuk, M. A. Martynov

ACCURACY ESTIMATION OF MEASURING THE INSTANTANEOUS FREQUENCIES AND PHASES OF COMPONENTS OF THE MULTICOMPONENT NON-STATIONARY SIGNAL

Measurements of instantaneous frequencies and phases of non-stationary components of the multicomponent signals are actual in processing medical, radar, sonar, seismic, vibration, and speech signals. When we measure the parameters of multi-component non-stationary signals, it is a need to measure the instantaneous frequency and current phase of several non-stationary frequency-modulated signal components. In this article, estimates of the measurement accuracy of the specified parameters of the non-stationary signal components were obtained using the method of simulation modeling. Measurement methods based on the short-time Fourier transform and the proposed method with local adaptive matching filtering of signal components in the frequency domain in the time-sliding observation window were studied. Adjustment of matched filters is performed separately for each component of the signal, returning to the time domain

and taking into account the filter settings in the previous time window. The simulation method is used for the signal model consisting of three components. The first two components are the frequency modulated harmonic ones and the last is harmonic with constant frequency. The amplitudes of components and additive Gaussian noise variance were varied to study the influence of signal-to-noise ratio on the accuracy of measurements. Estimates of the experimental standard deviation of instantaneous frequencies and current phase measurements were obtained by comparing them with their known dependencies. The frequency laws of non-stationary signal components were chosen to be harmonic, which also allowed us to evaluate the influence of the nonlinearity of the instantaneous frequency change on the measurement accuracy. The results of differential phase measurements between two measurement channels are obtained to illustrate the quality of such ones for multi-component non-stationary signals situations. The results of this study may be useful for the development of imaging methods in inverse synthetic aperture radars (ISAR) and interferometric ISAR.

Keywords: non-stationary signal, frequency-modulated signal component, short-time Fourier transform, match filtering, measurement, instantaneous frequency, current phase.

DOI 10.32684/2412-5288-2021-2-19-48-62

Вступ

Випадкові нестационарні вимірювальні сигнали широко представлені в метрологічній практиці. В першу чергу, вони є випадковими завдяки наявності у суміші з квазидетермінованим корисним сигналом шумової складової, яка може бути як адитивною, так і мультиплікативною. Окрім цього, параметри корисного сигналу, який несе інформацію про вимірювану фізичну величину, також можуть бути змінними у часі як за детермінованим, так і за випадковим законом. Вимірювання цих параметрів виконується засобами вимірювань, які самі також є джерелом завад. Одним з прикладів сигналу з детермінованими змінними параметрами є частотно-модульований (ЧМ) сигнал, в якому корисна інформація закодована у законі зміни в часі миттєвої частоти (МЧ, англ. – Instantaneous Frequency – IF) сигналу. Вимірювана в радіолокаційних і гідроакустичних системах частота Допплера несе інформацію про радіальну швидкість руху цілі, просторове положення цілі та її елементів за результатами вимірювань МЧ або фази відбитого сигналу [1, 2]. В радіолокаційних системах із синтезуванням апертури за результатами таких вимірювань відновлюються двовимірні [3, 4] і тривимірні [5] радіолокаційні зображення (РЗ). Вимірювання МЧ застосовується у сейсмології для представлення сейсмічних сигналів [6]. Оцінювання МЧ, наприклад, використовується для виявлення вуглеводнів, оскільки нафтові та газові пласти можуть викликати аномалії в енергії та частоті сейсмічних сигналів [7], акустичних мовних сигналів, миттєві частоти яких несуть важливу інформацію для аналізу і розпізнавання мовлення [8]. Численні застосування вимірювань МЧ присутні в медицині. Наприклад, в електроенцефалограмі (ЕЕГ, англ. EEG) новонароджених оцінку МЧ використовують для виявлення, моделювання та

класифікації судом [9]. Для підвищення ефективності виявлення аномалій ЕЕГ багатоканальний аналіз МЧ компонент сигналу може комбінуватися з методами сегментації зображень, які отримуються за результатами часово-частотного (ЧЧ) аналізу сигналу [10]. Отримані результати вимірювань законів зміни МЧ компонент сигналів у розглянутих випадках є ознаками або застосовуються для отримання ознак розпізнавання об'єктів або ситуацій з метою подальшого прийняття рішень [10].

Спектральний аналіз є загальноприйнятим методом в метрологічній практиці, який реалізується в аналізаторах спектру та аналізаторах сигналів для виявлення особливостей сигналу на обмеженій часовій ділянці. Такими особливостями можуть бути: кількість компонент у складі сигналу, гармонічних та негармонічних, що може бути визначена за формою їх спектрів. При отриманні послідовності спектрів у ковзному часовому вікні додається можливість спостереження законів зміни оцінок МЧ та амплітуд, середньої частоти та закону зміни ширини спектру кожної з компонент, тобто реалізувати ЧЧ аналіз [11, 12]. При тривалому спостереженні нестационарних сигналів оцінки законів зміни МЧ часто отримуються на основі спектральних оцінок середньої частоти на порівняно короткій ділянці спостереження. При цьому для підвищення точності вимірювання МЧ тривалість вікна треба, з одного боку, зменшувати, щоб частоту сигналу на цій ділянці можна було б прийняти незмінною, а, з іншого боку, – збільшувати для підвищення роздільної здатності та забезпечення достатнього рівня відношення сигнал-шум. Тобто існує протиріччя, яке потрібно вирішувати на практиці, виходячи з характеру зміни параметрів вимірювального сигналу [11, 13].

Аналіз літератури

Найпоширенішим на практиці методом спектрального аналізу є перетворення Фур'є (ПФ, англ. Fourier Transform – FT) [14]. Метод є оптимальним, коли сигнал є сумішшю гармонік з кратними частотами і білого шуму. Якщо інформація про фізичний процес закладена в часових змінах миттєвих частот (МЧ) компонент спектральних складових сигналу, спектральний аналіз може бути застосований лише наближено на обмеженому часовому інтервалі (вікні спостереження), де можна нехтувати зміною частот компонент сигналу. Задля скорочення тривалості вікна при збереженні роздільної здатності за частотою описано значну кількість параметричних методів спектрального аналізу [14]. Кожен з них має переваги і недоліки пов'язані з відповідністю прийнятої моделі сигналу аналізованому сигналу. Для виявлення короткотривалих спотворень гармонічного сигналу, які є коротшими за його період, віконний спектральний аналіз є не придатним. Для вирішення таких задач застосовуються, наприклад, методи вейвлет-аналізу [15]. У випадку нестационарних сигналів із змінною у часі частотою з метою збільшення тривалості вікна аналізу застосовуються лінійні моделі зміни частоти (фаза такого сигналу відповідно має квадратичну залежність), а для більш складних сигналів – поліноміальні моделі більш високого порядку [3, 13]. Проблемним питанням щодо використання таких моделей є зростання обчислювальної складності налаштування фільтрів, яке виконується після попереднього розділення компонент сигналу із застосуванням, наприклад, короткочасного перетворення Фур'є (КЧПФ).

Часово-частотний (ЧЧ, англ. Time Frequency – TF) аналіз надає ефективні інструменти для аналізу нестационарних сигналів. Миттєва частота є одним з найважливіших параметрів у ЧЧ аналізі. Представлення МЧ, її вимірювання та зв'язок з фізичними величинами є ключовими темами аналізу нестационарних сигналів [11, 12, 16]. Вибір алгоритмів обробки сигналів залежить від апріорних знань про явище, що розглядається. Якщо у вибраному просторі представлення існує точна математична модель сигналу, для виділення та класифікації ознак можуть бути застосовані параметричні алгоритми обробки сигналів [3]. Однак для аналізу нестационарних сигналів часто не існує узгоджених параметричних моделей, за винятком дуже небагатьох особливих випадків. У [17] демонструються приклади параметричного представлення нестационарних сигналів різними моделями на основі ознак, які піддаються обчисленню. Нестационарні сигнали такі як перехідна характеристика системи, мовні

фонемі та сигнали електрокардіографа підлаштовуються за допомогою цих моделей на основі ознак. Таким чином, підхід моделювання на основі ознак може бути придатним для обробки сигналів на основі моделі.

В [18] аналізуються сучасні методи вимірювання МЧ ЧМ-компонент багатоконтактних нестационарних сигналів. Методи ґрунтуються на можливості розділення компонент сигналів у часовій, частотній або у часово-частотній площині (ЧЧП). Для цього ЧЧП поділяється на області, що відповідають окремим компонентам, і застосовується стандартний аналіз МЧ в цих областях. Ідеальна функція для оцінювання МЧ М-компонентного сигналу представляється зваженою сумою M δ -функцій, які матимуть лише M ненульових значень у певний момент часу, коли оцінка похідної фази дорівнює МЧ однієї з компонент. Такий підхід застосовується для ефективної реалізації алгоритмів обробки багатоконтактних сигналів, компоненти яких розділяються в ЧЧП [19, 20].

В [3, 21] представлені методи, які передбачають адаптацію до законів зміни МЧ компонент сигналу. Вони застосовуються за умови попереднього розділення компонент сигналу для подальшого уточнення їх частотних параметрів. При цьому методи спектрального аналізу можуть бути як лінійні, так і застосовувати квадратичні розподіли. В [22] розглядається локальне поліноміальне перетворення Фур'є (ЛППФ), включаючи його визначення, властивості, зв'язки з іншими перетвореннями, такими як КЧПФ, розподіл Вігнера-Вілля (Wigner-Ville distribution – WVD), функція невизначеності (ambiguity function, AF) AF і дробове ПФ (fractional Fourier transform – FrFT), які широко застосовуються для аналізу нестационарних сигналів. Проведене порівняння ЛППФ з ПФ, КЧПФ і розподілом Вігнера-Вілля показало перевагу ЛППФ в покращенні відношення сигнал-шум, що підтверджується теоретичним аналізом і комп'ютерним моделюванням. Надані результати порівняльного аналізу продуктивності використання різних методів, пов'язаних з локальним поліноміальним перетворенням, для сигналів, вбудованих в адитивний білий гаусівський шум, імпульсний шум і суміш адитивного білого гаусівського шуму та імпульсних шумів. Нарешті, розглядаються приклади застосування ЛППФ і обговорюються перспективи застосування ЛППФ в таких областях, як обробка музичних сигналів, видалення перешкод у зв'язку, аналіз висоти мови та формант, а також аналізу дисперсії хвиль Лемба.

В [23, 24] пропонується адаптивний метод для оцінювання МЧ компонент зашумлених не-

стаціонарних багатокомпонентних сигналів у поєднанні з методом оцінки тривалості компонентів на основі короточасної ентропії Ренні. Локалізація та розділення компонент здійснюється за допомогою методу двонаправленого відстеження та виділення компонентів, тоді як оцінка МЧ виконується за допомогою адаптивних алгоритмів, заснованих на правилі перетину довірчих інтервалів і правилі відносного перетину довірчих інтервалів. Отримані оцінки середньої абсолютної та середньої квадратичної похибки вимірювання МЧ компонент в залежності від відношення сигнал-шум. Аналогічний підхід, представлений в [25], ілюструється результатами застосування кількох методів часово-частотного аналізу (ЧЧА) для обробки суттєво нестационарних вібраційних сигналів обертових машин, які є неперервними, показують, що метод КЧПФ поступається іншим відомим методам ЧЧА: узагальненому Warblet перетворенню (GWT); синхронному перетворенню другого порядку (SSET) та запропонованому авторами методу GWT-SSET, який поєднує ці два методи ЧЧА. Перевірка цих методів виконана чисельно для однокомпонентних і багатокомпонентних нестационарних сигналів зі змінною МЧ та за результатами натурного експерименту. Для оцінювання концентрації ЧЧА та точності вимірювання МЧ використовувались квантовані показники ентропії Ренні та середньої відносної похибки відповідно. В той же час, суттєвою перевагою КЧПФ є значно менші обчислювальні витрати і можливість застосування алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Більш того, у разі багаторазового ковзного віконного обчислення дискретного ПФ можна застосовувати ітераційний алгоритм, який переважає за швидкістю відомі алгоритми ШПФ [26, 27].

В представлений статті розглядаються неперервні нестационарні сигнали з одним типом нестационарності – зі зміною у часі МЧ сигналу. Сигнал є сумішшю кількох компонент, закони зміни МЧ яких можуть бути різними. При цьому припускається можливість розділення компонент в частотній області на обмежених за часом ділянках спостереження із застосуванням КЧПФ.

Важливим завданням в окремих радіолокаційних застосуваннях також є вимірювання початкової фази та закону зміни поточної фази компонент нестационарного сигналу, а також міжканальної різниці фаз компонент нестационарного сигналу в приймальних каналах багатокаанальної системи [1, 5, 28].

Метою роботи є оцінювання точності вимірювання МЧ та поточних фаз ЧМ компонент нестационарного сигналу, а також різниці їх фаз в двох каналах методом імітаційного моделювання.

Завданнями дослідження є оцінювання:

точності вимірювання МЧ компонент нестационарного сигналу на основі метода КЧПФ та адаптивного локального поліноміального метода з налаштуванням в частотній області, що пропонується;

точності вимірювання поточної фази і різниці фаз між двома каналами.

Методи дослідження – методи вимірювання МЧ та фаз компонент нестационарного сигналу, метод імітаційного моделювання.

Основна частина

Імітаційна модель вимірювання МЧ та фаз компонент нестационарного сигналу

В подальшому, як і в більшості розглянутих вище робіт, МЧ сигналу чи будь-якої його компоненти сигналу $f(t)$ визначається як похідна за часом t від поточної фази відповідного аналітичного сигналу $z(t) = a(t)e^{-j\varphi(t)}$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad (1)$$

де $\varphi(t)$ – поточна фаза нестационарного сигналу, яку відповідно можна бути визначена інтегралом

$$\varphi(t) = 2\pi \int_0^t f(x)dx, \quad (2)$$

де t – поточний час.

Миттєва амплітуда сигналу $a(t)$ при імітаційному моделюванні вважається незмінною.

Із співвідношень (1), (2) видно, що для оцінювання закону поточної фази сигналу не важливо яким методом отримано закон зміни МЧ. Тобто методи ЧЧА з квадратичними розподілами також можуть застосовуватись для вимірювання поточної фази. Однак, виходячи з (1) і (2), початкова фаза сигналу буде втраченою.

В подальшому розглядається вимірювання МЧ та фаз низькочастотних цифрових сигналів методом імітаційного моделювання. Досліджуються методи КЧПФ та різновид ЛППФ, а також можуть одночасно досліджуватись й інші відомі та нові методи (рис. 1). Відповідні блоки умовно показані на рис. 1 штриховою лінією.

Короточасне (віконне) перетворення Фур'є (КЧПФ) є добре відомим методом ЧЧ аналізу нестационарних сигналів. У КЧПФ сигнал сегментується за часом шляхом застосування часового вікна певної форми. Тривалість вікна обирається достатньо короткою, щоб сигнал всередині вікна був наближеним до стаціонарного. В той же час

його тривалість є обернено пропорційною до частотної роздільної здатності. Тому при ЧЧ аналізі дуже коротке вікно бажано обирати при аналізі сигналів з високою частотою і швидкістю частотної модуляції (ЧМ) та сигналів, де нестационарність триває протягом короткого інтервалу. Оскільки КЧПФ зазвичай реалізується в цифровій області, період дискретизації аналого-цифрового перетворювача (АЦП) обмежує тривалість найкоротшого вікна. У разі необхідності кількість аналогічних каналів може бути збільшено. При реалізації КЧПФ застосовано алгоритм прискореного ітераційного обчислення послідовності ДПФ та фільтрації за Хеммінгом в частотній області детально описані в [26, 27].

Оператор візуалізації КЧПФ проєктує енергію сигналу в ЧЧП. Співвідношення для обчислення потужності сигналу для моменту часу t і частоти ω має вигляд [22]

$$STFT(s; t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \tau) h^*(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (3)$$

де $s(t)$ – сигнал, що підлягає аналізу;
 $h(t)$ – часове вікно, яке має обмежену тривалість;
 $\omega = 2\pi f$ – кутова частота;
 $*$ – знак комплексного спряження.

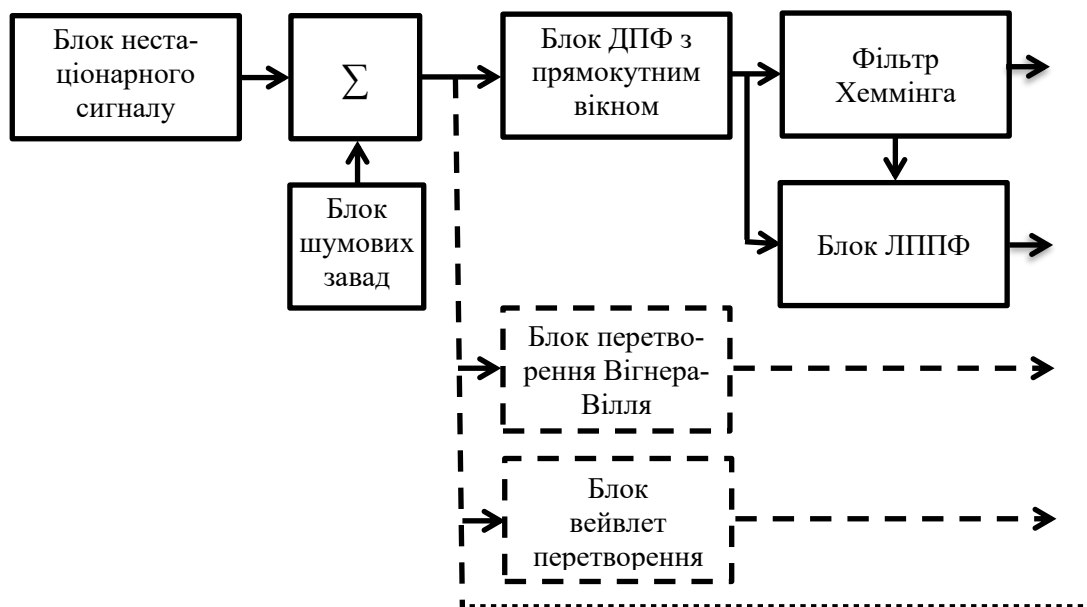


Рисунок 1 – Блок-схема імітаційної моделі для дослідження методів спектрального аналізу нестационарних сигналів (показано один вимірювальний канал)

При вимірюванні МЧ методом КЧПФ із застосуванням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) її значення наближено відповідають положенням максимумів піків в спектрі ДПФ. Ці частоти є оцінками МЧ у припущенні, що МЧ не змінюється у часі у вікні спостереження. Оскільки оцінка МЧ в спектрі може відхилятися від її істинного значення, при вимірюванні МЧ нестационарних сигналів ймовірно є методична похибка. Величина абсолютної похибки залежить від закону зміни МЧ у відповідному ковзному вікні.

У разі лінійного закону зміни МЧ її оцінка в спектрі ДПФ має наблизитись до середнього значення МЧ у вікні, тобто дорівнювати напівсумі початкового та кінцевого значень МЧ у часовому ковзному вікні. В той же час фаза цієї гармоніки у фазовому спектрі відповідатиме початковій фазі сигналу на початку відповідного

вікна, що потрібно урахувати при проведенні вимірювань.

На практиці для вимірювання МЧ компонент нестационарного сигналу потрібне виконання умови попереднього їх розділення компонент у ЧЧП. Одним із методів для покращення розділення ЧМ компонент є ЛППФ. Згідно [22] оператор ЛППФ можна записати як

$$LPPT(s; t, \vec{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \tau) h^*(\tau) e^{-j\theta(\tau, \vec{\omega})} d\tau, \quad (4)$$

де $\vec{\omega} = (\omega, \omega_1, \dots, \omega_{M-1})$ – вектор коефіцієнтів полінома фазового множника θ ;

$$\theta(\tau, \vec{\omega}) = \omega\tau + \omega_1 \frac{\tau^2}{2} + \dots + \omega_{M-1} \frac{\tau^{M-1}}{M-1};$$

M – порядок ЛППФ.

В подальшому припускається можливість обмеження степені полінома $\theta(\tau, \vec{\omega})$ другим

порядком, нехтуючи членами вищого порядку. Адаптивний ЛППФ другого порядку згідно [22] має вигляд (границі інтегрування є нескінченними, як у (3) і (4), і далі не позначаються)

$$LPPT_{\alpha}(s; t, \omega) = \int s(t + \tau) h^*(\tau) e^{-j\frac{\alpha(t)\tau^2}{2}} e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (5)$$

де $\alpha(t)$ – змінний у часі параметр, який відповідає швидкості зміни МЧ у момент часу t , і оцінюється за показником

$$\hat{\alpha}(t) = \underset{\alpha \in \Lambda}{\operatorname{argmax}} H(\alpha, t), \quad (6)$$

де Λ – область значень параметра α ;

$H(\alpha, t) = \int \frac{|LPPT_{\alpha}(t, \omega)|^2 d\omega}{(|LPPT_{\alpha}(t, \omega)|)^{3/2}}$ – одна з відомих мір концентрації [22].

В блоці ЛППФ (рис. 1) реалізовано обчислення за співвідношенням (5) в частотній області. Реалізація алгоритму для цифрових сигналів при цьому передбачає попереднє обчислення ДПФ з прямокутним вікном в частотній області згідно зі структурною схемою блоку ЛППФ (рис. 2). На рис. 2 умовно показано N каналів налаштування, в яких, на відміну від (6), передбачено також додаткове налаштування коефіцієнтів β . Їх зміна впливає на зсув спектра ЛЧМ складової, який далі комплексно спряжено перемножується зі спектром ДПФ відповідної компоненти нестационарного сигналу. Це дозволяє за результатами

налаштування не тільки вимірювати швидкість зміни частоти, але й обчислювати поправку до вимірної МЧ.

У блоці вимірювання та відслідковування частот компонент сигналу (ВВЧКС) визначаються максимуми компонент сигналу шляхом порівняння амплітуди кожної спектральної складової на виході обмежувача знизу, який усуває бічні пелюстки і шумові викиди, із сусідніми значеннями в спектрі.

На кожному наступному кроці виконання КЧПФ положення піків вимірюються та відслідковується зміна положення відповідних піків, які є близькими до піку на попередньому кроці. За результатами відслідковування будуються залежності зміни МЧ компонент нестационарного сигналу методом КЧПФ. При імітаційному моделюванні такі залежності далі порівнюються із заданими відовими законами МЧ компонент. Крім вимірювання МЧ, в блоці реалізується вимірювання поточної фази двома методами: вимірюванням фази відповідної гармоніки у фазовому спектрі та інтегруванням (методом трапецій) залежності МЧ у часі згідно співвідношення (2). Абсолютна похибка вимірювання фази також обчислюється як різниця отриманої експериментально залежності та заданої в імітованих сигналах.

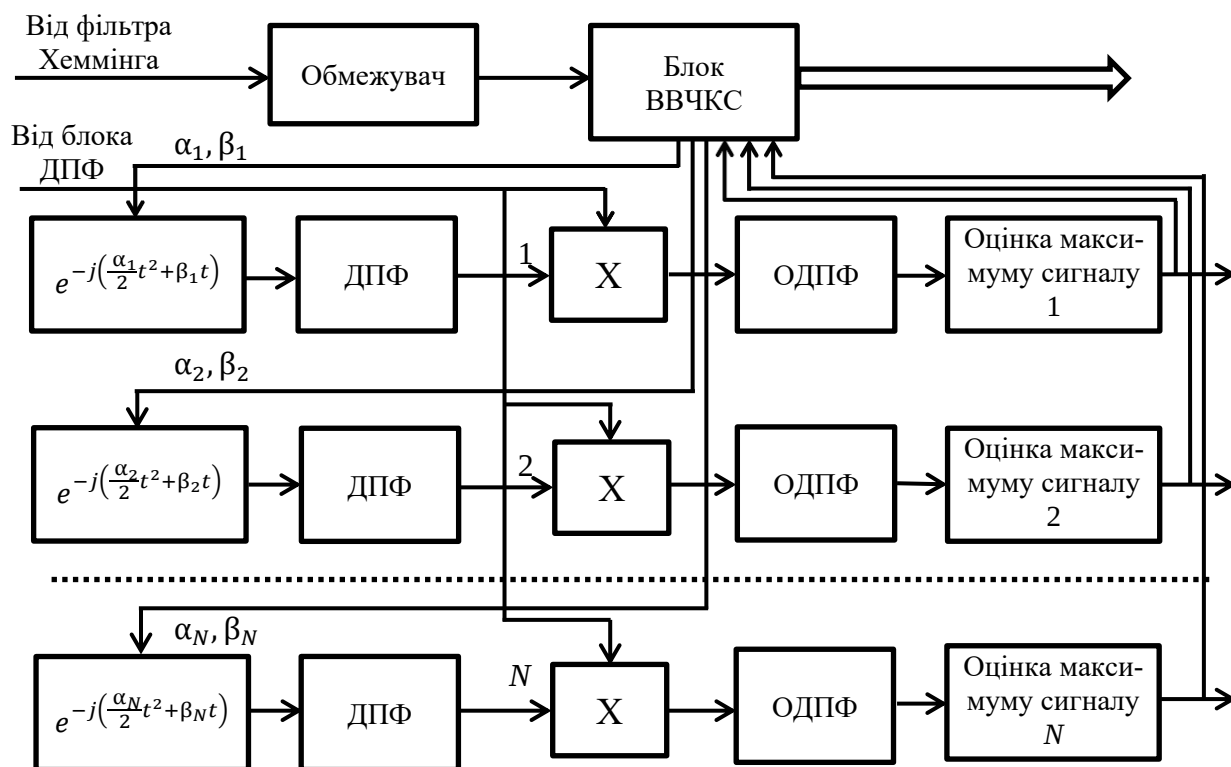


Рисунок 2 – Структурна схема блоку ЛППФ

Опорні сигнали з блоків відтворення фазових множників подаються в блоки ДПФ, в яких обчислюються амплітудно-фазові характеристики (АФХ) N фільтрів для відповідних значень швидкості ЛЧМ α_N та зсуву спектру β_N . Ці АФХ мають бути комплексно спряженими по відношенню до спектрів відповідних компонент сигналу. В блоках множення обчислюються добутки відповідних відліків АФХ та спектру ДПФ нестационарного сигналу, який був отриманий раніше. У блоках ОДПФ (оберненого дискретного перетворення Фур'є) обчислюються сигнали у часовій області після узгодженої фільтрації. В блоках оцінки максимуму сигналу знаходяться максимальні значення піків сигналів, за якими виконується налаштування коефіцієнтів α_i з використанням зворотного зв'язку та порівнянням цих значень з попередніми кроками налаштування у блоці ВВЧКС. При цьому при обранні початкових значень швидкості α_i враховуються результати вимірювань МЧ із застосуванням КЧПФ з вікном Хеммінга. Для цього обчислюється різниця оцінок МЧ на кінці та початку вікна спостереження та ділиться на значення його тривалості. Отримані початкові оцінки $\alpha_i^{(0)}$ в подальшому корегуються, як було описано раніше. Одночасно виконується налаштування коефіцієнтів β_i , початкове значення якого приймається рівним нулю. Слід зазначити, комплексні значення сигналів на виходах блоків ОДПФ також можуть бути застосовані для вимірювання різниці фаз між каналами у багатоканальній системі при відповідному налаштуванні.

Блок нестационарного сигналу призначений для відтворення залежності напруги нестационарного сигналу у часі. Модель сигналу являє собою адитивну суміш двох ЧМ сигналів с гармонічною модуляцією, одного гармонічного сигналу та гаусівського шуму. Імітований нестационарний сигнал є дискретною послідовністю комплексних відліків і має вигляд у першому

$$S_n = S_{1n} + S_{2n} + S_{3n} + a_{1n} + jb_{1n}, \quad (7)$$

та у другому вимірювальному каналі відповідно

$$Sa_n = Sa_{1n} + Sa_{2n} + Sa_{3n} + a_{2n} + jb_{2n}. \quad (8)$$

де компоненти сигналу задаються виразами

$$\begin{aligned} S_{1n} &= A_1 \cdot e^{j\left(2\pi t_n F_1 + \frac{2\pi a_1 F_1}{\Omega_1} \sin(\Omega_1 t_n)\right)}, \\ Sa_{1n} &= A_1 \cdot e^{j\left(2\pi t_n F_1 + \frac{2\pi a_1 F_1}{\Omega_1} \sin(\Omega_1 t_n) + Q_a\right)}, \\ S_{2n} &= A_2 \cdot e^{j\left(2\pi t_n F_2 + \frac{2\pi a_2 F_2}{\Omega_2} \sin(\Omega_2 t_n)\right)}, \\ Sa_{2n} &= A_2 \cdot e^{j\left(2\pi t_n F_2 + \frac{2\pi a_2 F_2}{\Omega_2} \sin(\Omega_2 t_n) + Q_a\right)}, \end{aligned}$$

$$S_{3n} = A_3 e^{j(2\pi t_n F_3)};$$

$$Sa_{3n} = A_3 e^{j(2\pi t_n F_3 + Q_a)},$$

в яких F_1, F_2, F_3 – постійні складові МЧ компонент сигналу; A_1, A_2, A_3 – амплітуди компонент сигналу; Ω_1 – частота однотонової кутової модуляції; a_1, a_2 – індекси модуляції першої та другої компонент сигналу; Q_a – різниця фаз між відповідними компонентами сигналу у разі застосування двох каналів для вимірювання параметрів нестационарного сигналу; $t_n = n \cdot \Delta t$ – n -й часовий відлік сигналу при періоді дискретизації Δt ; j – уявна одиниця.

Фази ЧМ компонент сигналу у моделі сигналу (7) і (8) обчислені згідно з (2) при МЧ $f_1(t) = F_1 + a_1 F_1 \cos(\Omega_1 t)$ та $f_2(t) = F_2 + a_2 F_2 \cos(\Omega_1 t)$ відповідно.

Блок шумових завад призначений для імітування внутрішнього шуму вимірювального каналу. Шуми є стаціонарним дельта-корельованим гаусівським процесом, математичне сподівання якого дорівнює нулю, а середнє квадратичне відхилення (СКВ) σ задається для відтворення потрібного рівня шуму. Відношення сигнал-шум в децибелах оцінюється при моделюванні окремо для кожної i -ї компоненти нестационарного сигналу за формулою

$$Sh_i = 20 \lg \left(\frac{A_i}{\sigma \sqrt{2}} \right), \quad (9)$$

Відліки шуму в обох вимірювальних каналах є комплексними числами виду $b_n + jc_n$. Числові значення b_n і c_n задаються двома незалежними датчиками випадкових чисел розподілених за нормальним законом $N(0, \sigma)$. Такий датчик, наприклад, входить до складу програмного середовища Mathcad у вигляді підпрограми-функції $\text{norm}(K, m, \sigma)$, в якій K – розмірність вектору відліків на виході датчика, m, σ – математичне сподівання та СКВ відповідно.

Для оцінювання точності результатів вимірювань отриманих методом імітаційного моделювання обчислюються оцінки експериментального СКВ при їх порівнянні з відомими залежностями та у порівнянні з вибірковою середньою вимірюваної величини, а також в деяких випадках застосовується оцінка СКВ середнього арифметичного. Застосовуються відповідні співвідношення наведені в теорії математичної статистики та, наприклад, в п. 5.13 стандарту ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення.

Імітаційне моделювання вимірювань МЧ та фаз компонент нестационарного сигналу виконувались для наступних вихідних даних:

тривалість запису сигналу – 16 с;
частота дискретизації сигналу – 128 Гц;
кількість отриманих відліків на ділянці спо-

стерезення – 2048;

період дискретизації $T_r = 1/128$ с;

параметри сигналів в формулах (7) в (8) наступні:

частоти $F_1 = 10$ Гц, $F_2 = 40$ Гц, $F_3 = 60$ Гц;

$\Omega_1 = \Omega_2 = 0,5\pi$ Гц;

індекси однотонової ЧМ $a_1 = 0,3$, $a_2 = 0,3$;

відношення сигнал-шум для першої компоненти 3 дБ, для другої – 19 дБ; для третьої компоненти 14,5 дБ;

тривалість ковзного вікна обралася рівною 0,5 с, за цей час отримуються 64 відліки сигналу.

Для підвищення точності вимірювання частот складових в спектрі послідовність відліків в кожному вікні доповнювалась до 256, що відповідає тривалості спостереження 2 с та дискретності відліків в спектрі ДПФ – 0,5 Гц.

У другий вимірювальний канал подається аналогічний нестационарний сигнал із фазовим зсувом кожної з компонент $Q_a = 0,4$. В позначеннях на рисунках додаткова буква a вказує на приналежність другому каналу.

На рис. 3 представлені спектри ДПФ нестационарного сигналу у двох вікнах спостереження розділених інтервалом 200 відліків, тобто за часом на 1,5625 с.

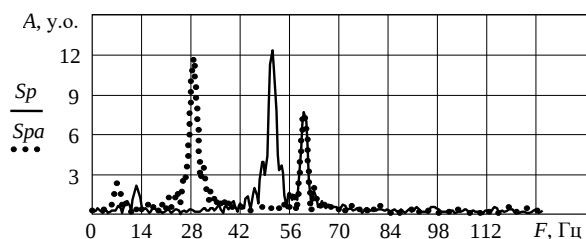


Рисунок 3 – Спектри віконного ДПФ на ділянках з відліками: 0-64 – суцільна лінія; 200-264 – точкова лінія

З рис. 3 видно, що третя (гармонічна) компонента сигналу залишається практично в тому ж положенні, тоді як дві інші мають помітний зсув по відношенню до попереднього положення. Крім цього, окрім трьох очікуваних піків, спостерігаються бічні пелюстки значного рівня та викривлення форми окремих піків за рахунок зміни МЧ. Такі зміни викликають розширення піка та появу додаткових максимумів, які при вимірюваннях можуть бути сприйняті за складову спектра.

Застосування фільтра Хеммінга (вікна Хеммінга) дозволяє суттєво зменшити рівень бічних пелюсток піків (рис. 4) [14]. Крім цього, піки стають більш симетричними і практично зникають додаткові пелюстки, які характерні для спектра ЛЧМ сигналу з прямокутною обвідною та для випадку нелінійної зміни частоти компонен-

ти сигналу у вікні спостереження.

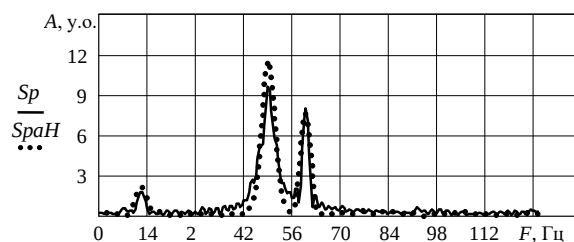


Рисунок 4 – Спектр ДПФ на ділянці 25-89 з прямокутним вікном (суцільна лінія) та із застосуванням вікна Хеммінга (точкова лінія)

Для виключення впливу шумів та залишкових спотворень вводиться поріг для обмеження спектра сигналу знизу (при моделюванні поріг обирався на рівні 0,1 від максимального значення) (рис. 5). Після виконання попередньої обробки виконується вимірювання МЧ компонент сигналу за положеннями максимумів піків в спектрі нестационарного сигналу.

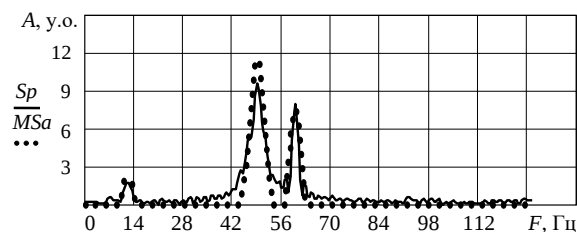


Рисунок 5 – Спектр ДПФ (рис. 4) після введення обмеження знизу в другому каналі (пунктирна лінія)

Результати вимірювань представлені графіками зміни оцінок МЧ у порівнянні із заданими законами зміни МЧ $f_1(t)$ та $f_2(t)$ для першої та другої компонент сигналу (рис. 6, а, б).

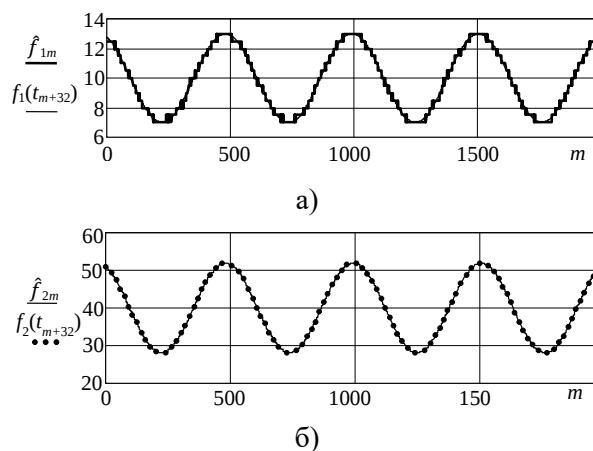


Рисунок 6 – Закони зміни МЧ за результатами вимірювань у порівнянні із заданими в моделі: а) для першої компоненти; б) для другої компоненти

На рис. 6 відліки теоретичних залежностей $f_1(t)$, $f_2(t)$ показані, починаючи з 32 відліку. Саме в цьому випадку вони є найближчими до результатів вимірювань МЧ. Це пояснюється тим, що виміряні в кожному часовому вікні частоти фактично є деякими середніми значеннями змінної МЧ на цьому інтервалі. Тому в першому вікні отримуються наближенні оцінки МЧ в середині інтервалу, тобто на 32 відліку, що за часом відповідає 0,25 с.

Вимірювання частоти третьої компоненти сигналу (гармоніки з постійною частотою) давало незмінний результат 60 Гц, однак така картина порушувалася при введенні незначного зсуву частоти (59,7 Гц). При цьому результатами вимірювань є два сусідніх за шкалою значення 59,5 Гц або 60 Гц, середнє арифметичне значення складало близько 59,52 Гц за 1984 вимірюваннями, а СКВ 0,206 Гц при порівнянні із заданою частотою 59,7 Гц. В той же час експериментальне СКВ складає 0,108. При цьому теоретичну оцінку СКВ пропонується обчислити як $\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, де σ_1 – СКВ за рахунок впливу внутрішніх шумів, σ_2 – СКВ за рахунок дискретності вимірювальної шкали. У припущенні, що після застосування вікна Хеммінга компонента сигналу матиме форму колокольного імпульсу з гармонічним заповненням і тривалістю ковзного вікна τ_w , обчислимо σ_1 за формулою $\sigma_1 = 1/q\tau_w\sqrt{\pi}$, де $q = \frac{A_3}{\sigma}$ [29]. Друга складова є СКВ рівномірного розподілу $\sigma_2 = \Delta F/2\sqrt{3}$, де ΔF – дискретність відліків у спектрі сигналу. Тоді для умов експерименту буде $\sigma_1 = 0,15$ Гц, $\sigma_2 = 0,144$ Гц і $\sigma_\varepsilon = 0,208$ Гц, яке є близьким до СКВ 0,206 при порівнянні із відомою частотою. При збільшенні відношення сигнал-шум до 19 дБ отримаємо $\sigma_1 = 0,09$ Гц і $\sigma_\varepsilon = 0,17$ Гц. Однак за результатами імітаційного моделювання СКВ складало 0,201 Гц. Таким чином є очевидним, що при подальшому збільшенні відношення сигнал-шум розподіл похибки наблизатиметься до рівномірного, тобто буде $\sigma_\varepsilon = \sigma_2$, а виміряна частота буде майже завжди 59,5 Гц.

Порівняння результатів вимірювань МЧ з теоретичними залежностями на рис. 6 за їх різницею дає оцінки абсолютної похибки вимірювань МЧ, які представлені на рис. 7, а, б для перших 512 часових відліків. З рисунків видно, що закони для обох компонент є подібними, мають ділянки близькі до лінійної залежності та такі, де закон зміни похибки є помітно нелінійним. На цій ділянці похибка поступово наближається до нуля. Діапазон зміни похибок для першої та другої компонент $(-0,48, 0,51)$ Гц та $(-0,39, 0,39)$ Гц відповідно. Тобто відмінність не є суттєвою,

хоча відношення сигнал-шум для першої компоненти 3 дБ, а для другої – 19 дБ.

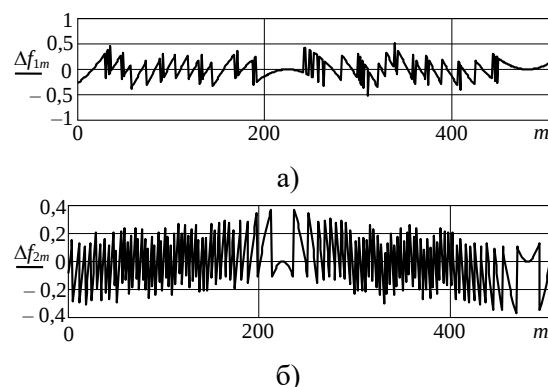


Рисунок 7 – Залежності абсолютної похибки вимірювань МЧ компонент нестационарного сигналу: а) першої; б) другої

При відношенні сигнал-шум 19 дБ для першої компоненти абсолютна похибка вимірювання є близькою до обумовленої періодом дискретизації й лише незначно перевищує в окремих точках значення 0,25 Гц, і не перевищує 0,3 Гц (рис. 8).

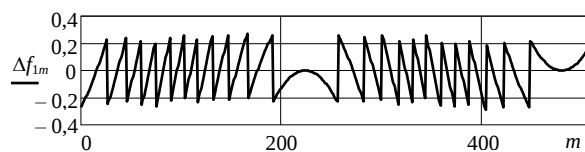


Рисунок 8 – Залежність абсолютної похибки вимірювань МЧ першої компоненти нестационарного сигналу

При такому співвідношенні розрахункове СКВ складає $\sigma_\varepsilon = 0,17$ Гц ($\sigma_1 = 0,09$ Гц, $\sigma_2 = 0,144$ Гц). Однак, вибіркове СКВ є близьким до 0,14 Гц, що навіть менше за складову σ_2 . При відношенні сигнал-шум 3 дБ різниця між розрахунковим і експериментальним значеннями є ще більшою: розрахунок – 0,58 Гц та моделювання – 0,17 Гц. Тобто вплив шумової складової є не таким суттєвим, як очікувалось, очевидно, завдяки впливу попередньої обробки.

Для другої компоненти помітною особливістю є поступове зростання та відповідно убуття абсолютної похибки після досягнення мінімального значення біля 224 відліку, де швидкість зміни МЧ у вікні є близькою до нуля (рис. 7, б). При цьому при відношенні сигнал-шум 19 дБ середнє значення похибки на всій ділянці спостереження має порядок 10^{-3} , оцінка СКВ абсолютної похибки відносно нуля складала 0,16 Гц (розрахункова – 0,17 Гц). Результати порівняння при менших відношеннях сигнал-шум: 9 дБ – СКВ 0,28 Гц (0,32 Гц); 6 дБ – СКВ 0,24 дБ

(0,43 Гц); 3 дБ – СКВ 0,26 дБ (0,58 Гц).

Слід зазначити, що при вимірюваннях на окремих реалізаціях шумів при відношеннях сигнал-шум 3 і 6 дБ спостерігалися аномальні похибки при вимірюваннях частот F_2 та F_3 , які мають усуватись при обробці результатів вимірювань.

Для отримання закону зміни поточної фази сигналу в моделі застосовується алгоритм обчислення різниці фаз між n -м та $(n-1)$ -м комплексними відліками відповідної спектральної складової КЧПФ, яка обрана для оцінювання МЧ на n -му та $(n-1)$ -му кроках,

$$Ph_n = Ph_{n-1} + \arg(Sp_n e^{j\varphi_n} \cdot Sp_{n-1} e^{-j\varphi_{n-1}}), \quad (10)$$

де Ph_n – n -й відлік поточної фази;

φ_n, Sp_n – фаза і амплітуда складової спектру відповідної компоненти сигналу на n -му кроці;

$\arg(*)$ – функція для обчислення фази комплексного відліку з інтервалом однозначності $(-\pi, \pi)$.

Побудований згідно алгоритму (10) закон зміни поточної фази є близьким до заданого в моделі (7), (8) (рис. 9).

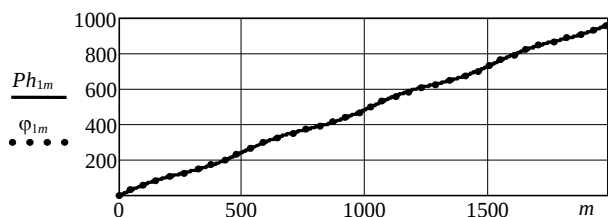


Рисунок 9 – Закони зміни поточної фази першої ЧМ компоненти сигналу за результатами імітаційного моделювання за алгоритмом (9) (неперервна лінія) та теоретична залежність (точкова лінія)

Залежності абсолютної похибки вимірювань поточної фази наведені на рис. 10, а, б як різниця експериментальних за результатами імітаційного моделювання та теоретичної для першого та другого вимірювальних каналів. Видно, що похибки вимірювань лежать в границях $\pm 1,8$, тобто можуть перевищувати 103 градуси (рис. 10, а), що веде до обмежень з практичного застосування таких оцінок.

Середнє квадратичне відхилення закону зміни поточної фази першої ЧМ компоненти сигналу порівняно з її теоретичною залежністю є середнім значенням $M=1984$ відліків на рис. 10, а, б. Воно складає для першого каналу 0,593, а для другого – 0,608 радіан. В той же час помітна періодична складова в обох каналах. Різниця фазових залежностей Pha_{1m} та Ph_{1m} не має такої періодичності (рис. 10, в). Це дає можливість вимі-

рювати різницю фаз між двома каналами з доволі високою точністю. Різниця фаз, яку задано при моделюванні складає $Q_a = 0,4$. Середнє арифметичне значення результатів вимірювань різниці фаз $\Delta\phi_{1m}$ дає оцінку $\overline{Q_a} = 0,3906$, її вибіркове СКВ складає $S_{Q_a} = 0,0995$. При цьому СКВ оцінки $\overline{Q_a}$ обчислене згідно співвідношення $S_{\overline{Q_a}} = S_{Q_a} / \sqrt{M}$ складало $2,234 \cdot 10^{-3}$.

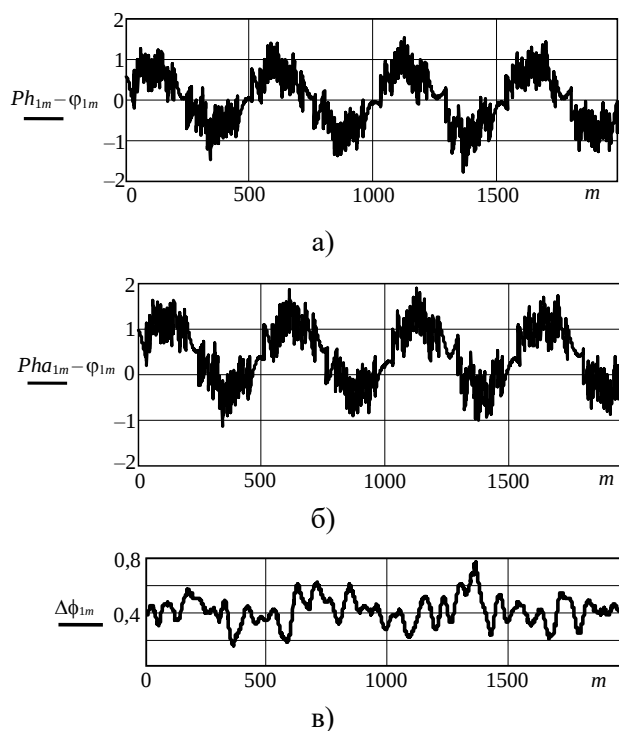


Рисунок 10 – Залежності абсолютної похибки вимірювання поточної фази першої ЧМ компоненти за алгоритмом (9): а) в першому; б) в другому вимірювальних каналах; та в) різниці між залежностями б) і а)

Слід зазначити, що вимірювання різниці фаз компонент сигналів між каналами можна реалізувати без розгортання поточної фази. Кожен відлік $\Delta\phi_{s1m}$ в цьому випадку дорівнює

$$\Delta\phi_{s1m} = \arg(Spa_m e^{j\varphi_{a_m}} \cdot Sp_m e^{-j\varphi_m}), \quad (11)$$

де Spa_m, φ_{a_m} – амплітуда і фаза складової спектру відповідної компоненти сигналу в другому каналі на m -му кроці. Результати вимірювань за алгоритмом (11) відрізняються від поданих на рис. 10, в на величину порядку 10^{-12} , якою на практиці можна нехтувати.

При вимірюванні поточної фази другої компоненти за фазовим спектром ДПФ та її розгортанням за алгоритмом (10) виникає неоднозначність, оскільки похибки вимірювання викликають перевищення границь діапазону однозначності $(-\pi, \pi)$ функції $\arg(*)$. Це відбувається за-

вдяки впливу власних шумів вимірювального каналу, завдяки впливу яких потенційне СКВ вимірювань фази є обернено пропорційним до пікового відношення сигнал-шум $\sigma_\phi = 1/q$ [29]. Для другої компоненти $q = A_2/\sigma = 12,5$ і $\sigma_\phi = 0,08$. І хоча максимальне значення зсуву фаз між сусідніми відліками другої компоненти складає 2,553 і похибка σ_ϕ не надто велика, щоб порушити умову однозначності, на практиці перевищення значення π має місце (рис. 11). На рис. 11 представлені закони зміни різниці фаз в m -й та $(m-1)$ -й відліки фази зсунуті за часом на період дискретизації.

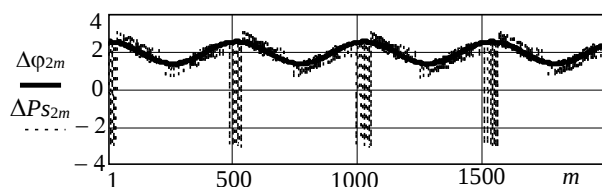


Рисунок 11 – Залежності зсуву поточної фази за період дискретизації теоретична (суцільна лінія) та експериментальна (точкова лінія) для другої ЧМ компоненти

Для усунення неоднозначності алгоритм розгортання поточної фази має урахувувати можливість перевищення однозначності ($-\pi$, π). Після такого урахування отримана експериментальна залежність поточної фази подібна до наведеної на рис. 9. Похибками вимірювань при цьому в границях $\pm 3,65$ відносно теоретичної залежності, а вибіркове СКВ близько 2,32. В той же час, результати вимірювання різниці фаз між сигналами другої компоненти в другому та першому каналах дають середню арифметичну оцінку $\overline{Q_a} = 0,4047$, а її вибіркове СКВ складає $S_{Q_a} = 0,0203$. При цьому СКВ оцінки $\overline{Q_a}$ згідно співвідношення $S_{\overline{Q_a}} = S_{Q_a}/\sqrt{M}$ складає $4,56 \cdot 10^{-4}$.

За результатами вимірювання МЧ закон зміни поточної фази може бути обчислений за формулою (2) методом чисельного інтегрування закону вимірюної МЧ. В цьому випадку втрачається інформація про початкову фазу, але може бути оцінений закон зміни поточної фази, починаючи з 33 відліку за часом (середина ковзного вікна). Отримані залежності для першої та другої ЧМ компонент порівнюються із заданими теоретичними законами після усунення постійного зсуву (він є близьким до ϕ_{32}) (рис. 12).

Отримані наступні показники точності оцінювання законів зміни поточних фаз ЧМ компонент: для першої компоненти оцінка початкового зсуву фази на момент 32 відліку – 20,25 ($\phi_{32} = 20,30$), СКВ – 0,1113; для другої відповідно

80,9125 ($\phi_{32} = 81, 2007$) та СКВ – 0,2368. Точність таких оцінок законів поточних фаз ЧМ компонент майже на порядок вище порівняно з вимірюваннями поточних фаз за фазовим спектром, для яких СКВ для першої компоненти 0,593, а для другої – 2,32. На рис. 12, б помітною є періодична складова, яка відповідає гармонічному закону ЧМ. Таким чином із збільшенням частоти компоненти сигналу зростає методична складова абсолютної похибки.

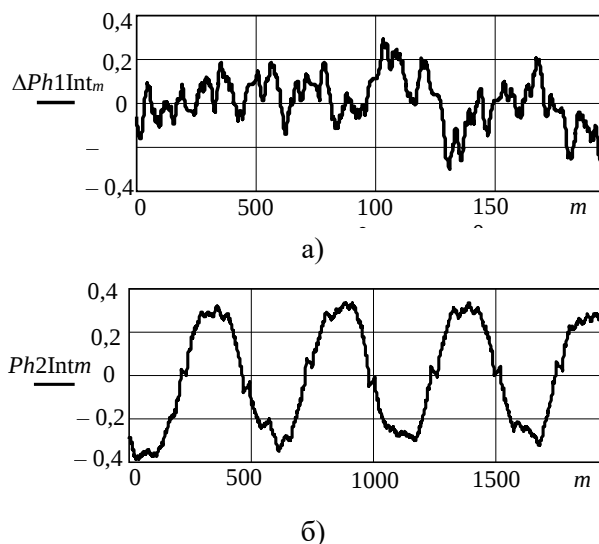


Рисунок 12 – Різниця законів вимірюної поточної фази та заданої в моделі: а) для першої ЧМ компоненти; б) для другої ЧМ компоненти

Останнім завданням, яке вирішується в роботі, є імітування ЛППФ з поліномом другого порядку з метою дослідження можливості підвищення точності вимірювання МЧ та швидкості її зміни. На рис. 13 представлені залежності абсолютних похибок вимірювань частоти другої компоненти $f_2(t) = F_2 + a_2 F_2 \cos(\Omega_1 t)$ при $F_2 = 30$ Гц на обмеженій ділянці спостереження від 200 до 512 часового відліку. За таких умов СКВ вимірювань МЧ методом КЧПФ склало 0,153 Гц, методом ЛППФ – 0,122, тобто зменшується на 20 %.

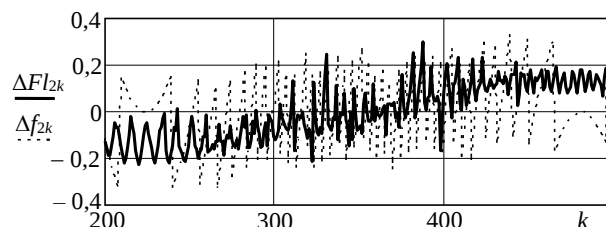


Рисунок 13 – Залежність абсолютної похибки вимірювання частоти другої із застосуванням ЛППФ (суцільна лінія) та КЧПФ (пунктирна лінія) при відношенні сигнал-шум 19 дБ

Оцінка швидкості зміни частоти α_2 порівняно з її теоретичною залежністю γ_2 показує коректність отриманих оцінок (рис. 14) за алгоритмом ЛППФ.

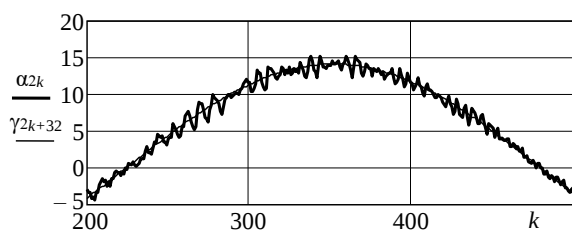


Рисунок 14 – Залежність швидкості зміни частоти α_2 отримана із застосуванням ЛППФ та теоретична залежність швидкості γ_2 при відношенні сигнал-шум 19 дБ

Оцінка залежності МЧ для першої компоненти представлена на рис. 15. Вона краще, ніж для другої компоненти: СКВ результатів вимірювання Методом ЛППФ 0,047 Гц, для метода КЧПФ – 0,13 Гц, тобто зменшується на 63,6 %.

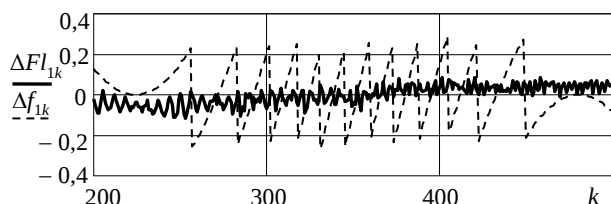


Рисунок 15 – Залежність абсолютної похибки вимірювання МЧ першої компоненти із застосуванням ЛППФ (суцільна лінія) та КЧПФ (пунктирна лінія) при відношенні сигнал-шум 19 дБ

Слід також зазначити, що при збільшенні МЧ компоненти і діапазону її зміни зростає методична похибка при оцінюванні частоти (рис. 13). Так при частоті $F_2 = 40$ Гц СКВ абсолютної похибки навіть збільшилося приблизно на 4 %. Її зростання може бути дещо зменшене, якщо вносити половину оціненої да методом ЛППФ правки частоти до оцінки за КЧПФ. В цьому випадку, наприклад для оцінки на рис. 13, СКВ

Таким чином, реалізація процедури налаштування алгоритму ЛППФ в частотній області порівняно є працездатною. Вона дозволяє практично усунути взаємний вплив компонент сигналу при налаштуванні в часовій області (5) [18]. Обмеженням методу є вимога до лінійності законів зміни МЧ компонент сигналу. Нелінійність зміни МЧ компоненти сигналу веде до появи методичної похибки. Тому відповідні узгоджені

фільтри мають налаштовуватись на ЧМ більш високого порядку, ніж лінійна, але ускладнення алгоритму такого налаштування робить проблематичною доцільність його реалізації алгоритму в частотній області. Слід також зазначити, що при зменшенні відношення сигнал-шум запропонований різновид алгоритму ЛППФ може давати хибні оцінки з оцінювання швидкості зміни частоти. При цьому похибки метода стають більшими, ніж при застосуванні КЧПФ.

Висновки

В роботі методом імітаційного моделювання отримані оцінки точності вимірювання МЧ та поточних фаз компонент нестаціонарного сигналу з гармонічною ЧМ, а також різниці їх фаз в двох каналах.

Оцінки точності вимірювання МЧ компонент нестаціонарного сигналу отримані із застосуванням метода КЧПФ та адаптивного метода локального поліноміального перетворення Фур'є (ЛППФ) з налаштуванням в частотній області, що пропонується. За результатами моделювання отримані оцінки СКВ для компонент з гармонічною ЧМ з середніми частотами 10 Гц, 30 Гц при заданих відношеннях сигнал-шум 3 дБ та 19 дБ. Показано, що діапазон зміни похибок для першої та другої компонент $(-0,48, 0,51)$ Гц та $(-0,39, 0,39)$ Гц відповідно. Оцінка СКВ абсолютної похибки відносно нуля складала при відношенні сигнал-шум 19 дБ для другої ЧМ компоненти 0,16 Гц. При менших відношеннях сигнал-шум: 9 дБ – СКВ 0,28 Гц; 6 дБ – СКВ 0,24 дБ; 3 дБ – СКВ 0,26 дБ, їх значення виявилися меншими за теоретично очікувані.

наведені оцінки точності вимірювання поточної фази і різниці фаз між двома каналами для компонент з гармонічною ЧМ з середніми частотами 10 Гц, 30 Гц при заданих відношеннях сигнал-шум 3 дБ та 19 дБ вказують на можливість вимірювання постійної різниці фаз з допустимою похибкою. Так, результати вимірювання різниці фаз між сигналами другої компоненти в другому та першому каналах дають середню арифметичну оцінку $\overline{Q_a} = 0,4047$ за 1984 відліками при заданому значенні 0,4, а її вибіркове СКВ складає $S_{Q_a} = 0,0203$. Середнє арифметичне значення результатів вимірювань різниці фаз для першої ЧМ компоненти дає оцінку $\overline{Q_a} = 0,3906$ та вибіркове СКВ $S_{Q_a} = 0,0995$.

Показано, що при оцінюванні поточної фази шляхом її розгортання за виміряними фазовими спектрами КЧПФ відповідної ЧМ компоненти сигналу абсолютні похибки є значно більшими, ніж при отриманні закону зміни поточної фази методом інтегрування закону зміни МЧ. Так для другої компоненти абсолютні похибки результа-

тів вимірювань знаходяться в границях $\pm 3,65$ відносно теоретичної залежності, а вибіркове СКВ складає близько 2,32. Тоді як при оцінці поточної фази методом інтегрування закону зміни МЧ СКВ дорівнює 0,2368, тобто є на порядок меншою. Недоліком другого методу, однак, є втрата інформації про початкові фази, що виключає можливість вимірювання різниці фаз між каналами. В той же час можна припустити можливість комбінування обох методів з метою підвищення точності оцінювання закону зміни поточної фази, що потребує додаткових досліджень.

Показано можливість реалізації запропонованого різновиду адаптивного методу ЛППФ з метою отримання оцінок швидкості зміни МЧ та уточнення законів зміни МЧ. Отримані результати вказують на придатність такого методу при достатньо великих відношеннях сигнал-шум. Подальше дослідження має визначити доцільність застосування ЛППФ за практичних умов спостереження рухомих об'єктів в радіолокаторах з інверсним синтезуванням апертури і відновлення їх радіолокаційних зображень.

Список використаних джерел

- Holder E. J. Angle-of-arrival estimation using radar interferometry. Methods and applications, SciTech Publishing, Edison, NJ, 2014.
- Stanković S., Djurović I. Motion parameter estimation by using time frequency representations, *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 24, Nov. 2001, pp. 1446-1448. DOI: 10.1049/el:20010970.
- Djurović I., Thayaparan T., and Stanković L. Adaptive local polynomial fourier transform in ISAR, Hindawi Publishing Corporation *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2006, Article ID 36093, pp. 1-15. DOI: 10.1155/ASP/2006/36093.
- Bratchenko H. D., Smagliuk H. H., Grygoriev D. V. Method for ISAR imaging objects with 3D rotational motion. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2016. № 2 (9), pp. 71-78. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2016-2-9-71-78>.
- Biao T., Zhejun Lu, Yongxiang L., Xiang Li. Review on interferometric ISAR 3D imaging: concept, technology and experiment, *Signal Processing*. 2018, Vol. 153, pp. 164-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.07.0156>.
- Hashemi H. Fuzzy clustering of seismic sequences: segmentation of time-frequency representations, *IEEE Signal Process. Mag.* Vol. 29, Issue 3, May 2012, pp. 82-87. DOI: 10.1109/MSP.2012.2185897.
- Xue Y.-J., Cao J.-X., and Tian R.-F. EMD and Teager-Kaiser energy applied to hydrocarbon detection in a carbonate reservoir, *Geophysical Journal International*, Vol. 197, Issue 1, April 2014, pp. 277-291. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt530>.
- Kawahara H., Masuda-Katsuse I., A. de Cheveigné. Restructuring speech representations using a pitch-adaptive time-frequency smoothing and an instantaneous-frequency-based F0 extraction: possible role of a repetitive structure in sounds, *Speech Communication*, Vol. 27, Issues 3-4, April 1999, pp. 187-207. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(98\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(98)00085-5).
- Mesbah M., O'Toole J., Colditz P., Boashash B. Instantaneous frequency based newborn EEG seizures characterization, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, volume 2012, Article number: 143 (2012) URL: <http://asp.eurasipjournals.com/content/2012/1/143>.
- Boashash B., Boubchir L., Azemi G. A methodology for time-frequency image processing applied to the classification of non-stationary multichannel signals using instantaneous frequency descriptors with application to newborn EEG signals, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2012, Article number: 117 (2012). URL: <https://asp.eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-6180-2012-117>.
- Cohen L. Time-frequency distributions – a review. *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, No. 7, July 1989, pp. 941-981. DOI: 10.1109/5.30749.
- Zhang H., Bi G., Razul S. G., See Ch. M. S. Robust time-varying filtering and separation of some nonstationary signals in low SNR environments, *Signal Processing*, Volume 106, January 2015, pp. 141-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.07.008>.
- Khan N. A., Jafri M N.; Qazi S. A. Improved resolution short time Fourier transform. *2011 7th International Conference on Emerging Technologies*, 5-6 Sept. 2011. Pages 1-3. DOI: 10.1109/ICET.2011.6048476.
- Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Лежнюк П. Д., Мірошник О. О. Застосування перетворень Фур'є та Вейвлет-спектрограм для ідентифікації спотворень режимів роботи розподільних мереж 0,38/0,22 КВ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 1. С. 71-79. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2015_1_12.
- Awal Md. A., Ouelha S., Dong Sh., Boashash B. A robust high-resolution time-

frequency representation based on the local optimization of the short-time fractional Fourier transform. *Digital Signal Processing*, vol. 70, November 2017, pp. 125-144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.07.022>.

17. Sircar P. Parametric Modeling of Non-Stationary Signals. arXiv preprint arXiv:1801.09045, 2018 - arxiv.org. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.09045>.

18. Stanković L., Djurović I., Stanković S., Simeunović M., Djukanović S., Daković M. Instantaneous frequency in time-digital frequency analysis: Enhanced concepts and performance of estimation algorithms. *Digital Signal Processing*. Vol. 35, December 2014, pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.09.008>.

19. Hussain Z., Boashash B. Adaptive instantaneous frequency estimation of multicomponent fm signals using quadratic time-frequency distributions. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, Issue 8, August 2002, pp. 1866-1876.

20. Flandrin P., Borgnat P. Time-frequency energy distributions meet compressed sensing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, Issue 6, June 2010, pp. 2974-2982. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2044839>.

21. Khan N. A., Boashash B. Multi-component instantaneous frequency estimation using locally adaptive directional time frequency distributions. *International journal of adaptive control and signal processing*. Vol. 30, Issue 3, March 2016, pp. 429-442. Published online 1 July 2015 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: <https://doi.org/10.1002/acs.2583>.

22. Li X., Bi G., Stankovic S., Zoubir A. M. Local polynomial Fourier transform: A review on recent developments and applications. *Signal Processing*, vol. 91, Issue 6, June 2011, pp. 1370-1393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.09.003>.

23. Lerga J., Sucic V., and Boashash B. An Efficient Algorithm for Instantaneous Frequency Estimation of Nonstationary Multicomponent Signals in Low SNR, Hindawi Publishing Corporation *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, Article ID 725189, 16 pages. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/725189>.

24. Sucic V., Lerga J., Boashash B. Multicomponent noisy signal adaptive instantaneous frequency estimation using components time support information. *IET Signal Process.*, Vol. 8, Iss. 3, May 2014, pp. 277-284. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2013.0349>.

25. Wei K., Jing X., Li B., Kang Ch., Dou Zh., Liu J., Chen Yu, and Zheng H. A combined

generalized Warblet transform and second order synchroextracting transform for analyzing nonstationary signals of rotating machinery. *Scientific Reports*, vol. 11, article number: 17000 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96343-2>.

26. Jacobsen E., Lyons R. The sliding DFT. *IEEE Signal Processing Magazine*, April 2003, pp. 74-80. DOI: 10.1109/MSP.2003.1184347.

27. Bradford R., Dobson R., and ffitch J. Sliding is smoother than jumping, *International Computer Music Conference 2005 (ICMC 2005)*, Spain, Barcelona (5 Sep. 2005 – 9 Sep. 2005), pp. 287-290.

URL: <http://www.music.mcgill.ca/~ich/research/misc/papers/cr1137.pdf>.

28. Bratchenko H., Milković M., Smahliuk H., Seniva I. "Method for 3D imaging of objects with random motion components in InSAR". Intellectual Systems and Information Technologies: Monograph / Edited by Prof. Yuri Gunchenko. Vienna: Premier Publishing s.r.o., 2021, pp. 129-141. DOI: <https://doi.org/10.29013/GunchenkoY.ISAIT.2021.184>.

29. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.

References

1. Holder E. J. Angle-of-arrival estimation using radar interferometry. Methods and applications, SciTech Publishing, Edison, NJ, 2014.

2. Stanković S., Djurović I. Motion parameter estimation by using time frequency representations, *Electronics Letters*, Vol. 37, No. 24, Nov. 2001, pp. 1446-1448. DOI: 10.1049/el:20010970.

3. Djurović I., Thayaparan T., and Stanković L. Adaptive local polynomial fourier transform in ISAR, Hindawi Publishing Corporation *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2006, Article ID 36093, pp. 1-15. DOI: 10.1155/ASP/2006/36093.

4. Bratchenko H. D., Smagliuk H. H., Grygoriev D. V. Method for ISAR imaging objects with 3D rotational motion. *Zbirnik Naukovih Prac' Odes'koj Deržavnoj Akademij Tehničnogo Regulivannâ ta Âkosti*. 2016. # 2 (9), pp. 71-78. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2016-2-9-71-78>.

5. Biao T., Zhejun Lu, Yongxiang L., Xiang Li. Review on interferometric ISAR 3D imaging: concept, technology and experiment, *Signal Processing*. 2018, Vol. 153, pp. 164-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.07.0156>.

6. Hashemi H. Fuzzy clustering of seismic sequences: segmentation of time-frequency representations, *IEEE Signal Process. Mag.* Vol. 29, Issue 3, May 2012, pp. 82-87. DOI: 10.1109/MSP.2012.2185897.
7. Xue Y.-J., Cao J.-X., and Tian R.-F. EMD and Teager-Kaiser energy applied to hydrocarbon detection in a carbonate reservoir, *Geophysical Journal International*, Vol. 197, Issue 1, April 2014, pp. 277-291. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt530>.
8. Kawahara H., Masuda-Katsuse I., A. de Cheveigné. Restructuring speech representations using a pitch-adaptive time-frequency smoothing and an instantaneous-frequency-based F0 extraction: possible role of a repetitive structure in sounds, *Speech Communication*, Vol. 27, Issues 3-4, April 1999, pp. 187-207. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(98\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(98)00085-5).
9. Mesbah M., O'Toole J., Colditz P., Boashash B. Instantaneous frequency based newborn EEG seizures characterization, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, volume 2012, Article number: 143 (2012) URL: <http://asp.eurasipjournals.com/content/2012/1/143>.
10. Boashash B., Boubchir L., Azemi G. A methodology for time-frequency image processing applied to the classification of non-stationary multichannel signals using instantaneous frequency descriptors with application to newborn EEG signals, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2012, Article number: 117 (2012). URL: <https://asp.eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-6180-2012-117>.
11. Cohen L. Time-frequency distributions – a review. *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, No. 7, July 1989, pp. 941-981. DOI: 10.1109/5.30749.
12. Zhang H., Bi G., Razul S. G., See Ch. M. S. Robust time-varying filtering and separation of some nonstationary signals in low SNR environments, *Signal Processing*, Volume 106, January 2015, pp. 141-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.07.008>.
13. Khan N. A., Jafri M. N.; Qazi S. A. Improved resolution short time Fourier transform. *2011 7th International Conference on Emerging Technologies*, 5-6 Sept. 2011. Pages 1-3. DOI: 10.1109/ICET.2011.6048476.
14. Marple S. L. Digital Spectral Analysis with applications. Martin Marietta Aerospace, Baltimore, Maryland, 1987.
15. Lezhniuk P. D., Miroshnyk O. O. Zastosuvannia peretvoren Furie ta veivlet-spektrohram dlia identyfikatsii spotvoren rezhymiv roboty rozpo-dilnykh merezh 0,38/0,22 KV. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2015. # 1. S. 71-79. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2015_1_12.
16. Awal Md. A., Ouelha S., Dong Sh., Boashash B. A robust high-resolution time-frequency representation based on the local optimization of the short-time fractional Fourier transform. *Digital Signal Processing*, vol. 70, November 2017, pp. 125-144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.07.022>.
17. Sircar P. Parametric Modeling of Non-Stationary Signals. arXiv preprint arXiv:1801.09045, 2018 - arxiv.org. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.09045>.
18. Stanković L., Djurović I., Stanković S., Simeunović M., Djukanović S., Daković M. Instantaneous frequency in time-digital frequency analysis: Enhanced concepts and performance of estimation algorithms. *Digital Signal Processing*. Vol. 35, December 2014, pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.09.008>.
19. Hussain Z., Boashash B. Adaptive instantaneous frequency estimation of multicomponent fm signals using quadratic time-frequency distributions. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, Issue 8, August 2002, pp. 1866-1876.
20. Flandrin P., Borgnat P. Time-frequency energy distributions meet compressed sensing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, Issue 6, June 2010, pp. 2974-2982. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2044839>.
21. Khan N. A., Boashash B. Multi-component instantaneous frequency estimation using locally adaptive directional time frequency distributions. *International journal of adaptive control and signal processing*. Vol. 30, Issue 3, March 2016, pp. 429-442. Published online 1 July 2015 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: <https://doi.org/10.1002/acs.2583>.
22. Li X., Bi G., Stankovic S., Zoubir A. M. Local polynomial Fourier transform: A review on recent developments and applications. *Signal Processing*, vol. 91, Issue 6, June 2011, pp. 1370-1393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.09.003>.
23. Lerga J., Sucic V., and Boashash B. An Efficient Algorithm for Instantaneous Frequency Estimation of Nonstationary Multicomponent Signals in Low SNR, Hindawi Publishing Corporation *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, Article ID 725189, 16 pages. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/725189>.
24. Sucic V., Lerga J., Boashash B. Multicomponent noisy signal adaptive instantaneous frequency estimation using components time support

information. *IET Signal Process.*, Vol. 8, Iss. 3, May 2014, pp. 277-284. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2013.0349>.

25. Wei K., Jing X., Li B., Kang Ch., Dou Zh., Liu J., Chen Yu, and Zheng H. A combined generalized Warblet transform and second order synchroextracting transform for analyzing nonstationary signals of rotating machinery. *Scientific Reports*, vol. 11, article number: 17000 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96343-2>.

26. Jacobsen E., Lyons R. The sliding DFT. *IEEE Signal Processing Magazine*, April 2003, pp. 74-80. DOI: 10.1109/MSP.2003.1184347.

27. Bradford R., Dobson R., and ffitich J. Sliding is smoother than jumping, *International Computer Music Conference 2005 (ICMC 2005)*, Spain, Barcelona (5 Sep. 2005 – 9 Sep. 2005),

pp. 287-290.

URL: <http://www.music.mcgill.ca/~ich/research/misc/papers/cr1137.pdf>.

28. Bratchenko H., Milković M., Smahliuk H., Seniva I. "Method for 3D imaging of objects with random motion components in InSAR". *Intellectual Systems and Information Technologies: Monograph / Edited by Prof. Yurii Gunchenko*. Vienna: Premier Publishing s.r.o., 2021, pp. 129-141. DOI: <https://doi.org/10.29013/GunchenkoY.ISAIT.2021.184>.

29. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. *Teoriya i texnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomex*. M.: Radio i svyaz', 1981. 416 s.

Надійшла до редакції 10.12.2021

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Бажанова А. Ю.	31	Мартинов М. А.	48
Боряк К. Ф.	6	Орнатський Д. П.	37
Братченко Г. Д.	48	Пономаренко А. Ю.	31
Катаєва М. О.	37	Сичов М. І.	6
Квашук Д. М.	37	Смаглюк Г. Г.	48
Коломієць Л. В.	17, 31	Хамрай В. В.	31
Коптелов В. О.	48	Цимбалюк А. Г.	17
Лимаренко О. М.	31	Цимбалюк Д. А.	17

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БАЖАНОВА <i>Анастасія Юрївна</i>	<i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, доцент кафедри «Динаміка машин і механічна інженерія», кандидат технічних наук</i>
БОРЯК <i>Костянтин Федорович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, завідувач кафедри метрології та інформаційно-виміральної техніки, доктор технічних наук, професор</i>
БРАТЧЕНКО <i>Геннадій Дмитрович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань, доктор технічних наук, професор</i>
КАТАЄВА <i>Марія Олександрівна</i>	<i>Національний авіаційний університет, м. Київ, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат технічних наук, доцент</i>
КВАШУК <i>Дмитро Михайлович</i>	<i>Національний авіаційний університет, м. Київ, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат економічних наук, доцент</i>
КОЛОМІЄЦЬ <i>Леонід Володимирович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань, доктор технічних наук, професор</i>
КОПТЕЛОВ <i>Віталій Олександрович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, аспірант кафедри стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань</i>
ЛИМАРЕНКО <i>Олександр Михайлович</i>	<i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, завідувач кафедри «Динаміка машин і механічна інженерія», кандидат технічних наук, доцент</i>
МАРТИНОВ <i>Михайло Андрійович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, студент</i>
ОРНАТСЬКИЙ <i>Дмитро Петрович</i>	<i>Національний авіаційний університет, м. Київ, професор кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, доктор технічних наук, доцент</i>
ПОНОМАРЕНКО <i>Андрій Анатолійович</i>	<i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, старший викладач кафедри «Динаміка машин і механічна інженерія»</i>
СИЧОВ <i>Михайло Іванович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, доцент кафедри метрології та інформаційно-виміральної техніки, кандидат технічних наук, доцент</i>
СМАГЛЮК <i>Геннадій Геннадійович</i>	<i>Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, викладач-асистент кафедри метрології та інформаційно-виміральної техніки</i>
ХАМРАЙ <i>Вадим Вікторович</i>	<i>Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, старший викладач кафедри «Динаміка машин і механічна інженерія»</i>

ЦИМБАЛЮК
Анатолій Григорович

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку,
м. Одеса, аспірант кафедри стандартизації, оцінки відповідності
та освітніх вимірювань*

ЦИМБАЛЮК
Дмитро Анатолійович

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку,
м. Одеса, аспірант кафедри стандартизації, оцінки відповідності
та освітніх вимірювань*

Наукове видання

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ**

Випуск 2(19) 2021

Редактор

Братченко Г. Д.

Комп'ютерна верстка

Постоварова В. Д.

Адреса редакції: 65020, м. Одеса, вул. Ковальська 15, ОДАТРА,
Тел.: (048)726-68-92 – довідки;
E-mail: bratchenkohd@gmail.com

*Надруковано з готового оригінал-макету
у друкарні «Апрель»
ФОП Бондаренко М. О.*

*Підписано до друку 24.12.2021
Формат 60*88/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 7,2
Тираж 100 прим.
65045, м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60.
www.aprel.od.ua*